



สมบัติทางวิศวกรรมและการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับ
ผสมร่วมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมละเอียด

โดย

นางสาวปวีณา บัวผาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สมบัติทางวิศวกรรมและการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับ
ผสมร่วมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมละเอียด

โดย

นางสาวปวีณา บัวผาย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ENGINEERING PROPERTIES AND LEACHING OF HEAVY METALS ON
SELF-LEVELING MORTARS MIXED WITH WASTE PRINTED
CURCUIT BOARDS AS FINE AGGREGATE REPLACEMENT

BY

MISS PAWEENA BUAPHAI



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER PROGRAM IN CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2022
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวปวีณา บัวผาย

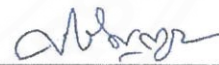
เรื่อง

สมบัติทางวิศวกรรมและการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับ
ผสมร่วมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมละเอียด

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

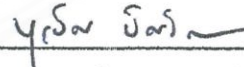
เมื่อ วันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2566

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีัญญา พรหมโคตร์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร นิตร์วีระ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.วรุณศักดิ์ เลี่ยมแหลม)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติทางวิศวกรรมและการชะละลายโลหะหนักของ มอร์ตาร์ปรับระดับผสมร่วมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แทนที่มวลรวมละเอียด
ชื่อผู้เขียน	นางสาวปิณดา บัวผาย
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

ปัจจุบันขยะจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่หมดอายุการใช้งานได้กลายมาเป็นปัญหาขยะที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะขยะจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งยากต่อการกำจัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่เป็นโลหะ ซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรใช้ใหม่โดยวิธีทางกายภาพมาใช้ในงานผลิตมอร์ตาร์ปรับระดับ กำหนดสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยการนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาทำการแทนที่มวลรวมละเอียดอัตราส่วนร้อยละ 2.5 – 20 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลวและสภาวะแข็งตัว สมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน การวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์และพฤติกรรมของการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมร่วมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ผลการทดสอบพบว่าลักษณะการกระจายตัวของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีค่าใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ส่วนความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นต่ำกว่ามวลรวมละเอียด มอร์ตาร์ปรับระดับมีแนวโน้มความต้องการน้ำในส่วนผสมและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นและการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง มอร์ตาร์ปรับระดับมีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี ส่วนการชะละลายโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด การพิจารณานำมอร์ตาร์ปรับระดับไปใช้งาน ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการผสมร่วมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่ควรเกินร้อยละ 15 สำหรับการใช้งานเทรองพื้น และไม่เกินร้อยละ 7.5 สำหรับงานเทพื้น

(3)

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ปรับระดับ, ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์, การแทนที่มวลรวมละเอียด, กำลังอัด,
ปริมาณโลหะหนัก



Thesis Title	Engineering Properties and Leaching of Heavy Metals on Self-Leveling Mortars Mixed with Waste Printed Circuit Boards as Fine Aggregate Replacement
Author	Miss Paweena Buaphai
Degree	Master of Engineering (Civil Engineering)
Major Field/Faculty/University	Civil Engineering Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Burachat Chatveera
Academic Year	2022

ABSTRACT

Currently, end-of-life electrical and electronic equipment is the fastest-growing environmental waste problem, with Waste Printed Circuit Boards (WPCBs) being especially difficult to dispose of. As a result, the non-metallic parts of WPCBs were used as physical process recycling waste in the production of self-leveling mortars in this study. WPCBs were used as a fine aggregate replacement in mortars in a mixed proportion of 2.5–20% by weight. WPCB physical properties, mortar fresh and hardened properties, insulating mortar properties, X-ray analysis, and heavy metal leaching were investigated. Results showed that WPCB's grading characteristics were close to those of fine aggregates, while their specific gravity and density were lower than those of fine aggregates. Self-leveling mortars tended to increase water demand and setting time as the percentage replacement of fine aggregates increased, while density and compressive strength tended to decrease. Self-leveling mortars had better insulating properties. As for heavy metal leaching, the amount of heavy metal mixed in the electronic circuit board was within the specified standard. To consider the use of leveling mortars, the optimum amount for mixing WPCBs should not exceed 15% for underlayment or 7.5% for overlayment work.

Keywords: Self - Leveling Mortar, Wasted Printed Circuit Board, Fine Aggregate Replacement, Compressive Strength, Heavy Metal Content



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง สมบูรณ์ได้ ด้วยความกรุณา ชี้แนะ แนะนำ ให้คำปรึกษา และการสนับสนุน อีกทั้งการให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.วรุณศักดิ์ เลี่ยมแหลม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศักดิ์ พิสิษฐ์ไพบูลย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ที่มีความครอบคลุม เหมาะสมสำหรับไปประยุกต์ใช้งานได้จริงและนำไปต่อยอดสำหรับการวิจัยขั้นสูงต่อไป

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีัญญา พรหมโคตร อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการธรณีเคมี และเครื่องมือในการทดสอบหองค์ประกอบทางเคมี อาจารย์พงศกร พรหมสวัสดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับกระบวนการในการทำวิจัย และสนับสนุนวัสดุหลักที่ใช้ในการทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้คำแนะนำในการใช้สถานที่ เครื่องมือ ในการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งการอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ และขอบคุณนายารเมธ ปรีไทย ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณวรพงศ์ รัตนจิโรจน์ ผู้แทนจากบริษัท เจียฮง อินเตอร์ จำกัด อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ซากแผ่นวงจรถอนิกส์สำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ยังอนุเคราะห์ให้ศึกษาวิธีการขั้นตอนการรีไซเคิลซากแผ่นวงจรถอนิกส์ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งกลายมาเป็นซากแผ่นวงจรถอนิกส์แต่ละชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนได้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ผู้บังคับบัญชา ผู้ใต้บังคับบัญชา เพื่อน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน อีกทั้งยังเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาการทำวิจัย และร่วมเป็นส่วนหนึ่งของความสำเร็จในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ประโยชน์อันเกิดจากการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านที่กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งหน่วยงานและผู้สนับสนุนท่านอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ และก่อให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง หรือสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการต่อยอดความรู้ในการคิดค้น พัฒนานวัตกรรมทางด้านวิศวกรรมโยธาต่อไป

นางสาวปวีณา บัวผาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(2)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(6)
สารบัญ	(7)
สารบัญตาราง	(16)
สารบัญภาพ	(20)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(25)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1.1 ปูนซีเมนต์	10
2.1.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์	12
2.1.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์	16

2.1.1.3	กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	16
2.1.1.4	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์	17
2.1.1.5	สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์	20
2.1.1.6	สารประกอบรองในปูนซีเมนต์	24
2.1.1.7	การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์	25
2.1.2	มวลรวมละเอียด	25
2.1.2.1	ขนาดคละ (Grading)	27
2.1.2.2	โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: F.M)	27
2.1.2.3	ปริมาณความชื้นและการดูดซึม (Moisture and Absorption)	27
2.1.2.4	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	29
2.1.2.5	หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)	29
2.1.2.6	สารอินทรีย์ที่เจือปนในมวลรวมละเอียด	30
2.1.3	น้ำ	30
2.1.3.1	น้ำสำหรับงานคอนกรีต	30
2.1.3.2	ประเภทของน้ำผสมคอนกรีต	31
2.1.3.3	คุณภาพของน้ำผสมคอนกรีต	31
2.1.3.4	คุณภาพของน้ำล้างมวลรวม	32
2.1.3.5	คุณภาพของน้ำบ่มคอนกรีต	32
2.1.4	ขยะอิเล็กทรอนิกส์	32
2.1.4.1	ประเภทของขยะอิเล็กทรอนิกส์	33
2.1.4.2	แหล่งกำเนิดขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย	34
2.1.4.3	องค์ประกอบของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	34
2.1.4.4	การแบ่งเกรดของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	37
2.1.4.5	การคาดการณ์ปริมาณซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์	38
2.1.4.6	การรีไซเคิลซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	39
2.1.4.7	สารอันตรายในขยะอิเล็กทรอนิกส์	40
2.1.4.8	ผลกระทบของสารอันตรายในขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่อสุขภาพ	43
2.1.5	สารผสมเพิ่ม (Admixtures)	47
2.1.5.1	ประเภทของสารผสมเพิ่ม	47
2.1.5.2	สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures)	48

2.1.5.3	แร่ผสมเพิ่ม (Mineral Admixtures)	49
2.1.5.4	สารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ (Other Admixtures)	50
2.1.6	โลหะหนัก	51
2.1.6.1	ตำแหน่งของโลหะหนักในตารางธาตุ	52
2.1.6.2	โลหะหนักจำแนกตามสมบัติทางกายภาพ	52
2.1.6.3	กำเนิดโลหะหนัก	54
2.1.6.4	การจัดอันดับความอันตรายของโลหะหนัก	54
2.1.7	ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	55
2.1.7.1	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)	55
2.1.7.2	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)	56
2.1.7.3	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)	57
2.1.7.4	ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	57
2.1.8	การบ่มคอนกรีต	58
2.1.8.1	ความสำคัญของการบ่มคอนกรีต	58
2.1.8.2	ระยะเวลาของการบ่ม	58
2.1.8.3	การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติ	60
2.1.8.4	การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง	63
2.1.9	มอร์ตาร์	63
2.1.9.1	ชนิดของมอร์ตาร์และการใช้งาน	64
2.1.9.2	มาตรฐานกำลังอัดมอร์ตาร์	64
2.1.10	มอร์ตาร์ปรับระดับ (Self-Leveling Mortar)	65
2.1.11	การศึกษาสมบัติทางกายภาพ	65
2.1.11.1	กล้องจุลทรรศน์	67
2.1.11.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	67
2.1.11.3	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือสภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity: k)	69
2.1.11.4	ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistivity: R)	70
2.1.12	การศึกษาสมบัติทางเคมี	73
2.1.12.1	เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence: XRF)	74

2.1.12.2	เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)	76
2.1.12.3	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES)	79
2.1.12.4	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP - MS)	82
2.1.13	การศึกษาสมบัติทางกล	86
2.1.13.1	การเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาสมบัติทางกล	87
2.1.13.2	การทดสอบกำลังรับแรงอัด	88
2.1.13.3	การทดสอบกำลังรับแรงดัด	88
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	90
บทที่ 3	วิธีการวิจัย	104
3.1	วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	104
3.1.1	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	104
3.1.2	ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	106
3.1.2.1	ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	107
3.1.2.2	ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	107
3.1.2.3	ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	107
3.1.3	มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)	109
3.1.4	สารผสมเพิ่ม (Admixtures)	109
3.2	อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ	111
3.2.1	แบบหล่อตัวอย่าง (Mold)	111
3.2.2	เครื่องผสม (Mixer)	111
3.2.3	เครื่องชั่งน้ำหนัก	113
3.2.4	อุปกรณ์สำหรับการตวง	114
3.2.5	เกรียงใบโพธิ์	115
3.2.6	นาฬิกาจับเวลา	115
3.2.7	พลาสติกแรป (Plastic Wrap)	116

3.2.8 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers)	116
3.3 อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	117
3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)	117
3.3.2 เครื่องบดอัดตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางกายภาพ	118
3.3.3 เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน	119
3.3.4 เครื่องทดสอบปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X – ray Fluorescence Analyzer)	119
3.3.5 เครื่องทดสอบปริมาณสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสี เอกซ์ (X – ray Diffraction Spectrometer)	119
3.3.6 เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion)	120
3.3.7 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES)	121
3.3.8 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS)	122
3.3.9 ชุดตะแกรงร่อน (Sieve Mesh)	123
3.3.10 อุปกรณ์ทดสอบการไหลแม่ (Flow Test Equipment)	123
3.3.11 เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Vicat Apparatus)	124
3.3.12 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (Compression Testing Machine)	125
3.3.13 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์แบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM)	126
3.4 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ	127
3.5 ขั้นตอน วิธีการทดสอบ	127
3.5.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	127
3.5.1.1 กล้องจุลทรรศน์	127
3.5.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	128
3.5.1.3 ค่าการนำความร้อน และค่าการต้านทานความร้อน	128
3.5.1.4 การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมละเอียด (Sieve Analysis of Fine Aggregate)	128

3.5.2 การทดสอบหาค่าประกอบทางเคมี	129
3.5.2.1 การทดสอบปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Analyzer)	129
3.5.2.2 การทดสอบปริมาณสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ (X – ray Diffraction Spectrometer)	129
3.5.2.3 การย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion)	132
3.5.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES)	133
3.5.2.5 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS)	133
3.5.3 การศึกษาสมบัติทางกล	134
3.5.3.1 การทดสอบการไหล (Flow Test)	134
3.5.3.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเข็มไวแคท (Setting Time of Portland Cement by Vicat Needle)	135
3.5.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	136
3.5.3.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัด	138
3.6 อัตราส่วนผสม	139
3.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	141
3.7.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ	141
3.7.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางเคมี	142
3.7.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกล	142
 บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	 146
4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ	146
4.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	146
4.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	148

4.1.2.1 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	148
4.1.2.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	149
4.1.2.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	150
4.1.2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง	151
4.1.2.5 มอร์ตาร์ปรับระดับ	152
4.1.3 ค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน	159
4.1.4 การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมละเอียด	161
4.1.5 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ	164
4.2 ผลการทดสอบหาลงค์ประกอบทางเคมี	168
4.2.1 ผลการวิเคราะห์หาลงค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometer หรือ XRF)	168
4.2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง	168
4.2.1.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	170
4.2.1.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	170
4.2.1.4 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	173
4.2.1.5 ซีเมนต์เพสต์	173
4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาลงค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer หรือ XRD)	176
4.2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง	176
4.2.2.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	178
4.2.2.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	179
4.2.2.4 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	183
4.2.2.5 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000	185
4.2.2.6 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025	188
4.2.2.7 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050	189
4.2.2.8 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075	193
4.2.2.9 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100	194
4.2.2.10 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125	198
4.2.2.11 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150	199

4.2.2.12 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175	200
4.2.2.13 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200	205
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES)	208
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP - MS)	209
4.3 ผลการทดสอบหาสมบัติทางกล	212
4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติการไหลแม่ (Flow Test)	212
4.3.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)	214
4.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)	218
4.3.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)	221
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	225
5.1 สรุปผลการวิจัย	225
5.2 ข้อเสนอแนะ	226
รายการอ้างอิง	227
ภาคผนวก	244
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน และค่าการต้านทาน ความร้อนของมอร์ตาร์ปรับระดับ (Thermal Conductivity and Thermal Resistivity of Self-Leveling Mortar)	245
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมละเอียด (Sieve Analysis of Fine Aggregate)	249
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบหาน้ำหนักและค่าความหนาแน่นของ มอร์ตาร์ปรับระดับ (Weight and Density of Self-Leveling Mortar)	258

ภาคผนวก ง ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ (X - Ray Fluorescence)	264
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X - Ray Diffraction)	284
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP - OES) และ Inductively Coupled Mass Emission Spectrometry (ICP - MS)	343
ภาคผนวก ช ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับ	348
ภาคผนวก ซ ภาพประกอบการทำวิจัย	360
ประวัติผู้เขียน	366



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	19
2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	19
2.3 ปริมาณสารประกอบพื้นฐานของปูนซีเมนต์แต่ละประเภท	21
2.4 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	21
2.5 องค์ประกอบหลักโดยทั่วไปของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	35
2.6 องค์ประกอบทางเคมี (ธาตุองค์ประกอบหลัก) ของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	35
2.7 องค์ประกอบหลักทางเคมีของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากการวิเคราะห์โดยการบดตัวอย่างให้เป็นผงและนำไปทดสอบด้วยวิธีการชะละลาย	36
2.8 โลหะหนักและสารอันตรายในขยะอิเล็กทรอนิกส์	41
2.9 ปริมาณธาตุโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	43
2.10 ประเภทของสารเคมีผสมคอนกรีต	48
2.11 อันดับสารอันตรายโดยองค์การสารพิษและโรคระบาดแห่งสหรัฐอเมริกา	54
2.12 ระยะเวลาขั้นต่ำในการบ่มคอนกรีต	60
2.13 วิธีการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีการเพิ่มความชื้น	61
2.14 การบ่มคอนกรีตด้วยวิธีการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต	62
2.15 กำลังอัดเฉลี่ยเฉลี่ยของมอร์ตาร์	64
2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างอาคาร	71
2.17 พลังงานยึดเหนี่ยวในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น	75
2.18 พีคของกราฟดิฟแฟรกโทแกรมที่แนะนำสำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	79
2.19 ลักษณะทั่วไปของวิธี ICP - MS ICP - OES และ AAS	83
2.20 ค่าประมาณของขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) สำหรับธาตุ 46 ธาตุที่มีความไวในการวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP - OES และไอโซโทปที่มีมากในวิธี ICP - MS ชนิด Quadrupole ICP - MS	83
2.21 ลักษณะตัวอย่างสำหรับศึกษาสมบัติทางกล	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.1 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราทีพีไอ สีแดง เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) และมาตรฐาน สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ASTM)	105
3.2 ข้อมูลเบื้องต้นของสารลดน้ำพิเศษ ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete – 10 TH	109
3.3 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด	129
3.4 ระยะห่างระหว่างระนาบโมเลกุล (d - Spacing) กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ของรังสีเอกซ์ของธาตุทองแดง (Cu) โดยการแผ่รังสี $K\alpha$ ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$)	130
3.5 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์	139
3.6 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ	141
3.7 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางเคมี	143
3.8 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกล	144
4.1 ค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อนของมอร์ตาร์ปรับระดับ	159
4.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้าง	160
4.3 ข้อมูลสรุปผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด	162
4.4 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับที่ป่นในน้ำ	164
4.5 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับที่ป่นในอากาศ	164
4.6 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ	165
4.7 ความหนาแน่นของวัสดุก่อสร้างประเภทต่าง ๆ	167
4.8 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง	176
4.9 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	178
4.10 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	179
4.11 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	183
4.12 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ	185

C100 S1000 P0000

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025	188
4.14 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050	189
4.15 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075	193
4.16 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100	195
4.17 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125	198
4.18 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150	199
4.19 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175	200
4.20 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200	205
4.21 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (ICP - OES) ในตัวอย่าง มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025	208
4.22 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (ICP - MS) ในตัวอย่าง มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025	211
4.23 ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 เทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน	211
4.24 ผลการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ปรับระดับ	212
4.25 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับ	215
4.26 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ	219
4.27 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ	220

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.28 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ	222
4.29 ข้อมูลสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ปรับระดับเทียบกับ มอก. 3057 - 2563	223



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่น	2
1.2 ปริมาณการผลิตปูนเม็ด ปูนซีเมนต์ และ Cementitious Product ของประเทศไทย	3
1.3 ปริมาณการปล่อยก๊าซ CO ₂ ของประเทศไทยเทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซ CO ₂ ต่อตัน Cementitious Product ของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ทั่วโลก	3
2.1 แผนภาพแสดงกรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์	18
2.2 ภาพจากการศึกษาแผ่นหินบางขัดเงา (Polished Thin - Section) ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า จะพบส่วนที่ปรากฏเป็นสีเหลืองสว่าง ลักษณะโปร่งแสง ขอบของอนุภาค เป็นรูปเหลี่ยม คือ C ₃ S และส่วนที่ปรากฏเป็นสีเหลืองผสมกับสีดำทึบแสง ขอบอนุภาคกลมมน คือ C ₂ S	22
2.3 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์	23
2.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบในซีเมนต์ เส้นกราฟแสดง ข้อมูล “Overall” ประกอบด้วย C ₃ S = 55%, C ₂ S = 18%, C ₃ A = 10% และ C ₄ AF = 8%	24
2.5 การก่อตัวของปูนซีเมนต์	26
2.6 สภาวะความชื้นของมวลรวม	28
2.7 ปริมาณซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 10 ประเภท ระหว่างปี 2553 - 2593	39
2.8 กระบวนการรีไซเคิลซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	40
2.9 ธาตุโลหะหนักในตารางธาตุ	53
2.10 โลหะหนักจำแนกตามสมบัติทางกายภาพ	53
2.11 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแควงเซียมซิลิเกต	56
2.12 กำลังอัดของคอนกรีตที่ W/C = 0.5 และลักษณะการบวมที่ต่างกัน	59
2.13 ความสามารถในการไหลของซีเมนต์มอร์ตาร์ทั่วไปและมอร์ตาร์ปรับระดับ	65

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.14 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ	66
2.15 ช่วงของเครื่องมือที่เหมาะสมในการวัดค่าสภาพการนำความร้อน	70
2.16 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น	74
2.17 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอม	75
2.18 ดิฟแฟรกโทแกรมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	78
2.19 ภาพจำลองภาคตัดขวางของคอป ICP และ Load Coil	80
2.20 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อละอองตัวอย่างเข้าสู่คอป ICP	81
2.21 การดูดกลืนพลังงานและคายพลังงานโดยการเปล่งคลื่นแสง	82
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	103
3.2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราที่พีไอ สีแดง	104
3.3 ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	107
3.4 ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	108
3.5 ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	108
3.6 มวลรวมละเอียด	109
3.7 สารลดน้ำพิเศษ ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete – 10 TH	110
3.8 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์	111
3.9 เครื่องผสม (Mixer)	112
3.10 ใบบายของเครื่องผสมมอร์ตาร์	112
3.11 หม้อผสมของเครื่องผสมมอร์ตาร์	113
3.12 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ OHAUS รุ่น ExplorerPro	113
3.13 เขี่ยกพลาสติก	114
3.14 ถาดสแตนเลส	114
3.15 เกรียงใบโพธิ์	115
3.16 นาฬิกาจับเวลา	115
3.17 พลาสติกดีแรป (Plastic Wrap)	116
3.18 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers)	117

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JCM - 6000	118
3.20 เครื่องบดอัดตัวอย่างยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES	118
3.21 เครื่องวัดการไหลของความร้อน ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda	119
3.22 เครื่อง X – ray Fluorescence Analyzer แบบพกพา ยี่ห้อ Olympus รุ่น Vanta M Series	120
3.23 เครื่อง X-ray Diffraction Spectrometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance	120
3.24 เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Titan MPS	121
3.25 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Optima 8300	122
3.26 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น NexION 350X	122
3.27 ชุดตะแกรงร่อน (Sieve Mesh)	123
3.28 แท่นทดสอบการไหลแผ่น	124
3.29 Flow Ring	124
3.30 เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Vicat Apparatus)	125
3.31 เครื่องทดสอบความแข็งแรงในการรับแรงอัด (Compressive Strength) ยี่ห้อ Gilson	125
3.32 เครื่องทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Shimadzu	126
3.33 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ปรับระดับ	135
3.34 การหาค่าการแข็งตัวเริ่มต้น	136
3.35 ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่ได้จากการผสม	137
3.36 ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่เทลงในแบบหล่อ	137

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.37 ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศ	138
4.1 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 100X	146
4.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใยที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	147
4.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	148
4.4 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	149
4.5 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใยที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	151
4.6 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	152
4.7 มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50X	153
4.8 มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100X	155
4.9 มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 300X	157
4.10 ค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้าง	161
4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด	163
4.12 ความหนาแน่นของวัสดุก่อสร้างประเภทต่าง ๆ	167
4.13 ธาตุองค์ประกอบในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง	169
4.14 ธาตุองค์ประกอบในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	171
4.15 ธาตุองค์ประกอบในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	172
4.16 ธาตุองค์ประกอบในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	174
4.17 ธาตุองค์ประกอบในซีเมนต์เพสต์	175

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4.18	ดิฟแฟรคโทแกรมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง	180
4.19	ดิฟแฟรคโทแกรมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	181
4.20	ดิฟแฟรคโทแกรมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	182
4.21	ดิฟแฟรคโทแกรมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	184
4.22	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000	187
4.23	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025	191
4.24	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050	192
4.25	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075	196
4.26	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100	197
4.27	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125	202
4.28	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150	203
4.29	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175	204
4.30	ดิฟแฟรคโทแกรมของมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200	207
4.31	กราฟเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณของแร่แต่ละกลุ่มที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD ในตัวอย่างวัสดุและมอเตอร์ปรับระดับ	210

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	แอนไฮดรัสแคลเซียมอลูมิโนซิลเฟต
a	ระยะเฉลี่ยระหว่างเส้นรอยแตกกับฐานรองรับที่ใกล้ที่สุดบนผิวรับแรงดึงของคานาทดลอง
A	พื้นที่หน้าตัด
AAR	ปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (Alkali - Aggregate Reaction)
AAS	การดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectroscopy)
Ag	เงิน (Silver)
Al	อลูมิเนียม (Aluminium)
Al_2O_2	ไดออลูมิเนียม ไดออกไซด์ (Dialuminum Dioxide)
Al_2O_3	อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide) หรือ อลูมินา
$\text{Al}(\text{OH})_3$	อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide)
Am	อะเมริเซียม (Americium)
Ar	อาร์กอน (Archon)
As	สารหนู (Arsenic)
ASR	ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali - Silica Reaction)
ASTM	สมาคมวิชาชีพ ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (American Society for Testing and Materials)

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

ATSDR	องค์กรสารพิษและโรคระบาดแห่งสหรัฐอเมริกา (The Agency for Toxic Substances and Disease Registry)
Au	ทองคำ (Gold)
b	ความกว้างของคาน
B	โบรอน (Boron)
Ba	แบเรียม (Barium)
Be	แบริลเรียม (Beryllium)
BFR	สารหน่วงไฟประเภทโบรมีน (Brominated Flame Retardants)
Bi	บิสมัท (Bismuth)
Br	โบรมีน (Bromine)
C	คาร์บอน (Carbon)
Ca	แคลเซียม (Calcium)
CAS RN	ชุดตัวเลขอ้างอิงเฉพาะของสารเคมี (Chemical Abstracts Service Registry Number)
Cd	แคดเมียม (Cadmium)
C ₂ S หรือ 2CaO.SiO ₂	ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate) หรือ Belite
C ₃ S หรือ 3CaO.SiO ₂	ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate) หรือ Alite
C ₃ A หรือ 3CaO.Al ₂ O ₃	ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)
C ₄ AF หรือ 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	เตตระแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)
CaCO ₃	แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) หรือ แร่แคลไซต์ (Calcite)
CaO	แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) หรือ ปูนขาว

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

Ca(OH) ₂	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ ปูนขาว
CaSO ₄ .2H ₂ O	ยิปซัม (Gypsum), แร่เกลือจืด
Ce	ซีเรียม (Cerium)
CFC	คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon)
Cl	คลอรีน (Chlorine)
Co	โคบอลต์ (Cobalt)
CO ₂	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide)
cps	จำนวนนับต่อหนึ่งวินาที (Count per Second)
Cr	โครเมียม (Chromium)
CrVI	โครเมียมที่มีประจุบวก 6 (Cr ⁺⁶) หรือ Hexavalent Chromium
CRT	หลอดอิเล็กตรอนิกส์ (Cathode Ray Tube)
CSH หรือ C ₃ S ₂ H ₃	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate)
Cu	ทองแดง (Copper)
d	ระยะห่าง, ความลึกของคาน
eV	อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron Volt)
E - Waste	ขยะอิเล็กทรอนิกส์ หรือ Electronic Waste
F	ฟลูออรีน (Fluorine)
f _c	กำลังอัดของคอนกรีต
Fe	เหล็ก (Iron)
Fe ₂ O ₃	เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) หรือ สนิมเหล็ก
fg	เพมโตกรัม
fg/ml	เพมโตกรัมต่อมิลลิลิตร
FL	ฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent)
Ga	แกลเลียม (Gallium)

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

g/cm ³	กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (Gram/Cubic Centimeter)
Ge	เจอร์เมเนียม (Germanium)
GGBS	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Ground Granular Blast Furnace Slag)
GHz	กิกะเฮิรตซ์ (Giga - Hertz)
GNR	Getting the Numbers Right / เป็นฐานข้อมูลปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และข้อมูลประสิทธิภาพของพลังงานในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ทั่วโลก
Gt	Giga - Tones (10 ⁹ หรือ 1,000,000,000 ตัน)
H	ไฮโดรเจน (Hydrogen)
He	ฮีเลียม (Helium)
Hg	ปรอท (Mercury)
HIPS	High Impact Polystyrene
hkl	ระยะทางระหว่างระนาบซึ่งเป็นสาเหตุของการแทรกสอดแบบเสริมกันของลำแสง
H ₂ O	น้ำ
ICP	Inductively Coupled Plasma
ICP - AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer
ICP - MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer
ICP - OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer
I	ไอโอดีน (Iodine)
In	อินเดียม (Indium)
J/g	จูล/กรัม (Joule/Gram)

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

JCPDs	Joint Committee of Powder Diffraction Standard
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือสภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
K	เคลวิน (Kelvin)
K	โพแทสเซียม (Potassium)
K ₂ O	โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium Oxide)
kgCO ₂	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยกิโลกรัม (Kilograms of Carbon Dioxide)
Kr	คริปทอน (Krypton)
L	ความหนาของชั้นทดสอบ, ความยาวช่วงคาน
La	แลนทานัม (Lanthanum)
LCD	จอภาพผลึกเหลว (Liquid Crystal Display)
LECB	Low Emission Capacity Building / เป็นโครงการความร่วมมือระหว่างสหภาพยุโรป (European Commission and Member States) และโครงการพัฒนาแห่งสหประชาชาติ (United Nations Development Programmed) มีเป้าหมายในการสนับสนุนการวางระบบและโครงสร้างเชิงสถาบัน (Institutional Arrangement) ในการจัดทำข้อมูลบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาการดำเนินงานเชิงปฏิบัติในการ
LED	ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)
Li	ลิเทียม (Lithium)
LOD	ปริมาณน้อยมากเกินกว่าจะตรวจจับได้ (Less of Detected)
m	เมตร (Meter)

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

m ²	ตารางเมตร (Square Meter)
m ² .K/W	ตารางเมตร - เคลวินต่อวัตต์
Max.	ค่าสูงสุด (Maximum)
Mg	แมกนีเซียม (Magnesium)
mg/kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
MgCO ₃	แมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium Carbonate)
MgO	แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)
Min.	ค่าต่ำสุด (Minimum)
mm.	มิลลิเมตร (Millimeter)
Mn	แมงกานีส (Manganese)
Mo	โมลิบดีนัม (Molybdenum)
MPa	เมกะปาสคาล (Mega Pascal)
n	จำนวนเต็ม
N	นิวตัน (Newton)
N	ไนโตรเจน (Nitrogen)
Na	โซเดียม (Sodium)
Na ₂ O	โซเดียมออกไซด์ (Sodium Oxide)
Ne	นีออน (Neon)
NEMA	สมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อเมริกา (National Electrical Manufacturers Association)
ng	นาโนกรัม
ng/ml	นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร
Ni	นิกเกิล (Nickel)
nm	นาโนเมตร
N/mm ²	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

NMFPCB	ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะ (Non Metallic Fraction of Printed Circuit Board)
Np	โนนิลฟีนอล (Nonylphenol)
O	ออกซิเจน (Oxygen)
OPC	Ordinary Portland Cement
P	แรงกดสูงสุด
P	ฟอสฟอรัส (Phosphorus)
PAHs	โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
Pb	ตะกั่ว (Lead)
PBBs	Polybrominated Biphenyls
PBDEs	Polybrominated Diphenyl Ethers
PCBs	โพลีคลอริเนตไบฟีนิล (Polychlorinated Biphenyls)
PCDDs	Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins
PCDFs	Polychlorinated Dibenzofurans
PCNs	โพลีคลอริเนตเต็ดแนฟทาลีน (Polychlorinated Naphthalene)
Pd	แพลเลเดียม (Palladium)
pg	พิโคกรัม
pg/ml	พิโคกรัมต่อมิลลิลิตร
P ₂ O ₅	ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (Phosphorus Penta - Oxide)
ppm	หนึ่งในล้านส่วน (Part Per Million) หรือ 1 ใน 1,000,000
Psi	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Pound Per Square Inch)
Pt	แพลทินัม (Platinum)
P _u	น้ำหนักกดสูงสุดที่ขึ้นตัวอย่างทดสอบปรับได้

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัด ความ

PVC	โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride)
Q	ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง
R	ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)
R	โมดูลัสแตกกร้าว
Rn	เรดอน (Redon)
S	ซัลเฟอร์ (Sulphur)
Sb	พลวง (Antimony)
Se	ซีเลเนียม (Selenium)
SEM	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
Si	ซิลิกอน (Silicon)
SiO ₂	ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) หรือซิลิกา
Sn	ดีบุก (Tin)
SO ₃	สารซัลเฟต (Sulphate)
Sr	สตรอนเทียม (Strontium)
SSD	สภาวะอิมตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry)
TBBPA	Tetrabromobisphenol-A
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
Te	เทลลูเรียม (Tellurium)
TEM	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope)
Ti	ไทเทเนียม (Titanium)
TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)
Tl	แทลเลียม (Thallium)
TPP	ไตรฟีนิลฟอสเฟต (Triphenyl Phosphate)
U	ยูเรเนียม (Uranium)

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

UV	อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)
U - value	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient)
V	วานาเดียม (Vanadium)
W	วัตต์ (Watt)
W	ทังสเตน (Tungsten)
W/C	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio)
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment หรือ ซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
W/m.K	วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน
Wt.%	ปริมาณคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับน้ำหนัก (Percent by Weight)
Xe	ซีนอน (Xenon)
XRD	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X - Ray Diffraction)
XRF	การเรืองรังสีเอกซ์ (X - Ray Fluorescence)
Z	เลขอะตอม
Zn	สังกะสี (Zinc)
Zr	เซอร์โคเนียม (Zirconium)
Å	อังสตรอม (Angstrom)
°C	องศาเซลเซียส (Degree Celsius)
ΔT	อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ
λ	ความยาวคลื่น
θ	มุมตกกระทบ
μ	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโดยมวล (Mass Absorption Coefficient)
μg	ไมโครกรัม

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

 $\mu\text{g/l}$

ไมโครกรัมต่อลิตร

กก.

กิโลกรัม

กก./ชม.³

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

กก./ลบ.ม.

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ชม.

เซนติเมตร

ชม.³

ลูกบาศก์เซนติเมตร

ค.ศ.

คริสต์ศักราช

พ.ศ.

พุทธศักราช

มม.

มิลลิเมตร



บทที่ 1

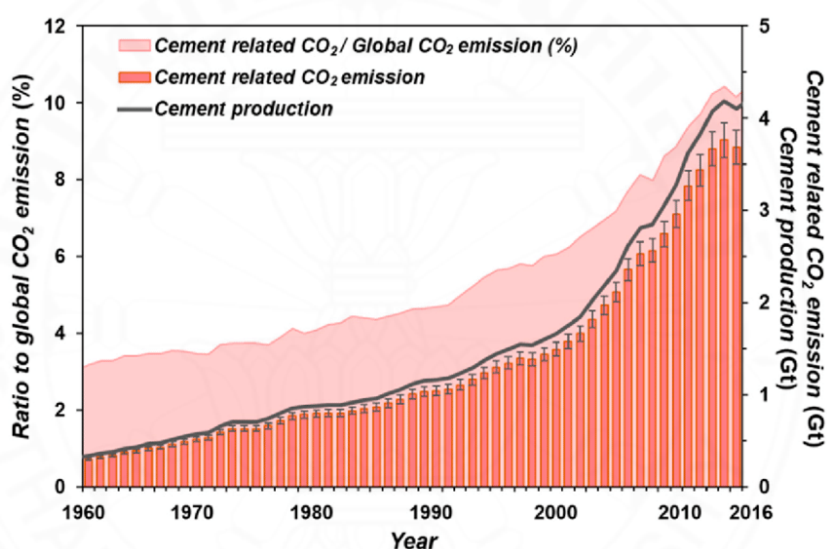
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สถาปัตยกรรมสิ่งก่อสร้างที่พบเห็นในปัจจุบัน ส่วนมากทำขึ้นจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ดังนั้น งานก่อสร้างบ้าน อาคารสถานที่ และสิ่งก่อสร้างอื่น ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันไม่สามารถปฏิเสธได้เลยว่า คอนกรีตมีบทบาทต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในงานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและรับกำลังได้ค่อนข้างสูงล้วนมีคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมอยู่ด้วย ไม่ว่าจะเป็นงานเสาเข็ม ฐานราก เสา คาน พื้น และหลังคา ซึ่งในปัจจุบันได้มีการคิดค้น วิจัย พัฒนานวัตกรรมในการสร้างสรรค์ผลงานเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์คอนกรีตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น คอนกรีตผสมเสร็จ ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป และผนังสำเร็จรูปที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับงานก่อสร้างหมู่บ้านจัดสรร และอาคารพาณิชย์ในยุคปัจจุบัน เป็นต้น การนำผลิตภัณฑ์คอนกรีตมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างทำให้สิ่งก่อสร้างเกือบทั้งหมดกลายเป็นสิ่งก่อสร้างจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่สร้างได้รวดเร็ว สะดวก คงทน สามารถรับกำลังได้ตามต้องการ ตอบสนองความเปลี่ยนแปลงในยุคปัจจุบันได้อย่างทันท่วงที เมื่องานคอนกรีตกลายเป็นหัวใจสำคัญของอุตสาหกรรมก่อสร้าง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเรียนรู้ และทำความเข้าใจกับผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีความหลากหลาย ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เพื่อที่จะได้เลือกผลิตภัณฑ์จากคอนกรีตไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม ถูกต้องตามมาตรฐาน ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างมีความคงทน แข็งแรงและปลอดภัย

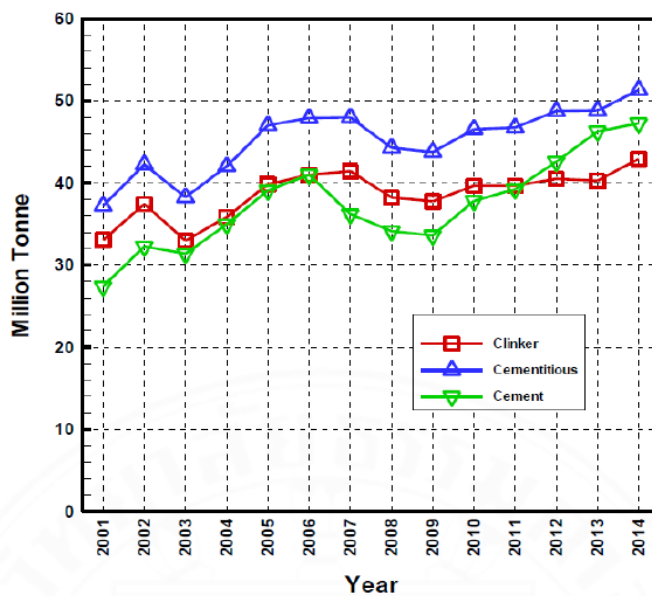
คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และน้ำ) และวัสดุผสม (มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ) รวมตัวกันจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) กลายเป็นของเหลวในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจะก่อตัวกลายเป็นของแข็ง และพัฒนากำลังรับน้ำหนักไปเรื่อย ๆ ตามอายุของคอนกรีต การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Concrete Mixed Design) หรือการหาสัดส่วนวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ (หินย่อยหรือกรวด) มวลรวมละเอียด (ทราย) น้ำ และสารผสมเพิ่ม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเป็นไปตามข้อกำหนดของโครงการและสามารถรับกำลังได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน นิยมออกแบบตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน หรือ American Concrete Institute (ACI) โดยอ้างอิงตาม ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete

เมื่อพิจารณาส่วนผสมของคอนกรีต จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์และน้ำเป็นวัสดุประสานตัวหลักที่จะทำให้คอนกรีตก่อตัว และกลายเป็นของแข็งที่สามารถรับน้ำหนักได้ แต่เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีต้นทุนในการผลิตสูง อีกทั้งกระบวนการในการผลิตตั้งแต่การทำเหมืองแร่เพื่อให้ได้มาซึ่งวัตถุดิบ การบด การเผา กระบวนการบด กระบวนการปรับปรุงคุณภาพ กระบวนการบรรจุ ไปจนถึงกระบวนการขนส่ง ล้วนก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น แต่ในทางกลับกันอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์มีการเติบโตเพิ่มมากขึ้น และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 1.1 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์มีอัตราส่วนเพิ่มขึ้นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่น

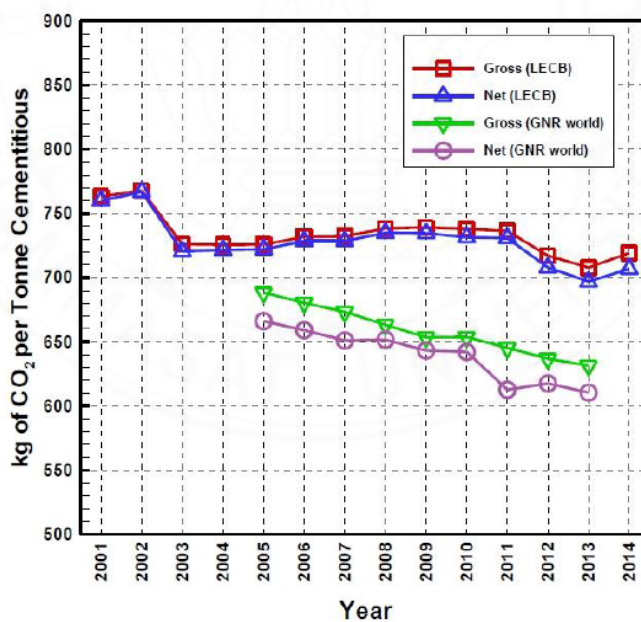


ภาพที่ 1.1 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่น¹

สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทย มีแนวโน้มการขยายตัวตามเศรษฐกิจ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนาจึงมีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่สูงมาก ดังจะเห็นได้จากข้อมูลปริมาณการผลิตปูนเม็ด (Clinker) ปูนซีเมนต์ (Cement) และปริมาณการผลิต Cementitious (Fly Ash, Ground Granulated Blastfurnace Slag, Limestone Fines and Silica Fume) ของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังแสดงในภาพที่ 1.2 ทั้งนี้ปริมาณการปล่อยก๊าซ CO₂ ต่อตัน Cementitious Product และการปล่อยก๊าซ CO₂ สุทธิจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เฉลี่ยเท่ากับ 733 และ 727 kgCO₂/tonne Cementitious Product ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับการปล่อย CO₂ เฉลี่ยในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ทั่วโลก² ดังแสดงในภาพ 1.3



ภาพที่ 1.2 ปริมาณการผลิตปูนเม็ด ปูนซีเมนต์ และ Cementitious Product ของประเทศไทย²



ภาพที่ 1.3 ปริมาณการปล่อยก๊าซ CO₂ ของประเทศไทยเทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซ CO₂ ต่อตัน Cementitious Product ของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ทั่วโลก²

นอกจากนี้วัสดุผสม อันได้แก่ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีอัตราส่วนมากกว่า 50% โดยปริมาตรที่ผสมอยู่ในคอนกรีต ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุทางธรณีวิทยาที่ได้จากกระบวนการทำเหมืองแร่ หากนำมาใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เช่น การพังทลายของตลิ่ง การเปลี่ยนแปลงทางน้ำ การเกิดแผ่นดินทรุด ปัญหาคุณภาพของน้ำ ปัญหาด้านการชลประทาน ไปจนถึงการเสียความสมดุลตามธรรมชาติ เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการทำเหมืองแร่ยังส่งผลกระทบต่อด้านอื่นอีกมากมาย เช่น ผลกระทบทางด้านคุณภาพอากาศ ผลกระทบต่อลักษณะภูมิประเทศ ผลกระทบด้านคุณภาพเสียงและแรงสั่นสะเทือน ผลกระทบด้านการคมนาคม ผลกระทบด้านสุขภาพทั้งผู้ปฏิบัติงานและผู้อาศัยในละแวกใกล้เคียง และผลกระทบทางด้านทัศนียภาพ เป็นต้น³ หากภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้างลดปริมาณการใช้มวลรวมเป็นส่วนผสมในวัสดุคอนกรีตได้บางส่วน โดยหันไปใช้วัสดุทดแทน จะเป็นการช่วยลดผลกระทบทางด้านต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น อีกทั้งยังเป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นอีกด้วย

เมื่อพิจารณาวัสดุทดแทนที่เหลือใช้ มีปริมาณมากพอ อีกทั้งกำจัดได้ยากด้วยวิธีการทางธรรมชาติ และสามารถนำมาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์คอนกรีตแล้ว ขยะอิเล็กทรอนิกส์จึงกลายเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่เหมาะสม ซึ่งจะเห็นได้จากข้อมูลขยะในปี 2562 มีของเสียอันตรายจากชุมชนเกิดขึ้นประมาณ 648,208 ตัน (เพิ่มขึ้นจากปี 2561 คิดเป็น 2%) ส่วนใหญ่เป็นซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ 421,335 ตัน คิดเป็น 65% และของเสียอันตรายประเภทอื่น ๆ เช่น ภาชนะบรรจุสารเคมี แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย กระป๋องสเปรย์ ประมาณ 226,873 ตัน คิดเป็น 35%⁴ และจากข้อมูลการศึกษาการขับเคลื่อนและอุปสรรคของการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยพบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2559 - 2564 มีปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นจาก 947,881 พันชิ้น ในปี พ.ศ. 2559 เป็น 1,067,767 พันชิ้น ในปี พ.ศ. 2564 โดยมีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3% ต่อปี นอกจากนี้ยังพบว่าข้อมูลการคาดการณ์ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงสุดในปี พ.ศ. 2564 จำแนกเป็นชนิดระบุว่าปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงสุดในปี พ.ศ. 2564 คือ แบตเตอรี่ ที่มีจำนวนสูงถึง 718,000 พันชิ้น รองลงมา คือ หลอดฟลูออเรสเซนต์ จำนวน 317,012 พันชิ้น และโทรศัพท์มือถือ/บ้าน จำนวน 13,419 พันชิ้น ตามลำดับ เมื่อคำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์แยกตามชนิด พบว่าเตาอบไมโครเวฟมีอัตราการเพิ่มขึ้นเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์สูงสุดที่ 9.03% ต่อปี รองลงมา คือ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ 8.01% ต่อปี โดยลำดับสุดท้าย คือ เครื่องพิมพ์/โทรสารที่ 0.33% ต่อปี⁵ ทั้งนี้ กลุ่มขยะอิเล็กทรอนิกส์จะครอบคลุมทั้งโทรทัศน์ โทรศัพท์ ตู้เย็น กล้องถ่ายภาพ คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ โน้ตบุ๊ก เครื่องปรับอากาศ หลอดฟลูออเรสเซนต์ แบตเตอรี่ โทรศัพท์บ้าน และเครื่องพิมพ์ เป็นต้น

ปัจจุบันการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์จะมีกระบวนการคัดแยกเอาโลหะที่มีค่าออกก่อน โดยโรงงานอุตสาหกรรมประเภท 105 และ 106 ที่ประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกหรือฝังกบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้ว หรือของเสียจากโรงงานมาผลิตเป็นวัตถุดิบ หรือผลิตภัณฑ์ใหม่โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรมตามลำดับ⁶ เมื่อมีการคัดแยกโลหะเพื่อนำไปหลอมและนำไปใช้ประโยชน์ใหม่ ถือว่าเป็นทางออกทั้งในด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ที่ดี ที่จะนำทรัพยากรธรรมชาติกลับมาใช้อย่างคุ้มค่า และลดการนำทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ประโยชน์ ประกอบกับในปัจจุบันสถานการณ์เหมืองแร่ในประเทศไทยได้มีการระงับการเปิดสัมปทานเหมืองเพื่อนำแร่ไปถลุง ทำให้มีการนำเข้าโลหะจากต่างประเทศมากขึ้น ปัญหาสำคัญอยู่ที่ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีโลหะเพียงร้อยละ 30 แต่อีกร้อยละ 70 คือ ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนอลูมิเนียม หรือแผงวงจรสีเขียวที่เรียกว่า Printed Circuit Board: PCB ซึ่งส่วนของซากแผงวงจรสีเขียวจะต้องนำไปสู่กระบวนการฝังกบอย่างปลอดภัย เพราะในองค์ประกอบยังมีสารอันตรายอยู่ และหากนำไปฝังกบก็จะนำไปสู่การเกิดมลพิษจากโลหะหนัก และสารหน่วงไฟประเภทโบรมีน (Brominated Flame Retardants: BERs) ปนเปื้อนไปกับน้ำใต้ดิน ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นการบำบัด/กำจัด หรือรีไซเคิล ต้องดำเนินการอย่างถูกต้องและเหมาะสม⁷

ปัจจุบันเริ่มมีการคิดค้นเพื่อนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนี้กลับมาใช้มากขึ้น ประกอบกับมีการศึกษา คิดค้น และพัฒนาส่วนผสมของผลิตภัณฑ์คอนกรีต โดยการปรับใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง หรือแม้กระทั่งการนำวัสดุชนิดอื่นมาแทนที่ในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์คอนกรีต ทั้งนี้ส่วนประกอบซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดโลหะ หรือ Printed Circuit Board (PCB) ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมประเภท 105 และ 106 จะให้ผลิตภัณฑ์ชนิดโลหะที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ แบบฝุ่นผง (Powder) แบบเม็ด (Granular) และแบบเส้นใย (Fiber) ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกได้

งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญในการวิเคราะห์และทำการทดสอบ เพื่อหาวัสดุทดแทนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการแทนที่มวลรวมในคอนกรีต โดยวัสดุทดแทนที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ได้อีก เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของวัสดุทดแทนแล้ว ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Printed Circuit Boards: WPCBs) ที่เหลือจากโรงงานจึงเป็นตัวเลือกวัสดุเหลือใช้ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำส่วนประกอบโลหะของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดมาเป็นวัสดุหลักในการแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ (Self-Leveling Mortar) นอกจากนี้ยังทดสอบการชะละลาย (Leaching) ของโลหะหนัก

ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน โดยเลือกทดสอบในมอร์ตาร์ปรับระดับที่ให้กำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด ซึ่งต้องมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีส่วนผสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด
2. เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีส่วนผสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด
3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในส่วนผสมของมอร์ตาร์ปรับระดับ
4. เพื่อศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C Ratio) หน่วยน้ำหนัก และระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด
5. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปและลักษณะการบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด
6. เพื่อศึกษากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดที่อุณหภูมิการขึ้นรูปที่เหมาะสม และมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด
7. เพื่อศึกษาหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistivity: R Value) และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity: k Value) ของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณสูงที่สุด
8. เพื่อศึกษาปริมาณการชะละลายของธาตุโลหะ และโลหะหนักในมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดที่มีร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณต่ำที่สุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 - 100% โดยสมบัติของมวลรวมละเอียดเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C778 - Standard Specification for Standard Sand ซึ่งจะดำเนินการทดสอบและเก็บข้อมูลภายใต้การ

ขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องเหมือนกัน แต่บ่มที่อุณหภูมิต่างกัน 2 สภาวะ คือ การบ่มในอากาศ และการบ่มในน้ำ หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดและมีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด

2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง, มวลรวมละเอียด, ซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด จาก บริษัท เจียฮง อินเตอร์ จำกัด, น้ำประปา, และสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต ประเภท F หรือสารลดน้ำระดับสูง (Superplasticizer) ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete - 10 TH

3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JCM-6000 ยี่ห้อ JEOL

4. ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JCM-6000 ยี่ห้อ JEOL

5. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ด้วยวิธีการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer, XRD) และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X - Ray Fluorescence Spectrometer, XRF) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ (X - ray Fluorescence Analyzer) ยี่ห้อ Olympus รุ่น Vanta M Series

6. ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water Cement Ratio: W/C) จากการทดสอบค่าการไหลแผ่ ตามมาตรฐาน ASTM C 1708 / C 1708M - Standard Test Methods for Self - Leveling Mortars Containing Hydraulic Cements

7. ศึกษาระยะเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด (Setting Time) ด้วยเข็มไวกแคท ตามมาตรฐาน ASTM C 191 - Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement

8. ศึกษาหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร

9. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูป (ขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง) และลักษณะการบ่มใน 2 สภาวะ (บ่มในน้ำ และบ่มในอากาศ) ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109/ C 109M - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

10. ศึกษากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร โดยเลือกทดสอบกำลังรับแรงดัดจากอุณหภูมิการบ่มที่ให้กำลังรับแรงอัดมากที่สุด ทั้งนี้ทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C 348 - Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars เปรียบเทียบกับ ASTM C 78 - Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third - Point Loading)

11. ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity: k Value) และค่าการต้านทานความร้อน (Thermal Resistance: R Value) โดยเลือกทดสอบจากตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดมากที่สุด ขนาด 30 x 30 x 3.6 เซนติเมตร

12. ศึกษาการชะละลายของโลหะ และโลหะหนัก โดยเลือกทดสอบจากตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดที่มีร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดน้อยที่สุด ทั้งนี้เลือกใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณธาตุไทเทเนียม (Ti), โครเมียม (Cr), แมงกานีส (Mn), เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn), สารหนู (As), ทองคำ (Ag), แคดเมียม (Cd) และ ตะกั่ว (Pb) และเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Emission Spectrometer (ICP-MS) สำหรับวิเคราะห์ หาปริมาณธาตุปรอท (Hg)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง และซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการกระจายตัวของอนุภาคต่าง ๆ ในส่วนผสมของมอร์ตาร์ปรับระดับที่ผสมซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

2. ทราบสัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง ซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ และโมเลกุลที่เป็นส่วนประกอบของมอร์ตาร์ปรับระดับที่ผสมซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

3. ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่มวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์ปรับระดับด้วยซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

4. ทราบระยะเวลาการก่อตัว และหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

5. ทราบอิทธิพลของอุณหภูมิการขึ้นรูปและการบ่ม ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

6. ทราบกำลังรับแรงดัด ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ค่าการต้านทานความร้อน (R) และปริมาณการชะละลายของโลหะหนักในมอร์ตาร์ปรับระดับที่ผสมซากแผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด

7. ผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานให้กับนักวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ซากแผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ในการแทนที่ส่วนผสมของมอร์ตาร์ปรับระดับในงานวิจัยระดับสูงต่อไป



บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทบทวนทฤษฎี วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแทนที่ส่วนผสมของมอร์ตาร์ปรับระดับด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะกล่าวถึง วัสดุตั้งต้นที่ใช้เป็นส่วนผสม ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โลหะหนัก ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับการก่อตัวของมอร์ตาร์ การบ่ม การศึกษา ลักษณะทางกายภาพ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ ดังนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์

พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน ให้ความหมายของไว้ว่า ซีเมนต์ หมายถึง วัสดุใช้ในการก่อสร้างชนิดหนึ่ง ลักษณะเป็นผง เมื่อผสมคลุกกับน้ำแล้วทิ้งไว้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นผลให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวได้ องค์ประกอบเคมีที่สำคัญของซีเมนต์ คือ แคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมอะลูมิเนต และแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ใช้ประโยชน์เพื่อทำคอนกรีต ปูนฉาบ หรือ ปูนก่อ เป็นต้น เรียกว่า ปูนซีเมนต์⁸

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กล่าวว่า ปูนซีเมนต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง ได้จากการบดปูนเม็ดกับแคลเซียมซัลเฟตรูปใดรูปหนึ่งหรือหลายรูป อาจเติมหินปูน วัสดุผสมเพิ่มอินทรีย์ และวัสดุผสมเพิ่มอินทรีย์ได้⁹

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กล่าวว่า ปูนซีเมนต์ คือ ผงที่ได้จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูนและหินดินดานหรือดินเหนียวไปผสมให้เข้ากันและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,400 - 1,600 องศาเซลเซียส ความร้อนจะทำปฏิกิริยาเคมีกับวัตถุดิบจนกลายเป็นปูนเม็ดซึ่งให้คุณสมบัติช่วยยึดประสาน จากนั้นนำไปบดกับยิปซัมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงจนกลายเป็นผงเมื่อนำมาผสมกับน้ำหินและทรายจะทำให้ปูนซีเมนต์นั้นยึดตัวและแห้งเร็วเป็นวัสดุทำหน้าที่ยึดประสาน ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีการนำไปใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน ถนนคอนกรีต และสะพาน ปูนซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีส่วนประกอบที่ต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน เช่น ปูนซีเมนต์ผสมได้จากการบดปูนเม็ดกับยิปซัมและทราย เหมาะกับการใช้การก่อ โบก ฉาบ หรือ งานก่อสร้างที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมากเกินไป¹⁰

กรมทรัพยากรธรณี กล่าวว่า ปูนซีเมนต์ คือ ของผสมที่มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ในสัดส่วนพอเหมาะ ซึ่งเมื่อรวมตัวกับน้ำแล้วจะจับตัวแข็งและมีกำลังอัดสูง จึงสามารถเป็นตัวประสานวัสดุชนิดเม็ด (Aggregates) เช่น ทรายหยาบ และกรวด ให้เกาะตัวกันแน่นเป็นคอนกรีตได้¹¹

รองศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ให้คำจำกัดความไว้ว่า ซีเมนต์ (Cement) โดยทั่วไป หมายถึง วัสดุประสานซึ่งสามารถยึดวัตถุชิ้นเล็ก ๆ เข้าด้วยกัน คำว่าซีเมนต์นี้ยังกินความถึงสารซีเมนต์หลายประเภท แต่สำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้าง คำว่า “ซีเมนต์” หมายถึง วัสดุผงละเอียดสีเทาหรือเทาเข้ม เมื่อผสมน้ำจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานยึดวัสดุประเภท อิฐ หิน และ ทราย เข้าด้วยกัน¹²

บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด กล่าวว่า ปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นคำที่มาจากภาษาละติน (Latin) หมายถึง สารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็ง หรือมวลรวม เช่น หินหรือกรวด และทราย ให้แข็งติดเป็นชิ้นเดียวกัน นิยมใช้ในงานก่อสร้างเป็นหลัก¹³

บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน) กล่าวว่า ปูนซีเมนต์ (Cement) หมายถึง วัสดุประสานที่สามารถยึดวัตถุชิ้นเล็ก ๆ เข้าด้วยกัน นับเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตขึ้นจากวัตถุดิบธรรมชาติ เพื่อนำใช้ทดแทนการตัดต้นไม้ของมนุษย์ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างบ้านเรือน ถนนหนทาง สะพาน เขื่อน โรงพยาบาล วัดวาอาราม รวมถึงสถาปัตยกรรมและโครงสร้างอาคารต่าง ๆ ซึ่งสิ่งปลูกสร้างถูกสร้างขึ้นจากปูนซีเมนต์จะมีความคงทนถาวรตลอดอายุการใช้งาน¹⁴

กองควบคุมและส่งเสริมพลังงาน สำนักงานพลังงานแห่งชาติ กล่าวว่า ซีเมนต์ (Cement) คือ สารที่ทำหน้าที่เป็นวัตถุตัวยึดเหนี่ยวสารอื่นให้ติดกัน เช่น พวงกาว ยาง เป็นต้น แต่ในทางวัสดุ ก่อสร้างแล้ว เราหมายถึงสารชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะทำหน้าที่เป็นเชื้อประสานยึดเหนี่ยวมวลสารให้ติดกัน เมื่อปล่อยให้แห้งตัวจะมีความแข็งเท่าเทียมหิน¹⁵

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ปูนซีเมนต์ หมายถึง วัสดุที่มีลักษณะเป็นผง ซึ่งได้จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูนและหินดินดานหรือดินเหนียวไปผสมให้เข้ากันและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,400 - 1,600 องศาเซลเซียส ความร้อนจะทำปฏิกิริยาเคมีกับวัตถุดิบตั้งต้นจนกลายเป็นปูนเม็ด ซึ่งให้คุณสมบัติช่วยยึดประสาน จากนั้นนำไปบดและผสมกับยิปซัมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงจนกลายเป็นผงที่มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมอะลูมิเนต และแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์สูง โดยอาจเติมหินปูน วัสดุผสมเพิ่มอินทรีย์ และวัสดุผสมเพิ่มอินทรีย์ได้ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ ปูนซีเมนต์นี้เมื่อนำมาผสมกับน้ำ หินทราย และวัสดุผสมเพิ่ม จะทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะทำหน้าที่เป็นเชื้อประสานยึดเหนี่ยววัสดุมวลสารให้ติดกัน เมื่อปล่อยให้แห้งตัวจะมีความแข็งเท่าเทียมหินและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม นิยมนำมาใช้ในการสร้างบ้านเรือน ถนนหนทาง สะพาน เขื่อน รวมถึงสถาปัตยกรรม

และโครงสร้างอาคารต่าง ๆ ซึ่งสิ่งปลูกสร้างถูกสร้างขึ้นจากปูนซีเมนต์จะมีความคงทนถาวรตลอดอายุการใช้งาน

2.1.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์

การจำแนกประเภทของปูนซีเมนต์ในประเทศไทยได้จำแนกตามมาตรฐานที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด ทั้งนี้ได้จำแนกประเภทของปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 15 เล่ม 1 - 2555 ดังนี้

(1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Type I Normal Portland Cement or Ordinary Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ทั่วไปในงานที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษเพิ่มเติม โดยส่วนมากจะนำไปใช้งานกับคอนกรีตเสริมเหล็กในการทำงานโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) เช่น คาน เสา พื้น สะพาน ถนน ท่อระบายน้ำ และงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น

(2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทดัดแปลง (Type II Modified Portland Cement) ใช้เมื่อต้องการความทนซัลเฟตปานกลาง หรือในกรณีที่ต้องการให้เกิดความร้อนปานกลาง (Moderate Heat Portland Cement) ขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ มีการคายความร้อนออกมาปริมาณน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับใช้กับโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำหรือดิน หรือโครงสร้างที่โดนน้ำเค็มไม่มาก หรือใช้ในงานก่อสร้างที่มีขนาดปานกลาง เช่น ตอม่อ การทำเขื่อนเก็บน้ำ กำแพงกันดิน สะพานท่าเรือ เป็นต้น

(3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งตัวเร็ว (Type III High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะมีความละเอียดเป็นพิเศษมากกว่าปูนซีเมนต์ทั่วไปส่งผลให้เนื้อปูนซีเมนต์เกิดการแข็งตัว และรับแรงได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่น จึงเป็นที่นิยมในการนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็ว เร่งด่วน และคล่องตัว หรือต้องการถอด รื้อ แบบที่เร็วกว่าปกติ เช่น พื้นสำเร็จรูป และเสาเข็ม เป็นต้น แต่ไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในงานก่อสร้างขนาดใหญ่

(4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Type IV Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ควบคุมความร้อนที่อาจเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำในขณะที่ปูนซีเมนต์กำลังแข็งตัว เพื่อไม่ให้ความร้อนมากเกินไป เพราะอาจทำให้เกิดการแตกร้าว ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 4 จะเป็นไปอย่างช้า ๆ จึงเหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำ เป็นต้น

(5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง (Type V Sulfate Resistance Portland Cement) เหมาะกับการใช้งานในพื้นที่ที่สัมผัสกับน้ำและดินที่มีซัลเฟตไม่สูงมากนัก มีระยะเวลาในการแข็งตัวช้าที่สุด เพราะมีสมบัติในการต้านทานต่อสารที่เป็นต่างได้ดี¹⁶

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่นิยมใช้ตามมาตรฐานสากล สามารถจำแนกได้เป็น 10 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C 150/C 150 M - Standard Specification for Portland Cement ดังนี้

- (1) Type I - สำหรับการใช้งานทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษอื่น
- (2) Type IA - ปูนซีเมนต์กักกระจายฟองอากาศ สำหรับการใช้งานทั่วไป เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ Type I และต้องการคุณสมบัติการกักเก็บอากาศ
- (3) Type II - สำหรับการใช้งานทั่วไปที่ต้องการคุณสมบัติความต้านทานซัลเฟตปานกลาง
- (4) Type IIA - สำหรับการใช้งานทั่วไปที่ต้องการคุณสมบัติความต้านทานซัลเฟตปานกลางเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ Type II และต้องการคุณสมบัติการกักเก็บอากาศ
- (5) Type II (MH) - สำหรับการใช้งานทั่วไปที่ต้องการให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในระดับปานกลาง
- (6) Type II (MH) A - สำหรับการใช้งานทั่วไปที่ต้องการให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในระดับปานกลางเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ Type II (MH) และต้องการคุณสมบัติการกักเก็บอากาศ
- (7) Type III - สำหรับใช้เมื่อต้องการกำลังรับแรงสูงในช่วงแรก
- (8) Type IIIA - สำหรับใช้เมื่อต้องการกำลังรับแรงสูงในช่วงแรกเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ Type III และต้องการคุณสมบัติการกักเก็บอากาศ
- (9) Type IV - สำหรับใช้เมื่อต้องการความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในระดับต่ำ

(10) Type V - สำหรับใช้เมื่อต้องการความต้านทานซัลเฟตสูง¹⁷

ปูนซีเมนต์ผสมสำหรับงานโครงสร้าง (Blended Cement หรือ Blended Hydraulic Cement) สามารถจำแนกออกเป็น 6 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C 595 - Standard Specification for Blended Hydraulic Cements Cement ดังนี้

(1) Type IS - ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก หรือ Portland Blast - Furnace Slag Cement เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่มีส่วนของผสม GGBS 25 - 70% โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้ในสภาพที่เป็นคอนกรีตสดจะเพิ่มความสามารถในการเทเข้าแบบได้ง่าย และลดการเยิ้ม น้ำ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะเพิ่มกำลังอัดที่ระยะปลาย เพิ่มความตึบ น้ำ เพิ่มความทนทานต่อสารละลายซัลเฟต และลดโอกาสการเกิดปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (Alkali - Aggregate Reaction หรือ AAR) ชนิดที่เรียกว่าปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali - Silica Reaction หรือ ASR)

(2) Type IP - ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลาน หรือ Portland Pozzolan Cement เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ผสมสารปอซโซลานปริมาณ 15 - 40% โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้จะเพิ่มความสามารถในการเทเข้าแบบได้ง่าย ลดการเยิ้ม น้ำ และลดการแยกตัว ให้กำลังอัดที่ระยะปลาย เพิ่มความตึบ น้ำ เพิ่มความทนทานต่อซัลเฟต ลดการหดตัว และลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

(3) Type P - ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลาน สำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการกำลังรับน้ำหนักสูงในช่วงแรก

(4) Type I (PM) - ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลานแบบดัดแปลง หรือ Pozzolan Modified Portland Cement เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลานน้อยกว่า 15% เหมาะสำหรับงานโครงสร้างโดยทั่วไป แต่ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะสูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลานประเภท IP เนื่องจากผสมสารปอซโซลานในสัดส่วนที่น้อยกว่า หรือมีสัดส่วนของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มากกว่า จึงเกิดความร้อนมากกว่า

(5) Type I (SM) - ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กดัดแปลง หรือ Slag Modified Portland Cement เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสม GGBS น้อยกว่า 25% โดยน้ำหนัก เหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป เช่นเดียวกับประเภท IS

(6) Type S - ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก หรือ Slag Cement เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสม GGBS มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เพื่อใช้ในงานคอนกรีต และยังสามารถใช้ผสมกับปูนขาว (Hydrated Lime) เพื่อใช้ในงานก่ออิฐผนังได้ด้วย^{13,18}

สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้จำแนกประเภทของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกออกเป็น 6 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C 1157/C 1157 M - Standard Performance Specification for Hydraulic Cement ดังนี้

- คุณสมบัติพิเศษอื่น
- (1) Type GU - ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับการใช้งานทั่วไปที่ไม่ต้องการ
- ปานกลาง
- (2) Type HE - ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ต้องการกำลังรับแรงสูงในช่วงแรก
- (3) Type MS - สำหรับการใช้งานที่ต้องการสมบัติความต้านทานซัลเฟต
- สูง
- (4) Type HS - สำหรับการใช้งานที่ต้องการสมบัติความต้านทานซัลเฟต
- ไฮดรอลิกในระดับปานกลาง
- (5) Type MH - สำหรับการใช้งานที่ต้องการให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยา
- ไฮดรอลิกในระดับต่ำ¹⁹
- (6) Type LH - สำหรับการใช้งานที่ต้องการให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยา

ปูนซีเมนต์ขยายตัว เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามมาตรฐาน ASTM 845 - Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement มีคุณสมบัติการขยายตัวได้เล็กน้อย ในช่วงที่ปูนซีเมนต์เริ่มแข็งตัวหลังจากก่อตัวไปแล้ว ประโยชน์หลัก ๆ ของปูนซีเมนต์ประเภทนี้ คือ ช่วยลดการแตกร้าวในคอนกรีต ที่มีสาเหตุการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำของคอนกรีตแข็งตัวแล้ว (Drying Shrinkage Cracking) โดยปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะขยายตัวเพื่อไปชดเชยกับปริมาตรคอนกรีตที่หดตัว ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เหมาะสำหรับงานบ่อพักเก็บน้ำหรือกากอุตสาหกรรมที่มีรอยต่อไม่มากนัก และงานเทพื้นคอนกรีตบริเวณกว้าง สามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

- (1) Type K - ปูนซีเมนต์ขยายตัวที่ประกอบด้วยแอนไฮดรัสแคลเซียมอลูมิโนซัลเฟต ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$) แคลเซียมซัลเฟต และไม่รวมตัวกับแคลเซียมออกไซด์
- (2) Type M - ปูนซีเมนต์ขยายตัวที่ประกอบด้วยแคลเซียมอลูมิเนต และแคลเซียมซัลเฟต
- (3) Type S - ปูนซีเมนต์ขยายตัวที่ประกอบด้วยไตรแคลเซียมอลูมิเนต และแคลเซียมซัลเฟต
- (4) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกขยายตัว หรือ Expansive Hydraulic Cement โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมอลูมิเนต และแคลเซียมซัลเฟต
- (5) คอนกรีตชดเชยการหดตัว (Shrinkage Compensating Concrete)²⁰

2.1.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์

กรมทรัพยากรธรณี ได้จำแนกประเภทวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ โดยใช้หลักเกณฑ์การจำแนกวัตถุดิบตามองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัตถุดิบ ดังนี้

(1) วัตถุดิบเนื้อปูน (Calcareous Component) ซึ่งมีปริมาณสูงถึง 80% ในส่วนผสมก่อนนำไปเผา (Raw Mix) เป็นวัตถุดิบที่ประกอบด้วยแร่แคลไซต์ (Calcite: CaCO_3) เป็นส่วนใหญ่ อาจเป็นหินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือดินมาร์ล (Marl) หินอ่อน (Marble) หรือหินชอล์ก (Chalk) ก็ได้ แต่สำหรับโรงงานปูนซีเมนต์ในประเทศไทยนั้น ทุกแห่งใช้หินปูนเป็นวัตถุดิบ

(2) วัตถุดิบเนื้อดิน (Argillaceous Component) มีสัดส่วนประมาณ 15 - 18% ในส่วนผสมก่อนการเผา และมีส่วนประกอบหลักเป็นพวกซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มีสนิมเหล็ก (Fe_2O_3) ปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย วัตถุดิบในกลุ่มนี้ได้แก่ หินดินดาน (Shale) หรือดินเหนียว (Clay)

(3) วัตถุดิบที่ใช้ปรับคุณภาพ (Corrective Component) คือ วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบเป็นเนื้อปูน อะลูมินา ซิลิกา หรือสนิมเหล็กสูง ใช้เติมลงในส่วนผสมของวัตถุดิบหลักสองตัวแรกในกรณีที่วัตถุดิบทั้งสองมีองค์ประกอบไม่เป็นไปตามข้อกำหนด เช่น มีอะลูมินาต่ำเกินไป ต้องเติมตัวปรับคุณภาพที่เป็นแร่บ็อกไซต์ [$\text{Al}(\text{OH})_3$] หรือถ้าเหล็กต่ำ ต้องเติมแร่เหล็กหรือเศษเหล็กลงไป เพื่อให้ส่วนผสมมีองค์ประกอบตามเกณฑ์ที่กำหนด

(4) สารเติมแต่ง (Additive) คือ วัตถุดิบที่เติมลงในปูนเม็ดภายหลังการเผา เพื่อปรับคุณสมบัติบางประการโดยเฉพาะอย่างยิ่ง แร่ยิปซัม (Gypsum) เพื่อหน่วงเวลาแข็งตัวของปูนให้ช้าลงเมื่อมีการผสมน้ำลงไป ปริมาณของยิปซัมที่ใช้อยู่ในช่วง 3 - 5% โดยน้ำหนักของปูนเม็ด ในบางกรณี การเติมตัวเติมลงไปก็เพียงเพื่อเพิ่มเนื้อปูน เช่นการเติมหินปูนบดในปริมาณ 10 - 20% โดยน้ำหนักลงไปปูนเม็ด ซึ่งสามารถทำได้โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์¹¹

2.1.1.3 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก (Wet Process) และกระบวนการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) การเลือกกระบวนการการผลิตแบบใดขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งแรงของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบที่ความชื้นช่วงหนึ่งของการบดวัตถุดิบให้ละเอียดทำได้ยาก จำเป็นต้องขจัดความชื้นที่มีอยู่หรือเพิ่มน้ำให้มีปริมาณมากขึ้น ถ้าวัตถุดิบเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงใช้กระบวนการผลิตแบบเปียก หากวัตถุดิบเป็นหินปูนและหินเชลล์จะมีความชื้นค่อนข้างต่ำ จึงควรใช้กระบวนการผลิตแบบแห้ง

(1) กระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ ดินเหนียว และดินสอพอง หรือดินมาร์ล (Marl) ถูกนำมาผสมกันให้ได้สัดส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ เติมน้ำลงไปช่วยผสมซึ่งปกติถ้าใช้ดินเหนียวและหินซอล์ก (Chalk) จะใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นนำส่วนผสมไปบดให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก (Wash Mill) หลังจากนั้น น้ำโคลนชั้น (Slurry) ที่ได้จะนำไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผา (Kiln) วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผา จะมีความชื้นร้อยละ 35 ถึง 50

(2) กระบวนการผลิตแบบแห้ง วัตถุดิบที่ระเบิดมาจากเหมืองส่วนใหญ่จะใช้หินปูนและหินดินดาน ถูกนำมาย่อยให้เล็กลงในเครื่องย่อยขั้นต้น (Primary Crusher) และเครื่องย่อยขั้นที่สอง (Secondary Crusher) ตามลำดับ จากนั้นนำไปบดละเอียดในหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) แล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัตถุดิบ (Blending Silo) จากนั้นเพิ่มความร้อนของวัตถุดิบด้วยลมร้อนก่อนส่งเข้าเตาเผาวัตถุดิบเนื้อปูน (Calcareous Component) วัตถุดิบชนิดนี้มีปริมาณสูงถึง 80% ในส่วนผสมก่อนนำเข้าเตาเผา (Raw Mix) เป็นวัตถุดิบที่ประกอบด้วยแร่แคลไซต์ (CaCO_3) เป็นส่วนใหญ่ หรืออาจเป็นหินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือดินมาร์ล (Marl) หินอ่อน (Marble) หรือหินซอล์ก (Chalk) ก็ได้ แต่สำหรับโรงงานปูนซีเมนต์ในประเทศไทยนั้น ทุกแห่งจะใช้หินปูนเป็นวัตถุดิบ

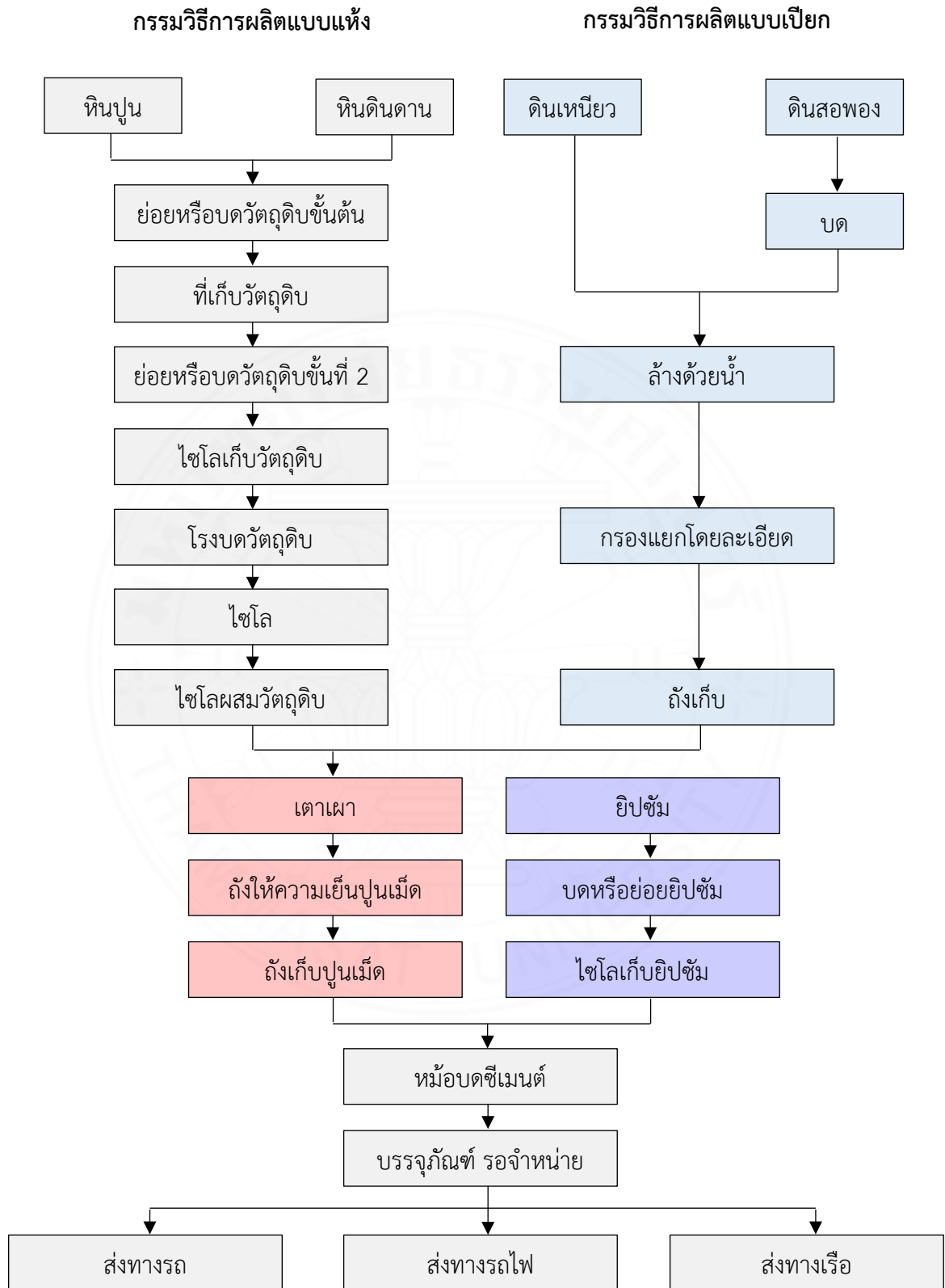
กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียกและแบบแห้งแสดงไว้ใน ภาพที่ 2.1 ปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยนิยมใช้กระบวนการผลิตแบบแห้ง เนื่องจากค่าใช้จ่ายถูกกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียกมาก กรรมวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก เตาเผาของระบบแห้งมีขนาดเล็กกว่าระบบเปียก และพลังงานที่ใช้เผาจะน้อยกว่าระบบเปียกมาก อีกทั้งยังเป็นกรรมวิธีที่ทันสมัยที่สุดสามารถผลิตปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณสูงถึง 10,000 ตันต่อวัน²¹

2.1.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

หลังจากที่วัตถุดิบต่าง ๆ ถูกส่งเผาในเตาเผา (Kiln) น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก็จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือเป็นปูนขาว (CaO) เกิดการหลอมตัวของธาตุออกไซด์ระหว่างแคลเซียมออกไซด์ จากหินปูนและดินสอพอง ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์จากดินเหนียวและดินดาน เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยกระบวนการตกผลึกเมื่ออุณหภูมิลดลง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการตกผลึก จะได้เม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

(1) ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3

(2) ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 และ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ²¹



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงกรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์²¹

สารประกอบที่เป็นออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ มีน้ำหนักรวมกันคิดเป็น 90% ของน้ำหนักซีเมนต์ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการผลิตปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์^[21]

สารประกอบออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 - 67
SiO ₂	1 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0.5 - 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 - 5.5
Na ₂ O + K ₂ O	0.5 - 1.3
TiO ₂	0.1 - 0.4
P ₂ O ₅	0.1 - 0.2
SO ₃	1 - 3

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์^[21]

ชื่อสารประกอบ	สัญลักษณ์ทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
เตตระแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

2.1.1.5 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

(1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate or Alite) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ หรือใช้ชื่อย่อว่า C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม สมบัติของ C_3S จะเหมือนกับสมบัติของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 - 3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อนสูงถึง 500 จูลต่อกรัม โดย C_3S จะมีปริมาณร้อยละ 35 - 55 ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

(2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate or Belite) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ หรือใช้ชื่อย่อว่า C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม เมื่อผสมน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และให้ความร้อน 250 จูลต่อกรัม ในระยะแรกจะมีกำลังอัดค่อนข้างต่ำ และจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ จนกระทั่งได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S โดย C_2S จะมีปริมาณร้อยละ 15 - 35 ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

(3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ หรือใช้ชื่อย่อว่า C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีสีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำในทันที ก่อให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว (Flash Set) และเกิดความร้อนประมาณ 850 จูลต่อกรัม มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดภายใน 1 - 2 วัน แต่จะให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำ โดย C_3A จะมีปริมาณร้อยละ 7 - 15 ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

(4) เตตระแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือใช้ชื่อย่อว่า C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในระยะเวลาไม่กี่นาที มีความร้อนเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ประมาณ 420 จูลต่อกรัม C_4AF จะมีกำลังอัดค่อนข้างต่ำ โดย C_4AF จะมีปริมาณร้อยละ 5 - 10 ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์²¹

วินิต ช่อวิเชียร ได้สรุปค่าปริมาณสารประกอบหลักพื้นฐานของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต่างชนิดกันจะมีสารประกอบหลักต่างกัน ในทำนองเดียวกันปริมาณสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะส่งผลให้สมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อัตราการเกิด ปฏิกิริยา ไฮเดรชัน การพัฒนากำลังอัด กำลังอัดประลัย ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และสมบัติอื่น ๆ ก็จะมีความแตกต่างกันไปด้วย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4²²

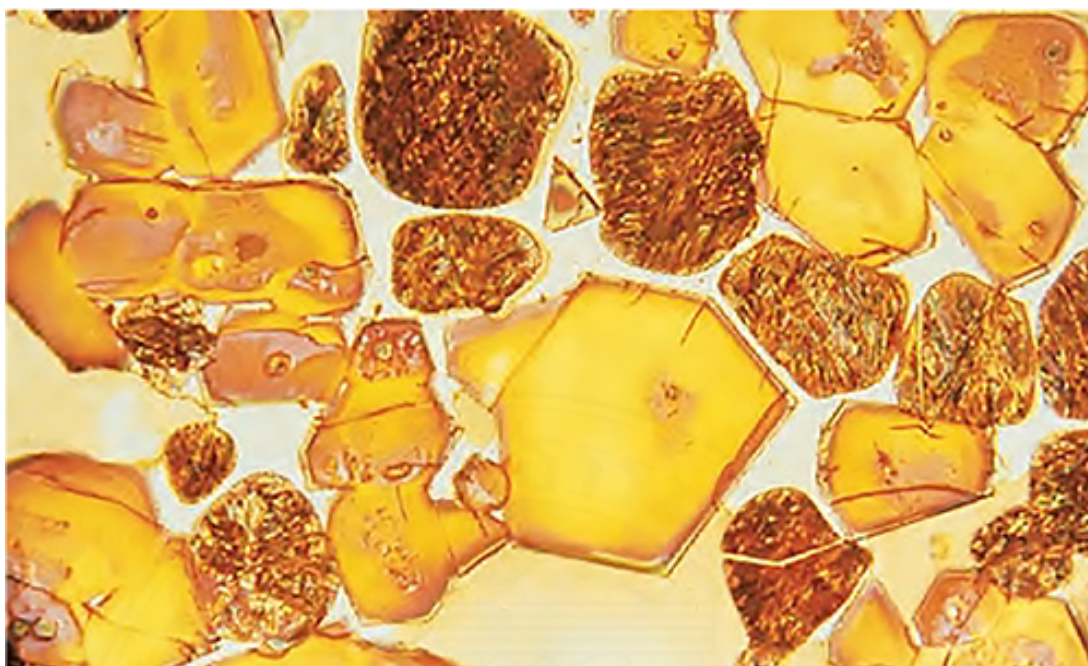
ตารางที่ 2.3 ปริมาณสารประกอบพื้นฐานของปูนซีเมนต์แต่ละประเภท^[22]

ประเภทของ ปูนซีเมนต์	ชนิด	ปริมาณของสารประกอบ (%)			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
I	ปกติ	49	25	12	8
II	ดัดแปลง	46	29	6	12
III	กำลังสูง	56	15	12	8
IV	ความร้อนต่ำ	30	46	5	13
V	ต้านทานซัลเฟต	43	36	4	12

ตารางที่ 2.4 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์^[22]

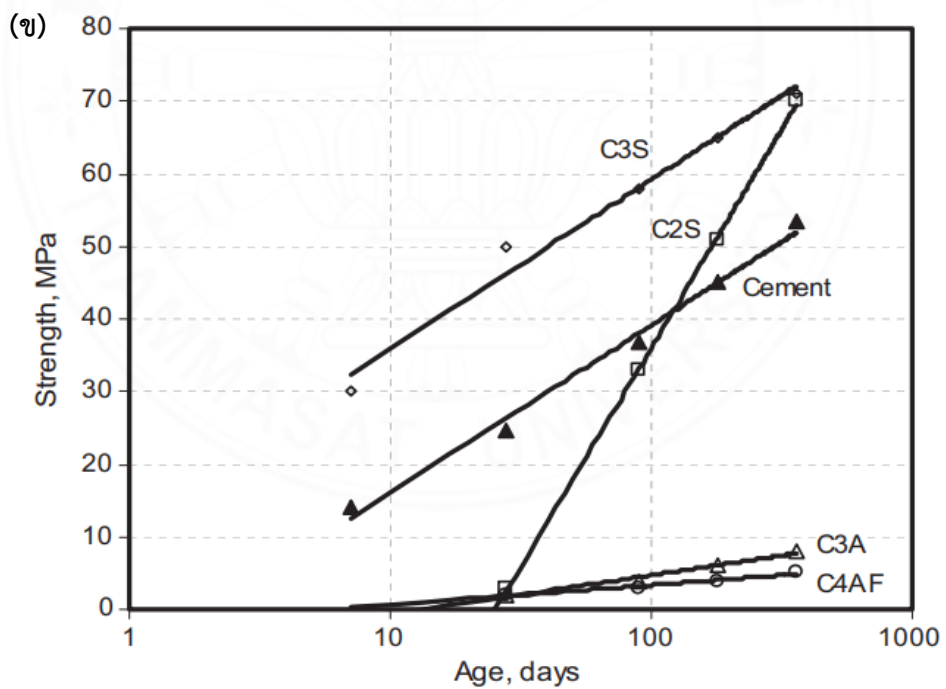
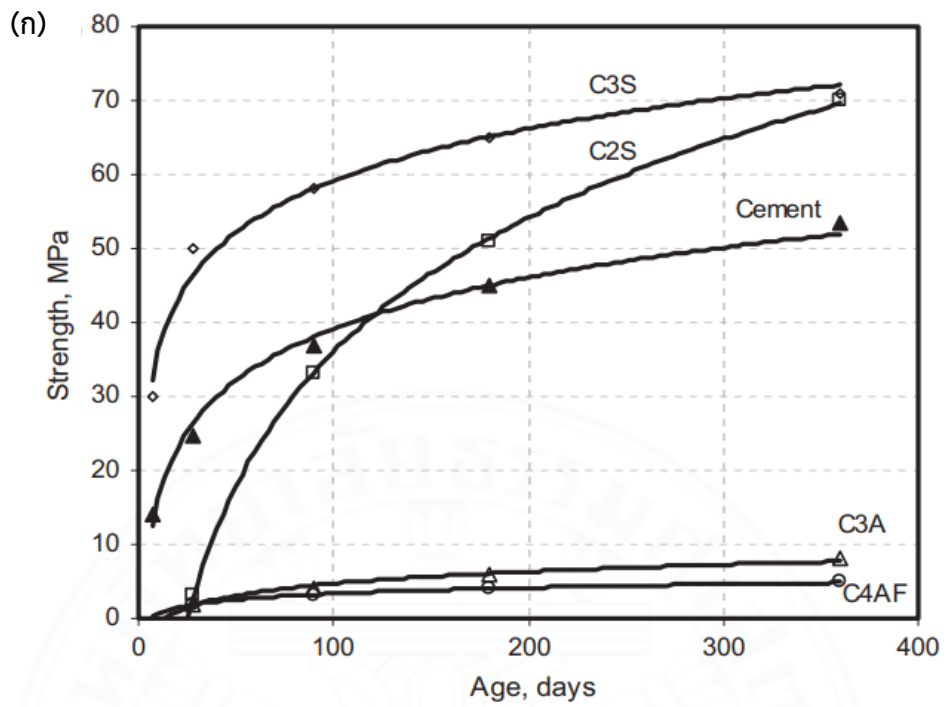
สมบัติ ของสารประกอบ	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1) อัตราการเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2) การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
3) กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4) ความร้อนจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5) สมบัติอื่นๆ	สมบัติเหมือน ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำ และถูกซัลเฟต ทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์ มีสีเทา

ยิปซัม (Gypsum: CaSO₄·2H₂O) และสารตั้งต้นจำพวกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (Calcium Sulfate Dihydrate) ที่ถูกใช้เป็นวัสดุตั้งต้นของสารประเภทซัลเฟตในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ C₃S (Alite) มีปริมาณ 50% - 70% ส่วน C₂S (Belite) มีปริมาณ 15% - 30% (ภาพที่ 2.2) ในขณะที่ C₃A มีปริมาณ 5% - 10% และ C₄AF มีปริมาณ 5% - 15%²³

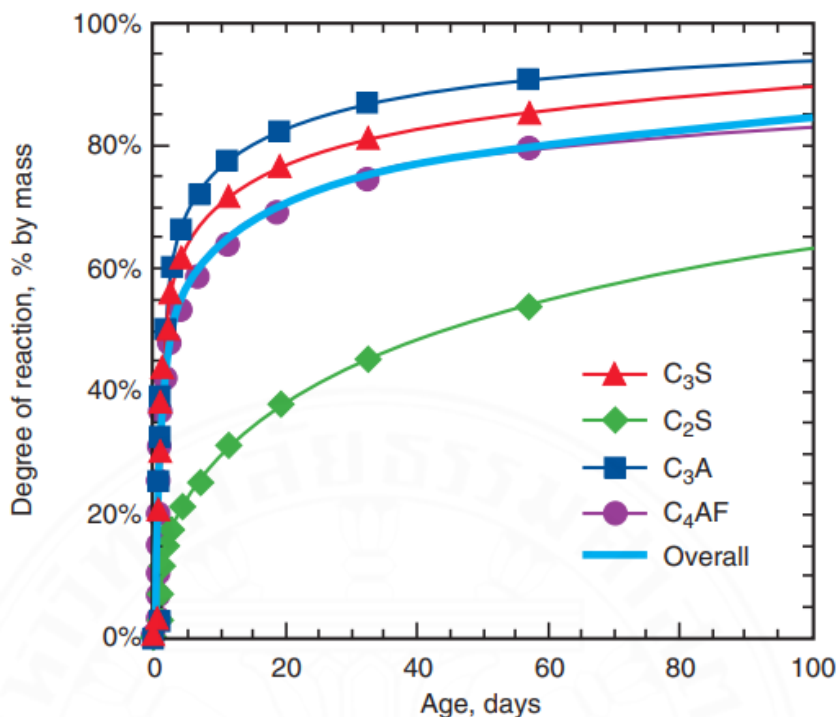


ภาพที่ 2.2 ภาพจากการศึกษาแผ่นหินบางขัดเงา (Polished Thin - Section) ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า จะพบส่วนที่ปรากฏเป็นสีเหลืองสว่าง ลักษณะโปร่งแสง ขอบของอนุภาคเป็นรูปเหลี่ยม คือ C_3S และส่วนที่ปรากฏเป็นสีเหลืองผสมกับสีดำทึบแสง ขอบอนุภาคกลมมน คือ C_2S ²³

Metwally AE ได้ศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของสารประกอบ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ผสมเป็นซีเมนต์เพสต์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ โดย C_3S มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะเวลาอันสั้น และสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดต่อไปได้เรื่อย ๆ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ปี ส่วนการพัฒนา กำลังอัดในช่วงแรกของ C_2S จะไม่ค่อยดีนัก แต่จะพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีในช่วงระยะหลังจาก 1 ปีผ่านไป แล้ว และจะพัฒนากำลังรับแรงอัดไปจนถึงค่าสูงสุด สำหรับ C_3A จะให้กำลังรับแรงอัดต่ำมากทั้งในระยะต้นและระยะปลายแม้เวลาจะผ่านไปนานถึง 1 ปี และสารประกอบ C_4AF สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ในระยะสั้นอย่างรวดเร็ว แต่จะให้กำลังรับแรงอัดโดยรวมอยู่ในระดับปานกลาง ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า เปอร์เซ็นต์ปริมาณของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะบ่งบอกถึงปริมาณของสารประกอบออกไซด์ในปูนซีเมนต์ รวมถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและอัตราส่วนการรวมตัวกันทางเคมีของสารประกอบนั้น ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดแตกต่างกันไปด้วยดังแสดงในภาพที่ 2.3 และภาพที่ 2.4^{23,24}



ภาพที่ 2.3 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (ก) มาตรฐานปกติ (ข) มาตรฐานลอกการีที่มฐาน 10^{24}



ภาพที่ 2.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบในซีเมนต์ เส้นกราฟแสดงข้อมูล “Overall” ประกอบด้วย C₃S = 55%, C₂S = 18%, C₃A = 10% และ C₄AF = 8%²³

2.1.1.6 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์

(1) ยิปซัม (Gypsum) สัญลักษณ์ทางเคมี CaSO₄·2H₂O ถูกผสมเข้าไปในระหว่างกระบวนการบดปูนเม็ด ทำหน้าที่ควบคุมระยะเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ไม่ให้ก่อตัวเร็วเกินไป โดยปริมาณยิปซัมจะต้องมีความเหมาะสม เพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงสุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบแอลคาไลออกไซด์ (Na₂O และ K₂O) ปริมาณสารประกอบ C₃A และความละเอียดของปูนซีเมนต์

(2) ปูนขาวอิสระ (Free Lime) เกิดขึ้นเมื่อวัตถุดิบตั้งต้นมีปริมาณปูนขาวมากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide: SiO₂) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide: Al₂O₃) และเหล็กออกไซด์ (Iron Oxide: Fe₂O₃) ได้หมด หรือในกรณีที่มีปริมาณปูนขาวมีปริมาณไม่มากแต่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบออกไซด์ไม่สมบูรณ์ ก็จะทำให้เกิดปูนขาวอิสระได้เช่นกัน โดยปูนขาวอิสระที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากทำปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่าซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจากปูนขาว

(3) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide) วัตถุประสงค์ตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium Carbonate: $MgCO_3$) ซึ่งเมื่อถูกนำไปเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวเป็นโมเลกุลของสารแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide: MgO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO_2) โดยแมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด และส่วนที่เหลือเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว

(4) แอลคาไลออกไซด์ (Alkali Oxide) ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Sodium Oxide: Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium Oxide: K_2O) ซึ่งแอลคาไลออกไซด์ที่ประกอบอยู่ในปูนซีเมนต์นี้ แม้จะมีปริมาณน้อยมากเพียงร้อยละ 0.5 - 1.3 แต่ก็มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดผลเสียในกรณีที่แอลคาไลออกไซด์ทำปฏิกิริยากับมวลรวมที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาจะเกิดเป็นปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali Silica Reaction) ซึ่งจะก่อให้เกิดซิลิกาเจลขยายตัวและเกิดแรงดันขึ้น ทำให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการซ่อมแซมหรือแก้ไข กรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับแอลคาไล ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีแอลคาไลต่ำ²¹

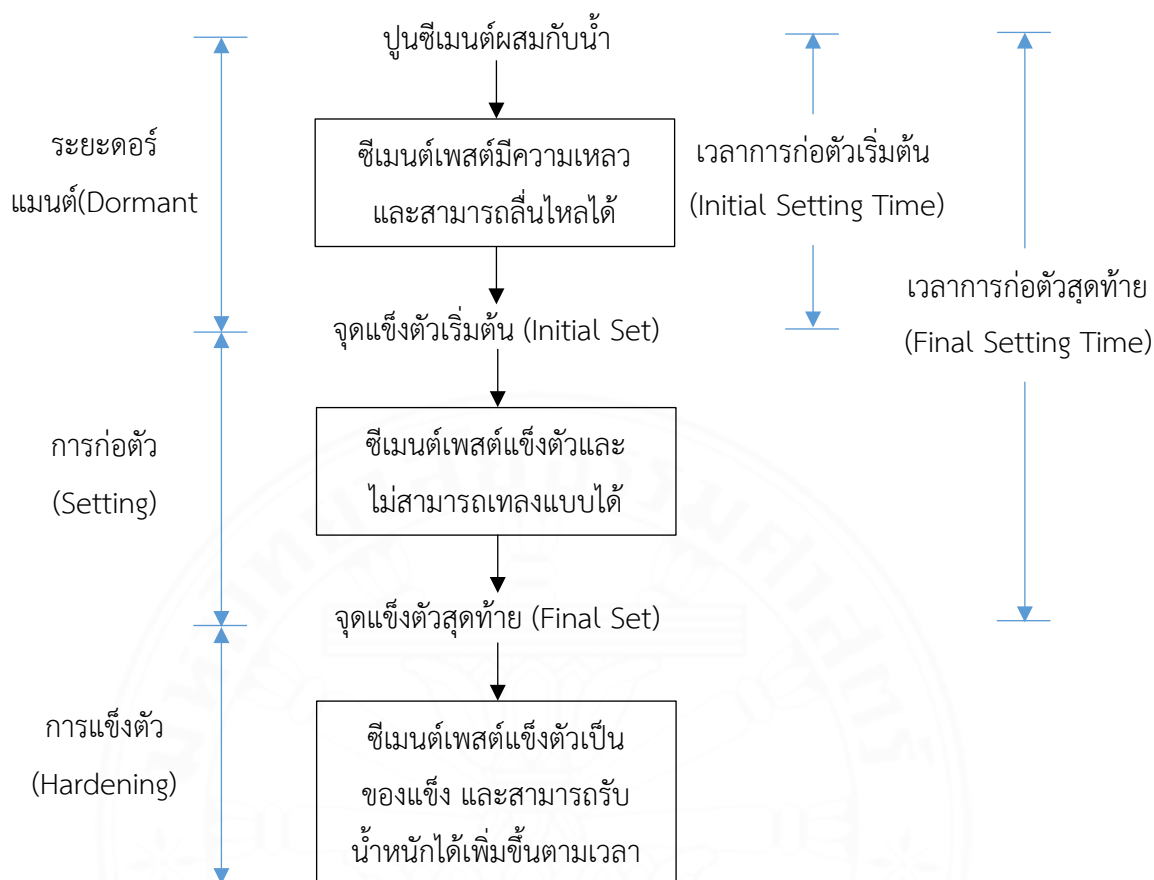
2.1.1.7 การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์

เมื่อปูนซีเมนต์ถูกผสมกับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เรียกช่วงเวลานี้ว่า “ระยะดอร์แมน (Dormant Period)” หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่มแข็งตัวแม้ว่าลักษณะจะยังไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้ จุดนี้เรียกว่า “จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set)” เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า “เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time)” การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ “จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)” และเวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวสุดท้าย เรียกว่า “เวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)” ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไปเรื่อย ๆ และสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการนี้เรียกว่า “การแข็งตัว (Hardening)” โดยขั้นตอนการก่อตัวไปจนถึงการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ แสดงดังภาพที่ 2.5²¹

2.1.2 มวลรวมละเอียด

แผนกวิชาการก่อสร้างและสาธารณูปโภค โรงเรียนทหารช่าง กรมทหารช่าง ให้นิยามของมวลรวมละเอียดไว้ว่า มวลรวมละเอียด หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือเป็นเม็ดที่สามารถลอดผ่านตระแกรงร้อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้ แต่ทั้งนี้จะต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มม. วัสดุมวลรวมที่เล็กกว่า 0.07 มม. เรียกว่า ฝุ่น (Silt หรือ Clay) วัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้กันทั่วไป คือทรายหยาบ²⁵

กรมโยธาธิการและผังเมือง ให้นิยามของมวลรวมละเอียดไว้ว่า มวลรวมละเอียด หมายถึง วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีขนาดตั้งแต่ 0.075 มิลลิเมตร ถึง 4.75 มิลลิเมตร²⁶



ภาพที่ 2.5 การก่อตัวของปูนซีเมนต์²¹

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้ให้นิยามของมวลรวมละเอียดไว้ว่า มวลผสมละเอียด (Fine Aggregate) หมายถึง มวลผสมที่ส่วนใหญ่ลอดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 4.75 มิลลิเมตรได้ และอาจมีบางส่วนที่หยาบผสมอยู่ได้บ้าง²⁷

ธวัชชัย คุณประคัลภ์ กล่าวว่า มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) คือ วัสดุผสม ที่มีขนาดเล็กกว่า 4.76 มิลลิเมตร หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทั้งนี้ต้องไม่เล็กกว่า 0.074 มิลลิเมตร หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200²⁸

จึงสามารถสรุปได้ว่า มวลรวมละเอียด หมายถึง วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ที่ส่วนใหญ่ลอดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 4.75 มิลลิเมตร และอาจมีบางส่วนที่หยาบผสมอยู่ได้บ้าง ซึ่ง มวลรวมมีปริมาตรคิดเป็นร้อยละ 70 - 80 ของปริมาตรส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้น มวลรวมจึงมีอิทธิพล ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์จากปูนซีเมนต์เป็นอย่างมาก

2.1.2.1 ขนาดคละ (Grading)

เป็นการกระจายขนาดต่าง ๆ ในอนุภาคมวลรวม ซึ่งถือเป็นสมบัติสำคัญสำหรับกำหนดปริมาณซีเมนต์เพสต์ วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดคละจะใช้ตะแกรงวางเรียงกันตามขนาดของช่องว่างตะแกรง จากขนาดใหญ่สุดด้านบนถึงขนาดเล็กสุดและมีถาดรองด้านล่าง แล้วทำการร่อน หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปสร้างกราฟ โดยข้อมูลขนาดคละที่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดจะต้องอยู่ในพื้นที่ของขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง²¹

มวลรวมที่มีขนาดคละดี (Well Graded) หมายถึง มวลรวมที่มีมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดขนาดต่าง ๆ กัน คละกันให้เหลือช่องว่างน้อยที่สุด คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดคละดีจะมีส่วนผสมที่เข้ากันสม่ำเสมอ สามารถเทเข้าแบบได้ง่าย ทำให้แน่นได้ง่าย การปาดแต่งผิวหน้า กำลังอัดและความทนทานเป็นไปตามข้อกำหนด²⁹

2.1.2.2 โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: F.M.)

เป็นตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม ทราบที่ใช้งานโดยทั่วไปควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3 - 3.2 ทราบที่มีค่า F.M. สูง (F.M. 3.2) คือ ทราบมีความหยาบมาก ส่วนทราบที่มีค่า F.M. ต่ำ (F.M. 2.3) จะมีความละเอียดมาก จึงจำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมากในการผสม เพื่อให้ได้ความสามารถในการเทที่เท่ากัน ส่วนค่า F.M. ที่เหมาะกับงานคอนกรีต คือ 2.7^{21,29}

โมดูลัสความละเอียด จึงเป็นค่าที่แสดงถึงความละเอียดของมวลรวมว่ามีมากน้อยเพียงใด (ค่าที่น้อยกว่าแสดงว่าละเอียดมากกว่า) สามารถหาได้จากการวิเคราะห์มวลรวมด้วยตะแกรงมาตรฐาน โดยนำค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐาน (Cumulative Percentage Retained) แต่ละตะแกรงมารวมกันแล้วหารด้วย 100 ซึ่งตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณหาโมดูลัสความละเอียด คือ เบอร์ 100, 50, 30, 16, 8, 4, 3/8", 1 1/2" และขนาดใหญ่กว่าในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ทั้งนี้ไม่รวมตะแกรงที่มีขนาดครึ่งหนึ่ง (Half Size) ของขนาดมาตรฐาน^{29,30}

ความหมายของโมดูลัสอีกอย่างหนึ่ง หมายถึง ขนาดตะแกรงเฉลี่ยทั้งหมดของร่วนนั้น ๆ โดยที่ตะแกรงเบอร์ 100 เป็นตะแกรงที่ 1 ตะแกรงเบอร์ 50 เป็นตะแกรงที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าหากว่าทราบชนิดหนึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.00 หมายความว่าทราบนั้นมีขนาดตะแกรงเฉลี่ยเป็นตะแกรงที่ 3 ซึ่งหมายถึงตะแกรงเบอร์ 30 นั่นเอง³⁰

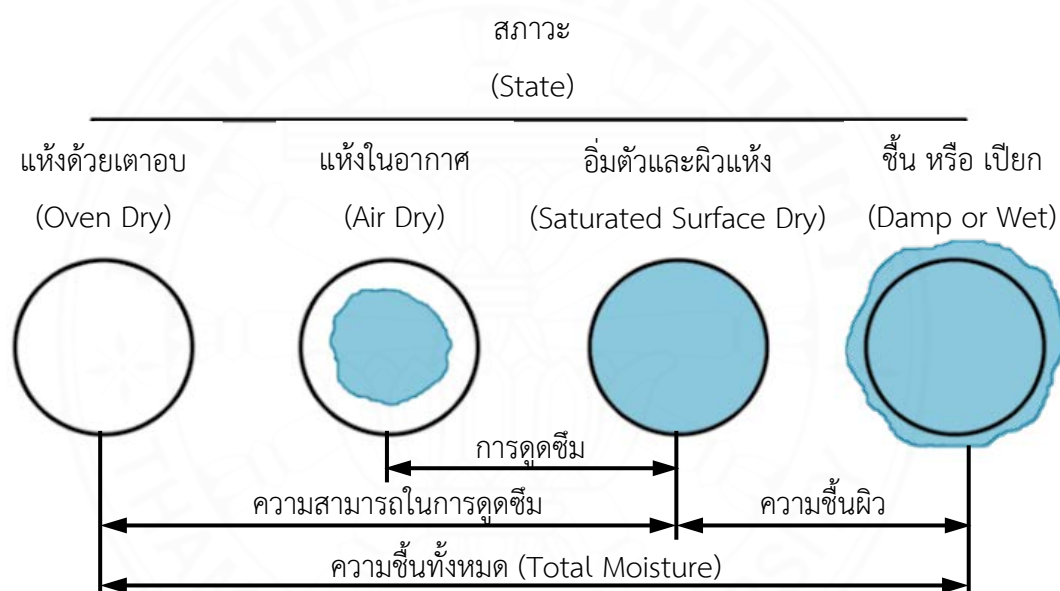
2.1.2.3 ปริมาณความชื้นและการดูดซึม (Moisture and Absorption)

มวลรวมมีรูพรุนบางส่วนที่ติดต่อกันกับผิวนอก ดังนั้นมวลรวมจึงสามารถดูดความชื้นได้ นอกจากนี้บางส่วนยังสามารถเกาะบริเวณผิวของมวลรวมได้ ซึ่งมวลรวมที่เก็บอยู่ในสภาพธรรมชาติจะมีความชื้นแตกต่างกันไป และในการคำนวณออกแบบส่วนผสมทุกครั้ง จะคำนวณ

โดยถือว่ามวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง แล้วจึงปรับปริมาณน้ำตามลักษณะความอิ่มตัวผิวแห้งนั้น เรียกว่า “ความจุในการดูดซึม” ผลต่างของความชื้นในลักษณะอิ่มตัวผิวแห้ง กับความชื้นในลักษณะแห้งด้วยอากาศ เรียกว่า “การดูดซึม” ²¹

โครงสร้างภายในก้อนวัสดุผสมประกอบด้วยเนื้อของแข็งและช่องว่าง ซึ่งช่องว่างเหล่านั้นจะดูดความชื้นเข้าไปเก็บไว้ได้ ดังนั้น การผสมคอนกรีตจึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติข้อนี้ด้วย เพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมให้ได้ความชื้นเหลวคงที่อันจะทำให้คอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอ

ปริมาณของน้ำในมวลรวมอาจอยู่ในสภาวะใดสภาวะหนึ่งใน 4 รูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 สภาวะความชื้นของมวลรวม^{30,31}

(1) แห้งด้วยเตาอบ (Oven Dry) ในสภาวะนี้มวลรวมจะสามารถดูดซึมความชื้นได้เต็มที่ เนื่องจากความชื้นในมวลรวมถูกขับออกด้วยความร้อนจากเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่

(2) แห้งในอากาศ (Air Dry) หรือแห้งที่ผิวแต่มีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างข้างใน ในปริมาณที่น้อยกว่าสภาวะแห้งและอิ่มตัว ดังนั้นมวลรวมอาจดูดซึมได้บ้าง

(3) อิ่มตัวและผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) เป็นสภาวะที่ดีที่สุดที่มวลรวมจะไม่คายน้ำออกหรือดูดน้ำจากคอนกรีต

(4) ชื้นหรือเปียก (Damp or Wet) เป็นสภาวะที่ปริมาณความชื้นสูงมากเกินไป โดยมีน้ำหุ้มก้อนมวลรวมอยู่ด้วย

ดังนั้น การทดสอบหาการดูดซึมของมวลรวม จึงมีประโยชน์สำหรับการหาปริมาณของน้ำที่มวลรวมคายออกมาหรือดูดซึมเข้าไปจากส่วนผสมของคอนกรีต ทำให้เราสามารถปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตให้เหมาะสมตามสภาวะของมวลรวมที่แท้จริง แต่ส่วนมากในการคำนวณออกแบบส่วนผสมทุกครั้งจะถือว่ามวลรวมอยู่ในสภาวะ “อิมตัว” ผิวแห้ง (SSD) แล้วจึงปรับปริมาณน้ำตามลักษณะของวัสดุที่เป็นจริง^{29,30}

2.1.2.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของมวลรวมต่อความหนาแน่นของน้ำ ความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสม และรูพรุนของก้อนวัสดุ ซึ่งมวลรวมละเอียดที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในประเทศไทยจะมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.65²¹ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมอาจแยกออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

(1) ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรของมวลรวม (ที่รวมทั้งรูพรุนทั้งหมดและช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน

(2) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) เป็นค่าแสดงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้มวลรวม (ที่รวมปริมาตรรูพรุนที่น้ำเข้าไม่สามารถซึมเข้าไปได้ (Impermeable Porous) และช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักของน้ำที่ปริมาตรเท่ากัน

(3) ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์ (Absolute or True Specific Gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวม (ที่รวมรูพรุนและช่องว่าง) ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์อาจหาได้โดยทำเป็นผงละเอียดที่ไม่มีช่องว่างอยู่เลย อย่างไรก็ตามความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์มิได้ประโยชน์ในงานคอนกรีต

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมขึ้นอยู่กับสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นน้ำหนักรวม เพื่อหาปริมาณมวลรวมสำหรับการผสมนั้น ๆ ตามปกติในการคำนวณปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต จะใช้ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) ของมวลรวมที่สภาวะอิมตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมโดยทั่ว ๆ ไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.40 - 2.90³⁰

2.1.2.5 หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)

หน่วยน้ำหนัก คือ น้ำหนักของมวลรวมในขนาดกะที่ต้องการต่อหน่วยปริมาตร หน่วยน้ำหนักจะบอกถึงปริมาตรและช่องว่างระหว่างมวลรวม ที่มีมวลรวมน้ำหนักหนึ่ง ๆ จะบรรจุลงได้ ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปนิยมใช้หน่วยเป็น กก./ลบ.ม. ดังนั้น หน่วยน้ำหนักของมวลรวมย่อมขึ้นอยู่กับ

กับความหนาแน่นของการบดอัดและสภาพความชื้น ซึ่งหน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่นิยมใช้ทั่วไปในประเทศไทยมีค่า 1,400 - 1,600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร^{21,30}

หน่วยน้ำหนักก็มีความสำคัญสำหรับการประมาณหาปริมาณวัสดุที่ใช้ และใช้สำหรับการคำนวณหาปริมาณของส่วนผสม โดยที่การหาปริมาณส่วนผสมนั้นใช้วิธีการตวงปริมาตร (Volumetric Basis) หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความชื้นที่มีอยู่ในมวลรวม เช่น หลวมหรืออัดแน่น เป็นต้น อย่างไรก็ตามการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมตามมาตรฐานนั้นจะหาในสภาพที่แห้งและอัดแน่น³⁰

2.1.2.6 สารอินทรีย์ที่เจือปนในมวลรวมละเอียด

สามารถทดสอบได้จากการแช่ทรายไว้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 3% แล้วทิ้งไว้ให้ครบ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเปรียบเทียบสีของสารละลายที่ได้กับแผ่นกระจกสีมาตรฐาน ถ้าสีของสารละลายเข้มกว่าสีมาตรฐานเบอร์ 3 จะถือว่าทรายนั้นมีสารอินทรีย์เจือปนในปริมาณมาก²¹

2.1.3 น้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับงานคอนกรีต คุณภาพและปริมาณของน้ำที่ผสมคอนกรีตเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีต น้ำที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมควรสะอาด ใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และสามารถดื่มได้ นอกจากนี้น้ำผสมคอนกรีตจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีต ดังนั้นการเลือกน้ำที่มีคุณภาพจึงจำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ²¹

2.1.3.1 น้ำสำหรับงานคอนกรีต

น้ำ ถือเป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับงานคอนกรีต โดยมีบทบาทในงานคอนกรีตจำแนกได้เป็น 3 ประการ ได้แก่

(1) น้ำผสมคอนกรีต ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อันมีผลต่อความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสด กำลัง และความคงทนของคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

ส่วนผสมและความพรุนของก้อนมวลรวม ความชื้นอาจทำให้ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมเปลี่ยนแปลงไปได้ ความถ่วงจำเพาะนี้ใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาปริมาณส่วนผสมของหินและทรายในคอนกรีตโดยใช้เป็นตัวเปลี่ยนน้ำหนักที่กำหนดให้ของมวลรวมเป็นปริมาตรเนื้อแท้ หรือเปลี่ยนปริมาตรเนื้อแท้ให้เป็น

(2) น้ำล้างมวลรวม ใช้ล้างมวลรวมที่สกปรกให้สะอาดพอที่จะนำมวลรวมมาใช้ผสมทำคอนกรีตได้

(3) น้ำบ่มคอนกรีต ใช้บ่มคอนกรีตให้มีกำลังเพิ่มขึ้นตามที่ต้องการและยังเป็นการป้องกันปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการสูญเสียน้ำของคอนกรีต²¹

2.1.3.2 ประเภทของน้ำผสมคอนกรีต

โดยทั่วไปความเหมาะสมของน้ำสำหรับผสมคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำชนิดนั้น โดยอาจจำแนกประเภทของน้ำได้ ดังนี้

(1) น้ำที่ดื่มได้ มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาผสมทำคอนกรีต โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการทดสอบ

(2) น้ำหมุนเวียนจากกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมคอนกรีต อาจมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการผสมทำคอนกรีต แต่ควรทดสอบคุณภาพน้ำก่อน

(3) น้ำจากแหล่งน้ำใต้ดิน (น้ำบาดาล) อาจมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการผสมทำคอนกรีต แต่ควรทดสอบคุณภาพน้ำก่อน

(4) น้ำจากแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติ อาจมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการผสมทำคอนกรีต แต่ควรทดสอบคุณภาพน้ำก่อน

(5) น้ำทะเล น้ำเค็ม น้ำกร่อย ไม่เหมาะสำหรับการนำมาผสมทำคอนกรีต เพราะมีคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งเป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมและคอนกรีต เจือปนอยู่มาก

(6) น้ำเสีย ไม่เหมาะสำหรับการผสมทำคอนกรีต เพราะมักมีสารซัลเฟต ซึ่งเป็นอันตรายต่อน้ำคอนกรีต เจือปนอยู่มาก²¹

2.1.3.3 คุณภาพของน้ำผสมคอนกรีต

การทดสอบคุณภาพของน้ำผสมคอนกรีต ทำได้โดยทดสอบเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดระหว่างน้ำตัวอย่างกับน้ำที่ใช้เป็นตัวแปรควบคุม สำหรับกรณีการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ให้ใช้น้ำกลั่นเป็นน้ำควบคุม¹³

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้ประกาศข้อกำหนดคุณภาพของน้ำผสมคอนกรีตจากผลการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ ดังนี้

(1) ค่าเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้น้ำที่นำมาทดสอบต้องแตกต่างจากตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้น้ำควบคุมไม่เกิน 30 นาที³²

(2) ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้น้ำที่นำมาทดสอบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 90% ของกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้น้ำควบคุม³³

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ได้มีข้อกำหนดคุณภาพน้ำผสมคอนกรีตจากผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต ดังนี้

(1) ค่าเวลาการก่อดัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้น้ำที่นำมาทดสอบต้องไม่เร็วเกินกว่า 60 นาที หรือไม่ช้าเกินกว่า 90 นาที เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้น้ำควบคุม

(2) ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้น้ำที่นำมาทดสอบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 90% ของกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้น้ำควบคุม³⁴

ถ้าผลการทดสอบที่ได้ไม่เป็นไปตามค่าที่มาตรฐานกำหนด แสดงว่าน้ำนั้น มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต อาจแก้ไขโดยการเปลี่ยนแหล่งน้ำที่จะนำมาผสมคอนกรีต หรือถ้าผลการทดสอบแสดงว่าค่ากำลังอัดของตัวอย่างไม่ต่ำกว่า 80% ของค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างที่ใช้น้ำควบคุม อาจใช้น้ำนี้แต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมคอนกรีต¹³

2.1.3.4 คุณภาพของน้ำล้างมวลรวม

น้ำล้างมวลรวมควรมีคุณสมบัติเหมือนน้ำผสมคอนกรีต เพราะน้ำนี้จะไปเคลือบอยู่บนผิวของมวลรวมและสามารถเข้าไปทำอันตรายต่อคอนกรีตได้ ข้อควรระวัง คือ ต้องคอยเปลี่ยนน้ำที่ใช้ล้างมวลรวมอย่างสม่ำเสมอ¹³

2.1.3.5 คุณภาพของน้ำบ่มคอนกรีต

น้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตไม่จำเป็นต้องมีคุณภาพสูงเท่ากับน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ควรมีสิ่งเจือปนในน้ำบ่มคอนกรีตในปริมาณมากพอที่จะทำอันตรายต่อคอนกรีต เช่น สารจำพวกซัลเฟต, สารที่ทำให้เกิดคราบสกปรก, น้ำมัน, กรด และเกลือ เป็นต้น¹³

2.1.4 ขยะอิเล็กทรอนิกส์

อรรวรรณ พุพิสุทธิ์ และศุภสิพร แสงกระจ่าง กล่าวว่า ขยะอิเล็กทรอนิกส์ คือ ขยะที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ ดีวีดี โทรศัพท์มือถือ จอมอนิเตอร์ เครื่องเล่นซีดี รวมถึงแบตเตอรี่ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เป็นต้น ประกอบไปด้วยสารพิษอันตรายหลายชนิด เมื่อเลิกใช้แล้วจะถูกนำไปรีไซเคิล ฝังกลบ หรือเผาทำลาย ซึ่งอาจส่งผลให้สารพิษเหล่านี้รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม³⁵

สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร กล่าวว่า ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Waste หรือ E - Waste) หรือซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electrical and Electronic Equipment: WEEE) คือ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว ไม่เป็นที่ต้องการแล้ว ล้าสมัย และไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกต่อไป³⁶

กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข กล่าวว่า ขยะอิเล็กทรอนิกส์ คือ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่หมดอายุการใช้งานหรือไม่ต้องการใช้งานอีกต่อไป เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ เครื่องถ่ายเอกสาร เครื่องพิมพ์ ตู้เย็น และเครื่องซักผ้า เป็นต้น³⁷

สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย กล่าวว่า ขยะอิเล็กทรอนิกส์ คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่เป็นที่ต้องการอีกต่อไป ล้าสมัย หรือหมดอายุการใช้งาน ขยะอิเล็กทรอนิกส์จัดเป็นวัตถุอันตรายเนื่องจากชิ้นส่วนต่างๆ มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ ซึ่งหากได้รับการจัดการไม่เหมาะสมและเกิดการรั่วไหลปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพ³⁸

ซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือที่เรียกกันว่า WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) หมายถึง ซากเครื่องใช้ หรืออุปกรณ์ ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กในการทำงานที่ไม่ได้ตามมาตรฐาน (Off - Spec) หรือหมดอายุการใช้งานหรือล้าสมัย³⁹

จึงอาจสรุปได้ว่า ขยะอิเล็กทรอนิกส์ คือ ขยะที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่หมดอายุการใช้งาน ล้าสมัย หรือไม่ต้องการใช้งานอีก และไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก ซึ่งจัดเป็นวัตถุอันตราย เนื่องจากชิ้นส่วนต่าง ๆ มีโลหะหนักและสารพิษอันตรายหลายชนิดเป็นส่วนประกอบ เมื่อเลิกใช้แล้วจะถูกนำไปรีไซเคิล ฝังกลบหรือเผาทำลาย หากได้รับการจัดการไม่เหมาะสมและเกิดการรั่วไหลปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

2.1.4.1 ประเภทของขยะอิเล็กทรอนิกส์

สหภาพยุโรปได้จัดทำระเบียบที่มีชื่อว่า Waste from Electronic and Electronic Equipment, WEEE ซึ่งถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการจัดการ และควบคุมขยะอิเล็กทรอนิกส์ โดยครอบคลุมถึงการจัดการในหลาย ๆ ส่วน เช่น การออกแบบผลิตภัณฑ์ การจัดการบำบัดการนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น ขยะอิเล็กทรอนิกส์ตามความหมายของ WEEE แบ่งเป็น 10 ประเภท ดังนี้

- (1) เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในครัวเรือนขนาดใหญ่ เช่น ตู้เย็น เครื่องทำความเย็น เครื่องซักผ้าเครื่องล้างจาน เป็นต้น
- (2) เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในครัวเรือนขนาดเล็ก เช่น เครื่องดูดฝุ่น เตารีด เครื่องปั่นขนมปัง มีดโกนไฟฟ้า เป็นต้น
- (3) อุปกรณ์ไอที เช่น คอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊ก เครื่องสแกน เครื่องโทรสาร โทรศัพท์บ้าน โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น
- (4) อุปกรณ์ให้แสงสว่าง เช่น หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น
- (5) เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้บริโภค เช่น วิทยุ โทรทัศน์ กล้อง เครื่องบันทึกวีดีโอ เครื่องดนตรีที่ใช้ไฟฟ้า เป็นต้น
- (6) อุปกรณ์เครื่องมือการแพทย์

- (7) เครื่องมือวัดหรือควบคุมต่าง ๆ เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น
- (8) ของเล่น เช่น เกมสีกด ของเล่นที่ใช้ไฟฟ้า เป็นต้น
- (9) เครื่องมือไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สว่าน เลื่อยไฟฟ้า เป็นต้น
- (10) เครื่องจำหน่ายสินค้าอัตโนมัติ เช่น เครื่องจำหน่ายเครื่องดื่ม เป็นต้น³⁹

2.1.4.2 แหล่งกำเนิดขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

(1) ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Waste) ซึ่งมีการปลดปล่อยสารเคมี หรือเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต และผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ โดยบางส่วนจะถูกนำไปรีไซเคิลและบางส่วนจะนำไปทำลายทิ้ง

(2) ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการใช้งานในครัวเรือน บริษัท หรือห้างร้านต่าง ๆ (Household Waste) ซึ่งเป็นขยะที่เกิดจากการใช้งานผลิตภัณฑ์จนหมดอายุ หรืออุปกรณ์ชำรุดเสียหายจนไม่สามารถแก้ไขให้กลับมาใช้งานได้ดังเดิม³⁷

(3) ขยะจากต่างประเทศ (Import Waste) หมายถึง ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการนำเข้ามาจากต่างประเทศ ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535⁴⁰

2.1.4.3 องค์ประกอบของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

องค์ประกอบหลักโดยทั่วไปของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า (ตารางที่ 2.5) ประกอบด้วยธาตุมากกว่า 60 ธาตุ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็นวัสดุหลัก 2 ประเภท ดังนี้

(1) ส่วนที่เป็นโลหะ เช่น แพลเลเดียม ทองแดง เหล็ก นิกเกิล ตะกั่ว เงิน ดีบุก ทอง บิสมัท พลวง และแทนทาลัม เป็นต้น มีปริมาณร้อยละ 30 - 40

(2) ส่วนที่เป็นอโลหะ มีปริมาณร้อยละ 60 - 70 สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ เรซินอินทรีย์และเซรามิก ร้อยละ 30 ออกไซด์ของวัสดุทนไฟหรือเส้นใยแก้ว ร้อยละ 30

เมื่อจำแนกองค์ประกอบทางเคมี โดยพิจารณาจากธาตุองค์ประกอบหลักของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์พบว่าประกอบด้วยธาตุจำนวน 13 ธาตุ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และการศึกษาองค์ประกอบหลักทางเคมีของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยการนำไปบดและวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีจะให้ข้อมูลที่ชัดเจนขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ทั้งนี้ องค์ประกอบทางเคมีของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการออกแบบ อายุ และการใช้งาน^{41,42,43}

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบหลักโดยทั่วไปของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์^[41]

วัสดุองค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ส่วนโลหะ เช่น เส้นใยพอลิเมอร์ เป็นต้น	70
ทองแดง	16
โลหะบัดกรี	4
เหล็ก, เฟอร์ไรท์	3
นิกเกิล	2
เงิน	0.05
ทอง	0.03
แพลเลเดียม และโลหะอื่น	0.01

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมี (ธาตุองค์ประกอบหลัก) ของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์^[42]

วัสดุองค์ประกอบ	ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณธาตุ	หน่วยนับ
เรซินอินทรีย์ (Organic Epoxy Resin)	C	18.1	Wt.%
	H	1.8	Wt.%
	N	0.32	Wt.%
	Br	5.07	Wt.%
	Sb	0.45	Wt.%
เส้นใยแก้ว (Inorganic Glass Fiber)		37.6	Wt.%
โลหะ (Metallic Elements)	Cu	14.6	Wt.%
	Fe	4.79	Wt.%
	Sn	5.62	Wt.%
	Ni	1.65	Wt.%
	Pb	2.96	Wt.%
	Au	205	ppm.
	Ag	450	ppm.
Pd	220	ppm.	

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบหลักทางเคมีของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากการวิเคราะห์โดยการบดตัวอย่างให้เป็นผงและนำไปทดสอบด้วยวิธีการละลาย^[43]

วัสดุองค์ประกอบ	ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณธาตุ	หน่วยนับ
โลหะ (Max. 40%)	Cu	20	Wt.%
	Al	2	Wt.%
	Pb	2	Wt.%
	Zn	1	Wt.%
	Ni	2	Wt.%
	Fe	8	Wt.%
	Sn	4	Wt.%
	Sb	0.4	Wt.%
	Au	1000	ppm.
	Pt		ppm.
	Ag	2000	ppm.
	Pd	50	ppm.
เซรามิก (Max. 30%)	SiO ₂	15	Wt.%
	Al ₂ O ₃	6	Wt.%
	Alkaline and Alkali Earth Oxide	6	Wt.%
	Titanates, Mica, etc.	3	Wt.%
พลาสติก (Max. 30%)	Polyethylene	9.9	Wt.%
	Polypropylene	4.8	Wt.%
	Polyester	4.8	Wt.%
	Epoxies	4.8	Wt.%
	Polyvinyl-Chloride	2.4	Wt.%
	Polytetra-Fluoroethane	2.4	Wt.%
	Nylon	0.9	Wt.%

2.1.4.4 การแบ่งเกรดของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์

สมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อเมริกา (National Electrical Manufacturers Association: NEMA) ได้แบ่งชนิดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไว้ถึง 30 ชนิด แต่โดยทั่วไปเราจะพบประมาณ 10 ชนิด ดังต่อไปนี้

(1) เกรด XXX PC แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ ทำขึ้นจากกระดาษยัดรวมตัวกันด้วยฟีนอลิกเรซิน เป็นชนิดที่ใช้งานทั่ว ๆ ไป ทนความชื้นได้ไม่สูงนัก มีความต้านทานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากสารชนิดอื่น สามารถใช้กับงานความถี่สูงได้ถึงย่านความถี่วิทยุออกแบบมาเพื่อให้ตัดเจาะได้ที่อุณหภูมิต่ำ

(2) เกรด FR-2 ทำจากฟีนอลิก ลักษณะโดยทั่ว ๆ ไปคล้ายกับเกรด XXX PC แต่ออกแบบมาให้ติดไฟได้ยากกว่า ทำให้สามารถนำไปใช้กับงานที่อุณหภูมิสูงกว่าได้

(3) เกรด FR-3 แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ทำจากกระดาษบาง ๆ ยัดติดกันด้วยอีพ็อกซีเรซิน มีความแข็งแรงสูง สามารถใช้กับงานที่แรงดันสูงและความชื้นสูงได้ดีกว่าเกรด XXX PC และยังออกแบบมาให้ตัดเจาะได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง

(4) เกรด FR-4 พัฒนาขึ้นมาจากเกรด FR-3 ทำจากใยแก้วยัดด้วยอีพ็อกซีเรซิน สามารถใช้ได้กับงานหลายประเภท ทนต่อความชื้นและอุณหภูมิสูง และสามารถใช้งานกับแรงดันสูงได้ดีกว่า เกรด XXX PC, FR-2 และ FR-3

(5) เกรด FR-5 พัฒนาขึ้นจากเกรด FR-4 โดยยังคงใช้เส้นใยแก้วยัดด้วยอีพ็อกซีเรซิน แต่มีความแข็งแรงสูงกว่าทั้งทางกลและทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังติดไฟได้ยากอีกด้วย

(6) เกรด FR-6 ทำจากแผ่นใยแก้วบาง ๆ ยัดรวมกันด้วยเทอร์โมเซตติงโพลีเอสเตอร์ มีค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกต่ำ มีความแข็งแรงต่ำ แต่ได้ปรับปรุงคุณสมบัติในด้านการทนต่อความชื้น จึงสามารถใช้กับงานที่มีความชื้นสูงได้

(7) เกรด CEM1 แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ใช้เซลลูโลสเป็นแกนกลาง มีใยแก้วทอเป็นผิวสองด้าน ยัดติดกันด้วยอีพ็อกซีเรซิน ทำให้ตัดเจาะได้ง่าย แต่ทนความชื้นได้ต่ำกว่าเกรด FR-4, FR-5 และ FR-6

(8) เกรด G-10 เป็นแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส มีความแข็งแรงทางกลสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม ลักษณะทั่วไปคล้ายกับเกรด FR-4 แต่ติดไฟยากกว่าแผ่นวงจรทั้งหมดที่กล่าวมานั้น ยังใช้วัสดุแบบเดิมทำเป็นแผ่นฐาน ซึ่งยังมีแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สารที่พัฒนาขึ้นมาใหม่เป็นแผ่นฐาน ได้แก่ เกรด G-30 และเกรด G-60

(9) เกรด G-30 ใช้ใยแก้วทอยึดตัวด้วยโพลีเอไมด์เรซินมีความคงตัว และสามารถต้านทานต่อความชื้นสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม เหมาะสำหรับการนำมาใช้ทำแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดมัลติเลเยอร์

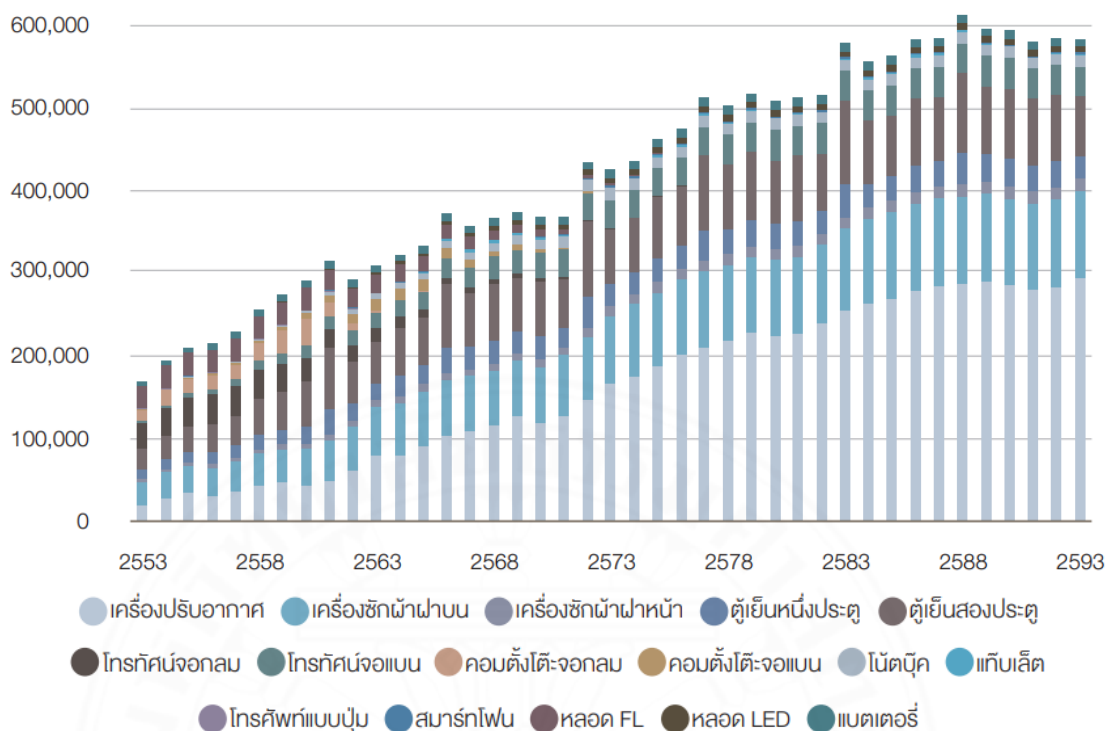
(10) เกรด G-60 เป็นแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดพิเศษที่ใช้สารโพลีซิลิโคนเทอร์โมพลาสติกทำเป็นแผ่นฐาน เนื่องจากมีค่าความสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำ สามารถควบคุมคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกได้ง่าย นิยมใช้ในงานความถี่สูงมาก ๆ เป็นกิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) สำหรับไมโครชิป เป็นต้น มีคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกและความสูญเสียในไดอิเล็กตริกของสารโพลีซิลิโคนที่ใช้กับย่านความถี่ไมโครเวฟ⁴⁴

2.1.4.5 การคาดการณ์ปริมาณซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์

การศึกษาเพื่อคาดการณ์ปริมาณซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ จำนวน 10 ประเภท ประกอบด้วย เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้า ตู้เย็น โทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊ก แท็บเล็ต โทรศัพท์มือถือ (มือถือฟลูออเรสเซนต์ และมือถือแอลอีดี) และแบตเตอรี่ ในระหว่างปี พ.ศ. 2553 - 2593 พบว่า ในปี พ.ศ. 2562 คาดว่าจะมีปริมาณซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์โดยรวมเกิดขึ้นประมาณ 3 แสนตันต่อปี และจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า คือ ประมาณ 6 แสนตันต่อปีในอีกประมาณ 25 ปีข้างหน้า ดังแสดงในภาพที่ 2.7

แนวโน้มของชนิดและปริมาณซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ จะมีการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีไปสู่ผลิตภัณฑ์ชนิดที่มีน้ำหนักเบาขึ้น เช่น การเปลี่ยนแปลงจากคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะแบบจอภาพ CRT (จอกกลม) ไปเป็นคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะแบบจอภาพ LCD/LED (จอแบน) โน้ตบุ๊ก และแท็บเล็ต ทำให้ปริมาณซากคอมพิวเตอร์แบบจอภาพ CRT มีแนวโน้มลดลง แต่คอมพิวเตอร์แบบจอภาพ LCD/LED โน้ตบุ๊ก และแท็บเล็ตมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในภาพรวมจะเห็นว่าปริมาณซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากประเทศไทยยังเป็นตลาดที่ยังไม่อิ่มตัวสำหรับหลายผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะเครื่องปรับอากาศ

นอกจากนี้ยังพบว่าซากเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่จำนวน 4 ประเภท (Big 4) ได้แก่ เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้า ตู้เย็น และโทรทัศน์ มีโอกาสที่จะถูกขายให้กับร้านรับซื้อของเก่าสูงถึงร้อยละ 50 - 78 ในขณะที่ซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น โทรศัพท์มือถือ และอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉายที่มีขนาดเล็ก มีโอกาสสูงที่จะถูกทิ้งปะปนไปกับขยะมูลฝอยทั่วไป⁴⁵

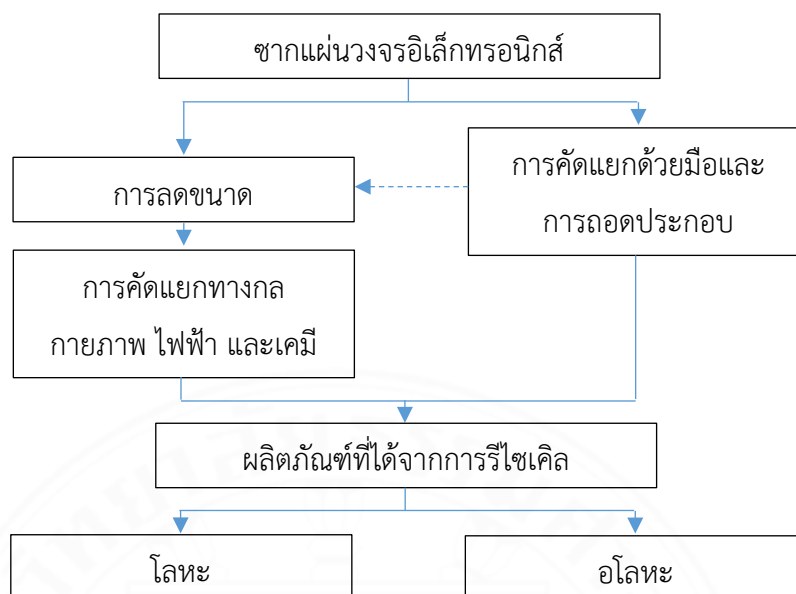


ภาพที่ 2.7 ปริมาณซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 10 ประเภท ระหว่างปี 2553 - 2593⁴⁵

2.1.4.6 การรีไซเคิลซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในปัจจุบันการจัดการซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะมีกระบวนการคัดแยกเอาโลหะที่มีค่าออกก่อน โดยโรงงานอุตสาหกรรมประเภท 105 และ 106 คือ โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกหรือฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียจากโรงงานมาผลิตเป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรมตามลำดับ⁷ กระบวนการรีไซเคิลซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เริ่มต้นจากการคัดแยกด้วยมือและการถอดชิ้นส่วน หลังจากนั้นถูกนำไปลดขนาดด้วยเครื่องจักร และการคัดแยกส่วนที่เป็นโลหะ เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ แผนผังดังแสดงในภาพที่ 2.8

(1) การถอดแยกชิ้นส่วน (Disassembly) เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งจะถอดแยกชิ้นส่วนทั้งหมดด้วยมือ เพื่อแยกชิ้นส่วนที่มีมูลค่าและคัมค่าที่จะนำไปใช้ซ้ำได้ โดยใช้เครื่องมือต่างๆ ช่วย เช่น สิว ไขควง คีม เป็นต้น ใช้เวลาและต้นทุนไม่มาก แต่สามารถแยกชิ้นส่วนที่มีมูลค่าไปใช้ซ้ำได้โดยตรง



ภาพที่ 2.8 กระบวนการรีไซเคิลซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์⁴⁶

(2) การลดขนาด (Resize) ของวัตถุดิบโดยใช้วิธีการตัด การทุบ การบด เพื่อให้อนุภาคของแร่ธาตุในวัตถุดิบแยกออกจากกัน ซึ่งอาจใช้เครื่อง Shredder ในการตัดย่อยซากแผ่นวงจรให้มีขนาดเล็กลง แต่เป็นการตัดแบบหยาบจะได้ขนาดที่ยังไม่เล็กมาก ส่วนเครื่อง Hammer Mill และ Rod Mill จะใช้ย่อยซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลงจนมีลักษณะเป็นฝุ่นผง

(3) การแยกแร่ธาตุที่มีค่าออกจากกัน โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพของแร่ธาตุแต่ละชนิด เช่น เครื่อง Magnetic Separator, เครื่อง Shaking Table และ เครื่อง Centrifuges เป็นต้น

(4) การแยกแร่ธาตุโดยใช้คุณสมบัติการนำไฟฟ้า คือ การตัดแยกวัสดุที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าหรือต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการตัดแยกอนุภาคของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียด

(5) การแยกแร่ธาตุที่มีค่าออกจากกัน โดยอาศัยวิธีการทางเคมี เช่น วิธีการชะละลาย หรือการใช้วิธีไฟฟ้าเคมี เป็นต้น วิธีการนี้จะทำให้ได้ธาตุที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก⁴⁶

2.1.4.7 สารอันตรายในขยะอิเล็กทรอนิกส์

ประเด็นที่น่าห่วงเกี่ยวกับขยะอิเล็กทรอนิกส์ นอกเหนือจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก็คือสารอันตรายและโลหะหนักหลากหลายชนิดที่อยู่ในชิ้นส่วนของขยะอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเมื่อมีการจัดการอย่างไม่ถูกต้องจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและ

สิ่งแวดล้อม ชนิดของสารอันตรายและโลหะหนักที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งพบว่ามีจำนวนมากกว่า 20 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.8⁴⁷

ตารางที่ 2.8 โลหะหนักและสารอันตรายในขยะอิเล็กทรอนิกส์^[47]

โลหะหนักหรือสารอันตราย	ความสัมพันธ์หรือองค์ประกอบ ในขยะอิเล็กทรอนิกส์
สารหน่วงการติดไฟกลุ่มโบรมีน (สารมลพิษที่ตกค้างยาวนาน) (Polybrominated Diphenyl Ethers, PBDEs; Polybrominated Biphenyls, PBBs; Tetrabromobisphenol-A, TBBPA)	สารหน่วงการติดไฟ (Flame Retardants) ที่ผสมในพลาสติก
โพลีคลอริเนตไบฟีนิล (Polychlorinated Biphenyls, PCBs)	คอนเดนเซอร์ (เครื่องควบแน่น), หม้อแปลงไฟฟ้า
คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon, CFC)	สารทำความเย็น น้ำมันในตู้เย็นและ เครื่องปรับอากาศ โฟมฉนวนกันความร้อนใน ตู้เย็น (รุ่นเก่า)
โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)	เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของ สารอินทรีย์
ไดออกซินและฟิวแรน (Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins; PCDDs, Polychlorinated Dibenzofurans, PCDFs)	เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ชิ้นส่วนพลาสติกที่ มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ
อะเมริซิยม (Americium, Am)	เครื่องตรวจจับควันชนิดไอออนไนเซชัน
พลวง (Antimony, Sb)	สารหน่วงการติดไฟ, พลาสติก, แผ่นวงจร, จอ CRT, จอ LCD, ชิ้นส่วนในคอมพิวเตอร์ โทรทัศน์และโทรศัพท์มือถือ
สารหนู (Arsenic, As)	แผ่นวงจร, จอ CRT, จอ LCD, จอพลาสมา, วัสดุในการโตปสำหรับซิลิคอน
แบเรียม (Barium, Ba)	จอ CRT, จอ LCD, จอพลาสมา

ตารางที่ 2.8 โลหะหนักและสารอันตรายในขยะอิเล็กทรอนิกส์^[47] (ต่อ)

โลหะหนักหรือสารอันตราย	ความสัมพันธ์หรือองค์ประกอบ ในขยะอิเล็กทรอนิกส์
แบริลเลียม (Beryllium, Be)	วงจรเรียงกระแสที่ควบคุมด้วยซิลิคอน (Siliconcontrolled Rectifiers), แผ่นวงจร, สายไฟ
แคดเมียม (Cadmium, Cd)	แบตเตอรี่, แผ่นวงจร, ชิ้นส่วนพลาสติก, โทนเนอร์
โครเมียม (Chromium, Cr)	คอมพิวเตอร์, แผ่นวงจร, จอ CRT, จอ LCD, จอพลาสมา
ทองแดง (Copper, Cu)	ระบบสายไฟ, แผ่นวงจร, จอ CRT, โรเตอร์ หรือ ตัวหมุนในมอเตอร์
แกลเลียม (Gallium, Ga)	สารกึ่งตัวนำ
อินเดียม (Indium, In)	จอ LCD, แผ่นวงจร
ตะกั่ว (Lead, Pb)	แบตเตอรี่, จอ CRT, จอ LCD, แผ่นวงจร, โลหะบัดกรี, ฮาร์ดดิสก์
ลิเทียม (Lithium, Li)	แบตเตอรี่
ปรอท (Mercury, Hg)	หลอดฟลูออเรสเซนต์, แบตเตอรี่, สวิตช์, จอ LCD, แผ่นวงจร
นิกเกิล (Nickel, Ni)	แบตเตอรี่, งานเล่นแผ่นซีดี, ฮาร์ดดิสก์, จอ LCD, แผ่นวงจร
ซีเลเนียม (Selenium, Se)	แผ่นวงจร, วงจรเรียงกระแส (Rectifier)
เงิน (Silver, Ag)	จอ LCD, แผ่นวงจร, โลหะบัดกรี, สวิตช์, ระบบสายไฟ
ดีบุก (Tin, Sn)	โลหะบัดกรี, จอ LCD
สังกะสี (Zinc, Zn)	ที่วางแผ่นซีดี, จอ CRT, ฮาร์ดดิสก์, แผ่นวงจร, จอพลาสมา
แร่ธาตุหายาก (Rare Earth Elements)	จอ CRT, แผ่นวงจร

จากการวิเคราะห์ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะ โดยวิธีการ ICP-MS พบว่ามีปริมาณของโลหะทองแดงมากที่สุด รองลงมา คือ เงิน เหล็ก ตะกั่ว และปรอท ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.9⁴⁸

ตารางที่ 2.9 ปริมาณธาตุโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์^[48]

ลำดับ	ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณ (mg/g)
1	Al	2.907
2	Ca	1.384
3	Cu	97.663
4	Cd	0.211
5	Fe	18.309
6	Ni	1.231
7	Zn	3.226
8	Ag	25.800
9	Pb	18.262
10	Hg	17.560

2.1.4.8 ผลกระทบของสารอันตรายในขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่อสุขภาพ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะมีโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม โครเมียม เป็นส่วนประกอบ โลหะหนักประเภทนี้สลายตัวยาก หากได้รับการจัดการที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม และเกิดการสะสมส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ ดังนี้

(1) ตะกั่ว (Lead) มีความเป็นพิษสูงต่อคนและสัตว์ การได้รับพิษตะกั่วสะสมเรื้อรังจะส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง และสมอง ทำให้มีอาการหงุดหงิดง่าย กระวนกระวาย ซึม เวียนศีรษะ เดินเซหกล้มง่าย นอนไม่หลับ บุคลิกภาพเปลี่ยนแปลงความจำเสื่อม ในรายที่เป็นรุนแรงอาจมีอาการสั่นเวลาเคลื่อนไหว ชัก หมดสติ และเสียชีวิตได้ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนปลายและกล้ามเนื้อ ระบบทางเดินอาหาร ระบบโลหิต ระบบทางเดินปัสสาวะ ระบบโครงสร้างโดยตะกั่วจะไปสะสมที่กระดูก ระบบสืบพันธุ์ นอกจากนี้แล้วสารตะกั่วถูกจัดว่าเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งกลุ่ม 2A

(2) โปรอท (Mercury) เป็นโลหะหนักที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ สามารถระเหยกลายเป็นไอและแขวนลอยอยู่ในอากาศได้ และจะตกตะกอนลงสู่ดินและแหล่งน้ำได้เมื่อฝนตก สารโปรอทนั้นเมื่ออยู่ในดินจะถูกเปลี่ยนเป็น Methylmercury โดยแบคทีเรียในดิน ซึ่งเป็นรูปที่สามารถสะสมอยู่ในไขมันในร่างกายได้เป็นเวลานาน พิษของโปรอทมีตั้งแต่ขั้นเล็กน้อยจนถึงรุนแรงและอาจเสียชีวิต โดยอาจทำให้เกิดอาการใจสั่น นอนไม่หลับ ปวดศีรษะสายตาดำพร่ามัว เดินเซ พูดจาไม่ชัด อ่อนเพลีย และอาจทำลายระบบประสาท ส่งผลต่อการเรียนรู้ กระบวนการคิด ความจำ สมาธิ และการสื่อสาร การสะสมของสารชนิดนี้ในร่างกายในปริมาณสูงจะส่งผลต่อไต ระบบการหายใจ และอาจถึงขั้นเสียชีวิต เราสามารถได้รับพิษจากโปรอทผ่านทางห่วงโซ่อาหารโดยการรับประทานปลาที่มีโปรอทสะสมอยู่ภายใน ในกรณีสตรีมีครรภ์รับประทานปลาที่มีการสะสมของสารโปรอทอาจส่งผลกระทบต่อพัฒนาการของทารกในครรภ์ และยังพบว่าโปรอทจะถูกสะสมอยู่ในน้ำนมแม่ด้วย

(3) แคดเมียม (Cadmium) สามารถสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมและมีความเป็นพิษสูง พิษอย่างเฉียบพลันเกิดจากการสูดไอของโลหะแคดเมียมเข้าไปทำให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ ระยะยาวแคดเมียมจะไปสะสมที่กระดูก ทำให้กระดูกผุ เมื่อได้รับแคดเมียมสะสมมาก ๆ จะสังเกตเห็นวงสีเหลืองที่โคนของซี่ฟัน ซึ่งจะขยายขึ้นไปเรื่อย ๆ จนอาจเต็มซี่ ถ้าขนาดของวงยิ่งกว้างและสียิ่งเข้มแสดงว่ามีแคดเมียมสะสมมาก แคดเมียมออกไซด์ถูกจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ นอกจากนี้ยังทำอันตรายต่อไต ทำให้สูญเสียประสาทการดมกลิ่นและทำให้เลือดจาง ถ้าได้รับปริมาณมากระยะสั้น ๆ จะมีอาการจ็บไข้ ปวดศีรษะ อาเจียน อาการนี้จะเป็นได้นานถึง 20 ชั่วโมง แล้วตามด้วยอาการเจ็บหน้าอก และไอรุนแรง

(4) โครเมียม (Chromium) การสูดหายใจเอาฝุ่นละอองหรือควันของกรดโครมิกจะทำให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ แผ่นกั้นระหว่างจมูกซึ่งเป็นกระดูกอ่อนถูกทำลาย โครเมียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกเปลี่ยนเป็น Trivalent Chromium ซึ่งสามารถจับกับโปรตีนส่งผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย สารประกอบเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium, CrVI) ทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้ดีเอ็นเอเสียหาย การได้รับสารเฮกซะวาเลนต์โครเมียม จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่ผิวหนัง เป็นโรคหืดหอบ โรคระบบทางเดินหายใจ ทำให้เยื่อแก้วหูเป็นรูปปอด ตับ ไต ลำไส้ถูกทำลาย มีอาการบวมหน้า เจ็บแสบกระบังลมหรือลิ้นปี่ ทำให้ฟันเปลี่ยนสี และอาจทำให้เกิด Pulmonary Congestion และถ้าได้รับเป็นเวลานานๆ จะทำให้เป็นมะเร็ง การสัมผัสกับฝุ่นละอองหรือสารละลายของกรดโครมิกทำให้ผิวหนังอักเสบ และทำให้เป็นมะเร็งที่ปอด

(5) เบริลเลียม (Beryllium) ก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อเมือกในระบบทางเดินหายใจ ไอ และหายใจลำบาก ผิวหนังอักเสบ เป็นไข้ ทำให้เกิดโรคปอดอักเสบ และเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

(6) พลวง (Antimony) มีความเป็นพิษคล้ายกับสารหนู (Arsenic) พิษเฉียบพลันจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อกระเพาะอาหาร ลำไส้ คลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง พิษเรื้อรังจะมีอาการอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร คลื่นไส้ ระบบทางเดินอาหารผิดปกติ ตับอาจถูกทำลาย นอกจากนี้อาจมีอาการทางผิวหนัง ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของผิวหนัง ทำให้หนังดำน อาการรุนแรงอาจจะเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนังได้

(7) สารหน่วงการติดไฟกลุ่มโบรมีน (Brominated Flame Retardants) สารในกลุ่มนี้ ได้แก่ Polybrominated Biphenyls (PBBs) และ Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) สามารถสะสมอยู่ในร่างกายคงทนโดยจะไปรบกวนการทำงานของระบบประสาทสมอง ต่อมไร้ท่อ และฮอร์โมน ยับยั้งการทำงานของไทรอยด์ฮอร์โมน ส่งผลต่อการพัฒนาทารกในครรภ์ และมีรายงานว่าจะเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งระบบทางเดินอาหารและต่อมน้ำเหลือง

(8) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) จะทำให้เกิดสารไดออกซินคลอไรด์และสารฟิวแรนซึ่งตกค้างและสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมยาวนาน และโดยมากมีความเป็นพิษสูงแม้ในความเข้มข้นที่ต่ำ

(9) โพลีคลอริเนตไบฟีนิล (Polychlorinated Biphenyls, PCBs) ใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมการผลิต PVC เป็นสารพิษตกค้างยาวนานและสะสมคงทนในร่างกาย อาจทำให้เกิดอาการเรื้อรัง ได้แก่ เหนื่อยล้า เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน และแขนขา เกิดอาการบวม ต่อมาจะ เกิดฝีและตุ่มเล็ก ๆ ที่ผิวหนัง ผิวหนังบริเวณหน้าคอและช่วงบนของลำตัวจะหยาบและหนา เปลือกตาบวม นอกจากนี้ยังอาจทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดความผิดปกติของระบบสืบพันธุ์และระบบภูมิคุ้มกัน และอาจทำให้เกิดเป็นมะเร็ง

(10) ไตรฟีนิลฟอสเฟต (Triphenyl Phosphate, TPP) ทำให้เกิดการระคายเคืองที่ผิวหนัง และมีรายงานว่ารบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อและฮอร์โมน

(11) โนนิลฟีนอล (Nonylphenol, NP) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกบางชนิด สะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร ทำให้ดีเอ็นเอและการทำงานของสเปิร์มในคนเสียหาย

(12) โพลีคลอริเนตเต็ดแนฟทาซีน (Polychlorinated Naphthalene, PCNs) เคลือบสายไฟเพื่อเพิ่มความเป็นฉนวน ใช้เป็นสารเติมแต่งในยางและพลาสติก และใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟ ส่งผลต่อผิวหนัง ตับ ระบบประสาท และระบบสืบพันธุ์³⁵

(13) ทองแดง (Copper) หากร่างกายได้รับทองแดงมากกว่า 100 มิลลิกรัม จะส่งผลให้ร่างกายอ่อนเพลีย อาเจียน เกิดการเบื่ออาหาร ร่างกายซบพอม เม็ดเลือดแดงแตกตัว

ทำลายตับ ยับยั้งการทำงานของตับ หากร่างกายมีทองแดงสะสมในปริมาณ 25 - 30 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัวกิโลกรัม จะทำให้ตับแข็ง และเกิดอาการคลุ้มคลั่งได้ง่าย

(14) โบรมีน (Bromine) ก่อให้เกิดการระคายเคืองเนื้อเยื่อมนุษย์ เช่น ไร่ระเหยจะทำให้เกิดอาการแสบตา หลอดลมและเยื่อจมูกอักเสบ และหากสัมผัสจะเกิดอาการคัน

(15) สารหนู (Arsenic) มีฤทธิ์ทำลายระบบประสาท ผิวหนังและระบบการย่อยอาหารหากได้รับในปริมาณมาก อาจทำให้ถึงตายได้อาการพิษเฉียบพลัน ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อบริเวณที่สัมผัสสารหนู และอาจทำให้คลื่นไส้ อาเจียน เป็นตะคริว กล้ามเนื้อเกร็ง อาจเกิดอาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตจากการทำงานล้มเหลวของหัวใจ อาการพิษเรื้อรัง จะทำให้เกิดแผลหรือรูที่ช่องจมูก มีรอยดำดำที่ผิวหนัง อาจมีเส้นสีขาวบนเล็บ ขนขาไม่มีแรง

(16) นิกเกิล (Nickel) การสูดหายใจสารประกอบนิกเกิลอาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองคอและมีอาการเสียงแหบ การสัมผัสทางผิวหนังจะมีอาการแสบร้อน ระคายเคือง และทำให้เกิดอาการหอบหืดได้ เมื่อเข้าตาทำให้เกิดการระคายเคืองดวงตาได้ การสัมผัสทางการกินทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง และท้องเสีย อาจทำให้มีอาการไอ หายใจไม่อึด และเวียนศีรษะ

(17) เบริลเลียม (Beryllium) เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ โดยเฉพาะมะเร็งปอด หากสัมผัสจะทำให้เกิดแผลที่ผิวหนังอย่างรุนแรง สารนี้ก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อเมือกในระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดอาการไอ หายใจลำบาก เป็นไข้ทำให้เกิดโรคปอดอักเสบ ทำให้ระบบการทำงานของต่อมไทรอยด์ และต่อมไร้ท่อผิดปกติสามารถสะสมในร่างกาย กระแสเลือดและสามารถถ่ายทอดในห่วงโซ่อาหารได้

(18) สารทำความเย็น (Refrigerants) เมื่อหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ จมูก คอ ทำให้ปวดศีรษะ หัวใจเต้นเร็ว หัวใจล้มเหลว อาจทำให้เสียชีวิตได้ การสัมผัสผิวหนังทำให้เกิดการระคายเคือง และมีอาการชา เนื่องจากความเย็น

(19) เหล็ก (Iron) ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยอาหารลดลง หลอดเลือดขยายตัว ความดันเลือดลดลง เลือดแข็งตัวได้ช้า การทำงานของตับลดลง ตับเสื่อมสภาพ ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

(20) สังกะสี (Zinc) เมื่อสังกะสีเข้าสู่ร่างกายมากขึ้นจะเกิดการสะสมที่บริเวณตับและไตจนทำให้เกิดผลกระทบตามมา ได้แก่ ทำลายอวัยวะภายใน ตับ และไตทำงานล้มเหลว เกิดโรคโลหิตจาง โครโมโซมผิดปกติ เสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง ร่างกายขาดธาตุทองแดง เนื่องจากถูกยับยั้งการดูดซึม³⁷

2.1.5 สารผสมเพิ่ม (Admixtures)

กระทรวงอุตสาหกรรม นิยามไว้ว่า สารผสมเพิ่ม (Admixtures) หมายถึง วัสดุที่นอกเหนือไปจากมวลรวม ปูนซีเมนต์ หรือน้ำ ซึ่งเติมลงไปก่อนหรือขณะผสมคอนกรีตเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของคอนกรีต ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือสารเคมีผสมเพิ่มและแร่ผสมเพิ่ม⁴⁹

บริษัท ผลิตภัณฑ์คอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง จำกัด กล่าวว่า สารผสมเพิ่ม หรือน้ำยาผสมคอนกรีต หมายถึง สารใด ๆ นอกเหนือไปจากปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวม อันใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือหลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ สิ่งแวดล้อมและสภาพการทำงาน ซึ่งสารผสมเพิ่มอาจได้มาจากธรรมชาติหรือผลิตจากกรรมวิธีสังเคราะห์ทางเคมี สารผสมเพิ่มที่มักนิยมนำมาใช้ในประเทศไทย ได้แก่ สารกักกระจายฟองอากาศ สารลดน้ำ สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว และสารเร่งการก่อตัว³⁴

พันธุเทพ โภมารกุล ณ นคร กล่าวว่า สารผสมเพิ่ม หมายถึง สารเคมีอื่น ๆ นอกเหนือไปจาก ปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวม และน้ำที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต ด้วยวัตถุประสงค์เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต⁵⁰

ดังนั้น สารผสมเพิ่ม จึงหมายถึง วัสดุหรือสารที่นอกเหนือไปจากมวลรวม ปูนซีเมนต์ หรือน้ำ ซึ่งเติมลงไปก่อนหรือขณะผสมคอนกรีต ด้วยวัตถุประสงค์เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ สิ่งแวดล้อมและสภาพการทำงาน สารผสมเพิ่มอาจได้มาจากธรรมชาติหรือผลิตจากกรรมวิธีสังเคราะห์ทางเคมี

สารผสมเพิ่มสามารถปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้มีความทนทาน ความสามารถเทได้ หรือคุณลักษณะของคอนกรีตทางด้านต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น สารผสมเพิ่มถูกนำมาใช้เพื่อเอาชนะขีดจำกัดของการก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นการเทคอนกรีตในสถานะที่มีอากาศร้อนหรืออากาศหนาว ใช้เพิ่มความสามารถทำให้บ่มได้ง่าย เร่งกำลังอัดช่วงต้นให้ได้ตามที่ต้องการ หรือการทำคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่ต่ำมากๆ เพื่อเพิ่มกำลังอัดหรือความทึบน้ำ³⁴

2.1.5.1 ประเภทของสารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มถูกจำแนกออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

(1) สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) เป็นสารเคมีที่ใช้เติมลงในส่วนผสมคอนกรีตก่อนผสมหรือขณะผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น ลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เร่งหรือหน่วงการก่อตัวและการแข็งตัว และปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสด เป็นต้น สารเคมีผสมคอนกรีตส่วนมากเป็นชนิดเหลวที่มักเรียกกันว่า “น้ำยาผสมคอนกรีต” แต่ก็มีชนิดผงที่สามารถละลายน้ำได้เช่นกัน

(2) แร่ผสมเพิ่ม (Mineral Admixtures) มีลักษณะเป็นผงละเอียด ที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อปรับปรุงความสามารถในการทำงาน เช่น เพิ่มกำลัง เพิ่มความคงทน ทำให้คอนกรีตสดมีคุณสมบัติในการยึดเกาะตัวดีขึ้น และยังสามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน เป็นต้น

(3) สารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ ได้แก่ สารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ ที่ไม่จัดอยู่ในสองประเภทแรก ซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้น³⁴

2.1.5.2 สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures)

สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา หรือ American Society for Testing and Materials ได้จำแนกสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีตออกเป็น 7 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C494 - Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete ดังแสดงในตารางที่ 2.10⁵¹

ตารางที่ 2.10 ประเภทของสารเคมีผสมคอนกรีต^[51]

ประเภท	ชื่อ	การใช้งาน
A	สารลดน้ำ (Water - Reducing Admixtures หรือ Plasticizer)	ลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ผสมคอนกรีต เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวตามที่กำหนด
B	สารหน่วงการก่อตัว (Retarding Admixtures)	หน่วงการก่อตัว
C	สารเร่งการก่อตัว (Accelerating Admixtures)	ลดเวลาการก่อตัว ทำให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วขึ้น
D	สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water Reducing and Retarding Admixtures)	ลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ผสมคอนกรีต และหน่วงการก่อตัว
E	สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว (Water Reducing and Accelerating Admixtures)	ลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ผสมคอนกรีต ลดเวลาการก่อตัว ทำให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 2.10 ประเภทของสารเคมีผสมคอนกรีต^[51] (ต่อ)

ประเภท	ชื่อ	การใช้งาน
F	สารลดน้ำพิเศษ (High Range Water Reducing Admixtures หรือ Superplasticizers)	ลดปริมาณน้ำตั้งแต่ 12% ขึ้นไป เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวที่กำหนด
G	สารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว (High Range Water Reducing and Retarding Admixtures หรือ Superplasticizing and Retarding Admixtures)	ลดปริมาณน้ำตั้งแต่ 12% ขึ้นไป เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวที่กำหนด และหน่วงเวลาการก่อตัว

2.1.5.3 แร่ผสมเพิ่ม (Mineral Admixtures)

มักจะมีลักษณะเป็นผงละเอียด ซึ่งผสมลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสด และเพิ่มความคงทนของคอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

(1) วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำหรือวัสดุเฉื่อย (Inert Materials) สารผสมเพิ่มชนิดนี้ใช้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ขาดอนุภาคนาขนาดเล็ก เช่น คอนกรีตที่ทำจากทรายหยาบ หรือคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อย คอนกรีตนี้อาจแยกตัวได้ง่ายไม่เหมาะสำหรับการลำเลียงและการเทลงแบบ การปรับปรุงการเกาะตัวและความเหลวของคอนกรีตด้วยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์อาจทำไม่ได้ด้วยเหตุผลทางเทคนิค เช่น ทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมากเกินไป เป็นต้น วิธีการที่ทำได้ คือ การใส่แร่หินปูน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน เหมาะสำหรับการปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงเท่านั้น

(2) สารปอซโซลาน (Pozzolan) คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่อุณหภูมิปกติรวมกับความชื้น ก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน นั่นคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)”

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมสารปอซโซลานจะขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณสารปอซโซลานในส่วนผสมคอนกรีต การบ่ม และอุณหภูมิ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตอาจจำเป็นต้องมีการทดลองผสม ต้องควบคุมการบ่มให้ดีและนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

ปริมาณการใช้ย่อมขึ้นอยู่กับประเภทและลักษณะงานโครงสร้าง โดยอาจใช้ได้ปริมาณมากถึง 15 - 40% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์หรือมากกว่านี้ สารปอซโซลานที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ และ Metakaolin เป็นต้น

(3) สารที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious Material) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เมื่อผสมกับน้ำ เช่น ตะกรันเหล็ก (GGBS) และเถ้าลอยบางประเภท เป็นต้น³⁴

2.1.5.4 สารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ (Other Admixtures)

(1) สารกักกระจายฟองอากาศ (Air - Entraining Admixtures) เป็นสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาบนผิวที่เติมลงในคอนกรีตก่อนผสมหรือขณะผสม เพื่อก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กกระจายตัวและคงตัวอยู่ในปริมาณที่ต้องการ ทำให้เทคอนกรีตสดได้ง่ายขึ้น และคอนกรีตแข็งตัวแล้วมีความคงทนสูงขึ้น

(2) สารกันชื้น (Damp Proofing Admixtures หรือ Hydrophobers หรือ Water Repellants) โดยทั่วไปสารประเภทนี้ทำมาจากวัสดุประเภทสบู่ หรือกรดไขมัน หรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ทำให้น้ำไม่จับที่ผิวคอนกรีต และช่วยลดอัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งหรือยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่จะไม่สามารถทนน้ำที่มีแรงดันมากได้

(3) สารลดการซึมผ่านของน้ำ (Permeability - Reducing Admixtures) ใช้ป้องกันการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้แรงดันน้ำจากภายนอก โดยทั่วไปสารประเภทนี้ทำมาจากสารที่มีคุณสมบัติช่วยลดน้ำ หรือสารที่มีคุณสมบัติเร่งการก่อตัว หรือวัสดุที่มีอนุภาคละเอียดมาก โดยอาจเป็นผงวัสดุเฉื่อยที่ละเอียดมาก หรือเป็นผงที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีผลก่อกำเนิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในซีเมนต์เมตริกซ์ได้ จึงช่วยลดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ลดช่วยลดการซึมผ่านของน้ำได้

(4) สารช่วยให้ปั๊มง่าย (Pumping Aids) ช่วยให้คอนกรีตยึดเกาะตัวกัน เคลื่อนผ่านท่อปั๊มไปได้ ถึงแม้ว่าคอนกรีตนั้นจะมีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ

(5) สารทำให้เกิดสี (Coloring Admixtures) ใช้เพื่อทำให้เกิดสีในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ โดยไม่ควรมีผลกระทบต่อทางด้านกายภาพอื่นๆ ที่ไม่ต้องการของส่วนผสม มีทั้งวัสดุที่เป็นธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้น

(6) สารอุดประสาน (Grouting Admixtures) ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อการอัดฉีดเข้าไปในซอกหรือบริเวณแคบๆ โดยป้องกันการแยกตัว การเยิ้ม รวมทั้งเพิ่มการยึดเกาะเพื่อให้ปัมได้สะดวก เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานต่างๆ เช่น งานเสริมความแข็งแรงให้แก่ฐานราก อุดรอยร้าวหรือรอยต่อในงานคอนกรีต อุดช่องว่างในงานคอนกรีตอัดแรงระบบ Bonding เป็นต้น

(7) สารเพิ่มการขยายตัว (Expansion Producing Admixtures) มีสารเคมีหลัก คือ Calcium Sulpho - Aluminate ซึ่งจะขยายตัวในระหว่างช่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต หรือทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่น ๆ ในคอนกรีต ก่อให้เกิดการขยายตัว เพื่อลดผลกระทบจากการเกิดการหดตัวแบบแห้ง (Dry Shrinkage) ให้เหลือน้อยที่สุด ใช้ทดแทนการหดตัวของคอนกรีตในการก่อสร้างต่างๆ ไป ทั้งงานเทคอนกรีตที่มีการยัดรังและไม่มีกรยัดรัง

(8) สารป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมในโครงสร้าง (Corrosion Inhibiting Admixtures) เป็นเกลือของสารเคมีที่มีประจุเกิดออกไซด์ได้ ใช้เป็นสารผสมเพิ่มในคอนกรีต เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งมีปริมาณสารคลอไรด์มาก

(9) สารป้องกันการเกิดเชื้อรา (Fungicidal Admixtures) ใช้เพื่อยับยั้งและควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและราในพื้นที่คอนกรีต กำแพง และรอยต่อ

(10) สารสร้างฟองก๊าซ (Gas Forming Admixtures) ช่วยสร้างฟองก๊าซในเนื้อคอนกรีตระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงก่อนเวลาการก่อตัวเริ่มต้น เพื่อควบคุมการทรุดตัวและการเยิ้ม ควบคุมการขยายตัว ชดเชยการหดตัว เพิ่มแรงยึดเหนี่ยว ทำให้มีหน่วยน้ำหนักเบา เป็นฉนวนกันความร้อนหรือเสียง

(11) สารเชื่อมประสาน (Bonding Admixtures) โดยส่วนใหญ่ทำมาจาก Organic Polymer Emulsion ที่รู้จักกันในชื่อ “Latex” ใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเก่ากับคอนกรีตใหม่ หรือระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม³⁴

2.1.6 โลหะหนัก

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย กล่าวว่า โลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition Metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักเป็นวัตถุพิษที่ถูกลำบากใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม เราใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และ

เครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ⁵²

ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ ให้นิยามว่า โลหะหนัก (Heavy Metal) คือ กลุ่มธาตุที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 4 โลหะหนักมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ต้องเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มธาตุ Transition Metals ซึ่งจัดว่าเป็นกลุ่มธาตุที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ไม่สลายตัวในกระบวนการทางธรรมชาติ มีความเสถียร และสามารถสะสมอยู่ในอากาศ ดินและแหล่งน้ำรวมถึงสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตได้อีกด้วย⁵³

กองตรวจสอบคุณภาพสินค้าประมง กรมประมง ให้นิยามว่า โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป ได้แก่ ดีบุก สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว สารหนู พรอท เป็นต้น เป็นสารที่มีอัตราการสลายตัวค่อนข้างช้า ทำให้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน⁵⁴

กรมควบคุมมลพิษ ให้นิยามว่า โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง กลุ่มโลหะที่มีความเป็นพิษแบบสะสมและมีความหนาแน่นมากกว่า 4 kg/dm³ เช่น แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี พรอท ตะกั่ว และอาร์เซนิก เป็นต้น⁵⁵

ดังนั้น โลหะหนัก หมายถึง กลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition Metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ

2.1.6.1 ตำแหน่งของโลหะหนักในตารางธาตุ

โลหะหนักเป็นธาตุกลุ่มใหญ่ที่ปรากฏในตารางธาตุ (มีจำนวนมากกว่า 40 ธาตุ) ที่มีมวลอะตอมมากกว่า 50 ขึ้นไป ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ธาตุโลหะหนักส่วนมากเป็นธาตุที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของพืช สัตว์ และมนุษย์ (เช่น Zn, Cu, Mn, Cr, Ni และ V เป็นต้น)⁵⁶ ธาตุที่จัดเป็นโลหะหนักที่พบมากมีทั้งหมด 22 ชนิด ได้แก่ ทองแดง เงิน ทองคำ ทองคำขาว สังกะสี ตะกั่ว โครเมียม ดีบุก ทังสแตน พลวง แคดเมียม พรอท บิสมีส พลวง ไททาเนียม แทนทาลัม โคบอลต์ ยูเรเนียม นิกเกิล แมงกานีส โมลิบดีนัม และเบอรัมเนียม⁵²

2.1.6.2 โลหะหนักจำแนกตามสมบัติทางกายภาพ

งานวิจัยส่วนมากใช้เกณฑ์การจำแนกโลหะหนัก โดยพิจารณาจากความถ่วงจำเพาะที่มากกว่า 5 g/cm³ ซึ่งโลหะที่แสดงสมบัติความเป็นโลหะหนักอย่างชัดเจน ได้แก่ พรอท ตะกั่ว และบิสมีส ส่วนโลหะที่แสดงสมบัติความเป็นโลหะหนักรองลงมา ได้แก่ ทองแดง แคดเมียม เงิน ดีบุก และเทลลูเรียม ส่วนโลหะที่แสดงสมบัติความเป็นโลหะหนักน้อยที่สุด คือ โครเมียม เหล็ก แมงกานีส โคบอลต์ นิกเกิล สังกะสี โมลิบดีนัม โรเดียม แพลเลเดียม อินเดียม อิริเดียม แพลทินัม ทองคำ และพอลโลเนียม ดังแสดงในภาพที่ 2.10⁵⁸

The image shows a periodic table with several regions highlighted. The 'Heavy Metals' region is labeled in blue and includes elements from Ca to Zn. The 'Metalloids' region is labeled in red and includes elements from B to Te. The 'Lanthanides' and 'Actinides' series are shown at the bottom in green and purple respectively. Each element cell contains its atomic number, symbol, and name.

ภาพที่ 2.9 ธาตุโลหะหนักในตารางธาตุ⁵⁷

This periodic table is color-coded to show the characteristics of heavy metals. A legend at the bottom indicates: a red box for 'Shows maximum characteristics of heavy metals' (elements like Pb, Bi, Po, At, Rn), a yellow box for 'Shows less characteristics of heavy metals' (elements like Cu, Ag, Au, Hg, Pt, Ir, Rh, Pd, Ni, Co, Ni, Zn), and a white box for 'Shows fewer characteristics of heavy metals' (the majority of elements). The table includes atomic numbers, symbols, and names for all elements.

ภาพที่ 2.10 โลหะหนักจำแนกตามสมบัติทางกายภาพ⁵⁸

2.1.6.3 กำเนิดโลหะหนัก

แหล่งกำเนิดโลหะหนักตามธรรมชาติ สามารถจำแนกออกเป็น 2 สภาวะ แวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนี้

(1) โลหะหนักที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มาจากวัสดุเปลือกโลกที่ผุกร่อน (ชะละลาย) และถูกกัดเซาะจากพื้นผิวโลก หรือถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศจากการปะทุของภูเขาไฟ มีปริมาณสูงถึง 80% จากแหล่งกำเนิดโลหะหนักตามธรรมชาติทั้งหมด ส่วนที่เหลืออีก 20% เกิดจากไฟฟ้า แหล่งชีวภาพ และอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาจากพืช

(2) โลหะหนักที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการดำรงชีวิตของมนุษย์ ซึ่งกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์มีการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมจำนวนมาก โดยทั่วไปโลหะหนักจะเข้าสู่สิ่งแวดล้อมผ่านสามเส้นทาง คือ การสะสมในบรรยากาศจากฝุ่นละออง (เช่น การขุด การถลุงแร่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การเผาขยะในชุมชน และการผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น) การกำจัดกากตะกอนน้ำเสียที่ประกอบด้วยโลหะและน้ำเสีย (ปุ๋ยเชิงพาณิชย์ ยาฆ่าแมลง และของเสียจากสัตว์) และผลพลอยได้จากกระบวนการทำเหมืองโลหะ⁵⁷

2.1.6.4 การจัดอันดับความอันตรายของโลหะหนัก

จะเห็นว่าโลหะหนักล้วนแต่เป็นธาตุที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท และจากข้อมูลการจัดอันดับสารอันตรายโดยองค์การสารพิษและโรคระบาดแห่งสหรัฐอเมริกา (The Agency for Toxic Substances and Disease Registry หรือ ATSDR) พบว่า มีโลหะหนัก 3 ชนิด ติด 10 อันดับแรกของสารอันตรายจากทั้งหมด 275 รายการทั้งในปี ค.ศ. 2007 และ ค.ศ. 2011 คือ ตะกั่ว (Lead) ปรอท (Mercury) และแคดเมียม (Cadmium) แสดงดังตารางที่ 2.11⁵³

ตารางที่ 2.11 อันดับสารอันตรายโดยองค์การสารพิษและโรคระบาดแห่งสหรัฐอเมริกา^[53]

Substance Name	CAS RN	2007 Rank	2011 Rank
Arsenic	007440-38-2	1	1
Lead	007439-92-1	2	2
Mercury	007439-97-6	3	3
Vinyl Chloride	000075-01-4	4	4
Polychlorinated Biphenyls	001336-36-3	5	5
Benzene	000071-43-2	6	6

ตารางที่ 2.11 อันดับแรกสารอันตรายโดยองค์กรสารพิษและโรคระบาดแห่งสหรัฐอเมริกา^[53] (ต่อ)

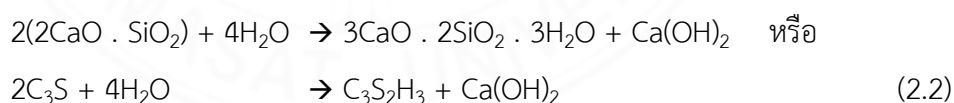
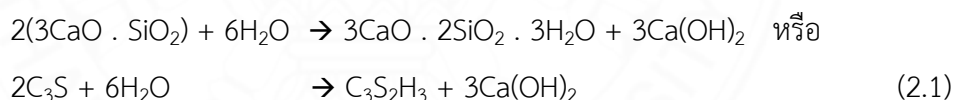
Substance Name	CAS RN	2007 Rank	2011 Rank
Cadmium	007440-43-9	7	7
Benzo (A) Pyrene	000050-32-8	9	8
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	130498-29-2	8	9
Benzo (B) Fluoranthene	000205-99-2	10	10

2.1.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

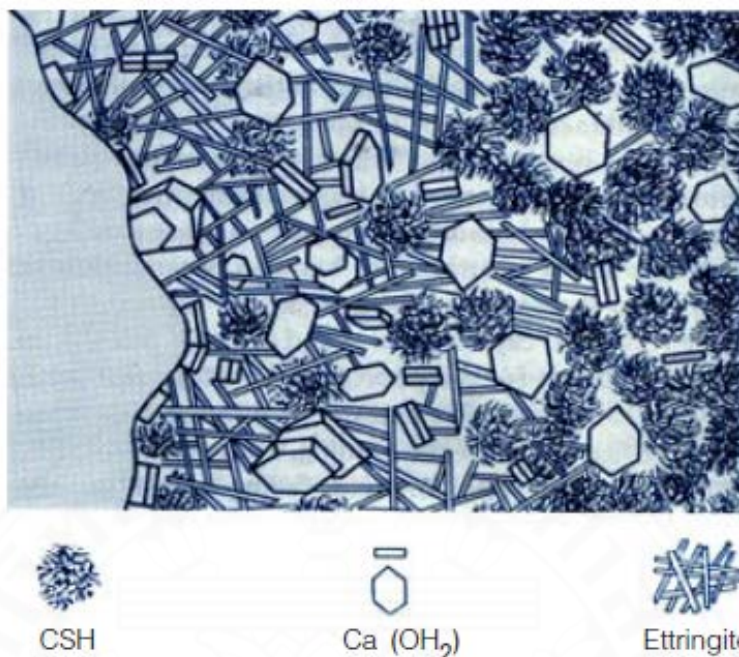
ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้เกิดการแข็งตัว ก่อตัว และสามารถรับกำลังได้แตกต่างกันไปตามปริมาณสารประกอบของปูนซีเมนต์

2.1.7.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในภาพที่ 2.11 โดยสามารถเขียนเป็นสมการเคมีดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)



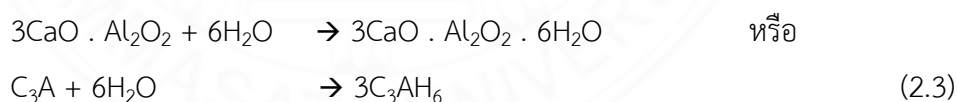
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันข้างต้น สารผลิตภัณฑ์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างสูงมาก มีค่า pH ประมาณ 12.5 ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี ส่วนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะมีลักษณะเป็นเจลที่มีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งองค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์²¹



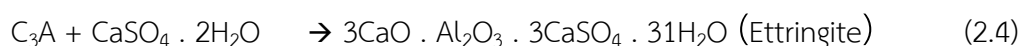
ภาพที่ 2.11 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแควงซีเมนต์เกิด²¹

2.1.7.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ (2.3)



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงได้เติมยิปซัม (CaSO₄ · 2H₂O) ในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ โดยยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C₃A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวอนุภาคของ C₃A ดังสมการ (2.4)



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C₃A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S และ C₂S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite

ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ชั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งไอออนของซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการเกิด Ettringite²¹

2.1.7.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้นของปฏิกิริยา โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ (2.5)²¹



2.1.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

(1) อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วงระยะดอร์แมนต์ (Dormant Period) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

(2) องค์ประกอบของซีเมนต์ องค์ประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละชนิด จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแตกต่างกัน

(3) ความละเอียดของซีเมนต์ หากซีเมนต์มีความละเอียดมากจะมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำได้มาก ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา

(4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่สำหรับช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตามไปด้วย

(5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

(6) น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยน้ำยาหน่วงการก่อตัวจะลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา และน้ำยาเร่งการก่อตัวจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน²¹

2.1.8 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือ ชื่อเฉพาะของวิธีการที่จะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการบ่มคอนกรีตจะให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัว เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต และรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม โดยวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังตามที่กำหนด มีความทนทาน และเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต²¹

หลายคนเข้าใจว่าเมื่อเทคอนกรีตเสร็จแล้ว คอนกรีตจะสามารถแข็งตัวได้เอง และไม่ต้องทำอะไรกับคอนกรีตแล้ว ความเข้าใจดังกล่าวถูกต้องเพียงครึ่งเดียว กล่าวคือ คอนกรีตสามารถแข็งตัวได้จริง แต่ถ้าต้องการให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีแล้วต้องทำการบ่ม (ให้สุกเสียก่อน) การบ่มคอนกรีตหากไม่บ่มให้ดี คอนกรีตก็จะไม่แข็งแรง ไม่ทนทาน ไม่สามารถใช้งานได้นาน แม้ว่าดูภายนอกแล้วจะเหมือนกับคอนกรีตที่บ่มมาอย่างดีก็ตาม⁵⁹

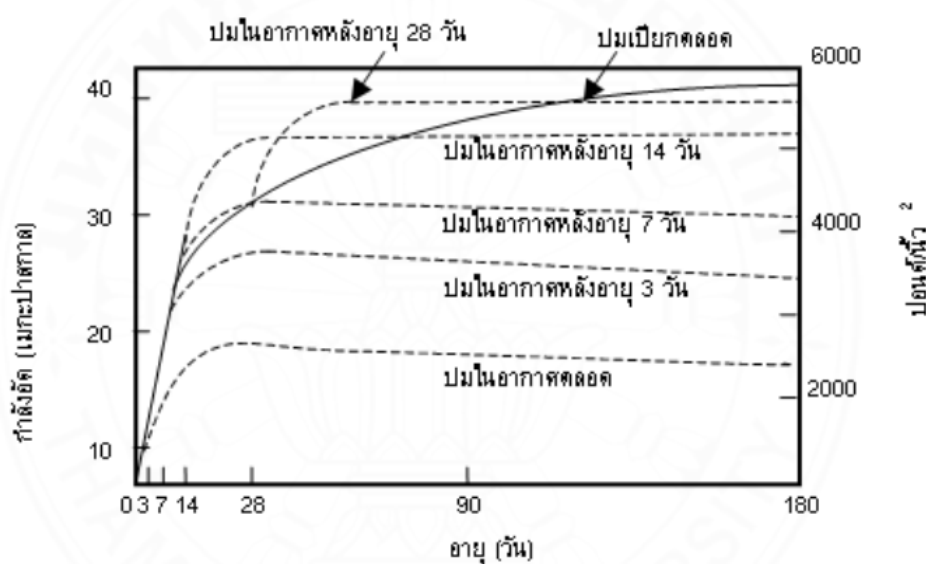
2.1.8.1 ความสำคัญของการบ่มคอนกรีต

ข้อเสียของการไม่บ่มคอนกรีตมีอยู่มากมาย และส่งผลเสียต่อคอนกรีตอย่างมากดังแสดงในภาพที่ 2.12 พบว่าคอนกรีตที่บ่มขึ้นตลอดมีกำลังอัดสูงถึง 41 เมกะปาสคาล ที่อายุ 180 วัน ขณะที่คอนกรีตที่บ่มในอากาศตลอด (คือไม่ได้บ่มนั่นเอง) มีกำลังอัดเพียง 18 เมกะปาสคาล หรือมีค่าต่ำกว่ากรณีที่บ่ม 2 เท่า นอกจากทำให้มีกำลังอัดที่ต่ำกว่าแล้ว ยังทำให้สารเคมีหรือสารอันตรายต่าง ๆ ซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตง่ายขึ้น ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ง่าย และคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายในที่สุด คอนกรีตที่ขาดการบ่มหรือบ่มไม่เต็มที่พบว่ามีกรสิกร่อนเนื่องจากการขัดสี (เช่น จากล้อรถยนต์) สูงกว่าคอนกรีตที่บ่ม เพราะการต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตจะขึ้นกับกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก⁵⁹

2.1.8.2 ระยะเวลาของการบ่ม

การบ่มทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้ต่อเนื่อง โครงสร้างของเนื้อซีเมนต์จะแน่นขึ้นและคอนกรีตจะมีความแข็งแรง การบ่มเปียกตลอดเวลา (ให้คอนกรีตเปียกขึ้นตลอดเวลา เช่น แช่น้ำ เอน้ำราดบนคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง เป็นต้น) ทำให้กำลัง

อัดของคอนกรีตมีค่าสูงสุด ขณะที่การบ่มในอากาศ (เทคอนกรีตเสร็จแล้วปล่อยให้ไว้ในอากาศ โดยไม่ต้องทำอะไร) ทำให้การเพิ่มกำลังอัดเป็นไปอย่างช้า และมีค่าต่ำกว่ากรณีที่บ่มเปียกมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.12 อิทธิพลของการบ่มมีผลมากในคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น แผ่นพื้นถนน และคอนกรีตที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากน้ำระเหยออกได้ง่าย นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ หรือตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น จะต้องการการบ่มที่นานกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ช้า ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีอยู่ต่อไปตราบที่ยังมีน้ำให้ทำปฏิกิริยาอยู่ ดังนั้นจึงควรบ่มคอนกรีตให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตาม การบ่มคอนกรีตที่นานมากเกินไปจะเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการบ่มโดยไม่จำเป็น⁵⁹



ภาพที่ 2.12 กำลังอัดของคอนกรีตที่ $W/C = 0.5$ และลักษณะการบ่มที่ต่างกัน⁶⁰

จากภาพที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วและมีการพัฒนากำลังได้เร็วจะต้องการเวลาสำหรับการบ่มน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาช้าและที่อุณหภูมิต่ำ คอนกรีตจะทำปฏิกิริยาได้ช้าและต้องการเวลาบ่มนานขึ้น อุณหภูมิของคอนกรีตที่ต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส พบว่ามีการพัฒนากำลังที่อายุต้น ๆ ค่อนข้างต่ำ หากคอนกรีตมีอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่อายุต้นมีค่าน้อยมาก และที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่าคอนกรีตแทบไม่มีการพัฒนากำลังเลย หลักการทั่วไปที่แนะนำสำหรับเวลาที่ควรใช้ในการบ่มคอนกรีตในประเทศไทย⁵⁹

โดยทั่วไประยะเวลาของการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนผสมของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ขนาดและรูปร่างของแท่งคอนกรีต อุณหภูมิที่ใช้บ่ม และความชื้นในขณะบ่ม เป็นต้น สำหรับงานโครงสร้างทั่ว ๆ ไป ส่วนใหญ่จะกำหนดระยะเวลาในการบ่มไว้ตั้งแต่ 3 วัน จนถึง 2 สัปดาห์ โดยระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งผลิตขึ้นในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2.12²¹

ตารางที่ 2.12 ระยะเวลาขั้นต่ำในการบ่มคอนกรีต^[21]

ประเภทของงาน	ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ผสมในคอนกรีต		
	ปูนซีเมนต์ผสม	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 3
งานธรรมดา			
- เสาคาน และกำแพง	7 วัน	7 วัน	4 วัน
- พื้นบ้าน พื้นถนนในบ้าน ฯลฯ	8 วัน	8 วัน	4 วัน
- ถนนชั้นหนึ่ง ลานจอด หรือทางวิ่ง	-	14 วัน	7 วัน
ของเครื่องบิน			
- เสาค้ำสำหรับฐานราก	21 วัน	14 วัน	7 วัน
งานพิเศษ			
- แผ่นพื้นบางๆ	14 วัน	14 วัน	7 วัน
- รูปหล่อที่เล็กบางซึ่งใช้ปูนซีเมนต์	-	21 วัน	7 วัน
ผสมมาก			

2.1.8.3 การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติ

การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติสามารถจำแนกได้ออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้
 (1) การเพิ่มความชื้น โดยให้ความชื้นต่อผิวหน้าของคอนกรีตโดยตรงในระยะเวลาที่คอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้นอกจากจะเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้ว ยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตลงด้วย จึงเหมาะกับคอนกรีตที่เทในอากาศร้อน การบ่มในลักษณะนี้สามารถทำได้หลายวิธี รวมทั้งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันในแต่ละวิธี ดังแสดงในตารางที่ 2.13

(2) วิธีป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตมิให้ระเหยสู่บรรยากาศภายนอก การป้องกันความชื้นตามวิธีนี้ได้แก่ การใช้กระดาษกัน

น้ำ ฝ้าพลาสติก หรือสารเคมี เป็นต้น อย่างไรก็ตามไม้แบบที่ยังไม่ถอดก็สามารถป้องกันการเสียความชื้นได้เช่นกัน โดยวิธีการบ่มในลักษณะนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.14²¹

ตารางที่ 2.13 วิธีการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีการเพิ่มความชื้น^[21]

วิธีการบ่ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
<p>1. การขังน้ำ</p> <p>เหมาะสมกับงานคอนกรีตที่มีพื้นราบ เช่น แผ่นพื้นทั่วไป าดาดฟ้า พื้นสะพาน และถนน ทางเท้าสนามบิน</p> <p><u>วิธีการ</u> ทำโดยใช้ดินเหนียวหรือก่ออิฐโดยรอบงานคอนกรีตที่จะบ่ม</p> <p><u>ข้อควรระวัง</u> อย่าให้น้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตมีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10 องศาเซลเซียส</p>	<p>1. ทำได้สะดวก ง่าย ราคาถูก</p> <p>2. วัสดุหาได้ง่าย ได้แก่ ดินเหนียว และน้ำ</p> <p>3. ใช้คนงานระดับกรรมกรได้</p> <p>4. ซ่อมแซมได้สะดวก รวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่าย</p>	<p>1. ต้องหมั่นตรวจดูรอยรั่วของดินเหนียวอยู่เสมอ มิฉะนั้นน้ำจะซึมออกหมด</p> <p>2. ต้องเก็บทำความสะอาดคอนกรีต หลังจากบ่มเสร็จเรียบร้อยแล้ว</p>
<p>2. การฉีบน้ำหรือพรมน้ำ</p> <p>ใช้ได้กับงานทั้งในแนวราบและแนวตั้ง เช่น ผนัง กำแพง พื้น</p>	<p>1. สะดวก ได้ผลดี และราคาถูก</p> <p>2. ใช้คนงานระดับกรรมกรได้</p> <p>3. ไม่ต้องดูแลตลอดเวลา</p>	<p>1. ไม่เหมาะกับสถานที่ที่หาน้ำได้ยาก</p> <p>2. กำแพงแนวตั้งน้ำจะแห้งเร็ว</p>
<p>3. การใช้วัสดุเปียกชื้นคลุม</p> <p><u>วิธีการ</u> ทำโดยผ้าใบ กระจสบ ซึ่งอุ้มน้ำได้ ถ้าเป็นผ้าใบควรเป็นสีขาว เพราะสะท้อนความร้อนได้ดี และรอยต่อต้องเหลื่อมกันให้มาก ถ้าใช้ฟางหรือขี้เลื่อยคลุมควรหนาไม่น้อยกว่า 15 เซนติเมตร คลุมให้ทั่วและฉีบน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ</p>	<p>1. ได้ผลดีมาก ราคาไม่สูงจนเกินไป</p> <p>2. ทำได้ทั้งแนวราบและแนวตั้งในกรณีที่ใช้ผ้าใบและกระจสบ</p> <p>3. ใช้คนงานระดับกรรมกรได้</p> <p>4. สามารถหาวัสดุได้ง่าย</p>	<p>1. ถ้าอากาศร้อน จะแห้งเร็ว</p> <p>2. สำหรับพื้นที่กว้าง ถ้าใช้ผ้าใบคลุมจะเสียค่าใช้จ่ายมาก</p> <p>3. ต้องฉีบน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ</p> <p>4. ต้องพิจารณาก่อนว่าวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นอันตรายต่อซีเมนต์หรือผิวคอนกรีตหรือไม่</p>

ตารางที่ 2.14 การบ่มคอนกรีตด้วยวิธีการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต^[21]

วิธีการบ่ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. การใช้กระดาษกันน้ำคลุม กระดาษชนิดนี้เป็นกระดาษ เหนียวยึดติดกันด้วยกาว ประเภทยางมะตอย และเสริม ความเหนียวด้วยใยแก้ว และมี คุณสมบัติยึดหดตัวไม่มาก	1. ทำได้สะดวก รวดเร็ว 2. ป้องกันคอนกรีตไม่ให้แห้ง เร็ว แต่ต้องคอยพรมน้ำอย่าง สม่ำเสมอ 3. ใช้คนงานระดับกรรมกรได้	1. ราคาแพง 2. ไม่สะดวกในการปฏิบัติงาน 3. ไม่สะดวกในการเก็บรักษา ต่อไป เมื่อต้องนำกลับมาใช้งาน อีกในภายหลัง
2. การใช้แผ่นพลาสติกคลุม แผ่นพลาสติกเป็นวัสดุที่มี น้ำหนักเบา และสามารถใช้คลุม งานคอนกรีตที่จะบ่มได้ทันทีที่ ต้องการ	1. มีน้ำหนักเบา ปฏิบัติงานง่าย 2. ได้ผลดีในการป้องกันน้ำที่ ระเหยออกไปจากคอนกรีต 3. ไม่ต้องรดน้ำ	1. แผ่นพลาสติกบางมาก ขำรูด ง่าย 2. ต้องหาวัสดุที่มีน้ำหนักทับไว้ เพื่อกันปลิว 3. ราคาแพง หากหน้างานมี ขนาดใหญ่
3. การบ่มด้วยน้ำยาเคมีเคลือบ ผิวคอนกรีต นิยมใช้น้ำยาเคมีสี ขาว เพราะสะท้อนแสงและ ความร้อนได้ดี จะใช้พ่นคลุม พื้นผิวคอนกรีตที่ต้องการใช้งาน เร็วเป็นพิเศษ เช่น ลานบิน หลังคากว้าง ๆ ตึกสูง ๆ ที่ส่งน้ำ ขึ้นไปได้ลำบาก และงานพิเศษ	1. สะดวก รวดเร็ว 2. ได้ผลดีพอสมควร 3. ไม่ต้องคอยรดน้ำ 4. ใช้ในกรณีที่บ่มด้วยวิธีอื่นไม่ ได้ผล	1. ค่าใช้จ่ายสูง 2. ต้องจัดเตรียมเครื่องมือ สำหรับพ่นทุกครั้ง 3. ต้องใช้บุคลากรที่มี ความสามารถ 4. น้ำยาเคมีอาจมีอันตรายต่อผู้ ที่อยู่ใกล้เคียงได้
4. การบ่มโดยใช้แบบ ต้องพ่น ไม้แบบให้มีความชื้นอยู่เสมอ ไม้ แบบจะช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำ ความชื้นได้ดีมาก ฉะนั้นควร รักษาไม้แบบไว้ให้นานที่สุด หลังจากถอดแบบแล้ว	1. ทำได้สะดวก 2. ใช้คนงานระดับกรรมกรได้	1. ต้องใช้ไม้แบบจำนวนมาก 2. งานอาจจะล่าช้า เนื่องจาก ต้องรอไม้แบบ สำหรับไปใช้กับ งานส่วนอื่นต่อไป 3. หากนำไม้แบบเก่ามาใช้อีก จะต้องเสียเวลาทำความสะอาด ไม้แบบก่อนนำมาใช้ใหม่

2.1.8.4 การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง

การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงสามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นที่นิยมในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น ท่อ คานและพื้น เป็นต้น วิธีการนี้จะสามารถทำให้ผลิตคอนกรีตได้รวดเร็วขึ้น ประหยัดแบบหล่อเพราะสามารถถอดแบบได้เร็ว คอนกรีตมีกำลังสูงเร็ว ทนต่อการเคลื่อนย้ายและใช้งานได้ดี

(1) การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำ (Low Pressure Steam Curing)

อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 40 - 100 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ได้ผลดีที่สุดจะอยู่ระหว่าง 65 - 80 องศาเซลเซียส การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกำลังประลัยสูงสุดจะมีค่าต่ำ ส่วนอุณหภูมิต่ำให้กำลังประลัยสูงสุดที่สูง แต่ด้วยอัตราการเพิ่มกำลังที่ต่ำ การบ่มด้วยไอน้ำที่มีความกดดันต่ำนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้กำลังสูงพอที่จะให้ความปลอดภัยต่อการถอดแบบและขนย้ายเท่านั้น จากนั้นก็สามารถบ่มคอนกรีตด้วยความชื้นตามปกติได้

(2) การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูง (High Pressure Steam Curing)

เป็นการบ่มคอนกรีตด้วยภาชนะปิดสนิทที่มีชื่อว่า Autoclave อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 160 - 210 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 6 3 20 atm ซึ่งจะสามารถใช้คอนกรีตได้ภายใน 24 ชั่วโมง และคอนกรีตจะมีกำลังสูงเทียบเท่าการบ่มปกติที่ 28 วัน มีการหดตัวน้อย ทนเกลือซัลเฟตได้ดี และมีความชื้นต่ำหลังการบ่ม แต่การบ่มโดยวิธีนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และใช้งานได้ดีกับคอนกรีตสำเร็จรูปเท่านั้น²¹

2.1.9 มอร์ตาร์

Sustainable Concrete Organization แห่งสหราชอาณาจักร ให้ความหมายไว้ว่า มอร์ตาร์ เป็นวัสดุที่ใช้ในการก่ออิฐ เพื่อเติมเต็มช่องว่างระหว่างอิฐและบล็อก มอร์ตาร์เป็นส่วนผสมของทราย สารยึดเกาะ (เช่น ซีเมนต์ หรือปูนขาว) และน้ำ หลังจากส่วนผสมทั้งหมดรวมตัวกัน เมื่อผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่งก็จะแข็งตัวกลายเป็นมอร์ตาร์⁶¹

The Clay Brick Association of Southern Africa กล่าวว่า มอร์ตาร์ เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับยึดวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐหรือหินเข้าด้วยกัน ประกอบด้วยส่วนผสมของน้ำ ทราย และซีเมนต์ โดยน้ำจะถูกใช้เพื่อหล่อเลี้ยงซีเมนต์และยึดเกาะส่วนผสมไว้ด้วยกัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในมอร์ตาร์จะสูงกว่าในคอนกรีตเพื่อสร้างการยึดเกาะในวัสดุองค์ประกอบ เมื่อผสมแล้วจะมีความหนา มากกว่าคอนกรีตมาก จึงเหมาะที่จะใช้เป็นกาวสำหรับวัสดุก่อสร้าง⁶²

อรรถนพ ประวัตินวงศ์ กล่าวว่า มอร์ตาร์เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I หรือปูนซีเมนต์ผสม ทรายที่มีโมดูลัสความละเอียด 1.8 และ/หรือปูนขาว ผสมอยู่ตามสัดส่วนที่เหมาะสม⁶³

จึงอาจสรุปได้ว่า มอร์ตาร์ หมายถึง วัสดุที่ใช้สำหรับยึดวัสดุก่อสร้าง เพื่อเติมเต็มช่องว่างระหว่างอิฐและบล็อก มีส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และน้ำ ผสมอยู่ตามสัดส่วนที่เหมาะสม

2.1.9.1 ชนิดของมอร์ตาร์และการใช้งาน

สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา หรือ American Society for Testing and Materials ได้จำแนกชนิดและการใช้งานของมอร์ตาร์ออกเป็น 5 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C270 - Standard Specification for Mortar for Unit Masonry ดังนี้

(1) Type M เป็นมอร์ตาร์ที่มีกำลังสูงที่สุด เหมาะกับงานที่ต้องการกำลังรับแรงมาก ๆ เช่น ฐานราก ผนังรับแรง

(2) Type S เป็นมอร์ตาร์ที่มีกำลังสูงปานกลาง เหมาะกับงานที่ต้องการกำลังในการยึดเหนี่ยว และกำลังรับแรงด้านข้าง

(3) Type N เป็นมอร์ตาร์ที่มีกำลังปานกลาง เหมาะกับงานทั่วไป เช่น รั้ว ปล่องไฟ

(4) Type O เป็นมอร์ตาร์ที่มีกำลังต่ำ เหมาะกับงานภายในทั่วไปที่ไม่ต้องรับแรงมาก

(5) Type K เป็นมอร์ตาร์ที่มีกำลังต่ำมาก เหมาะกับงานภายในที่ไม่ต้องรับแรง⁶⁴

2.1.9.2 มาตรฐานกำลังอัดของมอร์ตาร์

สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดคุณสมบัติของมอร์ตาร์แต่ละประเภทที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างไว้ ดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 กำลังอัดเฉลี่ยเฉลี่ยของมอร์ตาร์^[64]

Mortar	Type	Average Compressive Strength at 28 days, min, psi (Mpa)
Cement-Lime, Mortar Cement and Masonry Cement	M	2,500 (17.2)
	S	1,800 (12.4)
	N	750 (5.2)
	O	350 (2.4)

2.1.10 มอร์ตาร์ปรับระดับ (Self-Leveling Mortar)

มอร์ตาร์ปรับระดับเป็นมอร์ตาร์สำเร็จรูป ซึ่งจำเป็นต้องผสมน้ำก่อนนำไปใช้งาน โดยตรง ยิ่งไปกว่านั้นมอร์ตาร์ปรับระดับจะใช้ในการก่อสร้างพื้นราบและผิวเรียบที่มีกำลังรับแรงอัด เท่ากับหรือสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ทั่วไป

ปัจจุบันมอร์ตาร์ปรับระดับเป็นที่นิยมกันมากขึ้น เนื่องจากมีความต้องการใช้งาน พื้นราบและเรียบเพิ่มมากขึ้น มอร์ตาร์ปรับระดับมีความสามารถในการไหลสูง ตรงกันข้ามกับซีเมนต์มอร์ตาร์ทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 2.13⁶⁵



(ก) ซีเมนต์มอร์ตาร์ทั่วไป

(ข) มอร์ตาร์ปรับระดับ

ภาพที่ 2.13 ความสามารถในการไหลของซีเมนต์มอร์ตาร์ทั่วไปและมอร์ตาร์ปรับระดับ^{65,66}

มอร์ตาร์ปรับระดับสามารถนำไปใช้ในงานหลัก ๆ ได้ 3 ประเภท คือ เป็นวัสดุรองพื้น เป็นวัสดุปิดผิว และใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหายจากการใช้งาน เช่น สะพานหรือถนน เป็นต้น สำหรับกรณีที่ใช้เป็นวัสดุรองพื้นจะติดตั้งด้านล่างของพื้น เพื่อแก้ไขและซ่อมแซมพื้นผิว ก่อนที่จะดำเนินการติดตั้งโครงสร้างพื้น ส่วนกรณีที่ใช้เป็นวัสดุปิดผิวนั้น มอร์ตาร์ปรับระดับจะทำหน้าที่เป็นพื้นสำเร็จรูปจริงโดยไม่ต้องใช้วัสดุอื่นอีก⁶⁵

2.1.11 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

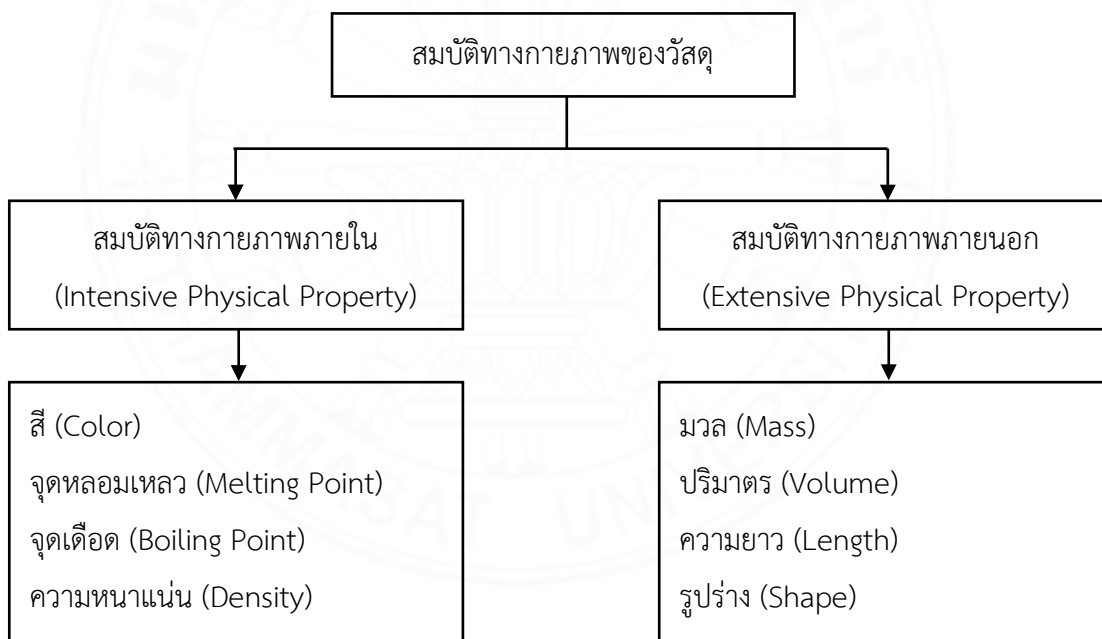
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กล่าวว่า สมบัติทางกายภาพ หรือสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties) ของวัสดุ เป็นสมบัติของสารที่สามารถสังเกตได้จากลักษณะภายนอก หรือจากการทดลองที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ สถานะ เนื้อสาร สี กลิ่น รส ความหนาแน่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว การนำไฟฟ้า การละลายน้ำ ความแข็ง ความเหนียว

สภาพยืดหยุ่น และการนำความร้อน ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน จึงนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้แตกต่างกัน^{67,68}

MADHAV University กล่าวว่า สมบัติทางกายภาพของวัสดุ คือ สิ่งที่สามารถสังเกตเห็นได้ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเอกลักษณ์ของวัสดุ คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น สี ขนาด และรูปร่าง ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ ความพรุน ฯลฯ⁶⁹

The Science Learning Hub กล่าวว่า สมบัติทางกายภาพ หมายถึง สมบัติที่สามารถสังเกตเห็นหรือวัดได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนองค์ประกอบของวัสดุ ตัวอย่าง ได้แก่ สี ความแข็ง กลิ่น และการเยือกแข็ง จุดหลอมเหลวและจุดเดือด⁷⁰

The LibreTexts Organization กล่าวว่า สมบัติทางกายภาพสามารถสังเกตหรือวัดได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนองค์ประกอบของสสาร คุณสมบัติทางกายภาพใช้ในการสังเกตและอธิบายสสาร ซึ่งสมบัติทางกายภาพสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ดังแสดงในภาพที่ 2.14⁷¹



ภาพที่ 2.14 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ⁷¹

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า สมบัติทางกายภาพ หมายถึง สมบัติที่สามารถสังเกตเห็นหรือวัดได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนองค์ประกอบ และเอกลักษณ์ของวัสดุ ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่น สี ความแข็ง ขนาดและรูปร่าง ความยาว ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ ความพรุน การเยือกแข็ง จุดหลอมเหลว และจุดเดือด

2.1.11.1 กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการศึกษาทางชีววิทยาช่วยขยายให้เห็นรายละเอียดของสิ่งต่าง ๆ อาทิ เซลล์และเนื้อเยื่อที่ชัดเจนมากขึ้น กล้องจุลทรรศน์มีความสามารถในการขยาย (Magnification) และแจกแจงรายละเอียด (Resolution) กล่าวคือ กล้องจุลทรรศน์แต่ละประเภทมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์ (Wavelength) และความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ (Numerical Aperture of Objective Lens) แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

(1) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light Microscope) คือ กล้องที่มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงอาทิตย์หรือแสงไฟฟ้า ประกอบด้วยเลนส์ 2 ชุด ได้แก่ เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) และเลนส์ใกล้ตา (Eyepiece Lens) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะมีกระจกเงา 2 ด้าน เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง ช่วยรวบรวมแสงให้สะท้อนเข้าที่ตรงกลางของแท่นวางวัตถุ กล้องรุ่นใหม่ หรือกล้องในปัจจุบันใช้หลอดไฟแทนกระจกเงา บางรุ่นมีเลนส์รวมแสง (Condenser lens) เพื่อปรับความเข้มของแสง และคัดเลือกแสงที่มีคุณภาพ ทำให้มองเห็นวัตถุได้ชัดเจนขึ้น

(2) กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (Electron Microscope) ใช้สำหรับขยายสิ่งซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงไม่สามารถขยายได้ เลนส์ของกล้องอิเล็กตรอนเกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีความถี่สูง และมีกำลังขยายถึง 500,000 เท่า ทำให้ได้ภาพที่คมชัดกว่ากล้องแบบใช้แสงที่มีกำลังขยายเพียง 2,000 เท่า อย่างไรก็ตาม กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ ให้ภาพสีเข้มน้ำ และไม่สามารถใช้ส่องดูสิ่งมีชีวิต ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)⁷²

2.1.11.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพของกำลังขยาย และการแจกแจงรายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร) จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่ Transmission Electron Microscope (TEM) และ Scanning Electron Microscope (SEM)

(1) Transmission Electron Microscope (TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)

หลักการทำงานของเครื่อง TEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ไป ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่งนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอร์รับ (Projector Lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสงสุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้

(2) Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย⁷³

2.1.11.3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือ สภาพการนำความร้อน

(Thermal Conductivity: k)

วัสดุใดมีประสิทธิภาพการนำความร้อนดีหรือไม่นั้น เราสามารถพิจารณาได้จากค่าสภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity, k - Value) ซึ่งบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุนั้น ๆ โดยวัดค่าอัตราปริมาณความร้อนไหลต่อหน่วยเวลาจากจุดระยะทางหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน (W/m.K) ค่าสภาพนำความร้อน (k) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$k = \frac{Q L}{A \Delta T} \quad (2.6)$$

โดย k = สภาพนำความร้อน หน่วย วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน (W/m.K)

Q = ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง หน่วย วัตต์ (W)

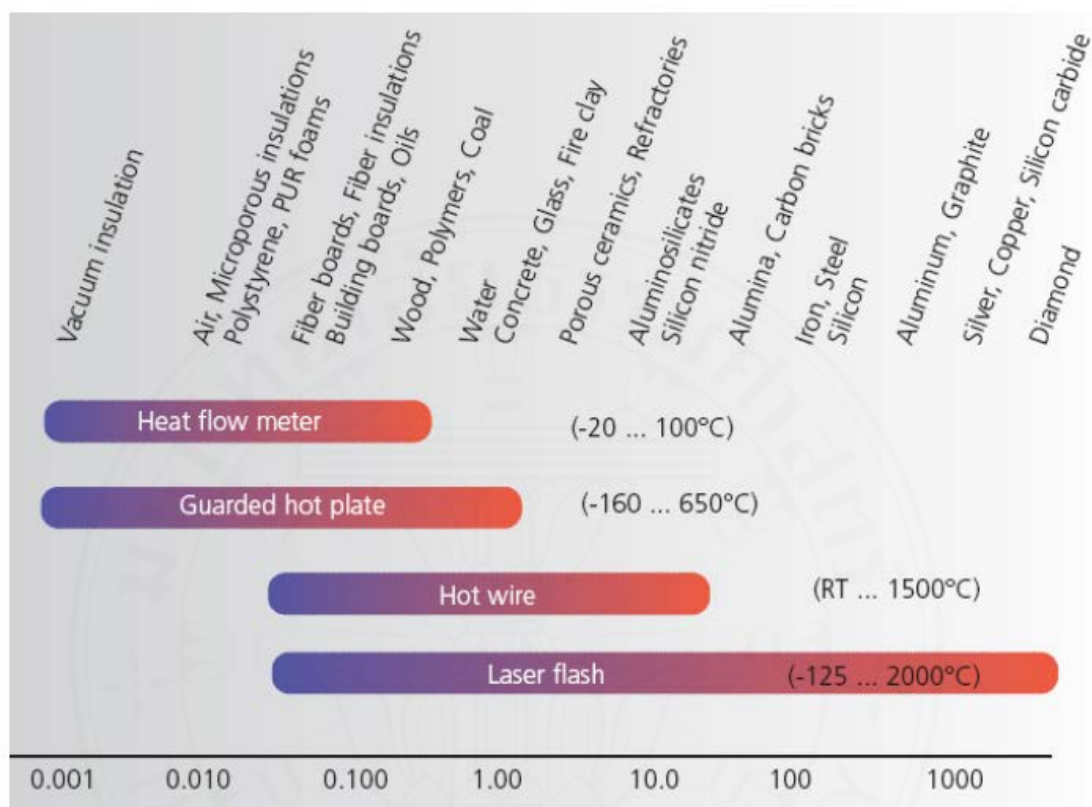
A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน หน่วย ตารางเมตร (m²)

L = ความหนาของชิ้นทดสอบ หน่วย เมตร (m)

ΔT = อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ หน่วย เคลวิน (K)⁷⁴

ในการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุมีหลายวิธี การเลือกเครื่องมือจึงควรเลือกให้เหมาะสมกับช่วงค่าการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งถ้าเป็นวัสดุประเภทฉนวนจะนิยมใช้เครื่อง Guard Hot Plate และ Heat Flow Meter เนื่องจากเครื่องมือนี้เหมาะกับวัสดุที่มีค่า

สภาพการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งการเลือกช่วงของเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุแต่ละประเภท แสดงดังภาพที่ 2.15⁷⁵



ภาพที่ 2.15 ช่วงของเครื่องมือที่เหมาะสมในการวัดค่าสภาพการนำความร้อน⁷⁶

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่าง ๆ ที่จะใช้ประกอบการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุก่อสร้างอาคาร ให้ใช้ค่าจากผลการทดสอบหรือรับรองโดยผู้ผลิตหรือสถาบันการทดสอบที่เชื่อถือได้ ในกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบหรือรับรองค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุก่อสร้างนั้น ๆ ให้ใช้ค่าที่กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมได้ประกาศกำหนดไว้ ดังตารางที่ 2.16⁷⁷

2.1.11.4 ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistivity: R)

ความเป็นฉนวนกันความร้อนสามารถพิจารณาได้จากค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance, R - Value) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของความหนาต่อค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็นตารางเมตร - เคลวินต่อวัตต์ ($m^2 \cdot K/W$) ฉนวนกันความร้อนที่ดีต้อง

มีค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำ และมีค่าความต้านทานความร้อนสูง ซึ่งค่าความต้านทานความร้อน (R) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7)⁷⁴

$$R = \frac{L}{k} \quad (2.7)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient, U - value) คือ ส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อน ดังแสดงในสมการที่ (2.8)⁷⁴

$$U = \frac{1}{R} \quad (2.8)$$

ตารางที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างอาคาร^[77]

ลำดับที่	วัสดุ	ค่า k (วัตต์ต่อเมตร - องศาเซลเซียส)
1	แผ่นซีเมนต์แอสเบสตอส	0.148
2	แผ่นฉนวนกันความร้อนแอสเบสตอส	0.108
3	วัสดุฉนวนหลังคาที่ทำด้วยแอสฟัลต์	1.226
4	บิทูเมน (Bitumen)	1.298
5	อิฐ	
	(ก) แห้งและฉาบปูนหรือปิดด้วยแผ่นโมเสก	0.807
	(ข) ความชื้น 6%	1.211
	(ค) ผนัง (ไม่ฉาบปูน)	1.154
6	คอนกรีต	1.442
7	คอนกรีตเบา ขนาดความหนาแน่นต่าง ๆ	
	ความหนาแน่น 960 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	0.303
	ความหนาแน่น 1120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	0.346
	ความหนาแน่น 1280 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	0.476
8	แผ่นไม้ก๊อก	0.042
9	แผ่นไฟเบอร์ (Fiber Board)	0.052

ตารางที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างอาคาร (ต่อ) ^[77]

ลำดับที่	วัสดุ	ค่า k (วัตต์ต่อเมตร - องศาเซลเซียส)
10	ไฟเบอร์กลาส (ใยแก้ว)	
	(ก) แบบม้วน (Blanket)	0.038
	(ข) แบบแผ่น (Rigid Board)	0.033
	(ค) แบบท่อสำเร็จ (Rigid Pipe Sections)	0.038
11	แผ่นกระจก	1.053
12	ใยแก้วสานเป็นแผ่น หรือสอดใส่อยู่ระหว่างวัสดุอื่น 2 แผ่น (แห้ง)	0.035
13	แผ่นยิปซัม	0.191
14	แผ่นไม้อัดฮาร์ดบอร์ด	
	(ก) มาตรฐาน	0.216
	(ข) ปานกลาง	0.123
15	โลหะ	
	(ก) โลหะผสมของอลูมิเนียมแบบธรรมดา	211
	(ข) ทองแดงที่มีขายเชิงพาณิชย์	385
	(ค) เหล็กกล้า	47.6
16	ใยแร่อัดแน่นเป็นแผ่น	ให้ใช้ค่าจริงจากผู้ผลิต
17	วัสดุใช้ฉาบหรือปิดผิว	
	(ก) ยิปซัม	0.191
	(ข) ปูนฉาบน้ำหนักเบา	0.063
	น้ำหนักขนาดกลาง	0.274
	(ค) เพอร์ไลต์	0.115
	(ง) ปูนผสมทราย	0.533
(จ) เวอร์มิกิวไลต์	ให้ใช้ค่าจริงจากผู้ผลิต	
18	โพลีสไตรีนขยายตัว	0.035
19	โพลียูรีเทน โฟม	0.024
20	วัสดุทำพื้น PVC	0.713

ตารางที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างอาคาร (ต่อ) ^[77]

ลำดับที่	วัสดุ	ค่า k (วัตต์ต่อเมตร - องศาเซลเซียส)
21	ดินอัดหลวม (ร่วนซุย) ความชื้น 14%	0.375
22	หิน	
	หินทราย	1.298
	แกรนิต	2.927
	หินอ่อน	1.298
23	กระเบื้องหลังคา	0.836
24	ไม้	
	ไม้เนื้ออ่อน	0.125
	ไม้เนื้อแข็ง	0.138
	ไม้อัด	0.138
25	เวอร์มิกิวไลต์แบบเม็ดหยาบอัดหลวม	0.065
26	ไม้อัดชิปบอร์ด	0.144
27	ไม้พื้นแผ่นเรียบ	0.086
28	หินล้าง, กรวดล้าง	0.115

2.1.12 การศึกษาสมบัติทางเคมี

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กล่าวว่า สมบัติทางเคมี (Chemical Properties) หมายถึง สมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี และองค์ประกอบทางเคมี เช่น การติดไฟ การผุกร่อน การทำปฏิกิริยากับน้ำ การทำปฏิกิริยากับกรด - เบส เป็นต้น⁶⁸

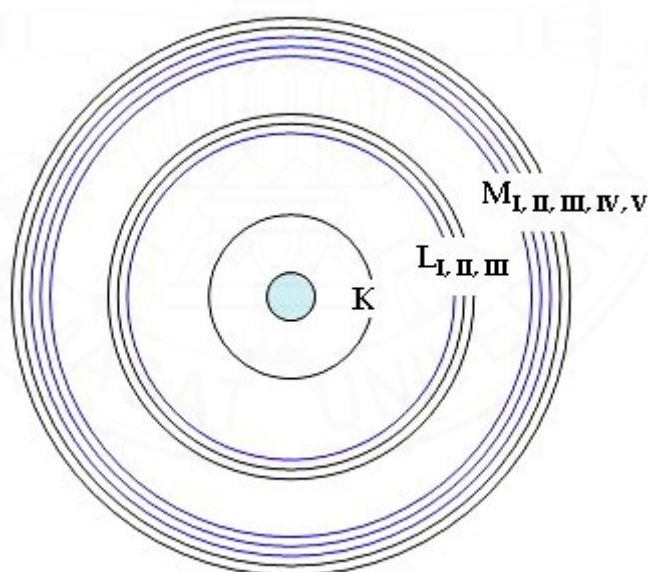
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ กล่าวว่า สมบัติทางเคมี หมายถึง สมบัติที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบภายในของสาร และการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น การเผาไหม้ การเกิดสนิม การผุพัง การระเบิด เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมี จะต้องมีสารใหม่เกิดขึ้นเสมอ มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายใน และมีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของสารด้วย ทำให้สารใหม่ที่เกิดขึ้น มีสมบัติแตกต่างไปจากสารเดิม เช่น การเกิดสนิมเหล็ก การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การสังเคราะห์ด้วยแสง เป็นต้น⁷⁸

จึงอาจสรุปได้ว่า สมบัติทางเคมี หมายถึง สมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี และองค์ประกอบทางเคมีภายในวัสดุนั้น เช่น การติดไฟ การผูกกร่อน การเผาไหม้ การเกิดสนิม การระเบิด การทำปฏิกิริยากับน้ำ การทำปฏิกิริยากับกรด - เบส เป็นต้น

2.1.12.1 เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X - Ray Fluorescence: XRF)

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละธาตุ

อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม แบ่งเป็นชั้น (Shells) โดยชั้นในสุดได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (Energy Level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, N, ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากอิเล็กตรอนในชั้น K ที่มีระดับพลังงานเดียวแล้ว อิเล็กตรอนในชั้นอื่น ยังแบ่งเป็นชั้นย่อย ได้แก่ LI, LII, LIII และ MI, MII, MIII, MIV, MV ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น⁷⁹

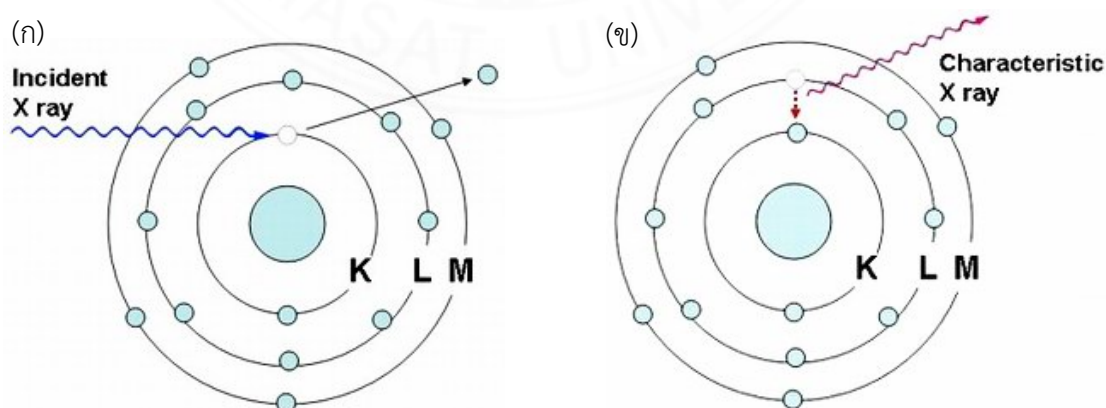
อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของวงโคจร มีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ที่ได้รับจากนิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ใกล้นิวเคลียส จะได้รับพลังงานยึด

เหนี่ยวนามากกว่าอิเล็กตรอนวงนอก และธาตุที่มีเลขอะตอมสูงขึ้นไป จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ออิเล็กตรอนมากขึ้น ดังตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 พลังงานยึดเหนี่ยวในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น ^[79]

ธาตุ	Z	KI	LI	LII	LIII	MI	MII	MIII
C	6	284.2	..	..	..	..	..	..
Al	13	1,559.6	117.8	72.95	72.55	..	..	..
Si	14	1,839.0	149.7	99.82	99.42	..	..	..
K	19	3,608.4	378.6	297.30	294.60	34.8	18.3	18.3
Ca	20	4,038.5	438.4	349.70	346.20	44.3	25.4	25.4
Cu	29	8,979.0	1,096.7	952.30	932.70	122.5	77.3	75.1
Zn	30	9,659.0	1,196.2	1,044.90	1,021.80	139.8	91.4	88.6

เมื่อยิงรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน หรือโปรตอน ไปยังอะตอมของธาตุ จะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ ดังแสดงในภาพที่ 2.17⁷⁹



ภาพที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอม (ก) รังสีเอกซ์ทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกจากวงโคจร (ข) อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่ามาแทนที่และคายรังสีเอกซ์จำเพาะออกมา⁷⁹

2.1.12.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X - Ray Diffraction: XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non - Destructive Analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิจาาระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ

ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L. Bragg ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของแร่ต่าง ๆ ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ขึ้นในปี 1948 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสามารถนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผลเพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น

XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD Pattern) เฉพาะตัวเปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน⁸⁰

การศึกษาวิเคราะห์โดยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน ศึกษาจากรูปแบบดิฟแฟรคชัน ซึ่งจะปรากฏในรูปกราฟแสดงค่า $2 - \theta$ ที่หน้าผลึกของแร่สะท้อนออกมา แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่า $d - \text{Spacing}$ โดยมีความสัมพันธ์กันดังสมการ Bragg's Equation (สมการที่ 2.9) ดังต่อไปนี้

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (2.9)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม

λ เป็นความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

d เป็นระยะห่างระหว่างระนาบ 2 ระนาบ

θ เป็นมุมตกกระทบของลำแสง

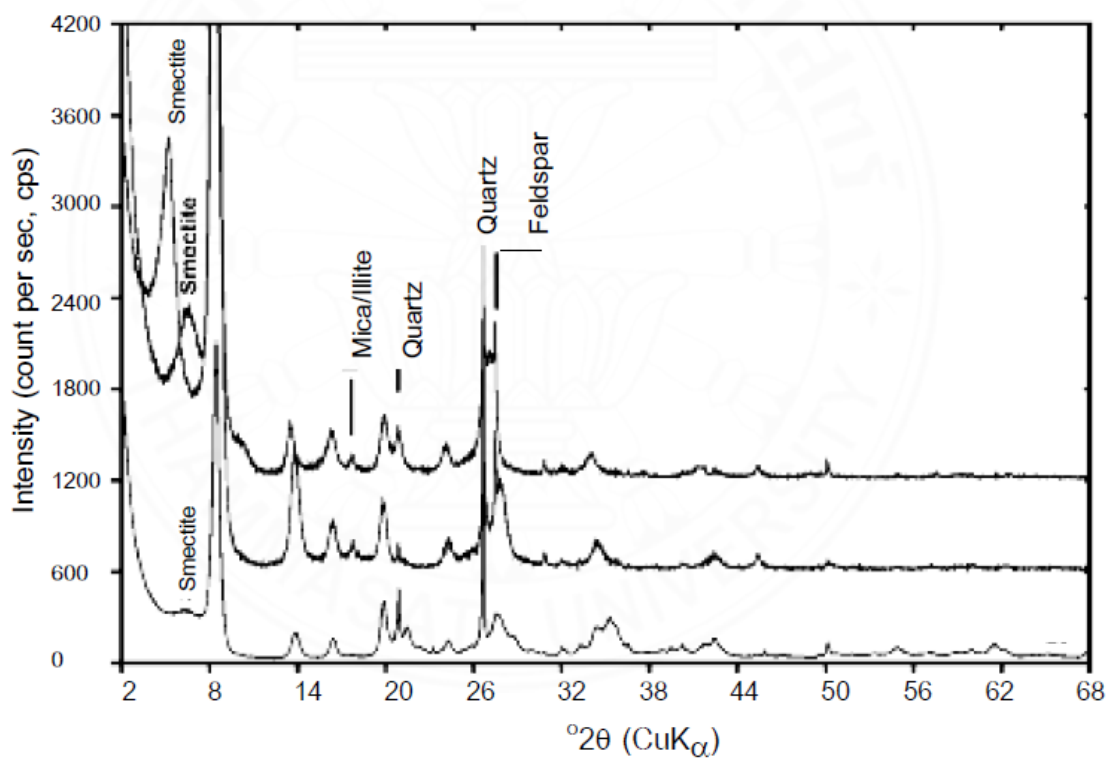
ในการแปลความหมายชนิดของแร่ สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบดิฟแฟรกชันโดยการหาค่า d - spacing ออกมาตามวิธีการมาตรฐานของ Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS, 1974) และ Interpretation of X - Ray Diffraction Data (Griffin, 1951) สำหรับปริมาณของแร่แต่ละชนิดนั้น อาจหาได้โดยการเปรียบเทียบความเข้มหรือความสูง หรือพื้นที่ใต้พีคหลักของแร่แต่ละชนิด โดยเปรียบเทียบกับแร่ที่พบทั้งหมดในตัวอย่างนั้น ๆ แล้วอาจจะประเมินเป็นเปอร์เซ็นต์ของแร่แต่ละชนิด⁸¹

หลักการที่สำคัญทางรังสีเอกซ์ยังคงได้นำมาใช้กันอยู่ถึงปัจจุบัน แต่มีความแตกต่างกันบ้างทางด้านรายละเอียดปลีกย่อยในการปฏิบัติ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ใช้โกนิออมิเตอร์ (goniometer) ทำให้เกิดการบันทึกผลการตรวจวัดตัวอย่างที่มีช่วงการวัดสม่ำเสมอ วิธีนี้เป็นลักษณะพิเศษเฉพาะสำหรับการทดสอบตัวอย่างที่มีขนาดเล็กละเอียดมาก การบดตัวอย่างให้ละเอียดเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการตรวจวัดโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การวิเคราะห์หาปริมาณทางเคมีจะให้ผลเป็นปริมาณธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างเท่านั้น ไม่ได้ให้ข้อมูลว่าธาตุต่าง ๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์ร่วมกันกับธาตุอื่น ๆ อย่างไร ซึ่งแตกต่างจากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ให้ผลการศึกษาเป็นรูปแบบของแนวระนาบทางผลึกบนดิฟแฟรกโทแกรม (Diffractogram) ที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้น การแปลความหมายของการเลี้ยวเบนรังสีจะทราบร่องค์ประกอบอย่างแท้จริง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโดยมวล (Mass Absorption Coefficient, μ^*) ไม่มีความแตกต่างมากนักสำหรับแร่หลักส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบจำนวนแร่โดยตรงในตัวอย่างโดยใช้ความเข้มหรือความสูงของยอดจากกราฟหรือพื้นที่ใต้กราฟนั้นให้ความแตกต่างได้ในระดับหนึ่ง

ข้อควรพิจารณาที่น่าสนใจ 2 ประการในการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ คือ การปรับเทียบเครื่องมือให้ถูกต้อง และการปรับตัวอย่างในวิถีของลำรังสีเอกซ์ เพื่อให้มีการเลี้ยวเบนได้สูงที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโดยมวลเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่างและเปลี่ยนแปลงตามลักษณะการแผ่รังสี อย่างไรก็ตามแร่ที่พบทั่วไปในตัวอย่างดินจะทำมุมการเลี้ยวเบน 2θ ระหว่าง 30 - 50 องศา ยกเว้นเหล็ก - คลอไรต์ (Fe - Chlorite) ซึ่งพบได้น้อยโดยทั่วไปเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ใช้หลอดรังสีเอกซ์แบบทองแดง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโดยมวลสำหรับแร่ทั่วไปเมื่อเปรียบเทียบกับหลอดรังสีที่ใช้ธาตุเหล็ก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโดยมวลของการแผ่รังสีเอกซ์ที่ใช้ธาตุเหล็กมีน้อยกว่าธาตุทองแดง (หลอดรังสีที่ใช้ธาตุทองแดง) การใช้การแผ่

รังสีเอกซ์ของธาตุเหล็กนิยมใช้กับแร่ที่คาดว่ามีความเข้มข้นของเหล็กสูง เมื่อใช้โมโนโครเมเตอร์ผลึกแบบโค้ง (Curved Crystal Monochromator) ที่เหมาะสมร่วมด้วยแล้ว การแผ่รังสีที่เหมาะสมที่สุดใน การระบุบ่งบอกแร่ดินในสารตัวอย่างนั้นจะให้ปริมาณแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบที่ถูกต้องมากขึ้น และง่ายกว่าการแผ่รังสีเอกซ์เนื่องจากธาตุอื่น

ในการตรวจสอบดิฟแฟรกโทแกรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินนั้น ได้นำมุม การเลี้ยวเบน (2θ) ไปเทียบกับตารางเพื่อหาระยะระหว่างระนาบ d ในหน่วยอังสตรอม (Å) เมื่อเปรียบเทียบกับระยะระหว่างระนาบผลึกนี้กับดิฟแฟรกโทแกรมของแร่มาตรฐานบนฐานข้อมูล ASTM แล้วสามารถบอกได้ว่าสารตัวอย่างนี้ประกอบด้วยแร่เดี่ยวหรือเป็นแร่ผสม ดิฟแฟรกโทแกรมในภาพที่ 2.18 แสดงแร่ดินที่ประกอบด้วยแร่ที่แตกต่างกันหลากหลาย



ภาพที่ 2.18 ดิฟแฟรกโทแกรมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์⁸²

การระบุแร่ดินนั้นจำเป็นต้องประยุกต์ใช้เทคนิควิธีอื่น ๆ เข้ามาช่วยในการศึกษาวิเคราะห์ เช่น วิธีทางเคมี ศิลาวรรณนา การดูกล้องแสงอินฟราเรด จุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscopy) การวิเคราะห์ความร้อนที่แตกต่างกัน (Differential Thermal Analysis) และวิธีอื่น ๆ แร่ดินที่ศึกษาโดยใช้การปฏิบัติวิธีอื่น ๆ เข้ามาช่วยนั้นเป็นสิ่งจำเป็นตัวอย่างเช่น ถ้าสาร

ตัวอย่างนั้นมีสารอินทรีย์อยู่มาก ควรกำจัดสารอินทรีย์ออกไปด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนที่จะผ่านขั้นตอนที่ใช้การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับการกำจัดเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนสารตัวอย่างด้วยโซเดียมไดไธโอนิต (Sodium Dithionite) หรือใช้วิธีการอื่นที่เหมาะสมกับสารที่ต้องการกำจัดออกเช่นเดียวกัน⁸²

สำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในปูนซีเมนต์จะทดสอบและแปลผลตามมาตรฐาน ASTM C 1365 - 98 Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland - Cement Clinker Using X - Ray Powder Diffraction Analysis ซึ่งได้แนะนำค่าสำหรับการแปลผลจากดิฟแฟรกโทแกรมไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.18

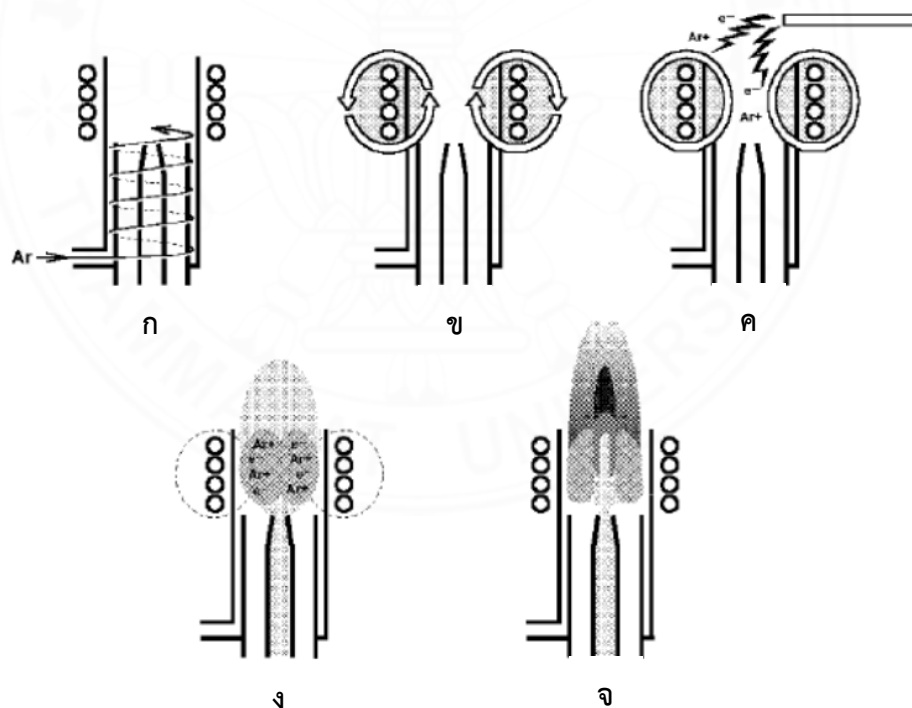
ตารางที่ 2.18 พีคของกราฟดิฟแฟรกโทแกรมที่แนะนำสำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์^[83]

Phase	hkl	d - Spacing (nm)	Position ($^{\circ}2\theta$) using Cu Ka
Orthorhombic C ₃ A	(113)	0.4210	21.1
Cubic C ₃ A	(023)	0.4236	21.0
	(213)	0.4083	21.8
C ₄ AF	(130)	0.3654	24.3
Magnesium Oxide	(200)	0.2106	42.9

2.1.12.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES)

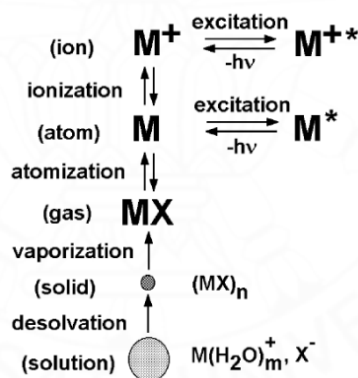
พลาสมา (Plasma) เป็นสถานะของสสารซึ่งมีลักษณะคล้ายแก๊ส แต่ในพลาสมามีอิเล็กตรอนและไอออนบวกเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย พลาสมาจึงมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและอนุภาคที่มีประจุในพลาสมาเกิดอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กได้ โดยทั่วไปแก๊สที่ใช้ในการจุดพลาสมา คือ แก๊สเฉื่อย แก๊สที่นิยมใช้คือ แก๊สอาร์กอน เพราะแก๊สอาร์กอนมีค่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนสูง มีค่าการนำความร้อนต่ำ และเกิด Background น้อย กระบวนการจุดพลาสมาในระบบ ICP - Based Method เริ่มจากการปล่อยแก๊สอาร์กอนผ่านเข้าไปในคบ (Torch) ดังแสดงในภาพที่ 2.19 ที่บริเวณปลายคบจะมีขดลวดทองแดงทำหน้าที่เป็นขดลวดเหนี่ยวนำคลื่นวิทยุหรือเรียกว่า Load Coil ซึ่ง Load Coil จะต่อกับอุปกรณ์ส่งความถี่วิทยุ เมื่อมีการส่งความถี่วิทยุเข้าสู่

Load Coil จะเกิดสนามแม่เหล็กบริเวณปลายคอบ หากมีตัวนำไฟฟ้าผ่านเข้าไปในบริเวณดังกล่าวจะมีการชักนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำและส่งผลให้ตัวนำเกิดความร้อน แก๊สอาร์กอนปกติที่ผ่านเข้าไปในคอบไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงให้แก๊สอาร์กอนที่ผ่านเข้าไปมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า โดยการปล่อยประจุไฟฟ้า (Discharge) เพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอาร์กอนและทำให้แก๊สอาร์กอนบางส่วนเป็นไอออน อิเล็กตรอนจะมีความเร็วมากขึ้นและมีพลังงานสูงขึ้นเมื่อผ่านสนามแม่เหล็กบริเวณปลายคอบ เรียกกระบวนการนี้ว่า Inductive Coupling อิเล็กตรอนพลังงานสูงไปชนอะตอมอาร์กอนอะตอมอื่น ทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ปฏิกิริยาลูกโซ่ดังกล่าวส่งผลให้แก๊สอาร์กอนที่ผ่านเข้าไปในคอบเปลี่ยนเป็นพลาสมาอาร์กอน พลาสมาที่เกิดขึ้นเรียกว่า Inductively Coupled Plasma (ICP) ที่มีอุณหภูมิสูงในช่วง 6,000 ถึง 10,000 เคลวิน อุณหภูมิสูงของพลาสมาสามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคที่ใช้เปลวไฟ (Flame) ในการทำให้ตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอม (Atomization) และเกิดการกระตุ้น (Excitation)⁸⁴



ภาพที่ 2.19 ภาพจำลองภาคตัดขวางของคอบ ICP และ Load Coil โดยแสดงกระบวนการ (ก) การเข้าสู่คอบของแก๊สอาร์กอน (ข) การส่งความถี่วิทยุไปยัง Load Coil (ค) การปล่อยประจุไฟฟ้าหรือสปาร์คให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระจากอาร์กอน (ง) อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) และเกิดพลาสมา (จ) ละอองลอยของตัวอย่างเข้าสู่พลาสมา⁸⁵

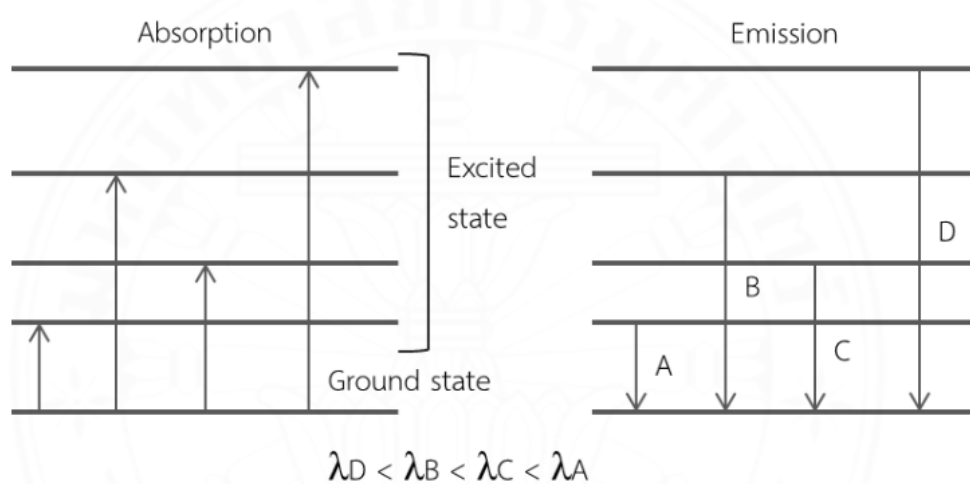
สารละลายตัวอย่างจะเข้าสู่คปในรูปละอองลอย (Aerosol) เมื่อตัวอย่างเข้าสู่บริเวณพลาสมาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 2.20 พลาสมาจะทำให้เกิดการกำจัดตัวทำละลายออกจากละอองตัวอย่าง (Desolation) ตัวอย่างที่ผ่านการกำจัดตัวทำละลายจะอยู่ในรูปอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่ปราศจากตัวทำละลาย แล้วสารตัวอย่างจะเกิดการกลายเป็นไอ (Vaporization) กระบวนการกลายเป็นไอเปลี่ยนอนุภาคสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปไอของโมเลกุลอิสระ ต่อมาโมเลกุลสารตัวอย่างจะเกิดการแตกตัวเป็นอะตอม (Atomization) อะตอมที่เกิดขึ้นบางส่วนอาจถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นไอออน (Ionization) นอกจากนี้พลาสมายังสามารถกระตุ้นอะตอมและไอออนของสารตัวอย่างให้อยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited State) ผ่านกระบวนการกระตุ้นอะตอมและไอออนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะไม่เสถียรและมีการคายพลังงานเพื่อเปลี่ยนระดับพลังงานมาสู่สถานะพลังงานที่ต่ำกว่า ดังแสดงในภาพที่ 2.21 การเปลี่ยนระดับพลังงานดังกล่าวจะมีการเปล่งแสง (Emission) ที่มีลักษณะเฉพาะตัวออกมา แสงที่เปล่งออกมาสามารถตรวจวัดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีคือ Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP - AES)



ภาพที่ 2.20 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อละอองตัวอย่างเข้าสู่คป ICP⁸⁵

การวิเคราะห์ธาตุด้วย ICP - OES อาศัยหลักการเปล่งแสงออกมาจากอะตอมธาตุ (Atomic Emission) หรือไอออนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา พลาสมาจากอาร์กอนมีพลังงานประมาณ 15.8 eV เมื่ออะตอมอิสระเข้าสู่พลาสมา พลังงานจากพลาสมากระตุ้นเวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron) ให้อยู่ในสถานะกระตุ้นหรือหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะคายพลังงานออกมาในรูปโฟตอนที่มีความยาวคลื่นจำเพาะ ภาพที่ 2.21 จำลองการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในภาวะกระตุ้นแผ่พลังงานออกมาและ

ลงมาสู่ชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า ถ้าการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานมีช่วงพลังงานที่กว้าง พลังงานที่แผ่ออกมาก็จะสูงและความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจะมีความยาวคลื่นสั้น ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจะอยู่ในช่วงยูวี - วิสิเบิล (UV - Visible) ความยาวของคลื่นแสงที่เปล่งออกมาสัมพันธ์กับระดับชั้นพลังงานและการจัดตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของอะตอมธาตุแต่ละชนิด นอกจากนี้ความเข้มของแสงที่เปล่งออกมายังสัมพันธ์กับปริมาณของอะตอมของธาตุในสารตัวอย่าง ดังนั้นเทคนิค ICP - OES จึงมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ⁸⁴



ภาพที่ 2.21 การดูดกลืนพลังงานและคายพลังงานโดยการเปล่งคลื่นแสง⁸⁴

2.1.12.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy (ICP - MS)

ICP - MS เป็นเครื่องมือใหม่ที่เริ่มมีใช้เมื่อปี ค.ศ. 1980 ใช้สำหรับการวิเคราะห์ธาตุและไอโซโทป วิธีนี้มีข้อดีหลายประการ คือ ช่วงของการตรวจวัดกว้างถึงช่วงยกกำลังหกถึงเจ็ดเท่า ICP-MS สามารถวิเคราะห์ธาตุในตารางธาตุได้พร้อมกันที่ละหลายธาตุถึง 70 ธาตุ วิธีนี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ เชิงกึ่งปริมาณ และเชิงปริมาณ ICP - MS สามารถใช้กับงานวิเคราะห์ที่ทำเป็นประจำ มีความรวดเร็วและมีความไวสูง สามารถวิเคราะห์สารได้ถึงขีดจำกัดการตรวจวัดที่ระดับความเข้มข้น พิโคกรัมต่อมิลลิลิตร (pg/ml) ถึง เฟมโตกรัมต่อมิลลิลิตร (fg/ml) ดังตารางที่ 2.19 บางครั้งการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคพิเศษสามารถวิเคราะห์ได้ถึงช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่าเฟมโตกรัมต่อมิลลิลิตร (sub - fg/ml) นอกจากนี้ ICP-MS ยังมีความสามารถเฉพาะในการวัดอัตราส่วนไอโซโทป (Isotopic Ratios) ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในการ

วิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุด้วยเทคนิค Isotope Dilution ได้อย่างแม่นยำ ลักษณะทั่วไปของวิธี ICP - MS เมื่อเปรียบเทียบกับ ICP - OES และ Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) สรุปในตารางที่ 2.19 ช่วงของขีดจำกัดการวิเคราะห์ทั่วไปของธาตุที่พบมาก สรุปได้ในตารางที่ 2.20⁸⁶

ตารางที่ 2.19 ลักษณะทั่วไปของวิธี ICP - MS ICP - OES และ AAS ^[86]

ลักษณะทั่วไปของการวิเคราะห์	ICP - MS	ICP - OES	AAS
Multi - Element Capacity	+	+	Oligo Analytical Method
Matrix and Minor Element (Stoichiometry)	+	++	+
Trace Elements	++	+	++
Ultra Trace Elements	++	-	+
Limits of Detection	pg/ml - fg/ml	ng/ml	pg/ml
Sample Amount of Analyze	ng - fg	µg - ng	ng - pg
Isotope Analysis (Isotope Dilution Analysis)	++	-	-
Dynamic Range	10 ⁹	10 ⁸	10 ⁹

ตารางที่ 2.20 ค่าประมาณของขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) สำหรับธาตุ 46 ธาตุ ที่มีความไวในการวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP - OES และไอโซโทปที่มีมากในวิธี ICP - MS ชนิด Quadrupole ICP - MS ^[87]

ธาตุ	สัญลักษณ์	LOD _{ICP - OES} (µg/l)	LOD _{ICP - MS} (µg/l)
Aluminium	Al	5	0.05
Antimony	Sb	40	0.005
Arsenic	As	30	0.01
Barium	Ba	0.5	0.001
Beryllium	Be	0.1	0.001
Bismuth	Bi	10	0.001
Boron	B	3	0.07
Bromine	Br	800/250	0.05

ตารางที่ 2.20 ค่าประมาณของขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) สำหรับธาตุ 46 ธาตุ ที่มีความไวในการวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP - OES และไอโซโทปที่มีมากในวิธี ICP - MS ชนิด Quadrupole ICP - MS (ต่อ) ^[87]

ธาตุ	สัญลักษณ์	LOD _{ICP - OES} (µg/l)	LOD _{ICP - MS} (µg/l)
Cadmium	Cd	2	0.005
Calcium	Ca	0.1	0.5
Cerium	Ce	100	0.001
Chromium	Cr	5	0.005
Chlorine	Cl	250/80	160
Cobalt	Co	3	0.001
Copper	Cu	0.3	0.005
Germanium	Ge	100	0.05
Gold	Au	25	0.005
Iodine	I	100/10	0.005
Indium	In	100	0.001
Iron	Fe	1	0.1
Lanthanum	La	6	0.005
Lead	Pb	7	0.001
Lithium	Li	3	0.005
Magnesium	Mg	0.5	0.05
Manganese	Mn	0.4	0.005
Mercury	Hg	20	0.001
Molybdenum	Mo	1	0.005
Palladium	Pd	70	0.005
Platinum	Pt	30	0.005
Potassium	K	80	0.5
Phosphorus	P	20	6
Selenium	Se	50	0.05
Silicon	Si	5	8

ตารางที่ 2.20 ค่าประมาณของขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) สำหรับธาตุ 46 ธาตุ ที่มีความไวในการวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP - OES และไอโซโทปที่มีมากในวิธี ICP - MS ชนิด Quadrupole ICP - MS (ต่อ) ^[87]

ธาตุ	สัญลักษณ์	LOD _{ICP - OES} (µg/l)	LOD _{ICP - MS} (µg/l)
Silver	Ag	5	0.005
Sodium	Na	6	0.05
Strontium	Sr	0.2	0.001
Sulphur	S	50	50
Tellurium	Te	20	0.005
Thallium	Tl	50	0.001
Tin	Sn	7	0.005
Titanium	Ti	3	0.05
Tungsten	W	20	0.005
Uranium	U	400	0.001
Vanadium	V	2	0.005
Zinc	Zn	1	0.005
Zirconium	Zr	5	0.005

วิธี ICP - MS สามารถวิเคราะห์ธาตุหรือไอโซโทปของธาตุได้เกือบทั้งหมด ประมาณ 70 ธาตุ แต่มีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ คือ

(1) ธาตุบางตัวไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี ICP - MS ได้แก่ ธาตุในกลุ่มแก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม (He) นีออน (Ne) อาร์กอน (Ar) คริปทอน (Kr) ซีซอน (Xe) และ เรดอน (Rn) เนื่องจากตัวอย่างอยู่ในสถานะแก๊ส ธาตุออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) วิเคราะห์ไม่ได้เนื่องจากเป็นแก๊สพื้นหลัง ธาตุฟลูออรีน (F) ก็ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากไม่แตกตัวเป็นไอออนใน ICP

(2) ธาตุบางตัวสามารถวิเคราะห์ได้แต่ค่อนข้างยาก ได้แก่ ธาตุคาร์บอน (C) ซัลเฟอร์ (S) คลอรีน (Cl)

(3) ธาตุบางตัวสามารถวิเคราะห์ได้แต่เนื่องจากแตกตัวเป็นไอออนยากใน ICP หรือมีการรบกวนจากนิวไคลด์ที่มีเลขมวลเหมือนกันแต่จำนวนโปรตอนต่างกัน หรือจากโมเลกุล

ไอออน หรืออนุกรมเลรีที่มีหลายอะตอม (Polyatomic Interference) ธาตุประเภทนี้ ได้แก่ ธาตุ ฟอสฟอรัส (P) ซิลิคอน (Si) เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) โบรมีน (Br)

จนถึงปัจจุบันได้มีการนำวิธี ICP - MS มาประยุกต์ใช้ในงานเภสัช วิเคราะห์ด้านต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์หาปริมาณตัวยาสำคัญ การวิเคราะห์การปนเปื้อน การศึกษา เมแทบอลิซึมของยา ฯลฯ นอกจากการใช้ประโยชน์ในงานด้านเภสัชวิเคราะห์แล้ว วิธี ICP - MS ยัง เป็นวิธีที่มีประโยชน์และใช้ในงานด้านอื่น ได้แก่ การวิเคราะห์น้ำ การวิเคราะห์ธาตุหรือสารตกค้างใน สมุนไพรและข้าว งานด้านพิษวิทยาและนิติวิทยาศาสตร์ ไอโซโทปของกัมมันตรังสีอายุยาว เป็นต้น⁸⁶

2.1.13 การศึกษาสมบัติทางกล

สถาบันยานยนต์ ให้ความหมายว่า สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ก็ คือ พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่สามารถแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ สมบัติ เชิงกล อันได้แก่ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) ความยืดหยุ่น (Flexible) ความอ่อนตัว (Ductility) ความเปราะ (Brittleness) ความเหนียว (Toughness) ความแข็งแรง (Strength) ความ แข็งแกร่ง (Stiffness) พลาสติกซีตี (Plasticity) ความล้า (Fatigue) การคืบ (Creep) ยิสเตอร์ซิสทาง กล⁸⁸

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กล่าวว่า สมบัติเชิงกล คือ พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่สามารถแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ เช่น ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) สภาพพลาสติก (Plasticity) สภาพยืดหยุ่น (Elastic) ความเปราะ (Brittleness) ความแข็งแรง (Stiffness) วัสดุต่าง ๆ จะมีการตอบสนองต่อแรงภายนอกที่มากระทำ แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของวัสดุ⁸⁹

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กล่าวว่า สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุที่ถูกแรงภายนอกกระทำ การยืดตัว/หดตัวของวัสดุ การเปลี่ยนรูปของวัสดุ ภายใต้แรงกระทำ การตอบสนองต่อแรงกระทำ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการรับ น้ำหนัก การทนต่อการสึกหรอ การทนต่อการขีดขีด ความเหนียวและการดูดซับพลังงาน (แรง กระแทก)⁹⁰

ดังนั้น สมบัติเชิงกล จึงหมายถึง พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่สามารถแสดง ออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ สมบัติเชิงกล อันได้แก่ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) ความยืดหยุ่น (Flexible) ความอ่อนตัว (Ductility) ความเปราะ (Brittleness) ความเหนียว (Toughness) ความแข็งแรง (Strength) ความแข็งแรง (Stiffness) พลาสติกซีตี (Plasticity) ความ ล้า (Fatigue) การคืบ (Creep) ยิสเตอร์ซิสทางกล เป็นต้น

2.1.13.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาสมบัติทางกล

การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำหรับการศึกษาสมบัติทางกล (ในที่นี่จะกล่าวถึงการทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด) จะอ้างอิงการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ดังแสดงในตารางที่ 2.21

ตารางที่ 2.21 ลักษณะตัวอย่างสำหรับศึกษาสมบัติทางกล

ลำดับ	ประเภทของผลิตภัณฑ์คอนกรีต	ขนาดและลักษณะตัวอย่าง	
		การทดสอบกำลังรับแรงอัด	การทดสอบกำลังรับแรงดัด
1	มอร์ตาร์	50 mm. Cube Specimen ⁹¹	40 x 40 x 160 mm. Prism Specimen ⁹²
2	มอร์ตาร์ปรับระดับ	50 mm. Cube Specimen ⁹¹	40 x 40 x 160 mm. Prism Specimen ⁹²
3	คอนกรีต ⁹³	ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm. ความยาว 300 mm. ^{93,94}	<u>Splitting Tensile Strength</u> ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm. ความยาว 300 mm. ^{93,95} <u>Simple Beam with Third - Point Loading</u> คานตัวอย่างมาตรฐานที่มีความยาว ประมาณ 3 เท่าของส่วนสูง ^{93,96} <u>Simple Beam With Center-Point Loading</u> คานตัวอย่างมาตรฐานที่มีความยาว ประมาณ 3 เท่าของส่วนสูง ^{93,97}

2.1.13.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

กำลังอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของคอนกรีต เนื่องจากการออกแบบคอนกรีตส่วนมากมักจะออกแบบให้คอนกรีตรับเฉพาะแรงอัดอย่างเดียว ถึงแม้ว่าคอนกรีตจะรับแรงดึงได้บ้าง ก็มักจะไม่นำมาคิดในองค์อาคารส่วนที่ต้องรับแรงดึง แต่มักจะให้เหล็กเสริมรับแรงส่วนนี้ไป

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาคส่วนผสม (โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์) อายุ การบ่ม และอื่น ๆ เนื่องจากวิวัฒนาการทางวิชาการของคอนกรีตได้พัฒนาไปมาก จึงทำให้ในปัจจุบันนี้สามารถผลิตคอนกรีตที่กำลังอัดถึง 700 กก./ซม.² หรือสูงกว่าได้

กำลังอัดของคอนกรีต, f_c หมายถึง กำลังอัดที่ได้จากการทดสอบแท่งตัวอย่างมาตรฐานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ที่อายุ 28 วัน ในบางครั้งแท่งตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. ก็มักนิยมใช้ในการก่อสร้างแต่กำลังอัดของรูปลูกบาศก์จะสูงกว่ากำลังอัดของรูปทรงกระบอกมาตรฐานซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$f_c = \frac{P_u}{A} \quad (2.10)$$

โดย f_c = ความต้านทานแรงอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, กก./ซม.²

P_u = น้ำหนักกดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบรับได้, กก.

A = พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, ซม.²

ในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การกำหนดใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญ ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงขีดความสามารถของผู้รับเหมาก่อสร้างด้วยว่า จะมีความสามารถผลิตคอนกรีตคุณภาพนั้น ๆ ได้หรือไม่ โดยปกติผู้ออกแบบจะกำหนดกำลังอัดของคอนกรีตสำหรับก่อสร้างจริงให้สูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้คำนวณออกแบบประมาณ 15 - 25% เนื่องจากกำลังของคอนกรีตในที่ก่อสร้างย่อมต่ำกว่ากำลังของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ⁹⁸

2.1.13.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

คานคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีพฤติกรรมอยู่ 2 แบบ คือ พฤติกรรมของคานรับแรงดัดและพฤติกรรมของคานรับแรงเฉือน ซึ่งการจะออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จึงจำเป็นต้องรู้ถึงพฤติกรรมในแบบต่าง ๆ ของคาน และรูปแบบการเสียหาย เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถให้รายละเอียดในการเสริมเหล็กแบบต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง และตรงตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของคานคอนกรีต

กำลังดึงของคอนกรีต (Tensile Strength) ในบางครั้งก็มีความสำคัญ สำหรับการออกแบบงานคอนกรีตบางประเภท เช่น ถังน้ำ เขื่อน หรือพื้นถนน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในอาคารหรือโครงสร้างทั่ว ๆ ไปแล้วมักจะไม่ได้คิดแรงดึงของคอนกรีตในการออกแบบ

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่เปราะ (Brittle) ดังนั้น กำลังดึงของคอนกรีตจะต่ำมากประมาณ 7 - 11 % ของกำลังอัดเท่านั้น การหาลำดับที่แท้จริงของคอนกรีตไม่นิยมทำการทดสอบเพราะทำได้ยากและได้ค่าไม่แน่นอน ส่วนมากมักทดสอบหาลำดับดึงของคอนกรีตทางอ้อม โดยการทำการทดสอบแรงดึงแยก (Splitting Tension) และการทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength)

ในการทดสอบกำลังดัดซึ่งนิยมใช้ในงานถนนคอนกรีตนั้นทำได้โดยการทดสอบคานคอนกรีตล้วน ขนาดพื้นที่หน้าตัด 15×15 ซม. กำลังดัดที่ได้จากการทดลองนี้หมายถึงค่ากำลังสูงสุดหรือบางครั้งเรียกว่า “โมดูลัสแตกหัก” (Modulus of Rupture)⁹⁸ ซึ่งการคำนวณแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

(1) รอยแตกร้าวเกิดที่ผิวรับแรงดึงภายในส่วนกลางหนึ่งในสามของคานทดลอง ให้คำนวณโมดูลัสแตกร้าวดัง สมการที่ 2.11

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.11)$$

เมื่อ R = โมดูลัสแตกร้าว (MPa)

P = แรงกดสูงสุดตามที่ย่านได้จากเครื่องทดลอง (N)

L = ความยาวช่วงคานประสิทธิผล (มิลลิเมตร)

b = ความกว้างเฉลี่ยของคานทดลอง (มิลลิเมตร)

d = ความลึกเฉลี่ยของคานทดลอง (มิลลิเมตร)

(2) รอยแตกร้าวเกิดที่ผิวรับแรงดึงภายนอกส่วนกลางหนึ่งในสามของคานทดลอง แต่ไม่เกิน 5% ของความยาวช่วงคานประสิทธิผล ให้คำนวณโมดูลัสแตกร้าว ดังสมการที่ 2.12

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ a = ระยะเฉลี่ยระหว่างเส้นรอยแตกกับฐานรองรับที่ใกล้ที่สุดบนผิวรับแรงดึงของคานทดลอง (มิลลิเมตร)

(3) รอยแตกร้าวเกิดที่ผิวรอบแรงดึงภายนอกส่วนกลางหนึ่งในสามของคานทดลองมากกว่า 5% ของความยาวช่วงคานประสิทธิผล ให้ถือว่าผลการทดลองไม่สามารถคำนวณหาโมดูลัสแตกร้าวได้⁹⁹

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแทนที่ส่วนผสมของผลิตภัณฑ์คอนกรีตด้วยซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์และการชะละลายของโลหะหนักในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์คอนกรีต ดังนี้

Wang R, Zhang T และ Wang P ได้ศึกษาการเติมผงของซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ส่วนอโลหะที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลเป็นสารผสมเพิ่มในซีเมนต์มอร์ตาร์ การศึกษาสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ ประกอบด้วย การศึกษาความหนาแน่น ปริมาณช่องว่างในอากาศ ค่าความคงตัว อัตราการหดตัว และความดูดซึมน้ำ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มฝุ่นผงพลาสติกจากกระบวนการรีไซเคิลซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ส่วนอโลหะในส่วนผสมของมอร์ตาร์จะเพิ่มปริมาณอากาศ และเพิ่มค่าความคงตัวในมอร์ตาร์สด แต่ทำให้ค่าความหนาแน่นในมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้วลดลง สำหรับกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ส่วนอโลหะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงการเติมซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ที่อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่า 15% ส่วนกำลังรับแรงดัดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามอัตราส่วนของซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังรับแรงดัดจะมีอัตราการลดลงอย่างช้า ๆ ในช่วงการเติมซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ที่ 0 - 10% อัตราการหดตัวของมอร์ตาร์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงการเติมซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ที่ 0 - 15% และค่าความดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่เติมซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ที่ 5% 10% และ 15% มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่เป็นตัวอย่างควบคุม ดังนั้น มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของฝุ่นผงพลาสติกจากกระบวนการรีไซเคิลซากแพลงจอร์อิเล็ททอนิกส์ส่วนอโลหะจึงกลายเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่สำหรับงานก่อสร้าง ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม¹⁰⁰

Lakshmi RS และ Nagan S กล่าวว่าในขณะที่ความต้องการวัสดุก่อสร้างมีเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยส่วนมากจึงมุ่งเน้นการศึกษาวัสดุทดแทนจากขยะอิเล็ททอนิกส์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำส่วนประกอบของขยะพลาสติกที่ได้จากการคัดแยกจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็ททอนิกส์มาใช้แทนมวลรวมหยาบในคอนกรีตในปริมาณ 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, 24% และ 28% และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก โดยศึกษาสมบัติการรับกำลังแรงอัด สมบัติการรับกำลังแรงดัด สมบัติการรับกำลังรับแรงดัด การทนทานต่อการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่นำส่วนผสมของขยะพลาสติกเข้าไปแทนที่มวลรวมหยาบไม่

เกิน 15% จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเล็กน้อย กำลังรับแรง และความทนทานต่อการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์¹⁰¹

Kumar SK และ Baskar K ได้ศึกษาการนำขยะพลาสติกที่มีส่วนผสมของพอลิสไตรีน (High Impact Polystyrene: HIPS) ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้แทนที่มวลรวมหยาบในคอนกรีต โดยมีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยขยะพลาสติกในปริมาตรที่แตกต่างกัน คือ 10% 20% 30% 40% และ 50% ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC 53 Grade) ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.13 ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหยาบ มีขนาดใหญ่สุดที่ 12.5 มิลลิเมตร ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.79 และค่าความหนาแน่น 1,624.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด มีขนาดใหญ่สุดที่ 4.75 มิลลิเมตร ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 และค่าความหนาแน่น 1,656.09 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และขยะพลาสติกที่นำมาแทนที่มวลรวมหยาบมีหลายขนาด ตั้งแต่ 6 - 12 มิลลิเมตร มีรูปร่างเป็นแผ่น ผิวหน้าเรียบ และมีสีดำ ค่าความถ่วงจำเพาะ 1.29 และค่าความหนาแน่น 595.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต ออกแบบเป็น 3 เกรด คือ M20 M25 และ M30 ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 0.49 และ 0.53 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าค่าการยุบตัว (Slump) และค่าความหนาแน่นของคอนกรีตสดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณขยะพลาสติกสูงขึ้น ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณขยะพลาสติกสูงขึ้น จากผลการทดสอบอาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยขยะพลาสติกไม่เกิน 30% จะสามารถนำไปใช้กับงานโครงสร้างได้¹⁰²

Iniyan LNA และ Shanmugasundaram M ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์ของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยการนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีต โดยได้นำซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดโลหะที่บดเป็นผงมาแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตในอัตราส่วน 10% 20% 30% 40% 50% ตามลำดับ และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราคงที่ 30% ในส่วนผสมคอนกรีต เกรด M25 พบว่าสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต ได้แก่ ค่าการยุบตัว ค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึง และค่ากำลังรับแรงดัด มีค่าลดลงตามปริมาณซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น คอนกรีตที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ไม่ต้องรับแรง แต่ในขณะเดียวกันคอนกรีตชนิดนี้มีความหนาแน่นต่ำ จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นโครงสร้างคอนกรีตมวลเบา โดยส่วนผสมที่สามารถนำไปใช้เป็นโครงสร้างคอนกรีตมวลเบา คือ การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ 10% อย่างไรก็ตามการใช้ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นวัสดุทดแทน จะช่วยลดการเกิดสารพิษในสิ่งแวดล้อมได้ และเป็นการนำซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ทดแทนวัสดุก่อสร้างได้อย่างยั่งยืน¹⁰³

Wang R และ Meyer C ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกที่มีส่วนผสมของพอลิสไตรีน (High Impact Polystyrene: HIPS) โดยการนำมาแทนที่ทรายในส่วนผสมของมอร์ตาร์ เพื่อที่จะลดปัญหาการเกิดขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และปัญหาจากการบริโภคพลังงาน ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ใช้ขยะพลาสติกที่มีส่วนผสมของพอลิสไตรีนแทนที่ทราย มีค่าลดลง แต่ค่ากำลังรับแรงดึงมีค่าลดลงน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงอัด แต่ขยะพลาสติกที่มีส่วนผสมของพอลิสไตรีนมีผลทำให้มอร์ตาร์มีความยืดหยุ่นและเพิ่มความสามารถในการกระจายพลังงาน อย่างไรก็ตามขยะพลาสติกที่มีส่วนผสมของพอลิสไตรีนมีส่วนทำให้ความหนาแน่น โมดูลัสความยืดหยุ่น ค่าการนำความร้อน และค่าความซึมผ่านของน้ำในมอร์ตาร์ลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อความต้านทานรอบการแช่แข็งและละลาย การใช้มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกที่มีส่วนผสมของพอลิสไตรีนเหมาะสำหรับการใช้งานเป็นคอนกรีตมวลเบาหรือคอนกรีตมวลปานกลาง นอกจากนี้ขยะพลาสติกที่มีส่วนผสมของพอลิสไตรีนมีส่วนช่วยปรับปรุงสมบัติการนำความร้อน และในขณะเดียวกันยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุพลาสติกหลังการบริโภคที่จะกลายเป็นขยะมูลฝอย¹⁰⁴

Schneider EL, Veit HM, Hartmann WL, Stolz CM, Robinson LC, Oliveira CT และคณะ ได้ศึกษาเมทริกซ์ซีเมนต์ที่ใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนอลูมิเนียมเป็นส่วนผสมของมวลรวมเบา โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินอิทธิพลของการแทนที่ทรายควอทซ์บางส่วนด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนอลูมิเนียม (NMFPCB) ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของแผงวงจร (PCB) จะถูกถอดออก ทำการเจียรแล้วผ่านกระบวนการแยกโดยแม่เหล็กและไฟฟ้าสถิต เพื่อแยกโลหะส่วนที่มีค่าและส่วนอลูมิเนียมออกจากกัน ในการศึกษาจะใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.48 เท่ากันตลอดการทดลอง อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทรายเท่ากับ 1:3 (โดยน้ำหนัก) สำหรับตัวอย่างควบคุมและใช้การแทนที่ทรายด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนอลูมิเนียม 25% และ 50% โดยปริมาตรและนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนในแต่ละช่วงอายุ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ทรายด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนอลูมิเนียมในปริมาณมากขึ้น ทำให้ความสม่ำเสมอของเมทริกซ์ซีเมนต์ลดลง กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม แต่อย่างไรก็ตามเมทริกซ์ซีเมนต์ก็ยังมีศักยภาพที่จะใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในส่วนที่เป็นบล็อกคอนกรีตและส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างหลัก¹⁰⁵

Lakshmi RS และ Nagan S ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกเป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้าง เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต และลดค่าใช้จ่ายทางอ้อมที่เกิดขึ้นจากการกำจัดขยะพลาสติกที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์แล้ว ขยะอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย แผงวงจรเก่าของเครื่องคอมพิวเตอร์

โทรทัศน์ ตู้เย็น วิทยุ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ที่หมดอายุการใช้งานแล้วถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตโดยการนำมาแทนที่มวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียด ซึ่งการทดลองในครั้งนี้ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยการนำไปแทนที่มวลรวมหยาบในผลิตภัณฑ์คอนกรีตประเภท M20 ตั้งแต่ 0% ถึง 30% จากผลการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัด อยู่ในเกณฑ์ดี สามารถนำไปใช้งานได้¹⁰⁶

Lakshmi RS และ Nagan S กล่าวว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์เป็นวัสดุที่จะก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งทางเลือกใหม่ของการจัดการกับขยะอิเล็กทรอนิกส์ คือ การพิจารณากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่อย่างเป็นรูปธรรม บทความนี้จึงได้แสดงผลการศึกษาศักยภาพของการเตรียมคอนกรีตที่ใช้ขยะอิเล็กทรอนิกส์ส่วนพลาสติกแทนที่มวลรวมหยาบ โดยได้ศึกษาการรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยขยะอิเล็กทรอนิกส์ในสัดส่วนต่างกัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่เป็นพลาสติกมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป นอกจากนี้ยังได้มีการออกแบบให้มีการทดสอบช่องว่างในคอนกรีต ความทนทานต่อสารเคมี และการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยขยะอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่เป็นพลาสติกที่ 15% โดยน้ำหนัก และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน 10% โดยน้ำหนัก จะทำให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากที่สุด¹⁰⁷

Kumar SK และ Baskar K ได้ศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบในคอนกรีตที่ใช้กับงานโครงสร้างด้วยขยะพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์ (E-plastic) สำหรับมุมมองของการใช้ขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ขยะพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์จากเครื่องคอมพิวเตอร์มีความเหมาะสมที่จะใช้แทนที่มวลรวมหยาบ ซึ่งในการศึกษาได้ออกแบบให้มีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยขยะพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณที่แตกต่างกัน (10, 20, 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร) และทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่อายุ 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการใช้งานได้ของส่วนผสมคอนกรีตที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยขยะพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์ลดลงเมื่อส่วนผสมมีปริมาณขยะพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัดของส่วนผสมคอนกรีตที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยขยะพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม จึงอาจกล่าวได้ว่าผลของการเพิ่มขยะพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์ในคอนกรีตจะลดความหนาแน่นแห้งของคอนกรีต และแสดงพฤติกรรมการเสียรูปสูงก่อนเกิดการวิบัติ ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตที่มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป อาจมีข้อได้เปรียบในน้ำหนักของคอนกรีตที่จะนำไปใช้เป็นคอนกรีตมวลเบา และการนำไปใช้งานกับโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นหรือในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว¹⁰⁸

Mohamad SSB ได้ศึกษาวิเคราะห์การนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะ (PCBs) แทนทรายในส่วนผสมของมอร์ตาร์และอิฐ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะกลับมาใช้ใหม่ โดยทดสอบการชะละลายของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะจากการบดมอร์ตาร์และอิฐ การทดสอบนี้ดำเนินการเพื่อหาความเป็นไปได้ของการใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะในมอร์ตาร์และอิฐในแง่ที่จะไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์และอิฐ จะใช้การแทนที่ส่วนผสมของทรายด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะตั้งแต่ 0% ถึง 40% และ 0% ถึง 50% โดยน้ำหนักของทรายตามลำดับ จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพของมอร์ตาร์และอิฐ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความต้านทานแรงดัด การดูดซับน้ำ และการทดสอบการชะละลาย นอกจากนี้ได้มีการทดสอบความทนทานต่อความเป็นกรดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะที่ 10% ผลการวิจัยพบว่าการชะละลายไอออนของโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยกระทรวงสิ่งแวดล้อมของประเทศมาเลเซีย (Department of Environment Malaysia: DOE) กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะ มีค่าอยู่ในช่วง 10.1 N/mm² ถึง 31.9 N/mm² สำหรับกำลังรับแรงอัด และ 3.5 N/mm² ถึง 7.7 N/mm² สำหรับกำลังรับแรงดัด ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด 33.5 N/mm² และ 8.0 N/mm² ปริมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะที่ใช้ทดแทนทรายที่ให้กำลังสูงสุดสำหรับมอร์ตาร์ คือ ประมาณ 28% และสำหรับอิฐสัดส่วนที่เหมาะสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะ คือ ไม่เกิน 30% จากการทดสอบความทนทาน น้ำหนัก และกำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงหลังจากผ่านการแช่ในสารละลายกรด การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ประมาณ 1.11% และ 11.11% ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 0.94% และ 13.29% ตามลำดับ โดยสรุปแล้วการศึกษาแสดงให้เห็นว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในรูปแบบที่เพิ่มมูลค่า เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีแนวโน้มที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในวงกว้าง¹⁰⁹

Ban BC, Song JY, Lim JY, Wang SK, An KG, Kim DS การพัฒนาล่าสุดในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทำให้การผลิตแผงวงจรพิมพ์ (PCB) เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้น ปริมาณ PCB ของเสียจากการผลิตทางอิเล็กทรอนิกส์และของเสียทางอิเล็กทรอนิกส์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน กลายเป็นเรื่องที่น่ากังวลอย่างมาก การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอวิธีการนำเศษ PCB กลับมาใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับปูนซีเมนต์ แม้ว่าการขยายตัวของแผง PCB ของเสียที่ละเอียดกว่า 0.08 มม. ในน้ำพบว่ามากกว่า 2.0% อัตราการขยายตัวสูงสุดในน้ำ 0.08 ถึงประมาณ 0.15 และ 0.15 ถึงประมาณ 0.30 มม. แผง PCB ขนาดน้อยกว่า 2.0% ซึ่งพอใจ เงื่อนไข

ที่จำเป็นในฐานะสารเติมแต่งทางเลือกสำหรับปูนซีเมนต์แทนทราย ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของปูนมาตรฐานและปูนที่เติม PCB ของเสียพบว่ามีย่าน้อยกว่า 10% และคาดว่าความแตกต่างจะน้อยลงหลังจากอายุมากขึ้น ความทนทานของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เติม PCB ของเสียยังได้รับการตรวจสอบผ่านการทดสอบไซคลิกการปรับสภาพแบบแห้ง/เปียก และการทดสอบการปรับสภาพที่เป็นกรด/ด่าง จากการทดสอบพบว่าทั้งน้ำหนักและกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์จะกลับคืนสภาพตามอายุ การทดสอบการชะโลหะหนักจากเศษ PCB ที่เติมด้วยปูนซีเมนต์พบว่าไม่มีไอออนของโลหะหนัก เช่น ทองแดง ตะกั่ว หรือแคดเมียมถูกตรวจพบในน้ำชะขยะ ซึ่งเป็นผลมาจากผลการตรึงของซีเมนต์ไฮเดรต¹¹⁰

Huang HL, Hwang CL, Peng SS, Wang EH, Chen CT and Chiang CC ได้ศึกษาการนำซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์นำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในซีเมนต์มอร์ตาร์ แม้ว่าการขยายตัวของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.08 มิลลิเมตรจะมีค่าสูงถึง 2% แต่ค่าการขยายตัวสูงสุดของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงที่มีขนาด 0.08 - 0.15 มิลลิเมตร และขนาด 0.15 - 0.30 มิลลิเมตร จะมีค่าการขยายตัวต่ำกว่า 2% ซึ่งเหมาะสำหรับที่จะนำมาใช้แทนที่ทรายในส่วนผสมของมอร์ตาร์ ความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงอัดระหว่างตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ พบว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า 10% ซึ่งคาดว่าอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากอายุของมอร์ตาร์ ค่าความทนทานของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ถูกทดสอบโดยการนำไปแช่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดและค่าความเป็นด่าง พร้อมทั้งเปลี่ยนสถานะของมอร์ตาร์ให้เปียกและแห้งซ้ำ ๆ กันหลายครั้ง จากการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของมอร์ตาร์เพิ่มมากขึ้น การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ ไม่พบว่ามีไอออนของโลหะหนัก เช่น ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมเจือปนอยู่¹¹¹

Nagajothi PG และ Kala F ได้ศึกษาการนำซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่น และซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง มาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์คอนกรีต สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตจะใช้ซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่นแทนที่มวลรวมหยาบปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 21 และ 28 วัน สำหรับส่วนผสมของมอร์ตาร์จะใช้ซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 0, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับ มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 10% เติมน้ำชิลิกา 2.5% หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงที่อายุ 7, 21 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดในตัวอย่าง

มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงมีค่าลดลงตามปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการแทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นในปริมาณร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงถึง 2 เท่าของตัวอย่างควบคุม ส่วนกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น¹¹²

Sawitri Pianchaiyaphum, Suphaphat Kwonpongsagoon, Premrudee Kanchanapiya และ Chakrapan Tuakta ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะ โดยการนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมในช่วง 0.46 – 4.5 % ส่วนกำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม 14.3 – 53.2 % แต่ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกจะเพิ่มขึ้น ปริมาณการชะละลายของโลหะหนัก ได้แก่ แบเรียม ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสี มีการตรวจพบเฉพาะสังกะสีและทองแดง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานได้กำหนดไว้¹¹³

Pongsatorn Saengpang, Premrudee Kanchanapiya และ Chakrapan Tuakta ได้ศึกษาผลของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะชนิดฝุ่นผงที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต โดยได้นำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะชนิดฝุ่นผงแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนตั้งแต่ 0% – 50% โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.62 จากผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะชนิดฝุ่นผงเพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ร้อยละ 40 และ 20 ตามลำดับ โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 25 เมกะปาสคาล และส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงดึงสูงสุด คือ การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ร้อยละ 30 โดยให้ค่ากำลังรับแรงดึง 4.48 เมกะปาสคาล ทั้งนี้การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะชนิดฝุ่นผงที่เหมาะสมที่สุด คือ 10 – 20% และไม่ควรมีอัตราส่วนเกิน 20% จึงจะมีสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง¹¹⁴

Pothinathan SKM, Muthukannan M และ Ganaraj SC ได้ศึกษาสมบัติความทนทานและกำลังรับแรงของคอนกรีตที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากการทดลองใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดตั้งแต่ 10 – 20 มิลลิเมตร แทนที่มวลรวมหยาบตั้งแต่ 0, 5, 10, 15 และ 20% ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปทดสอบการรับกำลังการรับน้ำหนัก และการไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ส่วนความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตและ

สารละลายคลอไรด์จะทดสอบที่อายุ 56 วัน นอกจากนี้ยังได้มีการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตด้วยการเติมสารช่วยยึดเหนี่ยว 1.5% โดยน้ำหนัก และฝุ่นผงซิลิกา 12% โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการยึดเหนี่ยวและความหนืด ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ 5% จะให้คุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมมากที่สุด โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 27.17, 36.03 และ 39.00 Mpa ตามลำดับ แต่จะมีความหนาแน่นน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม มีค่าความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตเท่ากัน และมีความต้านทานต่อสารละลายคลอไรด์สูงกว่าเล็กน้อย¹¹⁵

Sunil Ahirwar, Pratiksha Malviya, Vikash Patidar และ Vikash Kumar Singh ได้ศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบของคอนกรีตด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยการแทนที่จาก 0% - 30% และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณ 10%, 20% และ 30% ผลการทดสอบพบว่า การใช้ซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีตจะให้ผลผลิตก้อนคอนกรีตมวลเบาที่มีความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของเถ้าถ่านหินจะส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลง ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ 30% ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด และการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 10% - 20%¹¹⁶

Saranya K, Muthuswamy V, Sathiyaraj R และ Sudharsan A ได้ศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบของคอนกรีตด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเกรด M25 และแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ 0, 32, 34, 36 และ 38% ตามลำดับ และศึกษาสมบัติทางกล รวมถึงความทนทานของคอนกรีตเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ซึ่งจากข้อมูลผลการทดสอบพบว่า ส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงสูงสุด คือ การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 34% นอกจากนี้ยังพบว่า การมวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์จะช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการยอมให้ของเหลวซึมผ่านลดลง และให้ค่าความปลอดภัยในการรับน้ำหนักเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้าง¹¹⁷

Kumar SK, Gandhimathi R และ Baskar K ได้ศึกษาการชะละลายของโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ในส่วนผสมคอนกรีตที่มีซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ 0, 10, 20, 30, 40, และ 50% ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ที่อายุ 28, 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณการชะละลายจะลดลง เมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่ค่าการชะละลายยังอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด โดยปริมาณการชะละลายของแคดเมียมตรวจ

พบได้ในคอนกรีตอายุ 28 วันเท่านั้น ซึ่งมีค่าการชะละลายอยู่ในช่วง 0.0061 – 0.0570 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณการชะละลายของทองแดงตรวจพบได้ในคอนกรีตอายุ 28 วันเช่นเดียวกับแคดเมียม มีค่าการชะละลายอยู่ในช่วง 0.0136 – 0.0755 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณการชะละลายของสังกะสีตรวจพบได้ในคอนกรีตทุกช่วงอายุ แต่จะมีค่าการชะละลายสูงที่สุดในช่วงอายุ 28 วัน โดยมีปริมาณ 0.1053 – 0.2500 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณการชะละลายของตะกั่วตรวจพบได้ในคอนกรีตทุกช่วงอายุ แต่จะมีค่าการชะละลายสูงที่สุดในช่วงอายุ 28 วัน โดยมีปริมาณ 0.0283 – 0.5311 มิลลิกรัมต่อลิตร¹¹⁸

Shilpa B, Deshpande G, Nagarajan K และ Narwade R ได้ศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีตด้วยวัสดุทางเลือกที่ได้จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีตปริมาณตั้งแต่ 0 – 30% และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% หล่อตัวอย่างคอนกรีตเกรด M25 หลังจากนั้นนำคอนกรีตไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง ความสามารถในการไหลได้ก็ลดลงเช่นกัน ทั้งนี้ไม่ควรมีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณมากกว่า 20% และไม่ควรแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเกินกว่า 20% จึงจะให้คอนกรีตเกรด M25 นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็คอนกรีตมวลเบา¹¹⁹

Damal VS, Londhe SS และ Mane AB ศึกษาการใช้ประโยชน์จากพลาสติกในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในผลิตภัณฑ์คอนกรีต โดยการนำไปแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตเกรด M30 ในปริมาณ 0 – 21.5% แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง เมื่อพิจารณาคอนกรีตอายุ 28 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงถึง 52.98% เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 21.5% แต่การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ปริมาณ 7.5% จะให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงถึง 44.07 N/mm² เทียบเท่ากับคอนกรีตเกรด M43¹²⁰

Prasanna PK และ Rao MK ศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดในคอนกรีตเกรด M30 โดยใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมหยาบในปริมาณ 5, 10, 15 และ 20% และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 10% จากการศึกษาพบว่า การใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลง 33.7% เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 20% แต่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีทั้งการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 20% และ

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 10% จะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอีก 16.86% และสรุปได้ว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 15% จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด¹²¹

Dawande B, Jain D และ Singh G ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากพลาสติกในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยการนำมาแทนที่มวลรวมหยาบในคอนกรีต ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาวิธีการใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาแทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีต และนำไปทดสอบหาพฤติกรรมการรับแรง เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และความสามารถในการไหลได้ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาด 20 มิลลิเมตรแทนที่มวลรวมหยาบตั้งแต่ 0 – 25% และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 10% จากผลการศึกษาพบว่าสามารถใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมหยาบได้ และเมื่อใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณเพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลในคอนกรีตได้ ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณมากขึ้น ทั้งนี้ยังพบว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมที่สุด คือ ไม่เกิน 10% และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุด คือ ไม่เกิน 25%¹²²

Nagajothi PG และ Felixkala T ได้ศึกษาการนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดผงฝุ่นและชนิดเม็ดมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยทำการศึกษาสมบัติทางกลของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดผงฝุ่นแทนที่ทรายแม่น้ำ และใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดผสมเพิ่มเป็นไฟเบอร์ จากการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อปริมาณพลาสติกจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดผงฝุ่นเพิ่มมากขึ้น แต่คอนกรีตจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อผสมพลาสติกจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ซึ่งการผสมพลาสติกจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณ 2.5% จะเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้เกือบถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับส่วนผสมคอนกรีตปกติที่อายุการบ่ม 28 วัน นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่ส่วนผสมในคอนกรีตจะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และยังสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างโดยไม่ลดทอนความแข็งแรงของโครงสร้าง นอกจากนี้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำไปใช้เป็นส่วนผสม ยังช่วยลดการเกิดมลภาวะจากขยะได้อีกด้วย¹²³

Huang HL, Hwang CL, Peng SS, Wang E, Chen CT และ Chiang CC ศึกษาการประเมินความเพียงพอของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดผงฝุ่นในส่วนผสมคอนกรีต โดยใช้ผงเรซินและเส้นใยแก้วที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมละเอียด

(ทรายแม่น้ำธรรมชาติ) ในคอนกรีต ซึ่งใช้ส่วนผสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงผสมกับปูนซีเมนต์มาตรฐานในสัดส่วนการผสมปริมาตรคงที่ คือ ทราย: ปูนซีเมนต์: น้ำ 2.75: 1: 0.485 เป็นกลุ่มตัวอย่างควบคุม หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ผลการทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วพบว่าปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงควรน้อยกว่า 10% และระดับการเติมเส้นใยแก้วควรน้อยกว่า 2% จึงจะให้สมบัติทางวิศวกรรมและความทนทานใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์กลุ่มควบคุมตามมาตรฐานปริมาณสารเคมีเป็นพิษที่ปล่อยออกมาจากส่วนผสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วพบว่ามีค่าน้อยกว่ามาตรฐานที่กฎหมายท้องถิ่นกำหนด จึงสามารถใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนผสมของคอนกรีตได้¹²⁴

Wang R, Zhang T และ Wang P ศึกษาขนาดอนุภาคของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะชนิดฝุ่นผงที่มีผลต่อคุณภาพของมอร์ตาร์ โดยในงานวิจัยนี้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะชนิดฝุ่นผงถูกนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในส่วนผสมของมอร์ตาร์ และนำไปทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาณช่องว่าง การดูดซึมน้ำ และอัตราการหดตัว จากการศึกษาพบว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะชนิดฝุ่นผงมีส่วนทำให้ปริมาณช่องว่างและปริมาณการดูดซึมน้ำในมอร์ตาร์สดเพิ่มขึ้น แต่จะมีผลทำให้ความหนาแน่นในมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้วลดลง ส่วนกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยสำหรับการผสมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณไม่เกิน 15% สำหรับกำลังรับแรงดัดมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แต่จะลดลงอย่างช้า ๆ ในช่วงการผสมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ปริมาณ 0 - 10% ทั้งนี้ค่าอัตราการหดตัวของมอร์ตาร์มีอัตราการหดตัวเล็กน้อย ดังนั้น จึงสรุปได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงเป็นวัสดุใหม่ที่เหมาะสำหรับการก่อสร้างอาคารสีเขียว (Green Building) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม¹²⁵

Suchithra S และ Indu VS ได้ศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในคอนกรีต โดยศึกษาครั้งนี้ใช้คอนกรีตเกรด M20 และใช้การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดความยาว 0.5 นิ้ว ในปริมาณตั้งแต่ 0%, 5%, 10%, 15%, และ 20% ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมที่อายุการบ่ม 7 วันและ 28 วัน นำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณไม่เกิน 15% ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดแทบไม่มีนัยสำคัญ แม้กระทั่งจะมีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณมากถึง 15% นอกจากนี้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ยังมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่ากำลังรับแรงดึง เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นพบว่า การแทนที่มวลรวม

หยาดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักและเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดลดลง 2.23 และ 7.69 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ศึกษามีการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญในคอนกรีตขณะอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป และสามารถนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ¹²⁶

Shamili SR, Natarajan C และ Karthikeyan J ได้ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยการนำมาแทนที่มวลรวมหยาดบางส่วนในคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยสารที่มีความเป็นพิษ ได้แก่ ตะกั่ว ซิลิกา แบเรียม แคดเมียม อลูมิเนียม และเหล็ก แต่ก็ยังสามารถนำมาใช้แทนที่ส่วนผสมในคอนกรีตได้ทั้งมวลรวมหยาดและมวลรวมละเอียด โดยที่ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้คอนกรีตมีสมบัติเป็นคอนกรีตมวลเบา ซึ่งเมื่อมีการแทนที่มวลรวมด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการไหลด้วยตัวเองได้ดีขึ้น แต่ความสามารถในการเทได้ลดลง ส่วนสมบัติทางกลของคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม¹²⁷

Mishra SM และ Trivedi MK ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต โดยใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมละเอียดและปริมาณ 5, 7.5, 10 และ 12.5% ตามลำดับ พร้อมกับใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 35% นำไปบ่มด้วยน้ำที่อายุ 7 และ 28 วัน หลังจากนั้นนำไปทดสอบหาลำดับรับแรงอัด ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณเพิ่มขึ้น และพบว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ปริมาณไม่เกิน 10% จะให้ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีความเหมาะสมที่สุด¹²⁸

Priya TK และ Santhosh R ศึกษาความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตที่มีการแทนที่ส่วนผสมบางส่วนด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยในการทดลองได้นำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดตั้งแต่ 4.75 - 20 มิลลิเมตร มาแทนที่มวลรวมหยาดที่ 0, 4, 8, 12 และ 16% ตามลำดับ ผสมเป็นคอนกรีตเกรด M35 กำหนดให้มีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.45 ทุกส่วนผสม หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัด ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่มวลรวมหยาดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณไม่เกิน 8% แต่หากมีการแทนที่มวลรวมหยาดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า 8% จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดค่อย ๆ ลดลง ส่วนกำลังรับแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่มวลรวมหยาดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณไม่เกิน 8% เช่นเดียวกับกำลังรับแรงดัดจะมีค่าลดลงเมื่อ

มีปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์สามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีตได้¹²⁹

Manjunath ABT ได้ศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบในคอนกรีตด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนอโลหะ โดยนำซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการบดย่อยซึ่งมีขนาดคละกันตั้งแต่เล็กกว่า 20 มิลลิเมตร ไปจนถึงขนาดใหญ่กว่า 20 มิลลิเมตร มาใช้แทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีตที่ 0, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.50 ในทุกส่วนผสม หลังจากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 20% ลดลงถึง 52.98% เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตควบคุม และเมื่อมีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง สำหรับค่ากำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณมากกว่า 20% ขึ้นไป¹³⁰



บทที่ 3 วิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาและวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งแผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่จำเป็นสำหรับนำมาทำเป็นส่วนผสมในการศึกษามอร์ตาร์ปรับระดับผสมซากแผ่นวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด มวลรวมละเอียด (ทราย) น้ำ และสารเคมีผสมเพิ่ม (ประเภทสารลดน้ำพิเศษ Type F)

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement Type 1) ตราทีพีไอ สีแดง (ภาพที่ 3.2) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพและคุณสมบัติถูกต้องเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2547 ประเภทหนึ่ง และมาตรฐานสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ASTM C-150 Type 1 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้กับงานก่อสร้างงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูง และงานคอนกรีตทั่วไป เช่น งานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทุกชนิด สะพาน ถนน สนามบิน และผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงประเภทต่าง ๆ



ภาพที่ 3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราทีพีไอ สีแดง¹³¹

ตารางที่ 3.1 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราที่พีไอ สีแดง เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) และมาตรฐานสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ASTM) ^[131]

เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง		
	มาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547	มาตรฐาน ASTM C 150	ปูนซีเมนต์ ตราที่พีไอ สีแดง
คุณสมบัติทางเคมี			
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	≤ 6.0	≤ 6.0	1.2
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) เมื่อมี 3CaO.Al ₂ O ₃ ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า	≤ 3.0	≤ 3.0	2.5
เมื่อมี 3CaO.Al ₂ O ₃ มากกว่าร้อยละ 8	≤ 3.5	≤ 3.5	-
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)	≤ 3.0	≤ 3.0	1.1
กากที่ไม่ละลายในกรดต่าง (Insoluble Residue)	≤ 0.75	≤ 0.75	0.30
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaO.SiO ₂)	-	-	58
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (3CaO.Al ₂ O ₃)	-	-	8
Total Alkalis (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O)	≤ 0.6	≤ 0.6	0.4
คุณสมบัติทางฟิสิกส์			
ความละเอียด (Fineness) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) ในหน่วยตารางเซนติเมตรต่อกรัม ทดสอบด้วย Air Permeability Blaine			
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	2,800	2,800	3,500
ค่าต่ำสุดของตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง	2,600	2,600	3,000

ตารางที่ 3.1 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราที่พีไอ สีแดง เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) และมาตรฐานสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ASTM) ^[131] (ต่อ)

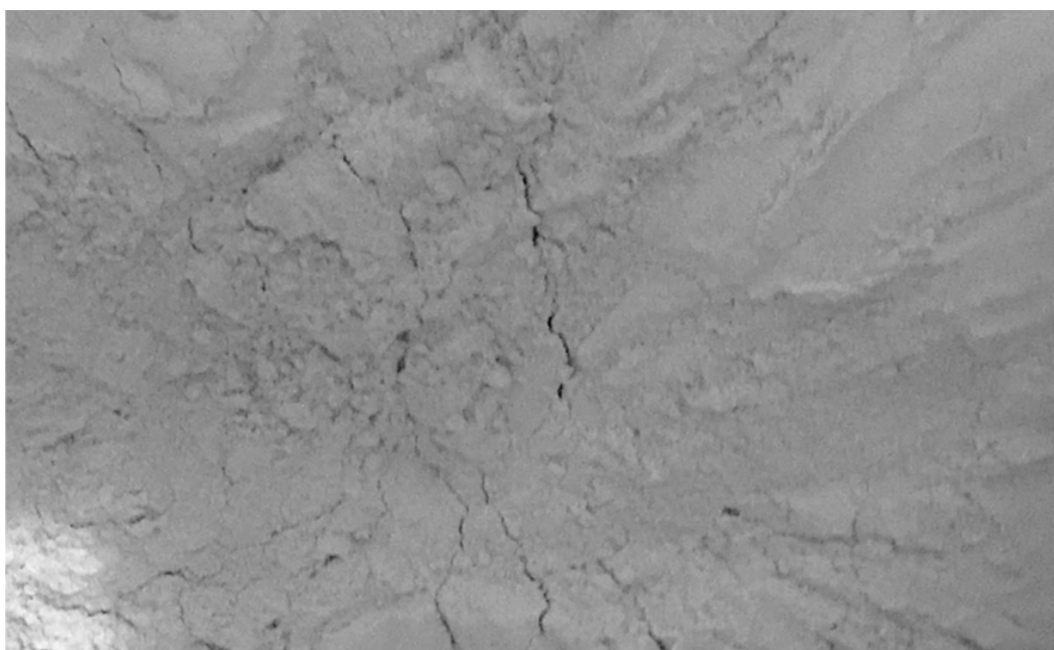
เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง		
	มาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547	มาตรฐาน ASTM C 150	ปูนซีเมนต์ ตราที่พีไอ สีแดง
คุณสมบัติทางฟิสิกส์			
ความอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีแคลฟวี่ (Autoclave Expansion)	≤ 0.80	≤ 0.80	0.01
ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) ทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test)			
การก่อตัวระยะต้น	≥ 45 นาที	≥ 45 นาที	100
การก่อตัวระยะปลาย	≤ 375 นาที	≤ 375 นาที	180
ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ (Air Content of Mortar) โดยปริมาตร	≤ 12.0	≤ 12.0	5.0
แรงอัด (Compressive Strength) กิตลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร			
1 วันในอากาศขึ้น 2 วันในน้ำ	≥ 122	≥ 122	180
1 วันในอากาศขึ้น 6 วันในน้ำ	≥ 194	≥ 194	250

3.1.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาทดสอบได้รับความอนุเคราะห์วัสดุ และข้อมูลการผลิตจาก บริษัท เจียฮง อินเตอร์ จำกัด สำนักงานตั้งอยู่ที่ 119 หมู่ที่ 5 ตำบลบ้านหลวง อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม โดยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะทางกายภาพ ดังนี้

3.1.2.1 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลักษณะภายนอกเป็นฝุ่นผงคล้ายแป้ง ไม่สามารถวัดขนาดได้ มีความละเอียดเล็กน้อยถึงปานกลาง มีสีเขียวย่อมนอมเทา เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการตัดหรือเจาะแผงวงจร เพื่อนำแผงวงจรไปขึ้นรูปและนำไปประกอบเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

3.1.2.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลักษณะภายนอกเป็นเม็ดลีบแบน ขนาดประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร มีสีน้ำตาลอมเหลือง มีส่วนที่เป็นสีเขียวผสมบ้างเล็กน้อย เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกระบวนการบดย่อยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขั้นที่ 2 และผ่านกระบวนการคัดแยกแยกโลหะทองแดงออกด้วยไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 3.4

3.1.2.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลักษณะภายนอกเป็นเส้นใย ขนาดความยาวประมาณ 5 - 8 มิลลิเมตร มีสีเขียวย่อมน โปรงใส และมีบางส่วนของวัสดุที่มีลักษณะรูปร่างลีบแบนคล้ายกับซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการบดย่อยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขั้นที่ 2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใยแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.4 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด



ภาพที่ 3.5 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

3.1.3 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้มวลรวมละเอียดที่หาได้ทั่วไป ดังภาพที่ 3.6 ซึ่งจะต้องนำมาร้อนผ่านตะแกรง เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ASTM C-778 Standard Specification for Standard Sand ซึ่งจะกล่าวถึงในขั้นตอนการทดสอบต่อไป



ภาพที่ 3.6 มวลรวมละเอียด

3.1.4 สารผสมเพิ่ม (Admixtures)

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ประเภท F สารลดน้ำระดับสูง (High Range Water Reducing Admixtures หรือ Superplasticizers) ตามมาตรฐานสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ASTM C494 - Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete - 10 TH (ภาพที่ 3.7) ซึ่งมีข้อมูลเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยใช้ผสมลงในส่วนผสมของมอร์ตาร์ปรับระดับปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลเบื้องต้นของสารลดน้ำพิเศษ ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete - 10 TH¹³²

ข้อมูลผลิตภัณฑ์	
SDS Number	100000008294

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลเบื้องต้นของสารลดน้ำพิเศษ ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete - 10 TH^[132] (ต่อ)

ข้อมูลผลิตภัณฑ์	
สถานะ	สารละลายเหลว
ส่วนประกอบ	5-Chloro-2-methyl-3(2H)-isothiazolone with 2-methyl-3(2H)-isothiazolone (3:1)
ส่วนประกอบหลัก	สารละลายดัดแปลงจำพวกโพลีคาร์บอกซีเลท
สี	น้ำตาลอ่อน
ความหนาแน่น	1.050 - 1.070 กก. / ลิตร (ที่อุณหภูมิ 25°C)
ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	4.97 (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)
ข้อแนะนำการใช้งาน	
ปริมาณการใช้งาน	0.6 – 3.0% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์
ความสามารถในการลดน้ำ	สูงสุดถึง 30%



ภาพที่ 3.7 สารลดน้ำพิเศษ ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete - 10 TH¹³²

Sika ViscoCrete - 10 TH เป็นน้ำยาผสมคอนกรีต ประเภทซูเปอร์พลาสติกไฮเซออร์ ชนิดใหม่สำหรับคอนกรีตและมอร์ต้า คุณสมบัติเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C - 494 ซึ่งมีกลไกการทำงานที่แตกต่างกันหลายอย่าง รวมถึงการดูดซึมบนพื้นผิว และการกระจายตัวที่แยกการยึดเกาะของอนุภาคซีเมนต์ โดยมีคุณสมบัติสามารถลดน้ำได้สูง ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตสูง ค่ากำลังอัดสูง และลดการซึมผ่านของน้ำได้ดี ผลจากการลดน้ำที่สูงกว่าส่งผลให้การไหลตัว และการหล่อเข้าแบบดีขึ้น ลดการหดตัวระหว่างการบ่ม และลดการคืบเมื่อคอนกรีตแข็งตัว ไม่มีคลอไรด์หรือ

ส่วนผสมอื่นใด ที่จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานเหล็กเสริมและงานคอนกรีตอัดแรง¹³²

3.2 อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ ได้แก่ แบบหล่อตัวอย่าง (Mold) เครื่องผสม (Mixer) เครื่องชั่งน้ำหนัก อุปกรณ์วัดปริมาณ เกรียงใบโพธิ์ นาฬิกาจับเวลา ภาชนะสำหรับชั่งตัวอย่างและบ่มตัวอย่าง พลาสติกป้องกันการสูญเสียน้ำ และเวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.2.1 แบบหล่อตัวอย่าง (Mold)

แบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ ทำจากโลหะทองเหลืองหรือเหล็กกล้า สามารถหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ได้ครั้งละไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่างในชุดเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.8



(ก) แบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ ชนิดทองเหลือง (ข) แบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ ชนิดเหล็กกล้า

ภาพที่ 3.8 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์

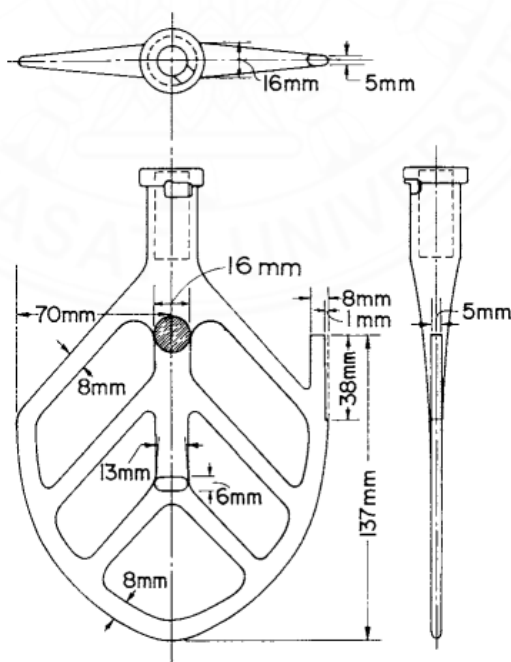
3.2.2 เครื่องผสม (Mixer)

เครื่องผสมที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ (ภาพที่ 3.9) เป็นตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C305 - Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency¹³³ ซึ่งกำหนดลักษณะของเครื่องผสมไว้ ดังนี้



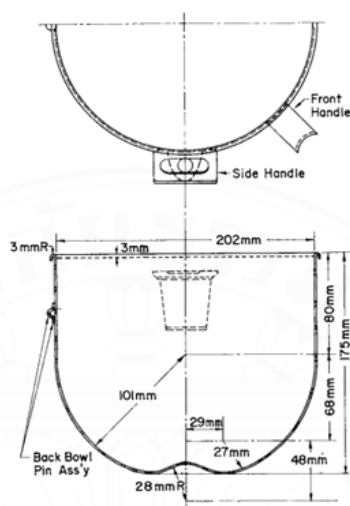
ภาพที่ 3.9 เครื่องผสม (Mixer)

1. ตัวเครื่อง ต้องใช้ไฟฟ้าที่สามารถปรับระดับการหมุนของใบพายได้ 2 ระดับ คือ 140 ± 5 rpm และ 285 ± 10 rpm
2. ใบพาย สามารถถอดออกจากตัวเครื่องได้ ควรทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม และมีขนาดเป็นไปตามภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ใบพายของเครื่องผสมมอร์ตาร์^[133]

3. หม้อผสม สามารถถอดออกจากตัวเครื่องได้ มีความจุไม่น้อยกว่า 4.73 ลิตร
 ควรทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม และมีขนาดเป็นไปตามภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 หม้อผสมของเครื่องผสมมอร์ตาร์^[133]

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า ชนิดแสดงผลด้วยหน้าจอดิจิทัล ความละเอียด 0.1 กรัม
 (แสดงผลด้วยทศนิยมไม่น้อยกว่า 1 ตำแหน่ง) ยี่ห้อ OHAUS รุ่น ExplorerPro แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ OHAUS รุ่น ExplorerPro

3.2.4 อุปกรณ์สำหรับการตวง

อุปกรณ์สำหรับการตวงส่วนผสมที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้ ได้แก่ เหยือกพลาสติก สำหรับวัดปริมาตรและชั่งน้ำหนักส่วนผสมที่มีสถานะเป็นของเหลว โดยใช้เหยือกที่มีปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3.13 ส่วนอุปกรณ์อีกชนิดที่ใช้สำหรับการตวงตัวอย่างส่วนผสมที่มีสถานะเป็นของแข็ง ได้แก่ ถาดสแตนเลส ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.13 เหยือกพลาสติก



ภาพที่ 3.14 ถาดสแตนเลส

3.2.5 เกรียงใบโพธิ์

โดยทั่วไปเกรียงใบโพธิ์ (ภาพที่ 3.15) จะใช้สำหรับงานก่ออิฐดินเผาหรืออิฐมอญ และคอนกรีตบล็อก มีลักษณะคล้ายรูปใบโพธิ์ ปลายค่อนข้างแหลมและบาง ตัวเกรียงจะค่อย ๆ หนาขึ้นทางด้านท้าย จึงเหมาะสำหรับใช้ปาดหรือตกแต่งได้ในจุดเล็ก ๆ สำหรับงานวิจัยนี้เกรียงใบโพธิ์ใช้สำหรับตักส่วนผสมของมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อ และปาดผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบ



ภาพที่ 3.15 เกรียงใบโพธิ์

3.2.6 นาฬิกาจับเวลา

นาฬิกาจับเวลา ที่สามารถจับเวลาได้ในระดับวินาที ใช้สำหรับจับเวลาในการทดสอบหาค่าการไหลแผ่ และระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมมอร์ตาร์ปรับระดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 นาฬิกาจับเวลา

3.2.7 พลาสติกแรป (Plastic Wrap)

พลาสติกแรปเป็นฟิล์มพลาสติกบางใสที่ใช้สำหรับห่อหุ้มอาหาร เพื่อเก็บรักษาอาหารให้สดใหม่เป็นเวลานาน พลาสติกชนิดแรกที่นิยมใช้ทำฟิล์มห่อหุ้มอาหาร คือ เซลโลเฟน (Cellophane) ค้นพบโดยนักเคมีชาวสวีตเซอร์แลนด์ชื่อ Jacques Edwin Brandenberger ในปี ค.ศ. 1911 และในราวต้นปี ค.ศ. 1924 เซลโลเฟนเริ่มถูกนำมาผลิตเป็นฟิล์มใสใช้งาน จุดเด่นของฟิล์มเซลโลเฟน คือ ความใสและโปร่งแสง ต่อมาในราวปี ค.ศ. 1933 ได้ค้นพบพลาสติกที่ใช้ผลิตฟิล์มใสอีกชนิดหนึ่งคือ โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) ผลิตเป็นฟิล์มครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1945 ในขณะที่พลาสติก PVC (Poly - Vinyl Chloride) ผลิตเป็นฟิล์มเมื่อปี ค.ศ. 1950 และในสองปีต่อมาฟิล์มใสที่ผลิตจากพลาสติก PVDC (Poly - Vinylidene Chloride) ก็ถูกผลิตออกสู่ท้องตลาดใช้สำหรับห่อหุ้มอาหาร¹³⁴

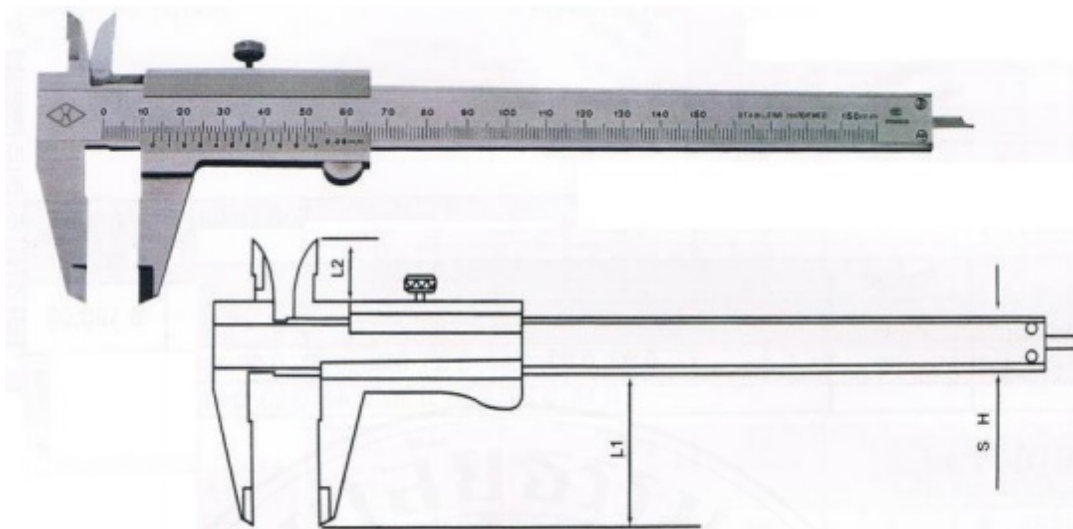
สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำพลาสติกแรปที่หาซื้อได้ในท้องตลาดทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 3.17 มาประยุกต์ใช้ในการห่อหุ้มตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ตัวอย่างมอร์ตาร์มีการสูญเสียน้ำเร็วเกินไป



ภาพที่ 3.17 พลาสติกแรป (Plastic Wrap)

3.2.8 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers)

เวอร์เนียคาลิปเปอร์ เป็นเครื่องวัดความยาวอย่างละเอียดที่ใช้หลักของเวอร์เนียร์สเกล โดยการแบ่งสเกลตามแนวยาวคล้ายไม้บรรทัด แต่มีการแบ่งสเกลรองโดยใช้สเกลเลื่อน เพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดมากขึ้น ซึ่งเครื่องมือวัดนี้คิดขึ้นโดย ปีแอร์ เวอร์เนียร์ (Pierre Vernier) ชาวฝรั่งเศส¹³⁵ เมื่อต้องการวัดความยาว ความสูง หรือความลึกของวัตถุขนาดไม่ใหญ่มากนัก และต้องการความแม่นยำมากกว่าการใช้ไม้บรรทัดหรือไม้เมตร มักนิยมจะใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers)¹³⁵

3.3 อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เครื่องบดอัดตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางกายภาพ เครื่องทดสอบหาค่าการนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน เครื่องทดสอบปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X – ray Fluorescence Analyzer) เครื่องทดสอบปริมาณสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X – ray Diffraction Spectrometer) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS) ชุดตะแกรงร่อน (Sieve Mesh) อุปกรณ์ทดสอบการไหลผ่าน (Flow Test Equipment) เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Vicat Apparatus) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ และเครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด (Universal Testing Machine: UTM) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่เป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์ปรับระดับ ได้แก่ ซากผงวงจรวีเล็กรอนิกส์ ปูนซีเมนต์ รวมไปถึงศึกษา

การศึกษาโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของส่วนผสมในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Benchtop SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JCM - 6000 ผลิตภัณท์ประเทศญี่ปุ่น (ภาพที่ 3.19) ที่กำลังขยายแตกต่างกันตั้งแต่ 100 – 1,000 เท่า



ภาพที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JCM - 6000¹³⁶

3.3.2 เครื่องบดอัดตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางกายภาพ

เครื่องบดอัดตัวอย่างลงในเข้าตัวอย่างรูปวงแหวนปลายปิดหนึ่งข้างและฉาบผิวหน้าตัวอย่างด้วยทองคำ สำหรับนำตัวอย่างไปทดสอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเฉพาะรุ่น Benchtop เท่านั้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องบดอัดตัวอย่างยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES (ภาพที่ 3.20) ผลิตภัณท์จากสหราชอาณาจักร



ภาพที่ 3.20 เครื่องบดอัดตัวอย่างยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES¹³⁷

3.3.3 เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน

เครื่องวัดการไหลของความร้อน (Heat Flow Meter) สามารถวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุได้ดีแม้เป็นวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ เช่น ฉนวน เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดการไหลของความร้อน ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda (ภาพที่ 3.21) ผลิตภัณท์ประเทศเยอรมนี ตัวเครื่องออกแบบให้สามารถทำการทดสอบได้ตามที่มาตรฐาน ASTM C518 กำหนด ใช้เทคโนโลยีการวัดด้วยฟลักซ์ รวดเร็ว ให้ผลลัพธ์ภายในไม่กี่นาที และมีความแม่นยำสูง



ภาพที่ 3.21 เครื่องวัดการไหลของความร้อน ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda¹³⁸

3.3.4 เครื่องทดสอบปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Analyzer)

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X – ray Fluorescence Analyzer แบบพกพา ยี่ห้อ Olympus รุ่น Vanta M Series ผลิตภัณท์จากประเทศอเมริกา ดังแสดงในภาพที่ 3.22 ที่มีความไวต่อพื้นผิวของตัวอย่าง ใช้เวลาในการทดสอบเพียงตัวอย่างละ 2 นาที ลดเวลาการประมวลผล และให้ความแม่นยำสูงที่ตรวจจับได้แม้ธาตุที่มีพลังงานต่ำ เช่น Mg, Si, Al เป็นต้น

3.3.5 เครื่องทดสอบปริมาณสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X – ray Diffraction Spectrometer)

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-ray Diffraction Spectrometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance ผลิตภัณท์จากประเทศเยอรมนี ดังแสดงในภาพที่ 3.23 ที่มีเอกลักษณ์และได้รับการออกแบบมาอย่างสมบูรณ์แบบสำหรับการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของผงเอ็กซ์เรย์ สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว และมีค่าความแม่นยำในการอ่านพีค $\leq 0.01^{\circ}2\theta$



ภาพที่ 3.22 เครื่อง X – ray Fluorescence Analyzer แบบพกพา ยี่ห้อ Olympus รุ่น Vanta M Series¹³⁹



ภาพที่ 3.23 เครื่อง X-ray Diffraction Spectrometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance¹⁴⁰

3.3.6 เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion)

เทคนิคการใช้คลื่นไมโครเวฟ สามารถย่อยสลายตัวอย่างทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถทำได้ทั้งในภาชนะปิดและเปิด แต่นิยมใช้ภาชนะปิดมากกว่าเพราะจะได้ความดันที่สูง ซึ่งมีผลให้อุณหภูมิสูงไปด้วย นอกจากนี้ยังใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยกว่าเนื่องจากไม่มีการระเหยของรีเอเจนต์ ทำให้ลดการปนเปื้อนของสารที่ติดมากับรีเอเจนต์ ทั้งยัง

ช่วยลดการระเหยของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ และสามารถย่อยในเวลาเดียวกันที่หลาย ๆ ตัวอย่าง¹⁴¹ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Titan MPS ผลิตภัณฑ์จากประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Titan MPS¹⁴²

3.3.7 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ทำการตรวจวัดความยาวคลื่นที่อะตอมคายพลังงานออกมาในรูปแสง สามารถวัดสเปกตรัมแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Visible and Ultraviolet Region) โดยใช้หลักการ Atomic Emission ซึ่งจะเกิดขึ้นเร็วมาก ใช้เวลาประมาณหนึ่งในร้อยล้านวินาที พลังงานที่คายออกมาจะเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงสเปกตรัมต่างๆ โดยธาตุที่ถูกกระตุ้นแต่ละชนิดจะปล่อยสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุออกมา ความเข้มของสเปกตรัมจะแปรผันตามจำนวนอะตอมที่ดูดพลังงานเข้าไป¹⁴¹ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Optima 8300 ผลิตภัณฑ์ประเทศสิงคโปร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Optima 8300¹⁴³

3.3.8 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ Quadrupole หรือ Magnetic Sector Analyzer โดยไอออนที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีค่า Background ต่ำมาก จึงมี Detection Limit ที่ดีมากกับทุก ๆ ธาตุ ซึ่งโดยปกติแล้วจะสามารถวัดได้ถึงระดับไมโครกรัมต่อลิตรภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อมที่ดี¹⁴¹ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น NexION 350X ผลิตภัณ์ท์จากประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงในภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น NexION 350X¹⁴⁴

3.3.9 ชุดตะแกรงร่อน (Sieve Mesh)

ชุดตะแกรงทดสอบและวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็ง (ภาพที่ 3.27) หรือความละเอียด ซึ่งมีช่องขนาดต่าง ๆ กัน โดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ช่องบนตะแกรง (Sieve) เกิดจากการนำลวดขนาดต่างกันมาสานเป็นช่อง และบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (Mesh) ซึ่งหมายถึง จำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช ในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความยาวกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด



ภาพที่ 3.27 ชุดตะแกรงร่อน (Sieve Mesh)

3.3.10 อุปกรณ์ทดสอบการไหลแผ่ (Flow Test Equipment)

แท่นทดสอบการไหลแผ่ (ภาพที่ 3.28) ใช้การทดสอบหาความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ปรับระดับ โดยวัดค่าการไหลของมอร์ตาร์ปรับระดับที่ไหลแผ่ออกตามเวลาที่กำหนด โดยใช้ Flow Ring ดังแสดงในภาพที่ 3.29 ตามมาตรฐาน ASTM C1708 – Standard Test Method for Self Leveling Mortar Containing Hydraulic Cements



ภาพที่ 3.28 แท่นทดสอบการไหลแผ่



ภาพที่ 3.29 Flow Ring

3.3.11 เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Vicat Apparatus)

ประกอบด้วยโครงโลหะโค้ง มีแกนสามารถเลื่อนขึ้นลงได้ในแนวตั้ง ที่ปลายทั้งสองของแกนมีเข็มที่ขนาดต่างกัน สามารถถอดเปลี่ยนได้ ดังภาพที่ 3.30 นอกจากนี้ ยังมีกรวยกลมสำหรับใส่ปูนซีเมนต์ ทำด้วยวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ ขอบบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 เซนติเมตร และขยายโตขึ้นที่ขอบล่าง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 เซนติเมตร ความสูงของกรวย 4 เซนติเมตร ขณะใช้งานกรวยนี้จะถูกวางลงบนแผ่นกระจกใสสี่เหลี่ยมจัตุรัส



ภาพที่ 3.30 เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Vicat Apparatus)

3.3.12 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (Compression Testing Machines)

เป็นเครื่องทดสอบสมบัติทางกลเอนกประสงค์ชนิด Static สามารถทดสอบสมบัติทางกลได้ เช่น แรงอัด (Compressive) ของคอนกรีตแบบตั้งพื้นด้วยเครื่อง Concrete Compression Machines เป็นระบบไฮดรอลิกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง อ่านค่าหน่วยแรงจากหน้าจอดีจิตอล ยี่ห้อ Gilson ดังภาพที่ 3.31



ภาพที่ 3.31 เครื่องทดสอบความแข็งแรงในการรับแรงอัด (Compressive Strength) ยี่ห้อ Gilson

3.3.13 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์แบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM)

เครื่องทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Shimadzu แสดงดังภาพที่ 3.32 เป็นเครื่องทดสอบแบบตั้งพื้นที่ทำงานโดยหลักการ Electromechanical ใช้สำหรับการตรวจวัดสมบัติทางกลของวัสดุ ระบบต้นกำลังเป็นแบบซอร์โวมอเตอร์และเกียร์ ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ให้ค่าความแม่นยำสูง



ภาพที่ 3.32 เครื่องทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Shimadzu

3.4 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ

สถานที่สำหรับการทดสอบทางห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยเลือกสถานที่ทดสอบทั้งห้องปฏิบัติการภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และหน่วยงานภายนอกมหาวิทยาลัย ดังนี้

- 1) ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (รังสิต)
- 2) ห้องปฏิบัติการธรณีเคมี อาคาร 4 ชั้น 3 ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น
- 3) ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา ชั้น 1 สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- 4) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อการวิจัยขั้นสูง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- 5) กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
- 6) กลุ่มงานวิเคราะห์และวิจัย กองวิเคราะห์และวิจัย สำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร

3.5 ขั้นตอน วิธีการทดสอบ

การทดสอบตัวอย่างประกอบด้วย การทดสอบสมบัติทางกายภาพ การศึกษาสมบัติทางเคมี และการศึกษาสมบัติทางกล โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.5.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย การทดสอบสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวมละเอียด วัสดุทดแทน และมอร์ตาร์ รวมถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่าง ๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ และศึกษาค่าการนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน และการวิเคราะห์ขนาดผลของมวลรวมละเอียด ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบ ดังนี้

3.5.1.1 กล้องจุลทรรศน์

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาสมบัติทางกายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ต้องเตรียมผ่านกระจกสไลด์และนำตัวอย่างไปวางที่แท่นวางตัวอย่างบนกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นปรับความเข้มของแสง ปรับความละเอียดของภาพรวมถึงความชัดเจนของภาพตามที่ต้องการ

3.5.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ หากตัวอย่างเป็นแบบผงใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่หากเป็นของแข็งควรเตรียมตัวอย่างโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร และถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทอง ทั้งนี้การเตรียมตัวอย่างจะเตรียมผ่านเครื่องบดอัดตัวอย่างสุญญากาศ QUORUM Q150R ES หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยปรับความเข้มของแสง ปรับความละเอียดของภาพรวมถึงความชัดของภาพตามที่ต้องการ

3.5.1.3 ค่าการนำความร้อน และค่าการต้านทานความร้อน

เตรียมตัวอย่างในสถานะของแข็งที่มี ความกว้างขนาด 30 ซม. x ยาว 30 ซม. x หนาตั้งแต่ 5 มม. ขึ้นไปแต่ไม่เกิน 7 ซม. ผิวเรียบทั้ง 6 ด้าน จำนวน 2 ชิ้น / 1 ตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ

3.5.1.4 การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมละเอียด (Sieve Analysis of Fine Aggregate)

เป็นการศึกษาการกระจายตัวของขนาดของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 778 - Standard Specification for Standard Sand โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) การหาขนาดคละของทรายควรกระทำผ่านการร่อนตะแกรง 6 ขนาด โดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นให้ทิ้งวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ออกไป ทำการอบให้ตัวอย่างแห้งจนมีน้ำหนักคงที่ อุณหภูมิ $110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2) เริ่มใส่ตัวอย่างทรายลงในกลุ่มตะแกรงร่อนมาตรฐาน ปิดฝาของตะแกรงร่อนแล้ววางลงบนเครื่องเขย่า

3) ทำการร่อนตัวอย่าง โดยให้เครื่องเขย่าทำงานเขย่าอย่างน้อย 10 นาที

4) ชั่งน้ำหนักของวัสดุที่ค้างอยู่บนแต่ละตะแกรง โดยเริ่มต้นที่วัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 16 เบอร์ 20 เบอร์ 30 เบอร์ 40 เบอร์ 50 และเบอร์ 100 ตามลำดับ จนกระทั่งถึงถาดรอง (Pan)

5) แปลงค่าน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงแต่ละเบอร์เป็นร้อยละของน้ำหนักรวมทั้งหมด คำนวณหาค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, FM) โดยทำการรวมร้อยละน้ำหนักสะสมของทรายที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 8 ถึงเบอร์ 100 แล้วหารด้วยหนึ่งร้อย โดยที่ค่าโมดูลัสความละเอียดเป็นเครื่องมือที่แสดงถึงความหยาบหรือความละเอียดของทราย แต่ไม่ได้แสดงถึงขนาดคละของทราย

6) สร้างกราฟเปอร์เซ็นต์สะสมที่ค้างบนตะแกรงของทรายกับเบอร์หรือขนาดของตะแกรง

ทั้งนี้ ขนาดคละของมวลรวมละเอียด ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C 778 แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด^[145]

ขนาดตะแกรง	Percent Passing
1.18 mm. (No. 16)	100
850 μ m. (No. 20)	-
600 μ m. (No. 30)	96 ถึง 100
425 μ m. (No. 40)	65 ถึง 75
300 μ m. (No. 50)	20 ถึง 30
150 μ m. (No. 100)	0 ถึง 4

3.5.2 การศึกษาสมบัติทางเคมี

การศึกษาศสมบัติทางเคมีประกอบด้วย การทดสอบปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ การทดสอบปริมาณสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy และการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบ ดังนี้

3.5.2.1 การทดสอบปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X - ray Fluorescence Analyzer)

ตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ให้เพียงเล็กน้อย โดยมีเงื่อนไขว่าวัสดุที่จะนำมาทดสอบจะต้องมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และควรเตรียมให้มีพื้นผิวเรียบเสมอกันตลอด มีพื้นที่หน้าตัดที่จะทดสอบไม่น้อยกว่า 2.5 x 2.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นใช้เครื่องทดสอบยิงไปบริเวณหน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียมไว้

3.5.2.2 การทดสอบปริมาณสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X - ray Diffraction Spectrometer)

ตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ให้เพียงเล็กน้อย ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ หากตัวอย่างเป็นแบบผงใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่หากเป็นของแข็งควรเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดเล็กที่สุดจะดีต่อการทดสอบ ทั้งนี้ การเตรียมตัวอย่างจะ

เตรียมผ่านเครื่องบดอัดตัวอย่างสุญญากาศ QUORUM Q150R ES หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปศึกษาด้วยเครื่องทดสอบปริมาณสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และแปลผลค่าระยะห่างระหว่างระนาบโมเลกุล (d - Spacing) กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ระยะห่างระหว่างระนาบโมเลกุล (d - Spacing) กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ของรังสีเอกซ์ของธาตุทองแดง (Cu) โดยการแผ่รังสี K_{α} ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$)^[82]

2θ	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
2	44.171	42.068	40.156	38.410	36.810	35.338	33.979	32.721	31.552	30.464
3	29.449	28.499	27.069	26.773	25.985	25.243	24.542	23.879	23.251	22.655
4	22.089	21.550	21.037	20.548	20.082	19.636	19.209	18.800	18.409	18.034
5	17.673	17.327	16.994	16.673	16.365	16.068	15.781	15.504	15.237	14.979
6	14.730	14.488	14.255	14.029	13.810	13.598	13.392	13.192	12.998	12.810
7	12.628	12.450	12.277	12.109	11.946	11.787	11.632	11.481	11.334	11.191
8	11.051	10.915	10.782	10.652	10.526	10.402	10.281	10.163	10.048	9.9355
9	9.8254	9.7176	9.6122	9.5091	9.4082	9.3093	9.2126	9.1178	9.0250	8.9341
10	8.8450	8.7576	8.6720	8.5880	8.5057	8.4249	8.3456	8.2678	8.1915	8.1166
11	8.0430	7.9708	7.8998	7.8302	7.7617	7.6944	7.6283	7.5634	7.4995	7.4367
12	7.3750	7.3142	7.2545	7.1957	7.1379	7.0810	7.0251	6.9699	6.9157	6.8624
13	6.8098	6.7580	6.7071	6.6569	6.6074	6.5587	6.5107	6.4634	6.4168	6.3708
14	6.3256	6.2809	6.2369	6.1935	6.1507	6.1085	6.0669	6.0259	5.9854	5.9454
15	5.9060	5.8671	5.8288	5.7909	5.7535	5.7166	5.6802	5.6442	5.6088	5.5737
16	5.5391	5.5049	5.4711	5.4378	5.4049	5.3723	5.3402	5.3084	5.2771	5.2461
17	5.2154	5.1852	5.1552	5.1257	5.0964	5.0675	5.0390	5.0107	4.9828	4.9552
18	4.9279	4.9009	4.8742	4.8478	4.8216	4.7958	4.7702	4.7450	4.7199	4.6952
19	4.6707	4.6465	4.6225	4.5988	4.5753	4.5521	4.5291	4.5063	4.4838	4.4615
20	4.4394	4.4175	4.3959	4.3744	4.3532	4.3322	4.3114	4.2908	4.2704	4.2502
21	4.2302	4.2104	4.1907	4.1713	4.1520	4.1329	4.1140	4.0953	4.0767	4.0583
22	4.0401	4.0220	4.0042	3.9864	3.9689	3.9515	3.9342	3.9171	3.9001	3.8833
23	3.8667	3.8502	3.8338	3.8176	3.8015	3.7855	3.7697	3.7540	3.7385	3.7231
24	3.7078	3.6926	3.6776	3.6627	3.6479	3.6332	3.6187	3.6043	3.5900	3.5758
25	3.5617	3.5477	3.5339	3.5201	3.5065	3.4930	3.4796	3.4662	3.4530	3.4399
26	3.4269	3.4140	3.4012	3.3885	3.3759	3.3634	3.3510	3.3386	3.3264	3.3143

27	3.3022	3.2903	3.2784	3.2666	3.2549	3.2433	3.2318	3.2203	3.2090	3.1977
28	3.1865	3.1754	3.1644	3.1534	3.1426	3.1318	3.1210	3.1104	3.0998	3.0893
29	3.0789	3.0685	3.0582	3.0480	3.0379	3.0278	3.0178	3.0079	2.9980	2.9882

ตารางที่ 3.4 ระยะห่างระหว่างระนาบโมเลกุล (d - Spacing) กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ของรังสีเอกซ์ของธาตุทองแดง (Cu) โดยการแผ่รังสี K_{α} ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) (ต่อ) ^[82]

2θ	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
30	2.9785	2.9688	2.9592	2.9497	2.9402	2.9308	2.9214	2.9122	2.9029	2.8938
31	2.8847	2.8756	2.8666	2.8577	2.8488	2.8400	2.8312	2.8225	2.8139	2.8053
32	2.7968	2.7883	2.7798	2.7715	2.7631	2.7549	2.7466	2.7385	2.7303	2.7223
33	2.7143	2.7063	2.6984	2.6905	2.6827	2.6749	2.6671	2.6595	2.6518	2.6442
34	2.6367	2.6292	2.6217	2.6143	2.6069	2.5996	2.5923	2.5851	2.5779	2.5707
35	2.5636	2.5565	2.5495	2.5425	2.5355	2.5286	2.5218	2.5149	2.5081	2.5014
36	2.4947	2.4880	2.4813	2.4747	2.4682	2.4616	2.4551	2.4487	2.4422	2.4358
37	2.4295	2.4232	2.4169	2.4106	2.4044	2.3982	2.3921	2.3860	2.3799	2.3738
38	2.3678	2.3618	2.3559	2.3500	2.3441	2.3382	2.3324	2.3266	2.3208	2.3151
39	2.3094	2.3037	2.2981	2.2924	2.2869	2.2813	2.2758	2.2703	2.2648	2.2593
40	2.2539	2.2485	2.2432	2.2378	2.2325	2.2273	2.2220	2.2168	2.2116	2.2064
41	2.2012	2.1961	2.1910	2.1859	2.1809	2.1759	2.1709	2.1659	2.1609	2.1560
42	2.1511	2.1462	2.1414	2.1365	2.1317	2.1270	2.1222	2.1175	2.1127	2.1080
43	2.1034	2.0987	2.0941	2.0895	2.0849	2.0804	2.0758	2.0713	2.0668	2.0623
44	2.0579	2.0534	2.0490	2.0446	2.0402	2.0359	2.0316	2.0273	2.0220	2.0187
45	2.0144	2.0102	2.0060	2.0018	1.9976	1.9935	1.9893	1.9852	1.9811	1.9770
46	1.9729	1.9689	1.9649	1.9609	1.9569	1.9529	1.9489	1.9450	1.9411	1.9372
47	1.9333	1.9294	1.9255	1.9217	1.9179	1.9141	1.9103	1.9065	1.9028	1.8990
48	1.8953	1.8916	1.8879	1.8842	1.8806	1.8769	1.8733	1.8697	1.8661	1.8625
49	1.8589	1.8554	1.8519	1.8483	1.8448	1.8413	1.8378	1.8344	1.8309	1.8275
50	1.8241	1.8207	1.8173	1.8139	1.8105	1.8072	1.8039	1.8005	1.7972	1.7939
51	1.7906	1.7874	1.7841	1.7809	1.7776	1.7744	1.7712	1.7680	1.7648	1.7617
52	1.7585	1.7554	1.7523	1.7491	1.7460	1.7430	1.7399	1.7368	1.7338	1.7307
53	1.7227	1.7247	1.7217	1.7187	1.7157	1.7127	1.7098	1.7068	1.7039	1.7009
54	1.6980	1.6951	1.6922	1.6894	1.6865	1.6836	1.6808	1.6779	1.6751	1.6723
55	1.6695	1.6667	1.6639	1.6612	1.6584	1.6556	1.6529	1.6502	1.6474	1.6447
56	1.6420	1.6393	1.6367	1.6340	1.6313	1.6287	1.6260	1.6234	1.6208	1.6182

57	1.6156	1.6130	1.6104	1.6078	1.6053	1.6027	1.6002	1.5976	1.5951	1.5926
58	1.5901	1.5876	1.5851	1.5826	1.5801	1.5777	1.5752	1.5722	1.5703	1.5679
59	1.5655	1.5631	1.5607	1.5583	1.5559	1.5535	1.5512	1.5488	1.5465	1.5441
60	1.5418	1.5395	1.5371	1.5348	1.5325	1.5302	1.5279	1.5257	1.5234	1.5211
61	1.5189	1.5166	1.5144	1.5122	1.5099	1.5077	1.5055	1.5033	1.5011	1.4989
62	1.4968	1.4946	1.4924	1.4903	1.4881	1.4860	1.4839	1.4817	1.4796	1.4775
63	1.4754	1.4733	1.4712	1.4691	1.4670	1.4650	1.4629	1.4609	1.4588	1.4568

ตารางที่ 3.4 ระยะห่างระหว่างระนาบโมเลกุล (d - Spacing) กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ของรังสีเอกซ์ของธาตุทองแดง (Cu) โดยการแผ่รังสี K_{α} ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) (ต่อ) ^[82]

2θ	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
64	1.4547	1.4527	1.4507	1.4487	1.4467	1.4447	1.4427	1.4407	1.4387	1.4367
65	1.4347	1.4328	1.4308	1.4289	1.4269	1.4250	1.4231	1.4211	1.4192	1.4173
66	1.4154	1.4135	1.4116	1.4097	1.4079	1.4060	1.4041	1.4023	1.4004	1.3985
67	1.3967	1.3949	1.3930	1.3912	1.3894	1.3876	1.3858	1.3840	1.3822	1.3804
68	1.3786	1.3768	1.3750	1.3733	1.3715	1.3697	1.3680	1.3662	1.3645	1.3628
69	1.3610	1.3593	1.3576	1.3559	1.3542	1.3524	1.3507	1.3491	1.3474	1.3457
70	1.3440	1.3423	1.3407	1.3390	1.3373	1.3357	1.3340	1.3324	1.3308	1.3291

3.5.2.3 การย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion)

เตรียมตัวอย่างในกรดไนตริกเข้มข้น 65% ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ทดสอบที่ 3 สภาวะ ดังนี้

- 1) Temperature 160°C, Ramp Time 5 Minutes and Hold Time 5 Minutes
- 2) Temperature 200°C, Ramp Time 3 Minutes and Hold Time 30 Minutes
- 3) Temperature 50°C, Ramp Time 1 Minutes and Hold Time 15 Minutes

3.5.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES)

ตัวอย่างที่ได้จากการย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ จะถูกนำมาทดสอบหาปริมาณโลหะทั้งหมด 12 ชนิด เพื่อศึกษาปริมาณการชะละลายของโลหะหนักในมอร์ตาร์ปรับระดับ โดยมีการตั้งค่าความยาวคลื่นเพื่อตรวจวัดปริมาณธาตุต่าง ๆ ดังนี้

- 1) Ag (338.289 nm): Working Range 0.1 – 50 mg/L
- 2) As (197.197 nm): Working Range 0.1 – 50 mg/L
- 3) Cd (228.802 nm): Working Range 0.1 – 20 mg/L
- 4) Co (236.380 nm): Working Range 0.1 – 20 mg/L
- 5) Cr (267.716 nm): Working Range 0.1 – 20 mg/L
- 6) Cu (327.393 nm): Working Range 0.1 – 50 mg/L
- 7) Fe (239.562 nm): Working Range 0.1 – 50 mg/L
- 8) Mn (403.075 nm): Working Range 0.5 – 50 mg/L
- 9) Ni (341.476 nm): Working Range 0.1 – 50 mg/L
- 10) Pb (217.000 nm): Working Range 0.1 – 20 mg/L
- 11) Ti (334.940 nm): Working Range 0.1 – 20 mg/L
- 12) Zn (206.200 nm): Working Range 0.1 – 20 mg/L

3.5.2.5 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS)

ตัวอย่างที่ได้จากการย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ จะถูกนำมาทดสอบหาปริมาณโลหะทั้งหมด 1 ชนิด คือ ปรอท เพื่อศึกษาปริมาณการชะละลายของโลหะหนักดังกล่าวในมอร์ตาร์ปรับระดับ โดยมีการตั้งค่าความยาวคลื่นเพื่อตรวจวัด Hg (m/z 202): Working Range 1 - 50 μ g/l และใช้สารละลายมาตรฐาน 10 μ g/ml Mercury

3.5.3 การศึกษาสมบัติทางกล

การศึกษาสมบัติทางกลของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ ประกอบด้วย การทดสอบการไหลแผ่ การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว การทดสอบกำลังรับแรงอัด และการทดสอบกำลังรับแรงดัด ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบ ดังนี้

3.5.3.1 การทดสอบการไหล (Flow Test)

การทดสอบเพื่อหาค่าการไหลเริ่มต้นของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ ต้องดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1708/ C1708M - Standard Test Method for Self Leveling Mortars Containing Hydraulic Cements¹⁴⁶ มีโดยขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1) เช็ดผิวบนของแผ่นทดสอบการไหลแผ่ให้แห้ง นำ Flow Ring วางตรงกลางของแผ่นทดสอบการไหล โดยพื้นผิวในแนวราบของ Flow Ring และแผ่นทดสอบจะต้องมีมุมในแนวราบห่างกันไม่เกิน 0.5 องศา

2) ภายใน 30 วินาทีหลังจากที่ผสมมอร์ตาร์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้นำตัวอย่างมอร์ตาร์มาเติมให้เต็ม Flow Ring

3) ยก Flow Ring ขึ้นในแนวตั้งอย่างรวดเร็ว โดยยกในระดับความสูงจากแผ่นทดสอบ 50 – 100 มิลลิเมตร (2 – 4 นิ้ว) ภายในระยะเวลา 2 วินาที และเริ่มจับเวลา

4) ปล่อยให้ส่วนผสมของมอร์ตาร์ไหลออกจาก Flow Ring ไปบนแผ่นทดสอบการไหลแผ่ทั้งหมด

5) จับเวลาจนครบ 240 ± 10 วินาที 20 นาที และ 30 นาที หลังจากนั้นวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ปรับระดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.33

6) ค่าการไหลเริ่มต้น คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ความละเอียด 4 ตำแหน่งที่เวลา 240 วินาที และค่าการไหลแผ่ คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ความละเอียด 4 ตำแหน่งที่เวลา 20 นาที และ 30 นาที

7) ให้ทดสอบหลาย ๆ ครั้งโดยเปลี่ยนปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมอร์ตาร์จนกระทั่งได้ค่าการไหลแผ่ตามที่กำหนด โดยทุกครั้งที่หาค่าการไหลแผ่ต้องใช้มอร์ตาร์ที่ผสมใหม่



ภาพที่ 3.33 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ปรับระดับ

3.5.3.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเข็ม

ไวแคท (Setting Time of Portland Cement by Vicat Needle)

เป็นการศึกษาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่แข็งตัวได้ในน้ำด้วยเครื่องไวแคท ตามมาตรฐาน ASTM C 191 - Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement¹⁴⁷ โดยมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

การเตรียมซีเมนต์เพสต์

ทำซ้ำเหมือนการทดสอบความชื้นเหลวปกติ โดยการใช้เปอร์เซ็นต์น้ำที่ต้องการผสมที่ทำให้เกิดความชื้นเหลวปกติ และวางแบบลงบนแผ่นกระจกใต้เครื่องไวแคท

การหาค่าการแข็งตัวเริ่มต้น

1) ใช้เข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร วางแตะที่ผิวด้านบนของเพสต์และหมุนสกรูให้แน่น

2) ตั้งค่าตัวชี้ (Moveable Indicator) ไปที่ขีดศูนย์ด้านบน ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้น แล้วปล่อยเข็มทันที ดังแสดงในภาพที่ 3.34

3) บันทึกระยะเวลาหลังจากที่เข็มน้ำลงไปปูนซีเมนต์ และระยะที่เข็มจมลงไปภายในเวลา 30 วินาทีหลังจากปล่อยเข็ม หลังจากนั้นทำการทดสอบซ้ำทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งการจมของเข็มเป็น 25 มิลลิเมตร โดยห้ามทำการทดสอบการจมใกล้กันเกินกว่า 6.4 มิลลิเมตร หลังจากการทดสอบการจมครั้งก่อน หรือ 9.5 มิลลิเมตร จากขอบด้านในของแบบรูปร่างแหวน

4) บันทึกผลการทดสอบของการทดสอบทุกครั้ง และหาเวลาที่เข็มจมเป็นระยะ 25 มิลลิเมตรด้วยเทคนิคการประมาณค่าในช่วง (Interpolation Technique) ค่าที่ได้ คือ

ค่าการแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ซึ่งมาตรฐาน ASTM กำหนดไว้ว่าต้องไม่น้อยกว่า 45 นาที สำหรับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา

การหาค่าการแข็งตัวสุดท้าย

การแข็งตัวสุดท้ายเกิดเมื่อเข็มทำให้เกิดรอยบนซีเมนต์เพสต์ แต่ขอบตัดไม่เกิดรอย เวลาหลังจากที่ผสมน้ำจนถึงเวลานี้ คือ การแข็งตัวสุดท้าย (Final Setting Time)

3.5.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

เป็นการศึกษาความสามารถในการรับกำลังแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับตามมาตรฐาน ASTM C 109 - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)⁹¹ โดยมีวิธีการทดสอบ ดังนี้



ภาพที่ 3.34 การหาค่าการแข็งตัวเริ่มต้น

การเตรียมตัวอย่าง

1) นำส่วนผสมปูนซีเมนต์ ซากแผ่นวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด และน้ำตามอัตรา ส่วนที่ได้จากการทดสอบความชื้นเหลือปกติ ผสมทิ้งไว้ 30 วินาที หลังจากนั้นเปิดเครื่องผสมที่อัตราเร็ว 140 ± 5 rpm เป็นเวลา 30 วินาที หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างนี้ให้ทำการกวาดเอาเพสต์ที่ติดอยู่ข้าง ๆ หม้อผสมลงไปในหม้อผสมให้หมด ผสมต่อด้วยความเร็วปานกลาง (285 ± 10 rpm) เป็นเวลา 150 วินาที จะได้ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับดังแสดงในภาพที่ 3.35

2) นำมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จแล้วใส่ลงในแบบหล่อขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร 1/3 ชั้น ของแบบหล่อ จากนั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง ใส่มอร์ตาร์เพิ่มอีก 1/3 ชั้น กระทุ้งอีก 25 ครั้ง และเติมจนเต็มแบบหล่อ ดังแสดงในภาพที่ 3.36

3) ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ที่เกินออกมาให้ผิวหน้าของมอร์ตาร์เรียบ

4) ถอดแบบได้หลังจากทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

5) ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง จดบันทึก และทำสัญลักษณ์ตัวเลขก่อนนำไปบ่ม
การบ่มตัวอย่าง

บ่ม 2 สภาวะ คือ บ่มในอากาศ และบ่มในน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 3.37

การทดสอบ

เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน จึงนำมาชั่งน้ำหนัก และนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดต่อไป



ภาพที่ 3.35 ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่ได้จากการผสม



ภาพที่ 3.36 ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่เทลงในแบบหล่อ



ภาพที่ 3.37 ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศ

3.5.3.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

เป็นการศึกษาความสามารถในการรับกำลังแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับตามมาตรฐาน ASTM C 348 - Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars⁹² โดยมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

การเตรียมตัวอย่าง

1) นำส่วนผสมปูนซีเมนต์ ซากแผ่นวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด และน้ำตามอัตรา ส่วนที่ได้จากการทดสอบความชื้นเหลือปกติ ผสมทิ้งไว้ 30 วินาที หลังจากนั้นเปิดเครื่องผสมที่อัตราเร็ว 140 ± 5 rpm เป็นเวลา 30 วินาที หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างนี้ให้ทำการกวาดเอาเศษที่ติดอยู่ข้างๆ หม้อผสมลงไปใหม่ผสมให้หมด ผสมต่อด้วยความเร็วปานกลาง (285 ± 10 rpm) เป็นเวลา 150 วินาที

2) นำมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จแล้วใส่ลงในแบบหล่อขนาด 40 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร x 160 มิลลิเมตร

3) ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ที่เกินออกมาให้ผิวหน้าของมอร์ตาร์เรียบ

4) ถอดแบบได้หลังจากทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

5) ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง จดบันทึก และทำสัญลักษณ์ตัวเลขก่อนนำไปบ่ม

การบ่มตัวอย่าง

บ่มในน้ำ

การทดสอบ

เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน จึงไปทดสอบกำลังรับแรงอัดต่อไป

3.6 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้ส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 inch or [50-mm] Cube Specimens) ซึ่งกำหนดให้ส่วนผสมของมอร์ตาร์ต้องประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทราย 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก

ดังนั้น อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบในการวิจัย จะแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดที่อัตราร้อยละ 0 ถึง 100 จำนวนทั้งสิ้น 23 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.5 โดยที่สัญลักษณ์ C คือ ปูนซีเมนต์ (Cement) S คือ มวลรวมละเอียด (Sand) และ P คือ ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด (Printed Circuit Boards)

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์

ลำดับ	สัญลักษณ์	ร้อยละการแทนที่ทราย ด้วย WPCBs	น้ำหนัก (กรัม)		
			ปูนซีเมนต์	ทราย	WPCBs
1	C100 S1000 P0000	0	500	1,375.00	-
2	C100 S0975 P0025	2.5	500	1,340.63	34.38
3	C100 S0950 P0050	5.0	500	1,306.25	68.75

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์

ลำดับ	สัญลักษณ์	ร้อยละการแทนที่ทราย ด้วย WPCBs	น้ำหนัก (กรัม)		
			ปูนซีเมนต์	ทราย	WPCBs
4	C100 S0925 P0075	7.5	500	1,271.88	103.13
5	C100 S0900 P0100	10.0	500	1,237.50	137.50
6	C100 S0875 P0125	12.5	500	1,203.13	171.88
7	C100 S0850 P0150	15.0	500	1,168.75	206.25
8	C100 S0825 P0175	17.5	500	1,134.38	240.63
9	C100 S0800 P0200	20.0	500	1,100.00	275.00
10	C100 S0790 P0210	21.0	500	1,086.25	288.75
11	C100 S0780 P0220	22.0	500	1,072.50	302.50
12	C100 S0770 P0230	23.0	500	1,058.75	316.25
13	C100 S0750 P0250	25.0	500	1,031.25	343.75
14	C100 S0720 P0280	28.0	500	990.00	385.00
15	C100 S0700 P0300	30.0	500	962.50	412.50
16	C100 S0680 P0320	32.0	500	935.00	440.00
17	C100 S0660 P0340	34.0	500	907.50	467.50
18	C100 S0640 P0360	36.0	500	880.00	495.00
19	C100 S0620 P0380	38.0	500	852.50	522.50
20	C100 S0600 P0400	40.0	500	825.00	550.00
21	C100 S0400 P0600	60.0	500	550.00	825.00
22	C100 S0200 P0800	80.0	500	275.00	1,100.00
23	C100 S0000 P1000	100.0	500	-	1,375.00

3.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางเคมี และตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกล ดังนี้

3.7.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบสมบัติทางกายภาพแบ่งออกเป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การศึกษาโดยใช้เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน และการทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมละเอียด จำนวนทั้งสิ้น 25 ตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

รายการทดสอบสมบัติทางกายภาพ	ชื่อตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง (หน่วย: ตัวอย่าง)
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	1. ปูนซีเมนต์	1
	2. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	1
	3. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	1
	4. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	1
	5. C100 S1000 P0000	1
	6. C100 S0975 P0025	1
	7. C100 S0950 P0050	1
	8. C100 S0925 P0075	1
	9. C100 S0900 P0100	1
	10. C100 S0875 P0125	1
	11. C100 S0850 P0150	1
	12. C100 S0825 P0175	1
	13. C100 S0800 P0200	1

ตารางที่ 3.6 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ (ต่อ)

รายการทดสอบสมบัติทางกายภาพ	ชื่อตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง (หน่วย: ตัวอย่าง)
เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน	1. C100 S1000 P0000	1
	2. C100 S0800 P0200	1
การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมละเอียด (เฉพาะตัวอย่างส่วนผสมมวลรวมละเอียดเท่านั้น)	1. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	1
	2. C100 S1000 P0000	1
	3. C100 S0975 P0025	1
	4. C100 S0950 P0050	1
	5. C100 S0925 P0075	1
	6. C100 S0900 P0100	1
	7. C100 S0875 P0125	1
	8. C100 S0850 P0150	1
	9. C100 S0825 P0175	1
	10. C100 S0800 P0200	1
รวม		25 ตัวอย่าง

3.7.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางเคมี

การทดสอบสมบัติทางเคมี แบ่งออกเป็นการศึกษาธาตุ สารประกอบ และการชะละลายของโลหะหนัก ทั้งในวัสดุที่เป็นส่วนผสม และตัวอย่างมอเตอร์าร์ปรับระดับ จำนวนทั้งสิ้น 51 ตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.7

3.7.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกล

การหล่อตัวอย่างสำหรับนำไปทดสอบสมบัติทางกล จะต้องผ่านการทดสอบสมบัติของมอเตอร์าร์สดก่อน ได้แก่ การทดสอบการไหลแผ่ และการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของมอเตอร์าร์ปรับระดับ หลังจากนั้นจึงจะนำไปทดสอบความแข็งแรง ได้แก่ การทดสอบรับกำลังแรงอัดในตัวอย่างมอเตอร์าร์ปรับระดับจะใช้ตัวอย่างที่บ่มในอากาศ และบ่มในน้ำ ที่อายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ส่วนการทดสอบกำลังรับแรงดัดจะใช้ตัวอย่างที่บ่มในอากาศ ที่อายุ 28 วัน ซึ่งจะใช้ตัวอย่างมอเตอร์าร์ปรับระดับรวมทั้งสิ้นจำนวน 468 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางเคมี

รายการทดสอบสมบัติทางเคมี	ชื่อตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง (หน่วย: ตัวอย่าง)
การทดสอบปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)	1. ปูนซีเมนต์	5
	2. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	5
	3. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	5
	4. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	5
	5. C100 S1000 P0000	5
การทดสอบปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)	1. ปูนซีเมนต์	1
	2. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง	1
	3. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด	1
	4. ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย	1
	5. C100 S1000 P0000	1
	6. C100 S0975 P0025	1
	7. C100 S0950 P0050	1
	8. C100 S0925 P0075	1
	9. C100 S0900 P0100	1
	10. C100 S0875 P0125	1
	11. C100 S0850 P0150	1
	12. C100 S0825 P0175	1
	13. C100 S0800 P0200	1
การทดสอบหาปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค ICP - OES	C100 S0800 P0200	12
การทดสอบหาปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค ICP - MS	C100 S0800 P0200	1
รวม		51 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.8 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกล

ลำดับ	สัญลักษณ์ส่วนผสม	ประเภทการบ่มและอายุของมอร์ตาร์ปรับระดับ							
		อากาศ				น้ำ			
		3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
	การทดสอบการไหลแผ่								
1	C100 S1000 P0000	1	1	1	1	1	1	1	1
2	C100 S0975 P0025	1	1	1	1	1	1	1	1
3	C100 S0950 P0050	1	1	1	1	1	1	1	1
4	C100 S0925 P0075	1	1	1	1	1	1	1	1
5	C100 S0900 P0100	1	1	1	1	1	1	1	1
6	C100 S0875 P0125	1	1	1	1	1	1	1	1
7	C100 S0850 P0150	1	1	1	1	1	1	1	1
8	C100 S0825 P0175	1	1	1	1	1	1	1	1
9	C100 S0800 P0200	1	1	1	1	1	1	1	1
	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว								
1	C100 S1000 P0000	1	1	1	1	1	1	1	1
2	C100 S0975 P0025	1	1	1	1	1	1	1	1
3	C100 S0950 P0050	1	1	1	1	1	1	1	1
4	C100 S0925 P0075	1	1	1	1	1	1	1	1
5	C100 S0900 P0100	1	1	1	1	1	1	1	1
6	C100 S0875 P0125	1	1	1	1	1	1	1	1
7	C100 S0850 P0150	1	1	1	1	1	1	1	1
8	C100 S0825 P0175	1	1	1	1	1	1	1	1
9	C100 S0800 P0200	1	1	1	1	1	1	1	1

ตารางที่ 3.8 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกล (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์ส่วนผสม	ประเภทการบ่มและอายุของมอร์ตาร์							
		อากาศ				น้ำ			
		3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
	การทดสอบกำลังรับ แรงอัด								
1	C100 S1000 P0000	4	4	4	4	4	4	4	4
2	C100 S0975 P0025	4	4	4	4	4	4	4	4
3	C100 S0950 P0050	4	4	4	4	4	4	4	4
4	C100 S0925 P0075	4	4	4	4	4	4	4	4
5	C100 S0900 P0100	4	4	4	4	4	4	4	4
6	C100 S0875 P0125	4	4	4	4	4	4	4	4
7	C100 S0850 P0150	4	4	4	4	4	4	4	4
8	C100 S0825 P0175	4	4	4	4	4	4	4	4
9	C100 S0800 P0200	4	4	4	4	4	4	4	4
	การทดสอบกำลังรับ แรงดัด								
1	C100 S1000 P0000	-	-	-	-	-	-	-	4
2	C100 S0975 P0025	-	-	-	-	-	-	-	4
3	C100 S0950 P0050	-	-	-	-	-	-	-	4
4	C100 S0925 P0075	-	-	-	-	-	-	-	4
5	C100 S0900 P0100	-	-	-	-	-	-	-	4
6	C100 S0875 P0125	-	-	-	-	-	-	-	4
7	C100 S0850 P0150	-	-	-	-	-	-	-	4
8	C100 S0825 P0175	-	-	-	-	-	-	-	4
9	C100 S0800 P0200	-	-	-	-	-	-	-	4
รวม		468 ตัวอย่าง							

บทที่ 4

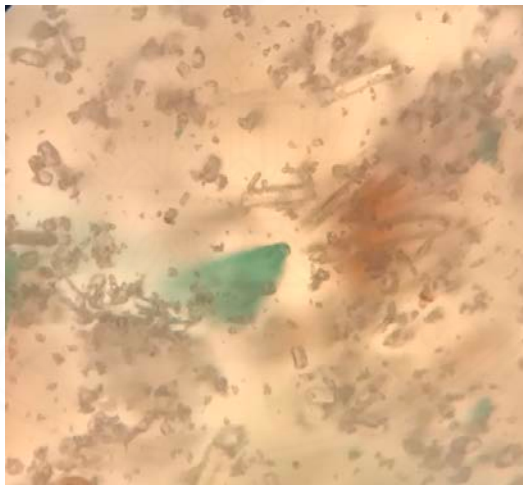
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ จะประกอบด้วย การทดสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน และการวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

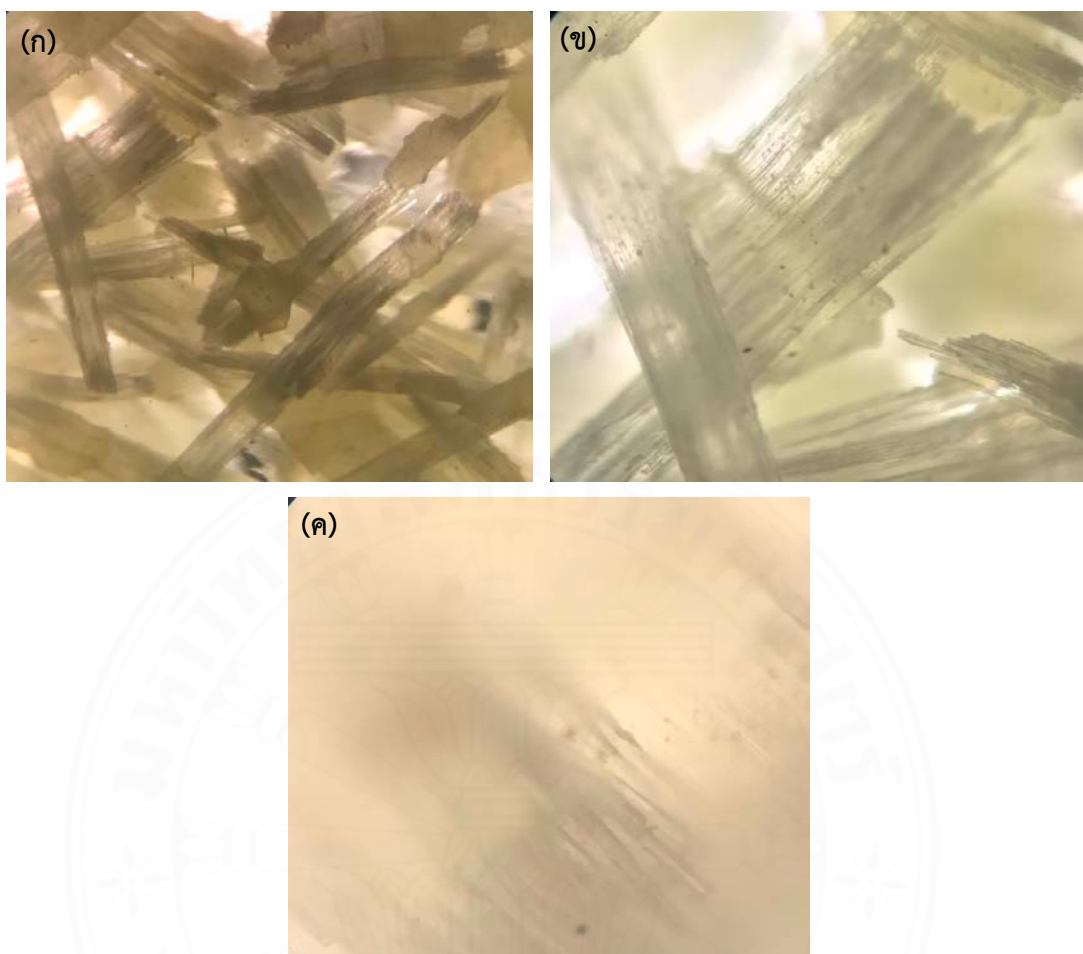
4.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ให้ผลการทดลองลักษณะทางกายภาพได้ในวัสดุบางชนิดที่ยอมให้แสงผ่านได้เท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ด้านกำลังขยาย และความสามารถในการส่องผ่านของแสง



ภาพที่ 4.1 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 100X

จากภาพที่ 4.1 จะเห็นว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด มีขนาดคละแตกต่างกันมาก เป็นรูปทรงเหลี่ยม บางส่วนมีลักษณะเรียวยาว และยังพบส่วนที่มีสีเขียวและสีน้ำตาลอมส้มที่ใช้เคลือบแผงวงจร ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงสามารถมองเห็นได้จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 100X เท่านั้น



ภาพที่ 4.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) กำลังขยาย 40X (ข) กำลังขยาย 60X (ค) กำลังขยาย 100X

จากภาพที่ 4.2 จะเห็นว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย มีรูปทรงเรียวยาว พื้นที่ผิวขรุขระ ไม่เรียบสม่ำเสมอ ลักษณะคล้ายเส้นใยแก้วทอ ส่วนปลายที่เป็นด้านสั้นขรุขระ ไม่เรียบสม่ำเสมอ แตกต่างจากลักษณะของขอบด้านยาวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอจนเกือบเป็นแนวเส้นตรง มีขนาดหลากหลายขนาดคละกัน ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใยสามารถมองเห็นได้ชัดเจนจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 40X และ 60X

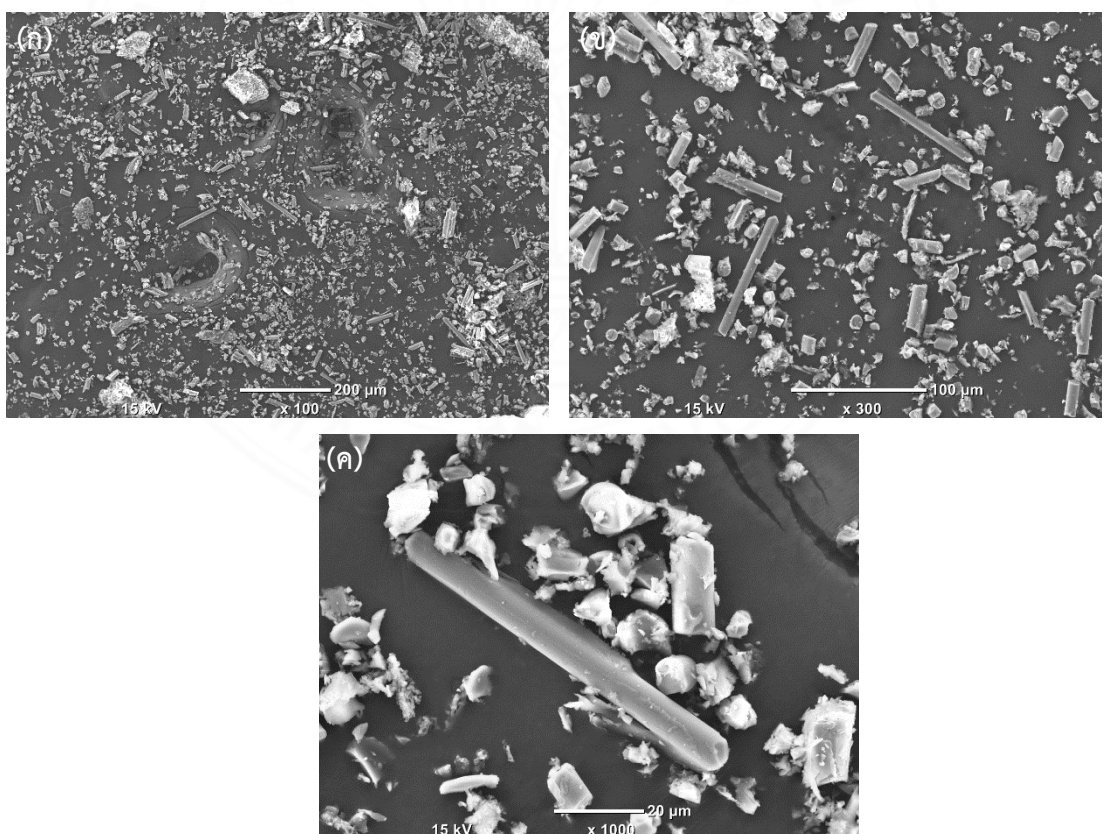
ส่วนที่กำลังขยาย 100X จะสามารถสังเกตเห็นพื้นที่ผิวของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใยได้อย่างชัดเจน ลักษณะที่พบมีสีใสค่อนข้างโปร่งแสง สังเกตเห็นเป็นเส้นคล้ายแก้วเรียงตัวกันอยู่ในแนวยาวอย่างเป็นระเบียบ

4.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะสามารถสังเกตเห็นลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่นำไปใช้ทดลองได้ชัดเจนมากกว่าจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เช่น ขนาดของวัสดุ รูปร่างของวัสดุ เป็นต้น

4.1.2.1 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงมีหลากหลายรูปร่าง ตั้งแต่รูปร่างกลมมน ลีแบน เป็นแท่งทรงกระบอกยาว ทรงสี่เหลี่ยม ทรงลูกบาศก์ และรูปทรงหลายเหลี่ยม ส่วนที่มีความละเอียดมาก พบมากที่สุดประมาณ 90% ของปริมาณตัวอย่างที่นำไปทดสอบ มีขนาดตั้งแต่ 1 - 5 ไมครอน ส่วนที่หยาบจะมีขนาดตั้งแต่ 5 - 100 ไมครอน พบในปริมาณ 3 - 4% โดยประมาณ และส่วนที่เป็นแท่งทรงกระบอกยาวที่มีด้านแคบประมาณ 5 ไมครอน ด้านยาวประมาณ 20 -100 ไมครอน พบในปริมาณ 6 - 7% โดยประมาณ พื้นผิวส่วนใหญ่จะเรียบเนียน โดยเฉพาะซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผงที่มีรูปร่างเป็นแท่งทรงกระบอกยาวและทรงกลม

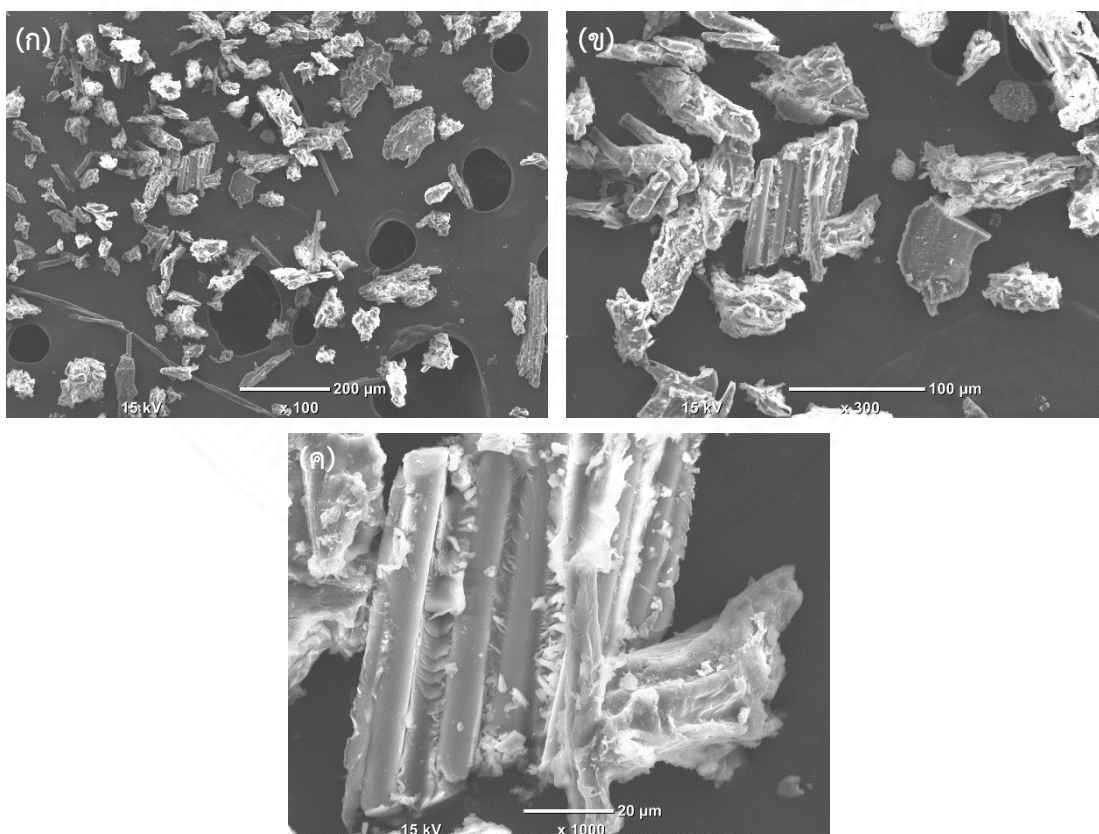


ภาพที่ 4.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กำลังขยาย 100X (ข) กำลังขยาย 300X (ค) กำลังขยาย 1,000X

4.1.2.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด มีหลากหลายรูปร่าง ตั้งแต่รูปร่าง ลีแบน เป็นแท่งทรงกระบอกยาว ทรงสี่เหลี่ยม และรูปทรงหลายเหลี่ยม รูปทรงที่พบส่วนมากจะมี ลักษณะลีแบน ส่วนละเอียดที่สุดที่พบ มีขนาดตั้งแต่ 20 - 100 ไมครอน พบในปริมาณ 90 - 95% โดยประมาณ ส่วนหยาบมีขนาดตั้งแต่ 100 - 200 ไมครอน พบในปริมาณ 2 - 3% โดยประมาณ และยังพบส่วนที่เป็นแท่งทรงกระบอกยาว ดังเช่นที่พบในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง พบใน ปริมาณ 1 - 2% โดยประมาณ พื้นผิวส่วนใหญ่จะขรุขระไม่เรียบเนียน มีพื้นที่ผิวสัมผัสเยอะมาก

เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 1,000X จะพบว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดเม็ดประกอบด้วยโครงสร้างของวัสดุที่มีรูปร่างเป็นแท่งทรงกระบอกยาว หรือโครงสร้างของเส้นใย แก้วทอ ที่เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR - 4 และ FR - 5 ซึ่งมีการยึด เหนี่ยวเส้นใยแก้วด้วยอีพอกซี



ภาพที่ 4.4 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กำลังขยาย 100X (ข) กำลังขยาย 300X (ค) กำลังขยาย 1,000X

4.1.2.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย โครงสร้างส่วนใหญ่ที่พบจะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกยาว พบมากถึง 95 - 97% โดยประมาณ ด้านที่เป็นหน้าตัดรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15 ไมครอน ซึ่งหน้าตัดบางหน้าตัดอาจจะมีลักษณะไม่เรียบเนียน ขึ้นอยู่กับการย่อยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนด้านยาวของเส้นใยทรงกระบอก มีความยาวตั้งแต่ 30 - 200 ไมครอน และพบวัสดุรูปทรงหลายเหลี่ยมปะปนมาเล็กน้อยในปริมาณ 3 - 5% โดยประมาณ โดยมีขนาด 30 - 50 ไมครอน

เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 300X และ 1,000X จะพบว่าองค์ประกอบของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย ประกอบด้วยโครงสร้างของวัสดุที่มีรูปร่างเป็นแท่งทรงกระบอกยาว หรือโครงสร้างของเส้นใยแก้วที่ไม่มีการยึดติดกันเป็นแผ่นเหมือนกับซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด นอกจากนี้พื้นที่ผิวของเส้นใยแก้วที่พบยังมีความเรียบเนียนอีกด้วย



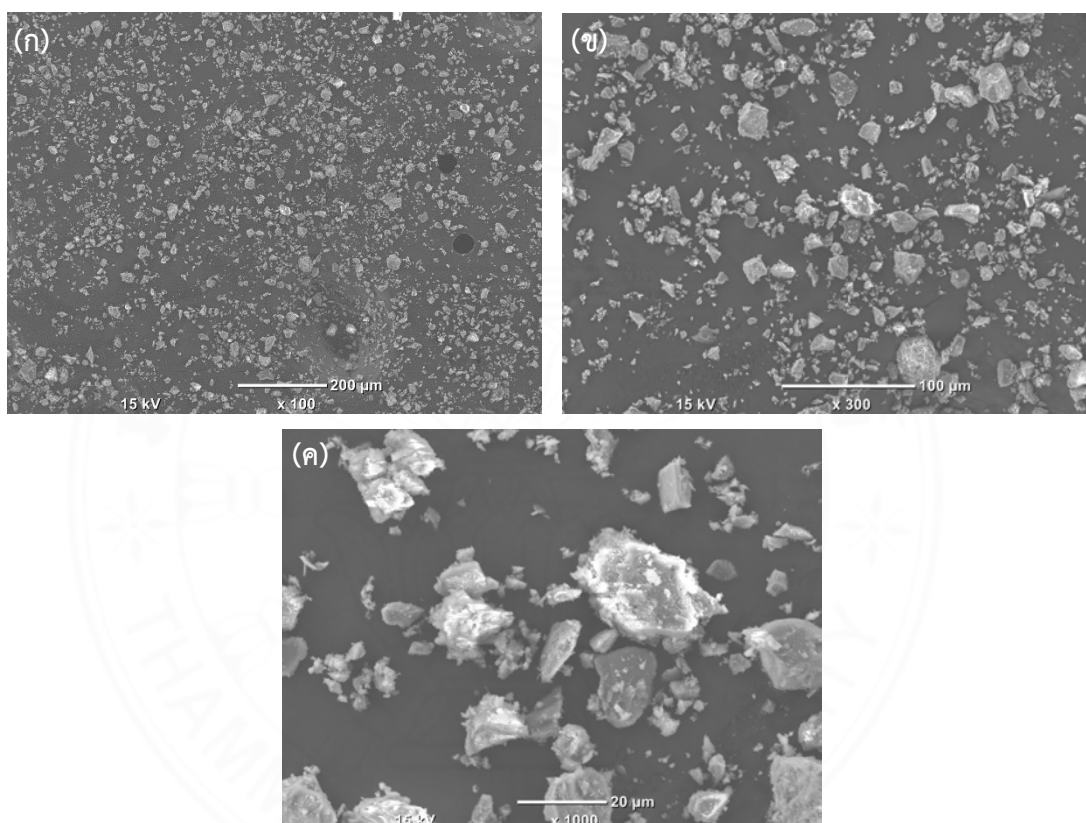


ภาพที่ 4.5 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กำลังขยาย 100X (ข) กำลังขยาย 300X (ค) กำลังขยาย 1,000X

4.1.2.4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง

ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง ประกอบด้วยอนุภาคขนาดแตกต่างกันกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อนุภาคที่พบมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดตั้งแต่ 2 - 20 ไมครอน รูปร่างส่วนใหญ่ของอนุภาคเป็นอสัณฐานหรือมีรูปร่างไม่แน่นอน

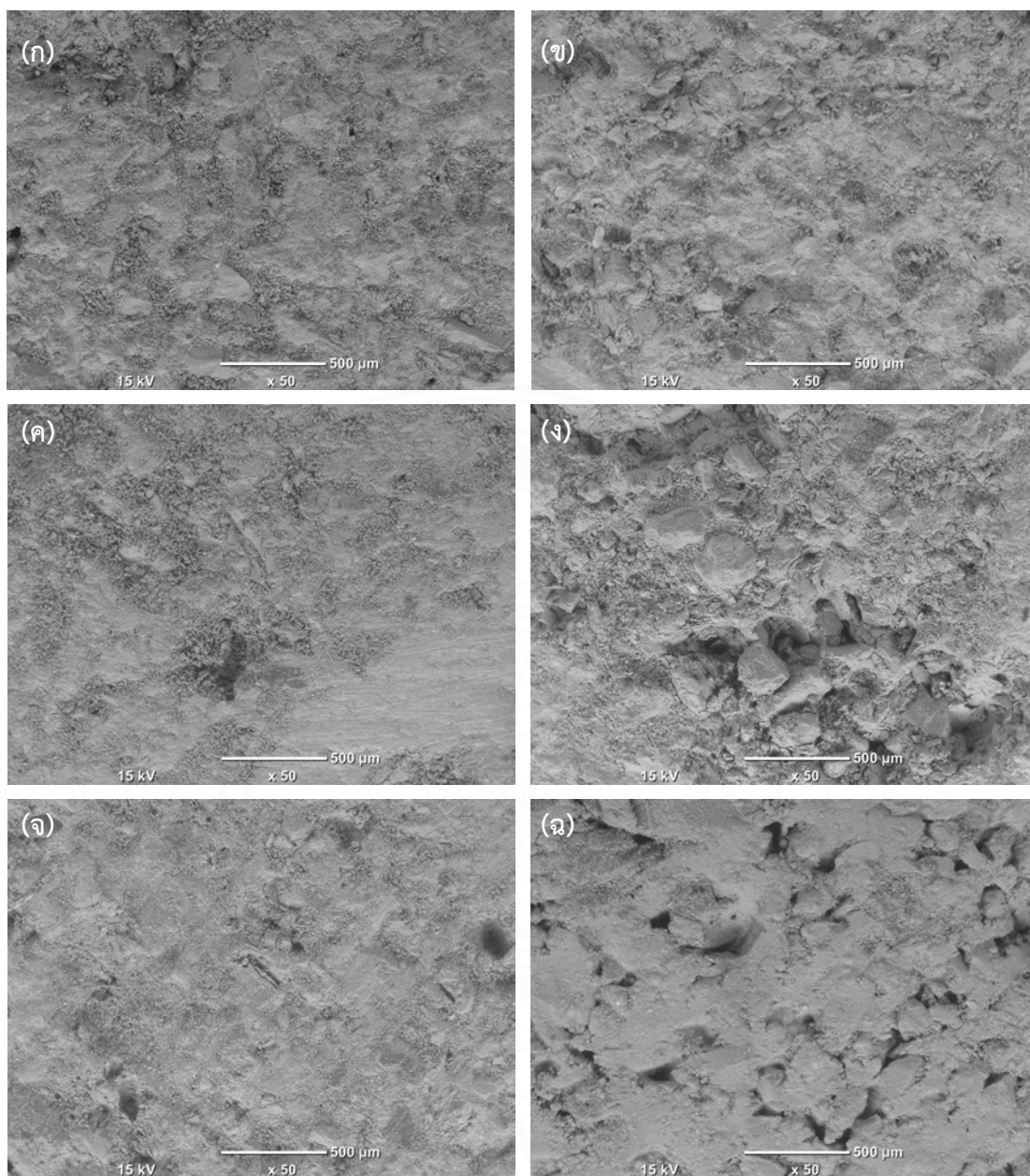
เมื่อพิจารณาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 300X และ 1,000X อาจจะบ่งบอกได้ว่าอนุภาคที่พบในปูนซีเมนต์ คือ แร่แคลไซต์ (CaCO_3) ที่มีแนวแตกเรียบเป็นแบบ 3 ทิศทางทำมุมต่อกันคล้ายกับขนมเปียกปูน (Rhombohedral Cleavage) หรือแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่มีแนวแตกเรียบแต่เป็น 1 ทิศทางเท่านั้น สามารถสังเกตได้จากแนวแตกเรียบที่พบบริเวณผิวของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาต่อแสงของกล้องจุลทรรศน์เป็นระนาบเดียวกัน



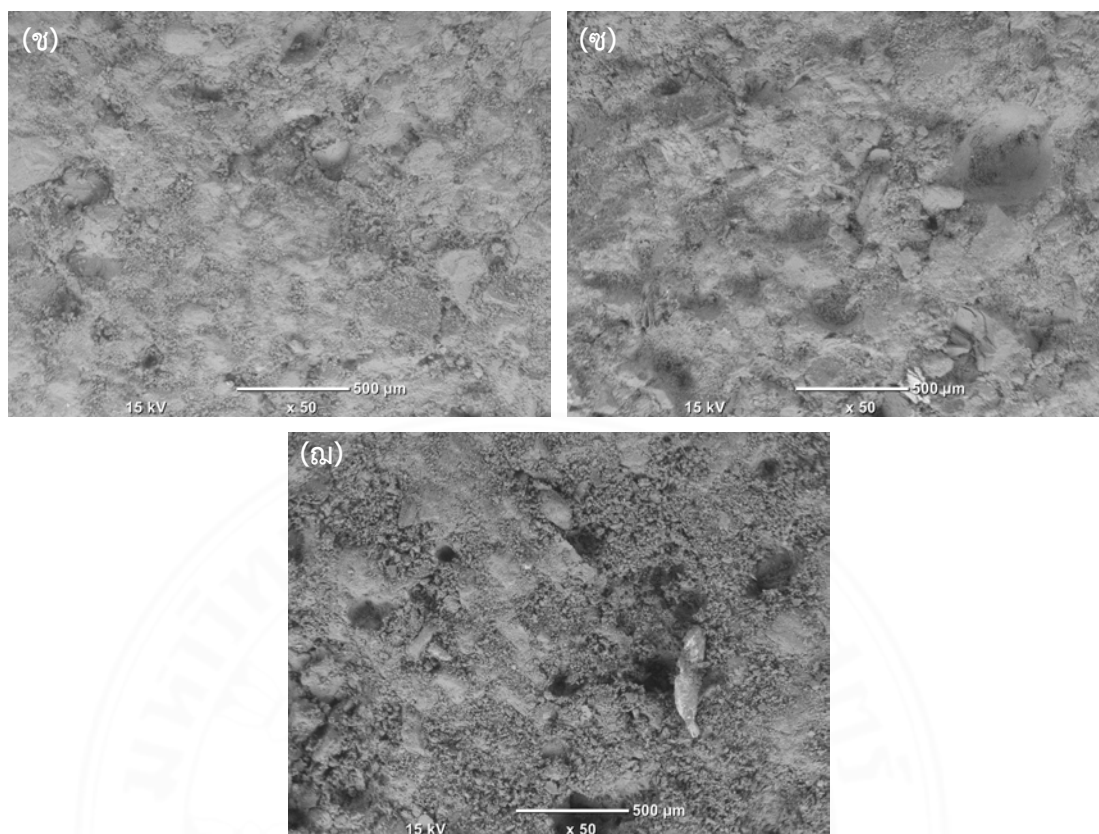
ภาพที่ 4.6 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กำลังขยาย 100X (ข) กำลังขยาย 300X (ค) กำลังขยาย 1,000X

4.1.2.5 มอร์ตาร์ปรับระดับ

ลักษณะทางกายภาพของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อิเล็ทธรอนิกส์ชนิดเม็ดตั้งแต่ 0 - 20% แสดงดังภาพที่ 4.7 - 4.9

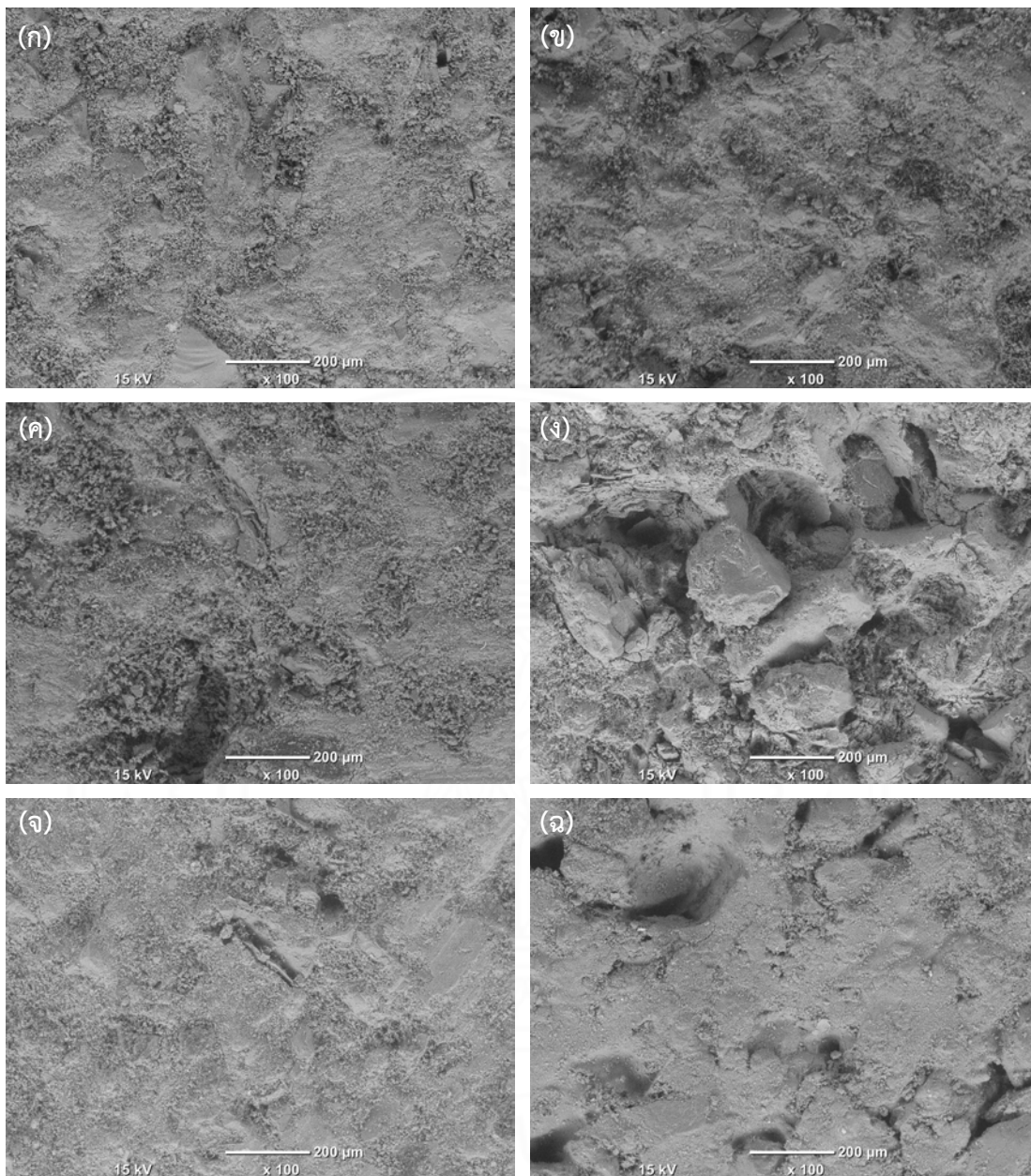


ภาพที่ 4.7 มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50X
 (ก) C100 S1000 P0000 (ข) C100 S0975 P0025 (ค) C100 S0950 P0050
 (ง) C100 S0925 P0075 (จ) C100 S0900 P0100 (ฉ) C100 S0875 P0125

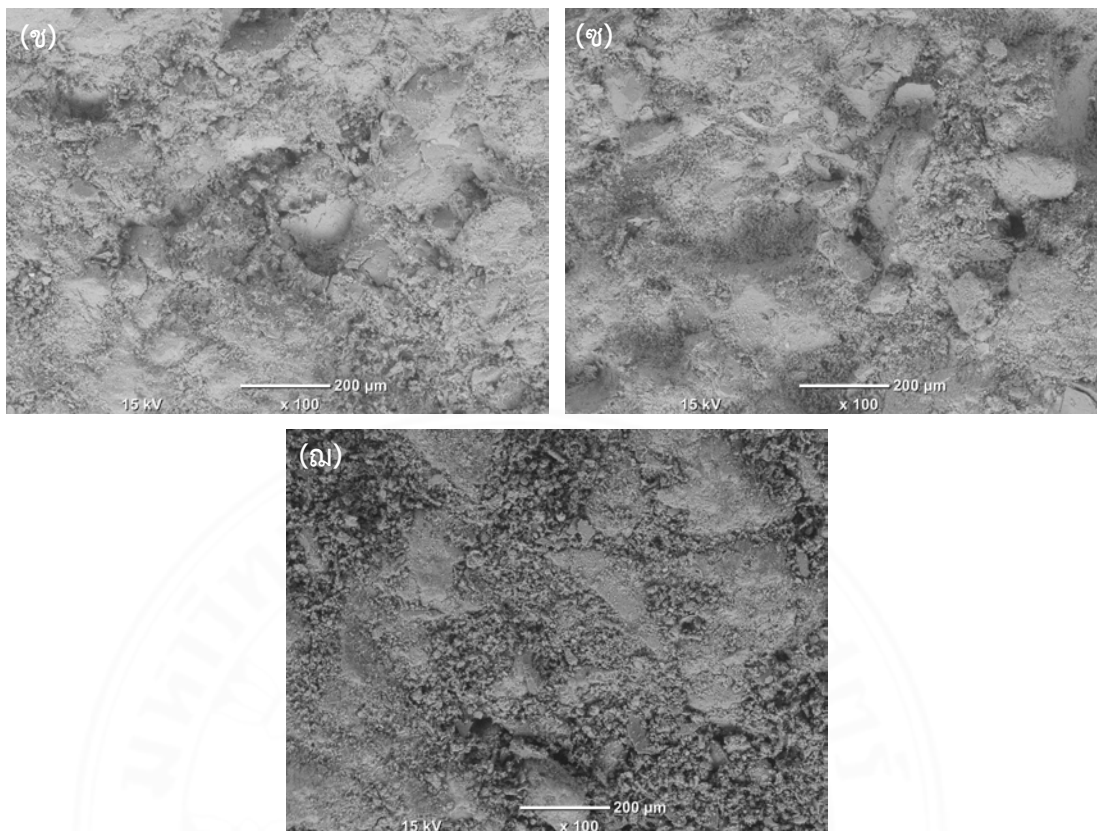


ภาพที่ 4.7 (ต่อ) มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50X
 (ข) C100 S0850 P0150 (ค) C100 S0825 P0175 (ณ) C100 S0800 P0200

ภาพที่ 4.7 เป็นภาพมอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50X จากภาพจะเห็นว่าอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับมีการยึดเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคเป็นอย่างดี ยกเว้นตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อิเล็ทรอนิกส์ในปริมาณ 20% ที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบเริ่มจะไม่สามารถยึดเกาะกันได้ และยังพบอีกว่าในตัวอย่างที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อิเล็ทรอนิกส์ชนิดเม็ดตั้งแต่ร้อยละ 7.5 ขึ้นไป (ส่วนผสมที่มีค่า $P > 0075$) จะเริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นภายในมอร์ตาร์ปรับระดับที่แข็งตัวแล้ว

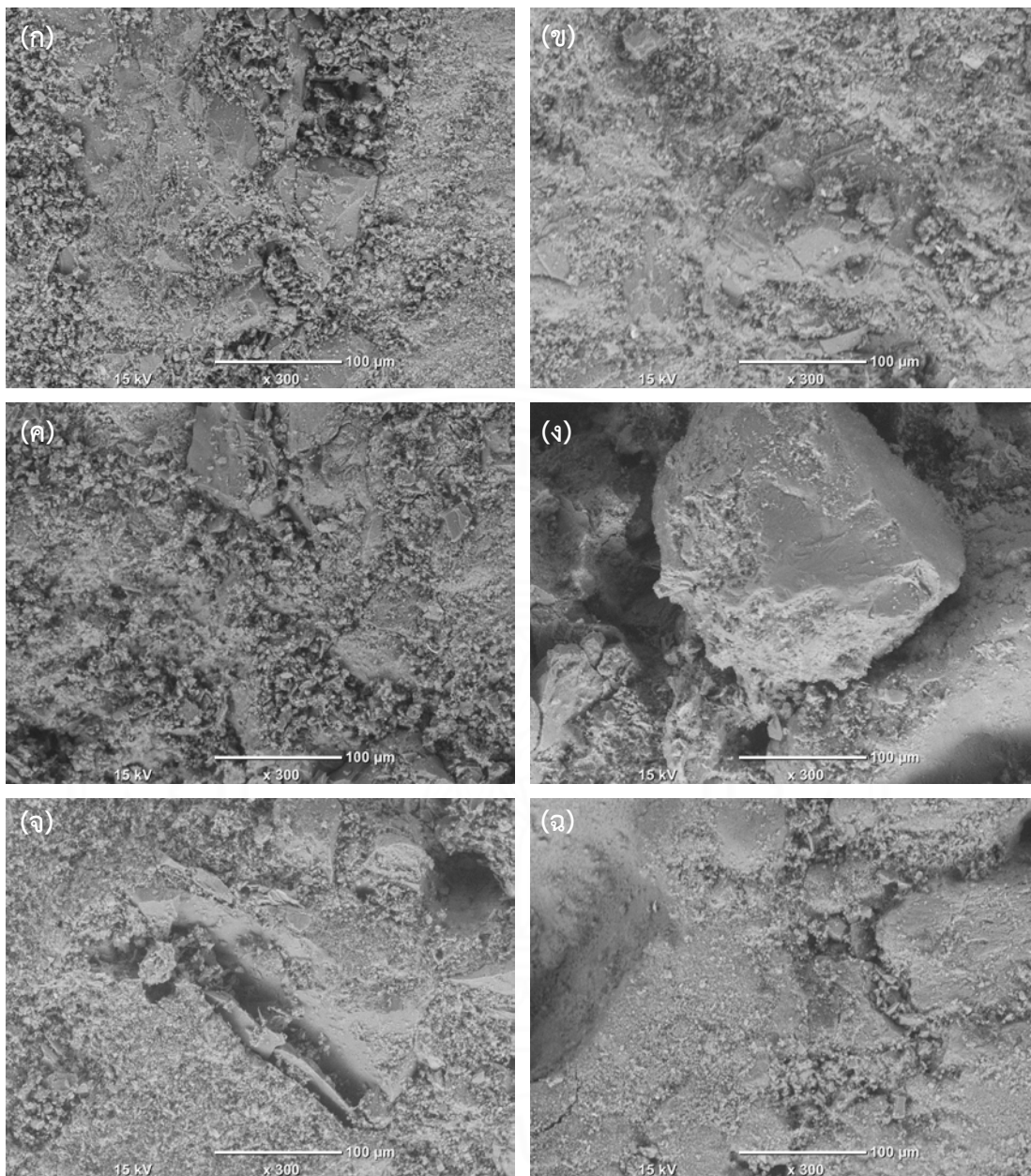


ภาพที่ 4.8 มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100X
 (ก) C100 S1000 P0000 (ข) C100 S0975 P0025 (ค) C100 S0950 P0050
 (ง) C100 S0925 P0075 (จ) C100 S0900 P0100 (ฉ) C100 S0875 P0125

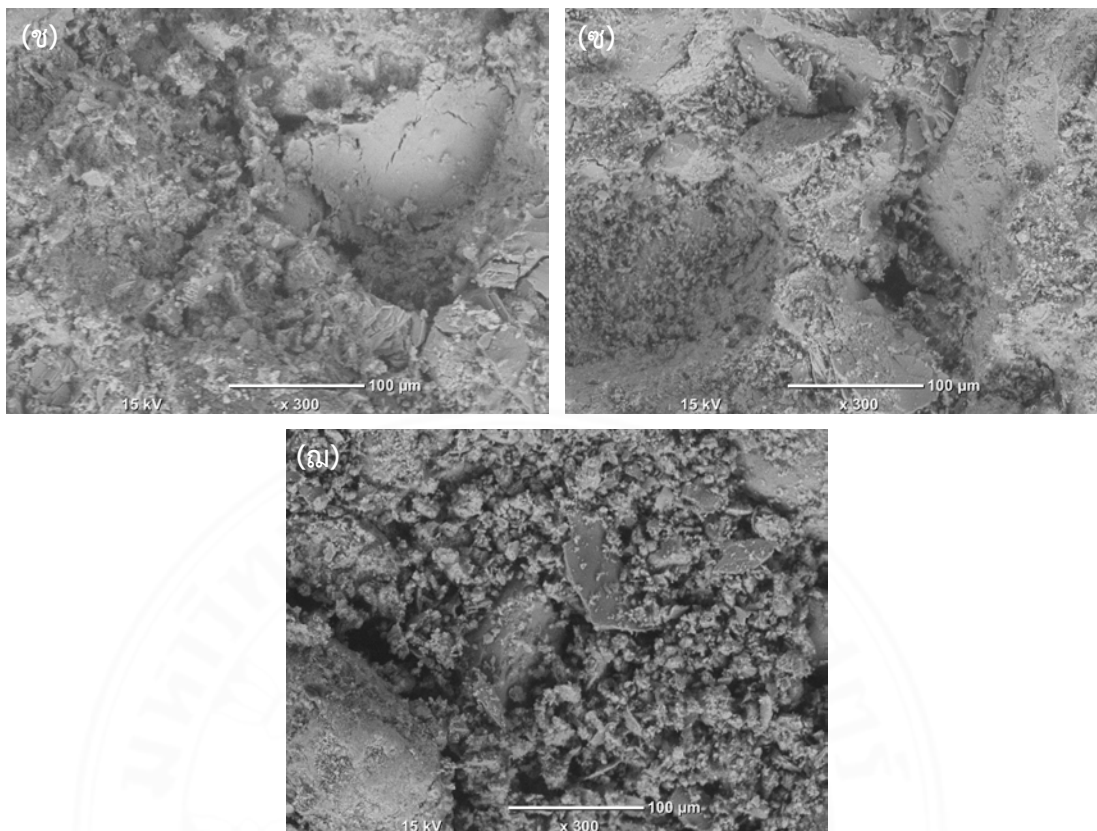


ภาพที่ 4.8 (ต่อ) มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100X
 (ข) C100 S0850 P0150 (ช) C100 S0825 P0175 (ณ) C100 S0800 P0200

ภาพที่ 4.8 เป็นภาพมอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100X จากภาพจะเห็นว่าอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับมีการยึดเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคเป็นอย่างดี ปูนซีเมนต์ที่เป็นสารเชื่อมประสานสามารถเชื่อมประสานอนุภาคได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ยกเว้นตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย خاکแฉวงจอร์อิเล็ททรอนิกส์ในปริมาณ 20% ที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบไม่สามารถยึดเกาะกันได้ และยังพบอีกว่าในตัวอย่างที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย خاکแฉวงจอร์อิเล็ททรอนิกส์ชนิดเม็ดตั้งแต่ร้อยละ 7.5 ขึ้นไป (ส่วนผสมที่มีค่า $P > 0075$) ช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในมอร์ตาร์ปรับระดับที่แข็งตัวแล้วจะเกิดบริเวณรอบ ๆ อนุภาคของ خاکแฉวงจอร์อิเล็ททรอนิกส์



ภาพที่ 4.9 มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 300X
 (ก) C100 S1000 P0000 (ข) C100 S0975 P0025 (ค) C100 S0950 P0050
 (ง) C100 S0925 P0075 (จ) C100 S0900 P0100 (ฉ) C100 S0875 P0125



ภาพที่ 4.9 (ต่อ) มอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 300X
 (ข) C100 S0850 P0150 (ค) C100 S0825 P0175 (ง) C100 S0800 P0200

ภาพที่ 4.9 เป็นภาพมอร์ตาร์ปรับระดับที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 300X จากภาพจะเห็นว่าอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับมีการยึดเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคเป็นอย่างดี ปูนซีเมนต์ที่เป็นสารเชื่อมประสานสามารถเชื่อมประสานอนุภาคได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และยังเชื่อมประสานอนุภาคของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 20% สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าซีเมนต์ไม่สามารถเชื่อมประสานอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบให้ยึดเกาะกันได้

4.1.3 ค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน

การทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อนของมอร์ตาร์ปรับระดับ ผู้วิจัยได้เลือกทดสอบเฉพาะตัวอย่างควบคุม (C100 S1000 P0000) และตัวอย่างที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 20 (C100 S0800 P0200) ผลสรุปการทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อนแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อนของมอร์ตาร์ปรับระดับ

ลำดับ	สัญลักษณ์ส่วนผสม	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบ (°C)	ค่าการนำความร้อน (W/m.K)	ค่าการต้านทานความร้อน (m ² .K/W)
1	C100 S1000 P0000	24.3	0.304	0.106
2	C100 S0800 P0200	23.1	0.358	0.098

หมายเหตุ: รายละเอียดและหนังสือรับรองผลการทดสอบแสดงใน ภาคผนวก ก

เมื่อพิจารณาค่าการนำความร้อนจากตารางที่ 4.1 จะพบว่ามอร์ตาร์ปรับระดับที่ไม่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีค่าการนำความร้อน 0.304 W/m.K ที่อุณหภูมิ 24.3 °C และมอร์ตาร์ปรับระดับ ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณร้อยละ 20 มีค่าการนำความร้อน 0.358 W/m.K ที่อุณหภูมิ 23.1 °C สังเกตได้ว่ามอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ปริมาณร้อยละ 20 มีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1.2 °C จึงสามารถอธิบายได้ว่าหากใช้อุณหภูมิทดสอบเดียวกัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ปริมาณร้อยละ 20 จะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม

เมื่อพิจารณาค่าการต้านทานความร้อนที่แปรผกผันกับค่าการนำความร้อน ก็จะสามารถอธิบายได้ในแนวทางเดียวกัน คือ หากใช้อุณหภูมิทดสอบเดียวกัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ปริมาณร้อยละ 20 จะมีค่าการต้านทานความร้อนสูงกว่าตัวอย่างควบคุม

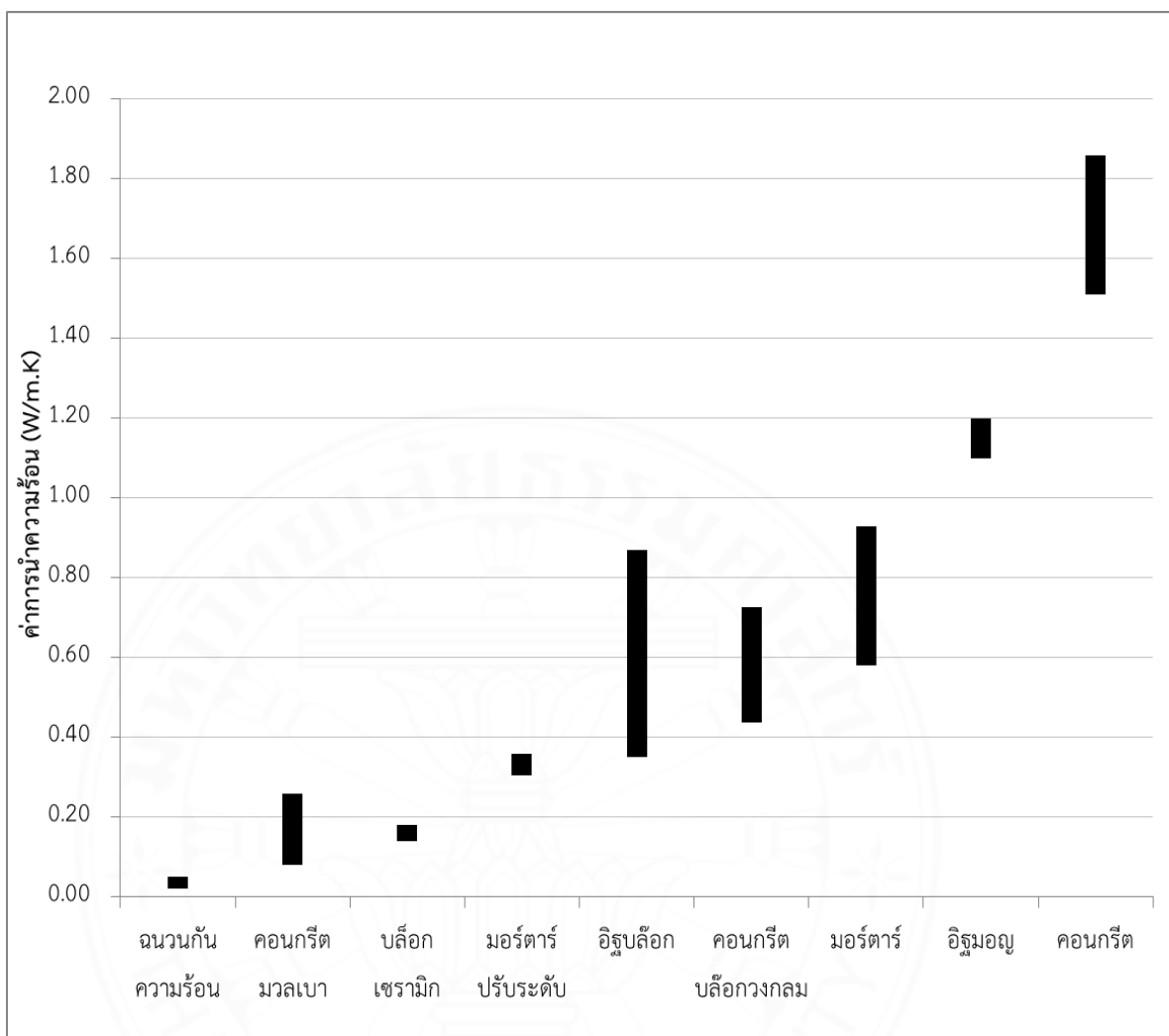
จึงอาจกล่าวได้ว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์ปรับระดับมีผลต่อค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน นั่นคือ มีค่าการนำความร้อนต่ำ และค่าการต้านทานความร้อนสูงกว่ามอร์ตาร์ทั่วไป

ตารางที่ 4.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้าง

ผลิตภัณฑ์คอนกรีต	ค่าการนำความร้อน (W/m.K)
ฉนวนกันความร้อน ¹⁴⁸	0.021 - 0.050
คอนกรีตมวลเบา ¹⁵⁰	0.080 - 0.260
บล็อกเซรามิก ¹⁵⁰	0.140 - 0.180
มอร์ตาร์ปรับระดับ	0.304 - 0.358
อิฐบล็อก ¹⁵⁰	0.350 - 0.870
คอนกรีตบล็อกวงกลม ¹⁴⁹	0.436 - 0.726
มอร์ตาร์ ¹⁴⁸	0.580 - 0.930
อิฐมอญ ¹⁴⁹	1.100 - 1.200
คอนกรีต ¹⁵⁰	1.510 - 1.860

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนกับวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น จะพบว่ามอร์ตาร์ปรับระดับมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าวัสดุฉนวนกันความร้อน คอนกรีตมวลเบา และบล็อกเซรามิกเล็กน้อย ซึ่งจัดว่ามอร์ตาร์ปรับระดับอยู่ในกลุ่มวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ (ไม่เกิน 0.35 W/m.K) และมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าอิฐบล็อก คอนกรีตบล็อกวงกลม มอร์ตาร์ อิฐมอญ และคอนกรีต

จึงอาจกล่าวได้ว่าหากนำมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดมาประยุกต์ใช้ในแง่ของการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อน มอร์ตาร์ปรับระดับจะมีสมบัติใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาและอิฐบล็อกมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้าง

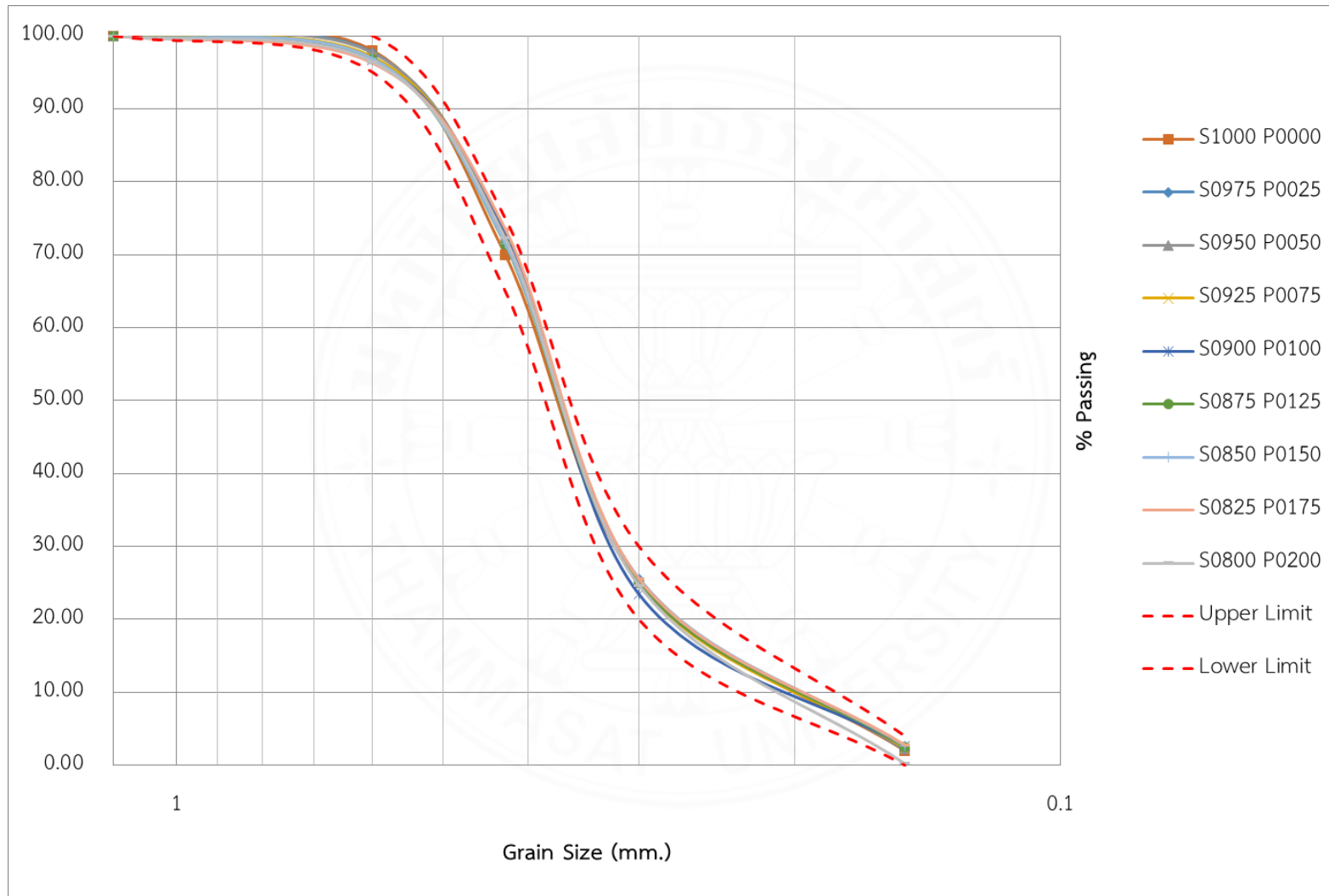
4.1.4 การวิเคราะห์ขนาดผลของมวลรวมละเอียด

การกระจายตัวของขนาดมวลรวมละเอียดในส่วนผสม Mortar ธรรมดาจำเป็นต้องมีการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 778 - Standard Specification for Standard Sand โดยได้มีการทดสอบขนาดผลของมวลรวมละเอียดจำนวนทั้งสิ้น 9 ตัวอย่าง โดยมีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสรุปผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด

ลำดับ	สัญลักษณ์ส่วนผสม	% Passing					
		Sieve No.					
		16 (1.180 mm.)	30 (0.600 mm.)	40 (0.425 mm.)	50 (0.300 mm.)	100 (0.150 mm.)	Pan
	Upper Limit	100.00	100.00	75.00	30.00	4.00	NA
	Lower Limit		96.00	65.00	20.00	0.00	
1	S1000 P0000	100.00	98.00	70.00	25.00	2.00	0.00
2	S0975 P0025	100.00	97.75	71.55	25.62	2.11	0.00
3	S0950 P0050	100.00	97.66	72.54	25.24	2.29	0.00
4	S0925 P0075	100.00	97.11	72.78	24.97	2.33	0.00
5	S0900 P0100	100.00	96.62	73.02	23.47	2.59	0.00
6	S0875 P0125	100.00	96.83	71.41	25.05	2.55	0.00
7	S0850 P0150	100.00	96.87	71.55	25.60	2.66	0.00
8	S0825 P0175	100.00	96.25	73.54	25.57	2.78	0.00
9	S0800 P0200	100.00	96.47	72.27	24.68	0.22	0.00

จากตารางที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่ามวลรวมละเอียดแต่ละชนิดมีค่าการกระจายตัวใกล้เคียงกัน และเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 778 - Standard Specification for Standard Sand ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปเขียนกราฟแสดงการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดดังภาพที่ 4.11 และรายละเอียดข้อมูลผลการทดสอบ แสดงในภาคผนวก ข



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด

4.1.5 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ

ผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ ได้จากการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่ขึ้นรูปด้วยแบบหล่อตัวอย่าง แล้วนำไปบ่มตามสภาวะและจำนวนวันที่ได้วางแผนการทดลองไว้ โดยค่าเฉลี่ยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำแสดงดังตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศแสดงดังตารางที่ 4.5 และ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ

Mix Code	Weight (g)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
C100 S1000 P0000	231.5	236.9	247.9	264.7	277.1
C100 S0975 P0025	254.7	260.6	263.8	261.4	264.1
C100 S0950 P0050	253.1	254.1	250.4	251.9	259.1
C100 S0925 P0075	251.6	250.8	258.5	251.1	257.6
C100 S0900 P0100	232.9	251.9	255.6	247.6	255.7
C100 S0875 P0125	239.9	248.0	244.5	251.5	252.5
C100 S0850 P0150	226.6	240.8	237.2	242.5	231.8
C100 S0825 P0175	231.9	231.2	233.4	243.0	235.8
C100 S0800 P0200	226.6	224.5	229.6	240.0	237.0

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ

Mix Code	Weight (g)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
C100 S1000 P0000	220.5	230.6	241.7	258.0	261.1
C100 S0975 P0025	252.1	253.4	257.5	243.4	253.5
C100 S0950 P0050	248.5	251.6	239.3	236.3	248.5

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ (ต่อ)

Mix Code	Weight (g)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
C100 S0925 P0075	246.0	244.7	238.0	242.6	246.8
C100 S0900 P0100	233.1	240.0	235.7	231.6	238.4
C100 S0875 P0125	228.6	242.1	236.1	229.6	233.3
C100 S0850 P0150	221.2	226.6	225.0	230.3	223.0
C100 S0825 P0175	216.1	219.7	216.6	224.2	218.3
C100 S0800 P0200	207.0	206.1	207.9	214.3	210.7

จากข้อมูลผลการทดลองในตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศจะมีน้ำหนักเบากว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำ และที่ระยะเวลาการบ่มสูงสุด 28 วัน ค่าผลต่างของน้ำหนักมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศก็ยิ่งสูงขึ้น โดยตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 20% มีผลต่างของน้ำหนักสูงที่สุด ซึ่งมีค่าสูงถึง 26.3 กรัม ทั้งนี้เนื่องมาจากการบ่มตัวอย่างในอากาศจะทำให้ตัวอย่างมีอัตราการสูญเสียน้ำในส่วนผสมมากกว่าการบ่มในน้ำ

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix Code	ความหนาแน่น (g/cm ³)									
	Water Curing					Air Curing				
	3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
C100 S1000 P0000	1.85	1.90	1.98	2.12	2.22	1.76	1.84	1.93	2.06	2.09
C100 S0975 P0025	2.04	2.08	2.11	2.09	2.11	2.02	2.03	2.06	1.95	2.03
C100 S0950 P0050	2.02	2.03	2.00	2.02	2.07	1.99	2.01	1.91	1.89	1.99
C100 S0925 P0075	2.01	2.01	2.07	2.01	2.06	1.97	1.96	1.90	1.94	1.97
C100 S0900 P0100	1.86	2.02	2.04	1.98	2.05	1.86	1.92	1.89	1.85	1.91

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ (ต่อ)

Mix Code	ความหนาแน่น (g/cm ³)									
	Water Curing					Air Curing				
	3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
C100 S0875 P0125	1.92	1.98	1.96	2.01	2.02	1.83	1.94	1.89	1.84	1.87
C100 S0850 P0150	1.81	1.93	1.90	1.94	1.85	1.77	1.81	1.80	1.84	1.78
C100 S0825 P0175	1.86	1.85	1.87	1.94	1.89	1.73	1.76	1.73	1.79	1.75
C100 S0800 P0200	1.81	1.80	1.84	1.92	1.90	1.66	1.65	1.66	1.71	1.69

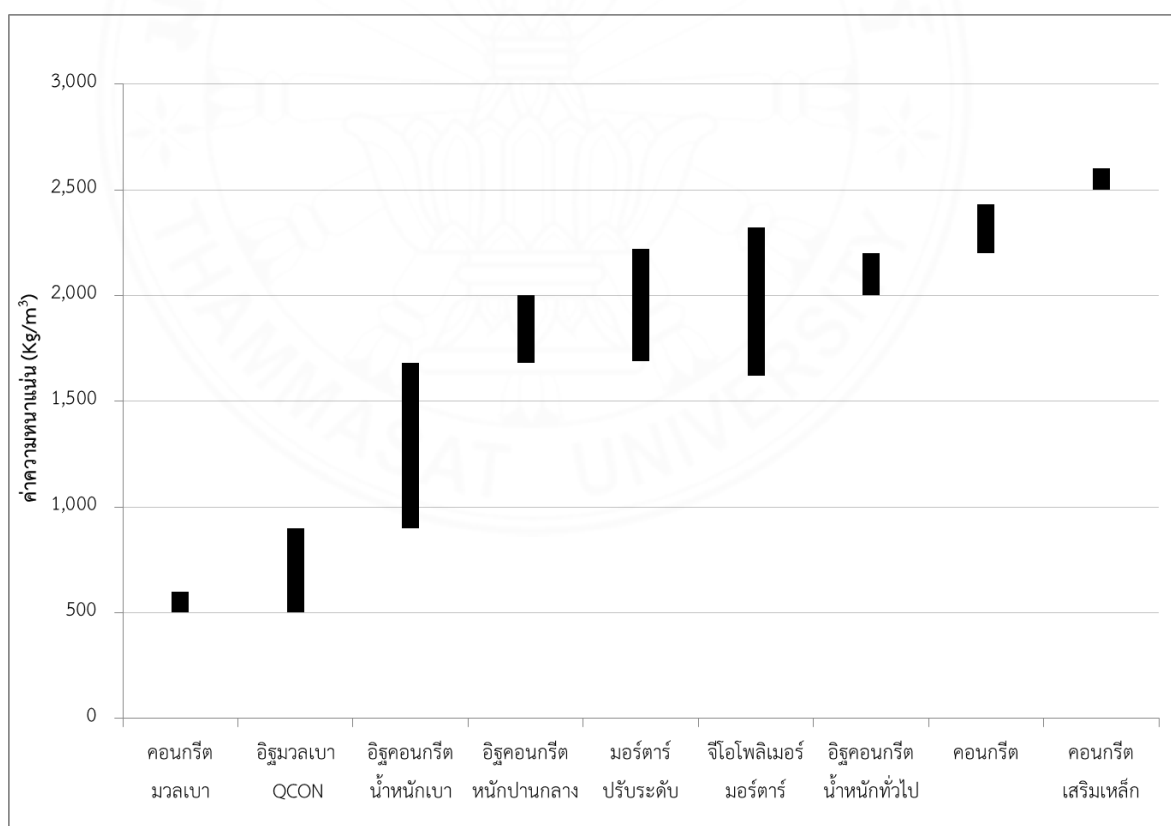
จากข้อมูลผลการทดลองในตารางที่ 4.6 พบว่าค่าความหนาแน่นของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ เมื่อพิจารณา มอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ จะพบว่ายิ่งใช้ระยะเวลาการบ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แตกต่างจากมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศที่ระยะเวลาการบ่มสูงขึ้นค่าความหนาแน่นของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับก็ยังมีแนวโน้มลดลง

เมื่อพิจารณาอายุการบ่มที่ 28 วัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.90 - 2.22 g/cm³ ซึ่งมีความมากกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศที่มีค่าความหนาแน่น 1.69 - 2.09 g/cm³ โดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับลดลง ทั้งนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ

ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่นจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับอิฐคอนกรีต, คอนกรีตบล็อกกลวง น้ำหนักปานกลาง และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.12 ทั้งนี้ รายละเอียดผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.7 ความหนาแน่นของวัสดุก่อสร้างประเภทต่าง ๆ

วัสดุ	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
คอนกรีตมวลเบา	500
อิฐมวลเบา QCON ¹⁵³	500 - 900
อิฐคอนกรีต, คอนกรีตบล็อกกลวง น้ำหนักเบา ^{151,152}	< 1,680
อิฐคอนกรีต, คอนกรีตบล็อกกลวง น้ำหนักปานกลาง ^{151,152}	1,680 - 2,000
มอร์ตาร์ปรับระดับ	1,690 - 2,220
จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ¹⁵⁴	1,620 - 2,320
อิฐคอนกรีต, คอนกรีตบล็อกกลวง น้ำหนักทั่วไป ^{151,152}	≥ 2,000
คอนกรีต	2,200 - 2,430
คอนกรีตเสริมเหล็ก	2,500



ภาพที่ 4.12 ความหนาแน่นของวัสดุก่อสร้างประเภทต่าง ๆ

4.2 ผลการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี

การทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ซากแผ่นวงจร อิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง ชนิดเม็ด และชนิดเส้นใย จะทำให้ทราบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการทำปฏิกิริยาเคมี ทั้งนี้การทดสอบแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X - Ray Fluorescence Spectrometer หรือ XRF) และการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer หรือ XRD) การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES) และ การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP - MS)

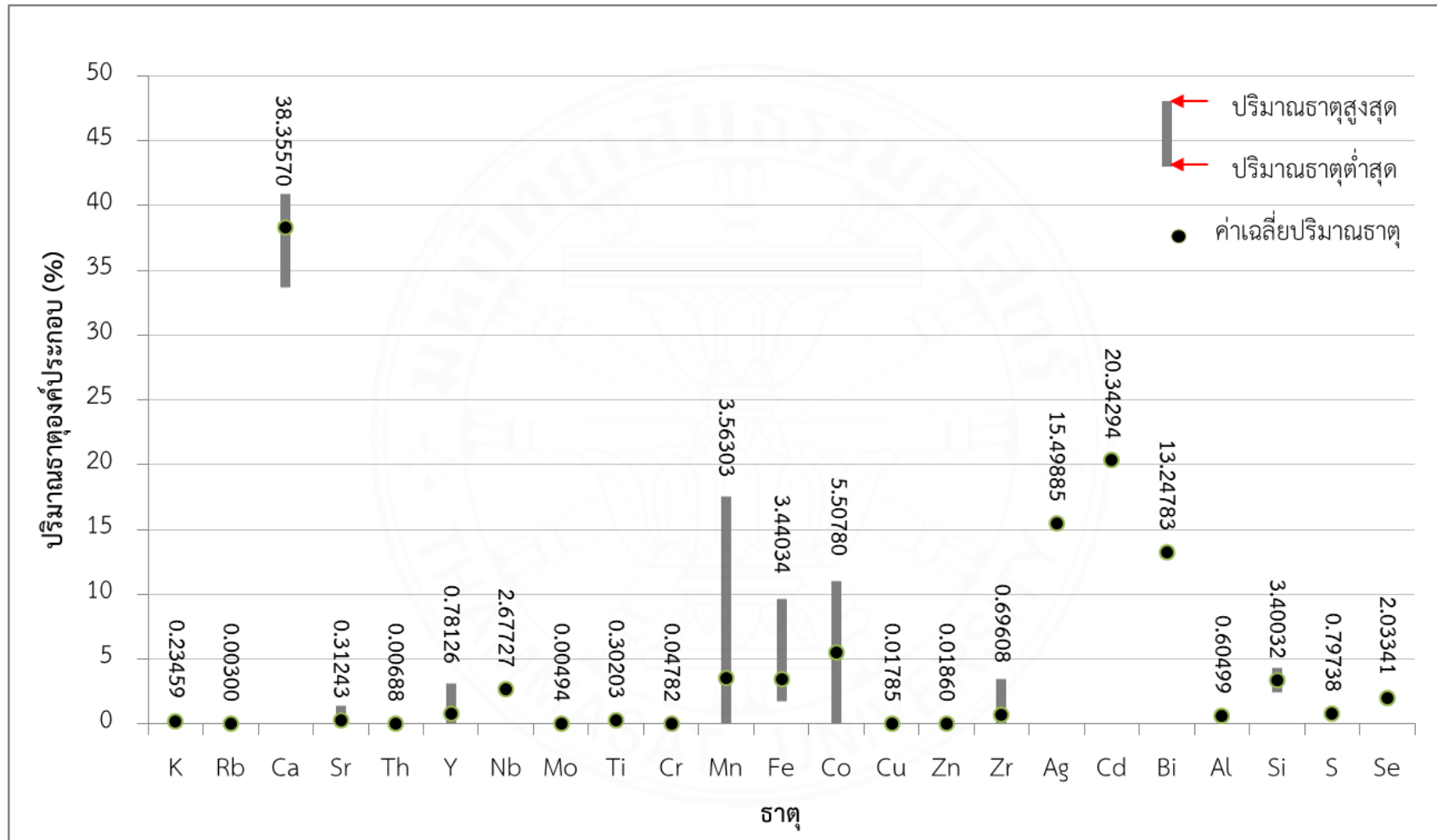
4.2.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X - Ray Fluorescence Spectrometer หรือ XRF)

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ จะให้ผลการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ ดังแสดงในภาคผนวก ง โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์ตัวอย่างของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยจำนวนทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง ดังนี้

4.2.1.1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง

จากการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ประกอบด้วยธาตุที่มีน้ำหนักเบาที่เครื่องมือไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ (ธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า 12) ในปริมาณ 50.76 - 60.99% รองลงมา คือ ธาตุแคลเซียม (Ca) มีปริมาณ 33.73 - 40.88% ส่วนธาตุโลหะที่พบมากที่สุดสามอันดับคือ แคดเมียม (Cd) เงิน (Ag) และบิสมัท (Bi) โดยพบในปริมาณเฉลี่ย 20.34%, 15.50% และ 13.25% ตามลำดับ ส่วนโลหะหนักตัวอื่น ๆ เช่น ไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และเซอร์โคเนียม (Zr) พบในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 5% โดยเฉลี่ย) เมื่อพิจารณาธาตุกึ่งโลหะและอโลหะ มีการตรวจพบธาตุกึ่งโลหะเพียง 2 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) และซิลิคอน (Si) โดยพบในปริมาณเฉลี่ย 0.60% และ 3.40% ตามลำดับ ส่วนธาตุอโลหะก็ตรวจพบเพียง 2 ชนิด เช่นเดียวกัน ได้แก่ กำมะถัน (S) และซีลีเนียม (Se) โดยพบในปริมาณเฉลี่ย 0.80% และ 2.03% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.13

จะเห็นได้ว่าแร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งประกอบด้วยธาตุแคลเซียม (Ca) คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่พบปริมาณธาตุแคลเซียมสูงที่สุด ส่วนธาตุคาร์บอนและออกซิเจนถือเป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบา (เลขอะตอม 4 และ 6 ตามลำดับ) จึงไม่สามารถตรวจวัดด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ได้



ภาพที่ 4.13 ธาตุองค์ประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง

4.2.1.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

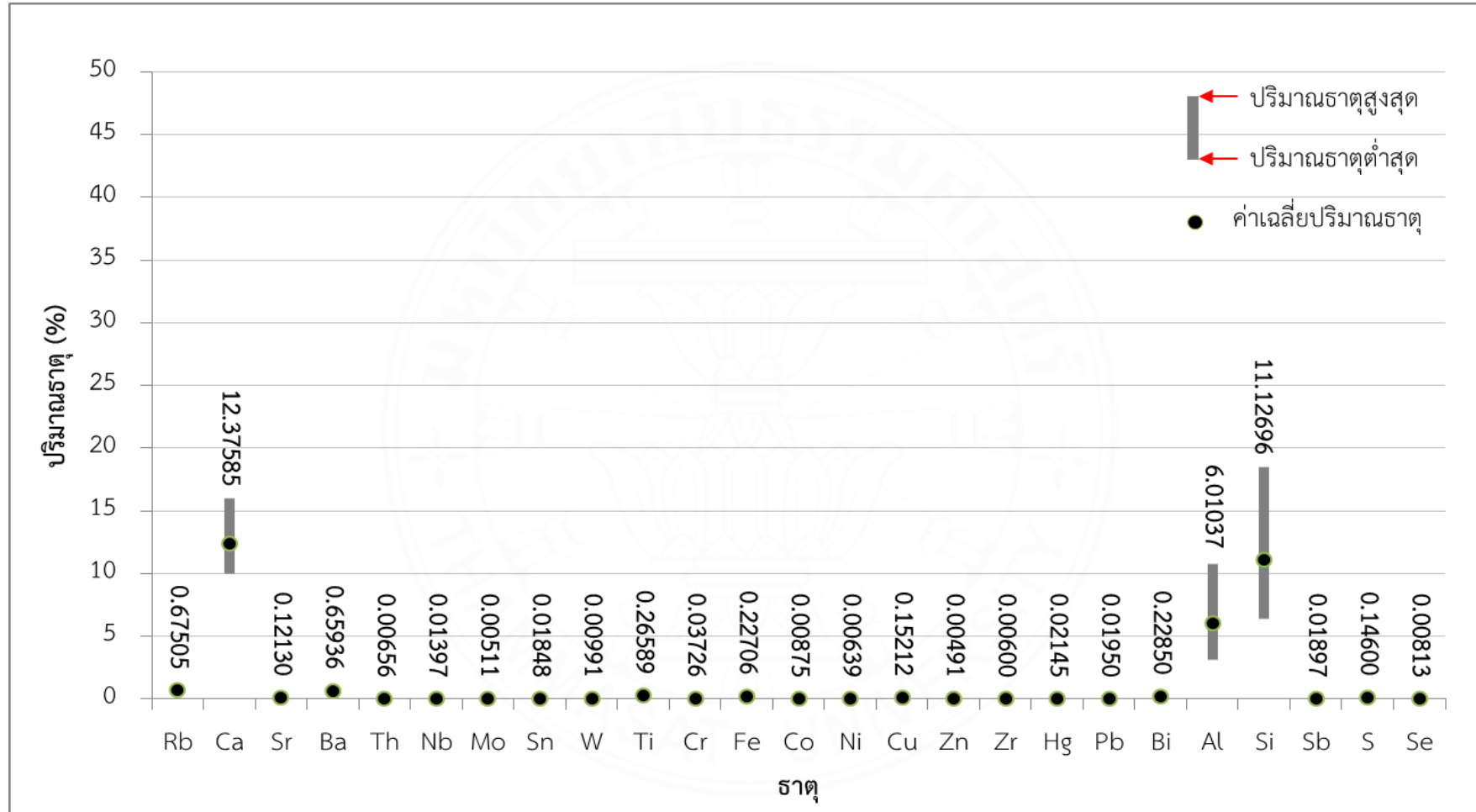
จากการทดสอบพบว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง ประกอบด้วยธาตุที่มีน้ำหนักเบาที่เครื่องมือไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในปริมาณ 52.19 - 78.27% ส่วนธาตุหลักที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้มีจำนวนทั้งสิ้น 3 ธาตุ คือ ธาตุแคลเซียม (Ca) มีปริมาณ 10.02 - 15.98% ธาตุซิลิกอน (Si) มีปริมาณ 6.40 - 18.49% และธาตุอลูมิเนียม (Al) มีปริมาณ 3.09 - 10.73% ส่วนธาตุตัวอื่น ๆ พบในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 1%) ดังแสดงในภาพที่ 4.14

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบหลักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะประกอบด้วยเส้นใยแก้วฉนวนที่เชื่อมประสานกันด้วยอีพอกซี โดยเส้นใยแก้วฉนวนจะประกอบด้วยโมเลกุลของสารประกอบ SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO มากกว่าร้อยละ 90 ส่วนอีพอกซีจะประกอบด้วยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักเบาจึงไม่สามารถตรวจวัดด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ได้ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ธาตุหลักที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้จำนวน 3 ธาตุ เป็นธาตุองค์ประกอบบางส่วนของเส้นใยแก้วฉนวนในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

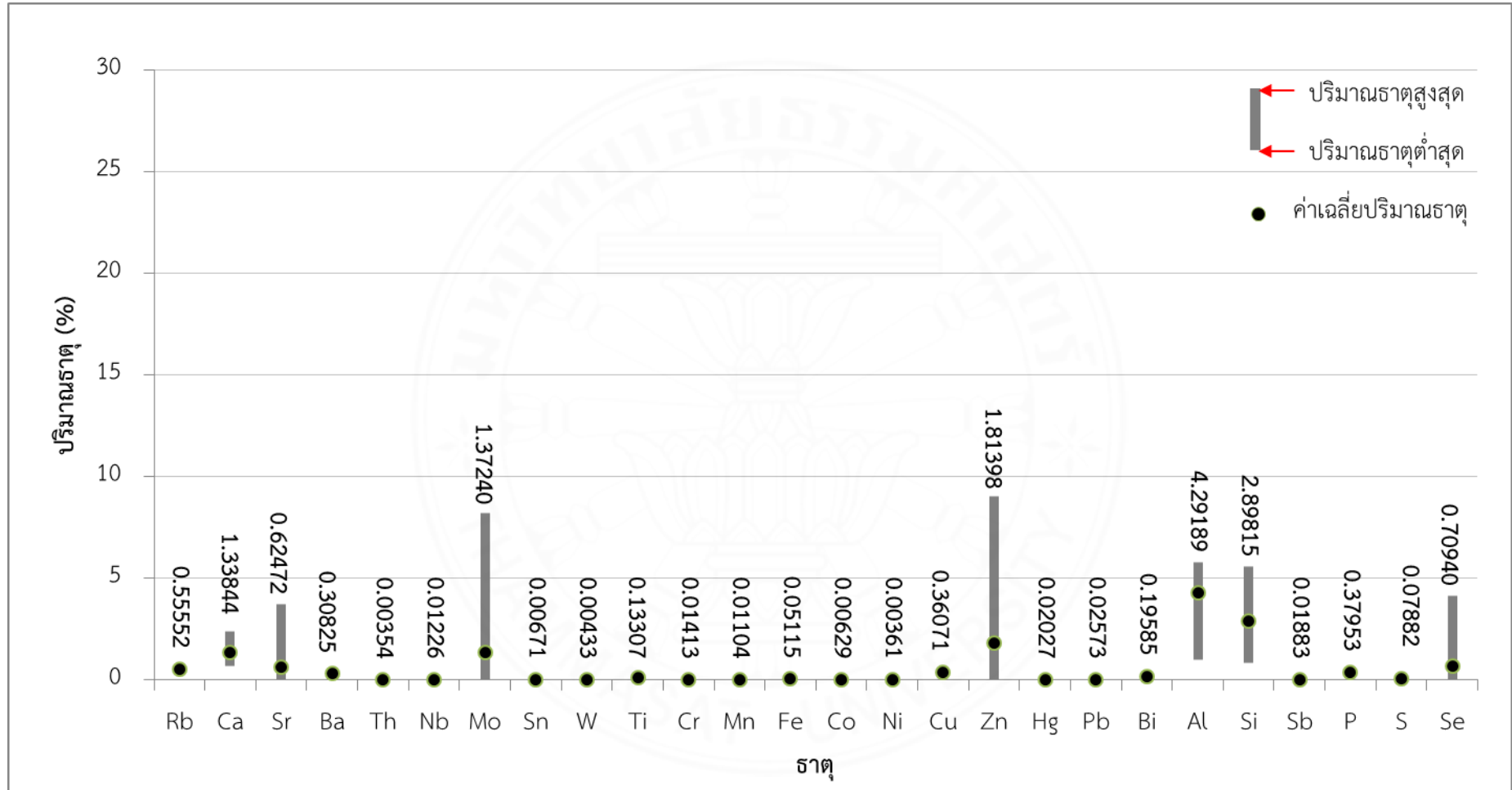
4.2.1.3 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

จากการทดสอบพบว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ประกอบด้วยธาตุที่มีน้ำหนักเบาที่เครื่องมือไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในปริมาณ 84.05 - 95.83% ส่วนธาตุหลักที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้มีจำนวนทั้งสิ้น 3 ธาตุ คือ ธาตุแคลเซียม (Ca) มีปริมาณ 0.68 - 2.41% ธาตุซิลิกอน (Si) มีปริมาณ 0.83 - 5.57% และธาตุอลูมิเนียม (Al) มีปริมาณ 1.02 - 5.81% ตรวจพบโลหะกลุ่มอัลคาไลน์เอิร์ท จำนวน 1 ธาตุ คือ สตรอนเชียม (Sr) มีปริมาณ 0.01 - 3.71% โลหะหนักและสารอันตรายจำนวน 2 ธาตุ คือ โมลิบดีนัม (Mo) มีปริมาณ 0.003 - 8.21% และสังกะสี (Zn) มีปริมาณ 0.002 - 9.06% ธาตุกลุ่มโลหะที่พบมาก คือ ซีลีเนียม (Se) มีปริมาณ 0.02 - 4.16% ส่วนธาตุตัวอื่น ๆ พบในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 1%) ดังแสดงในภาพที่ 4.15

นอกเหนือจากธาตุหลักที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยแก้วฉนวนในซาก 3 ธาตุ ได้แก่ ธาตุแคลเซียม (Ca) ธาตุซิลิกอน (Si) และธาตุอลูมิเนียม (Al) ยังพบสตรอนเชียมที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเช่นเดียวกับธาตุแคลเซียมแต่จะมีราคาสูงกว่า ส่วนโลหะโมลิบดีนัมและสังกะสีอาจจะเป็นโลหะตกค้างจากกระบวนการรีไซเคิลที่แยกโลหะออกจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะออกไม่หมด และธาตุโลหะซีลีเนียม (Se) เป็นธาตุหนึ่งที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 4.14 ธาตุองค์ประกอบในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง



ภาพที่ 4.15 ๓๒๗องค์ประกอบใน๓๒๗แกงวงจรีเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

4.2.1.4 ซากแผ่นวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

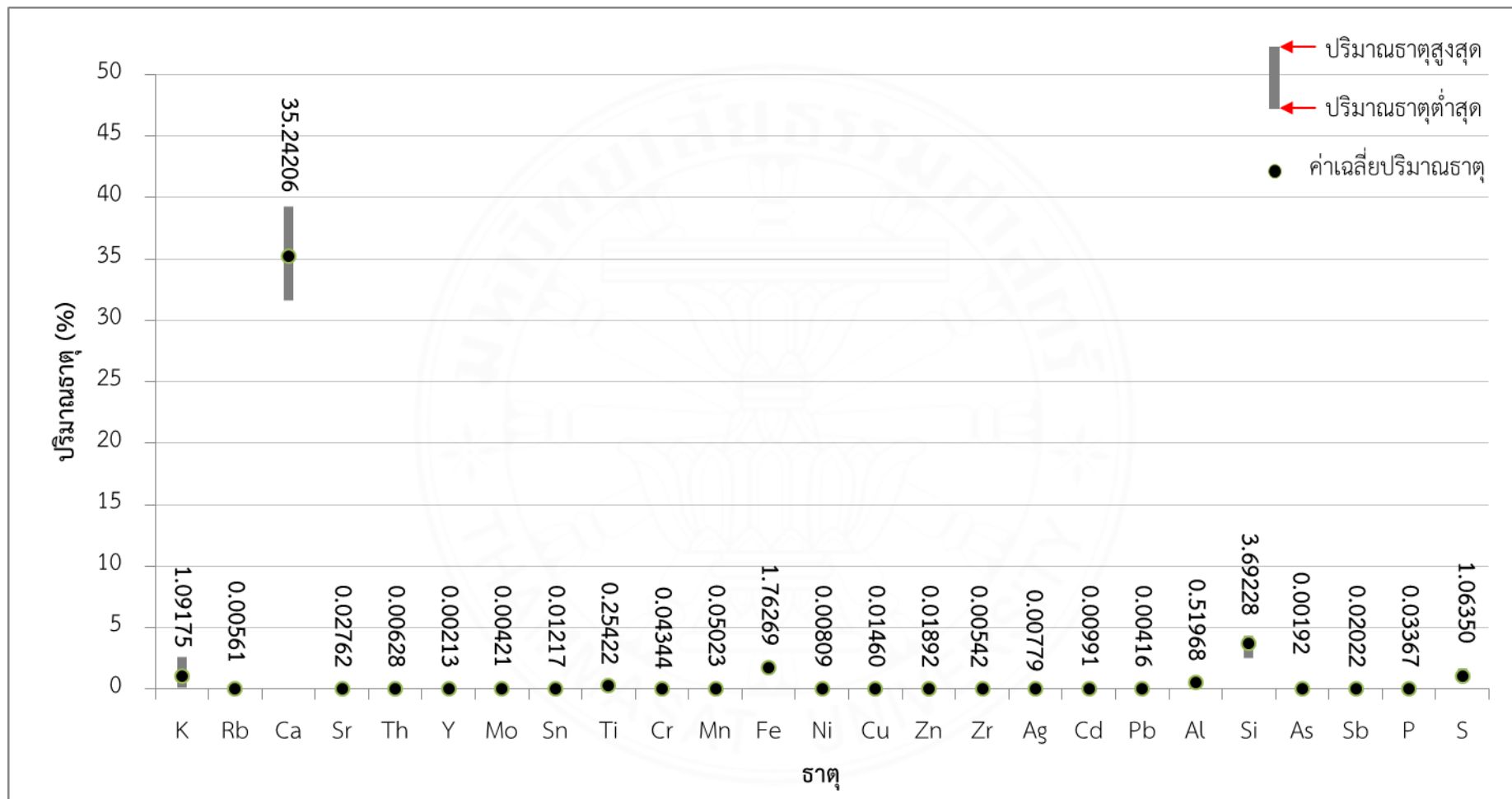
จากการทดสอบพบว่าซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใยพบธาตุองค์ประกอบคล้ายกับซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่น ซึ่งประกอบด้วยธาตุที่มีน้ำหนักเบาที่เครื่องมือไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในปริมาณ 61.31 - 65.82% ส่วนธาตุหลักที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้มีจำนวนทั้งสิ้น 3 ธาตุ คือ ธาตุแคลเซียม (Ca) มีปริมาณ 12.43 - 13.42% ธาตุซิลิกอน (Si) มีปริมาณ 12.36 - 15.37% และธาตุอลูมิเนียม (Al) มีปริมาณ 7.04 - 8.66% ส่วนธาตุตัวอื่น ๆ พบในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 1%) ดังแสดงในภาพที่ 4.16

4.2.1.5 ซีเมนต์เพสต์

จากการทดสอบพบว่าซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยธาตุที่มีน้ำหนักเบาที่เครื่องมือไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ (ธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า 12) ในปริมาณ 52.58 - 61.07% รองลงมา คือ ธาตุแคลเซียม (Ca) มีปริมาณ 31.66 - 29.25% ซิลิกอน (Si) มีปริมาณ 2.51 - 4.31% กำมะถัน (S) มีปริมาณ 0.77 - 1.70% เหล็ก (Fe) มีปริมาณ 1.51 - 2.01% และโพแทสเซียม (K) มีปริมาณ 0.14 - 2.57% ส่วนธาตุตัวอื่น ๆ พบในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 1%) ดังแสดงในภาพที่ 4.17

จะเห็นได้ว่าธาตุที่พบเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของโมเลกุลที่พบในการผลิตปูนซีเมนต์ทั้งสิ้น โดยธาตุแคลเซียมจะพบในโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์ ทำนองเดียวกันกับธาตุซิลิกอนและโพแทสเซียมจะพบในโมเลกุลของแร่ดินเหนียวที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์เช่นกัน ส่วนธาตุเหล็กจะพบในโมเลกุลของเหล็กออกไซด์ที่ส่วนมากใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการผลิตปูนซีเมนต์ และธาตุกำมะถันที่มาจากโมเลกุลของสารซัลเฟตในองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งแตกตัวออกมาอยู่ในสถานะของแข็งเนื่องจากกระบวนการทางความร้อน

จากผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของวัสดุต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ ประกอบด้วยธาตุแคลเซียมคิดเป็นปริมาณสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบธาตุโลหะและธาตุกำมะถันเล็กน้อย เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ทบทวนไว้ในบทที่ 2 นอกจากนี้ยังทราบธาตุองค์ประกอบของซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยธาตุแคลเซียม ซิลิกอน และอลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียดหรือทรายจากธรรมชาติที่ประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 4.17 ธาตุองค์ประกอบในซีเมนต์เพสต์

4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer หรือ XRD)

การวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะได้ข้อมูลระหว่างมุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (2 - Theta) และค่าความเข้มของการแผ่รังสีเอกซ์ (Intensity) ดังแสดงในภาคผนวก จ หลังจากนั้นนำข้อมูลมุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (2 - Theta) ไปเทียบหาระยะห่างระหว่างระนาบโมเลกุล (d - spacing) และนำข้อมูลความเข้มของการแผ่รังสีเอกซ์ที่ได้ไปแปลผลหาชนิดของแร่หรือสารประกอบต่อไป

4.2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	11.653°	7.58799 Å	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	1.37
2	12.124°	7.29392 Å	Chrysotile	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	0.99
3	14.925°	5.93085 Å	Lepidocrocite	Gamma - FeO(OH)	0.83
4	20.745°	4.27834 Å	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	0.47
5	22.976°	3.86773 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	0.87
6	29.452°	3.03030 Å	Calcite	CaCO ₃ (Trigonal)	9.50
7	30.108°	2.96578 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	2.28
8	31.075°	2.87563 Å	Vermiculite	(Mg,Fe ²⁺ ,Fe ³⁺) ₃ [(Al,Si) ₄ O ₁₀] (OH) ₂ .4H ₂ O	1.05
9	32.236°	2.77466 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	17.53
10	32.624°	2.74255 Å	Magnesite	MgCO ₃	14.39
11	33.246°	2.69267 Å	Hematite	Fe ₂ O ₃	4.47
12	33.898°	2.64239 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	2.43
13	34.384°	2.60609 Å	Spessartine	Mn ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	11.02
14	36.725°	2.44515 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	1.71

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
15	38.808°	2.31859 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	2.92
16	41.316°	2.18345 Å	Anhydrite	CaSO ₄	7.31
17	44.157°	2.04935 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	1.69
18	46.990°	1.93217 Å	Cristobalite	SiO ₂	2.50
19	51.805°	1.76334 Å	Muscovite	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀ (F,OH) ₂)	4.83
20	56.553°	1.62605 Å	Calcite	CaCO ₃	3.20
21	60.013°	1.54031 Å	Biotite	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (F,OH) ₂	1.99
22	62.432°	1.48630 Å	Calcite	CaCO ₃	4.68
23	63.738°	1.45897 Å	Quartz	SiO ₂	1.14
24	67.429°	1.38778 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	0.39
25	80.197°	1.19592 Å	Pyrite	FeS ₂	0.43

จากตารางที่ 4.8 จะพบว่าแร่องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง ประกอบด้วยแร่หลัก 5 กลุ่ม ดังนี้

(1) แร่ในกลุ่มดินเหนียว ได้แก่ แร่ดินขาว (Kaolinite) มีปริมาณมากที่สุด ในองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ 17.53% แร่เฟลด์สปาทหรือแร่ฟันม้า (Plagioclase) ปริมาณ 11.90% และแร่เวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) ปริมาณ 1.05%

(2) แร่ในกลุ่มคาร์บอเนต ได้แก่ แร่แคลไซต์ (Calcite) ปริมาณ 17.38% และแร่แมกนีไซต์ (Magnesite) ปริมาณ 14.39%

(3) แร่ในกลุ่มซัลเฟต ได้แก่ แร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) ปริมาณ 7.31% และแร่ยิปซัม (Gypsum) ปริมาณ 1.85%

(4) แร่ในกลุ่มออกไซด์ ได้แก่ แร่สเปสซาทิน (Spessartine) ปริมาณ 11.02% แร่ไมกา (Mica) ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นมัสโคไวท์ (Muscovite) 4.83% ส่วนที่เป็นไบโอไทต์ (Biotite) 1.99% แร่ควอตซ์ (Quartz) ปริมาณ 3.64% แร่ฟิลลิปไซต์ (Phillipsite) ปริมาณ 0.39% และแร่คริโซไทล์ (Chrysotile) ปริมาณ 0.99%

(5) แร่ที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก ประกอบด้วย แร่ฮีมาไทท์ (Hematite) มีปริมาณ 4.47% แร่เลพิโดโครไซต์ (Lepidocrocite) มีปริมาณ 0.83% และแร่ไพไรต์ (Pyrite) มีปริมาณ 0.43%

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่ากลุ่มแร่ดินเหนียวและกลุ่มแร่คาร์บอเนตเป็นแร่ที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งในการวิเคราะห์มีปริมาณสูงถึง 61.20% ส่วนที่เหลือจะเป็นแร่ออกไซด์ แร่ยิปซัม และแร่เหล็กที่ใช้ปรับปรุงสมบัติของปูนซีเมนต์ให้เป็นไปตามที่ต้องการ ทั้งนี้สามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffractogram) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง ดังภาพที่ 4.18

4.2.2.2 ซากผงวงจรรีเอ็กต์รอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากผงวงจรรีเอ็กต์รอนิกส์ชนิดฝุ่นผง แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากผงวงจรรีเอ็กต์รอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	18.314°	4.84034 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	20.56
2	20.329°	4.36485 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	12.14
3	22.850°	3.90014 Å	Sulphur	S	3.71
4	25.901°	3.43711 Å	Analcite	NaAlSi ₂ O ₆ ·H ₂ O	2.20
5	26.662°	3.34078 Å	Quartz	SiO ₂	8.66
6	28.755°	3.10213 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	3.97
7	29.377°	3.03790 Å	Calcite	CaCO ₃	17.23
8	36.580°	2.46162 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	20.76
9	37.719°	2.38298 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	4.21
10	40.631°	2.22206 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	4.80
11	42.556°	2.12265 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	1.75

จากตารางที่ 4.9 จะพบแร่ที่เป็นวัสดุตั้งต้นในการใช้ผลิตเส้นใยแก้ว คือ แร่กิบบไซต์ (Gibbsite) หรืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แร่แคลไซต์ (Calcite) แร่ดินขาว (Kaolinite)

และแร่ควอตซ์ (Quartz) พบในปริมาณ 46.12% 17.23% 16.35% และ 8.66% ตามลำดับ ส่วนแร่กลุ่มดินเหนียวและกลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ (Al - Si - O) ที่พบได้แก่ แร่ดินเหนียว (Plagioclase) ปริมาณ 1.75% และแร่อนาลไซต์ (Analcite) ปริมาณ 2.20% จะเป็นแร่ประกอบของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการรวมตัวกันของแร่กิปไซต์และแร่ควอตซ์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีกำมะถันปะปนมาในปริมาณเล็กน้อยที่ปริมาณ 3.71% โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffraction) ของซากผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง ได้ดังภาพที่ 4.19

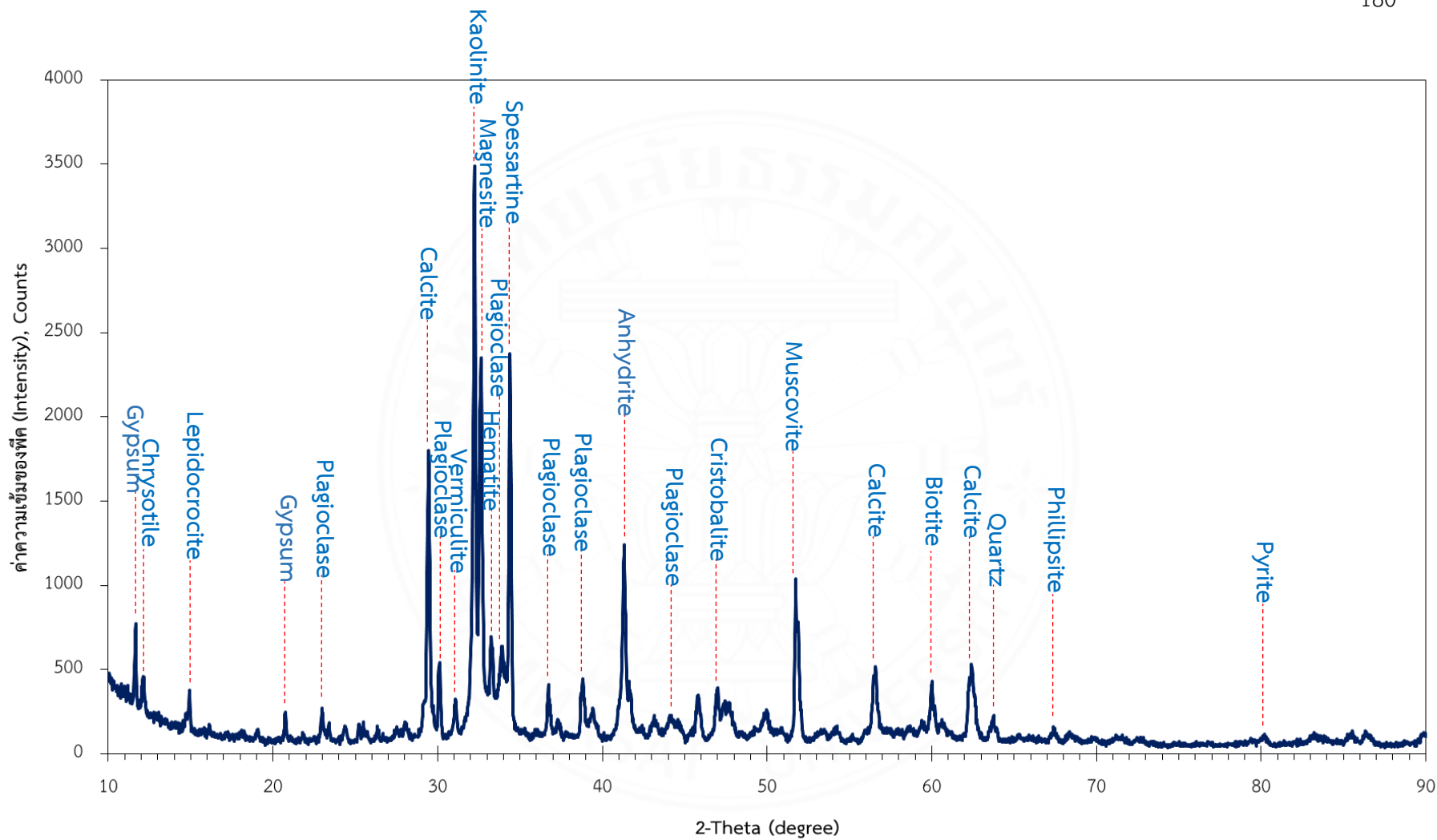
4.2.2.3 ซากผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด แสดงดังตารางที่ 4.10

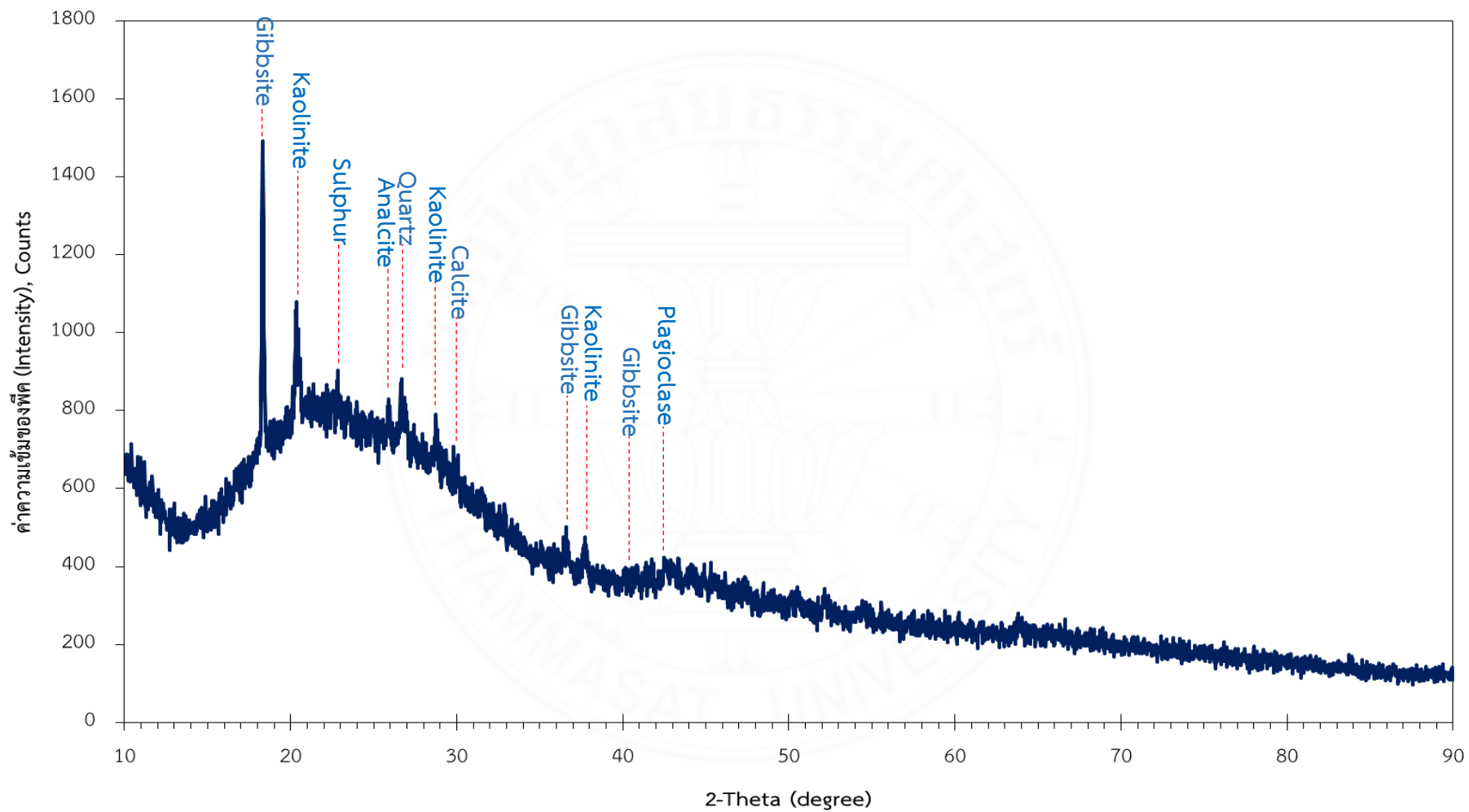
ตารางที่ 4.10 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	16.672°	5.31318 Å	Andalusite	Al ₂ Si ₂ O ₅	14.36
2	20.717°	4.28414 Å	Tridymite	SiO ₂	20.86
3	22.521°	3.94487 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	44.20
4	34.686°	2.58414 Å	Chlorite (Phyllosilicate)	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄₀ .10(OH) ₂ . (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	16.90
5	43.166°	2.09405 Å	Anhydrite	CaSO ₄	3.68

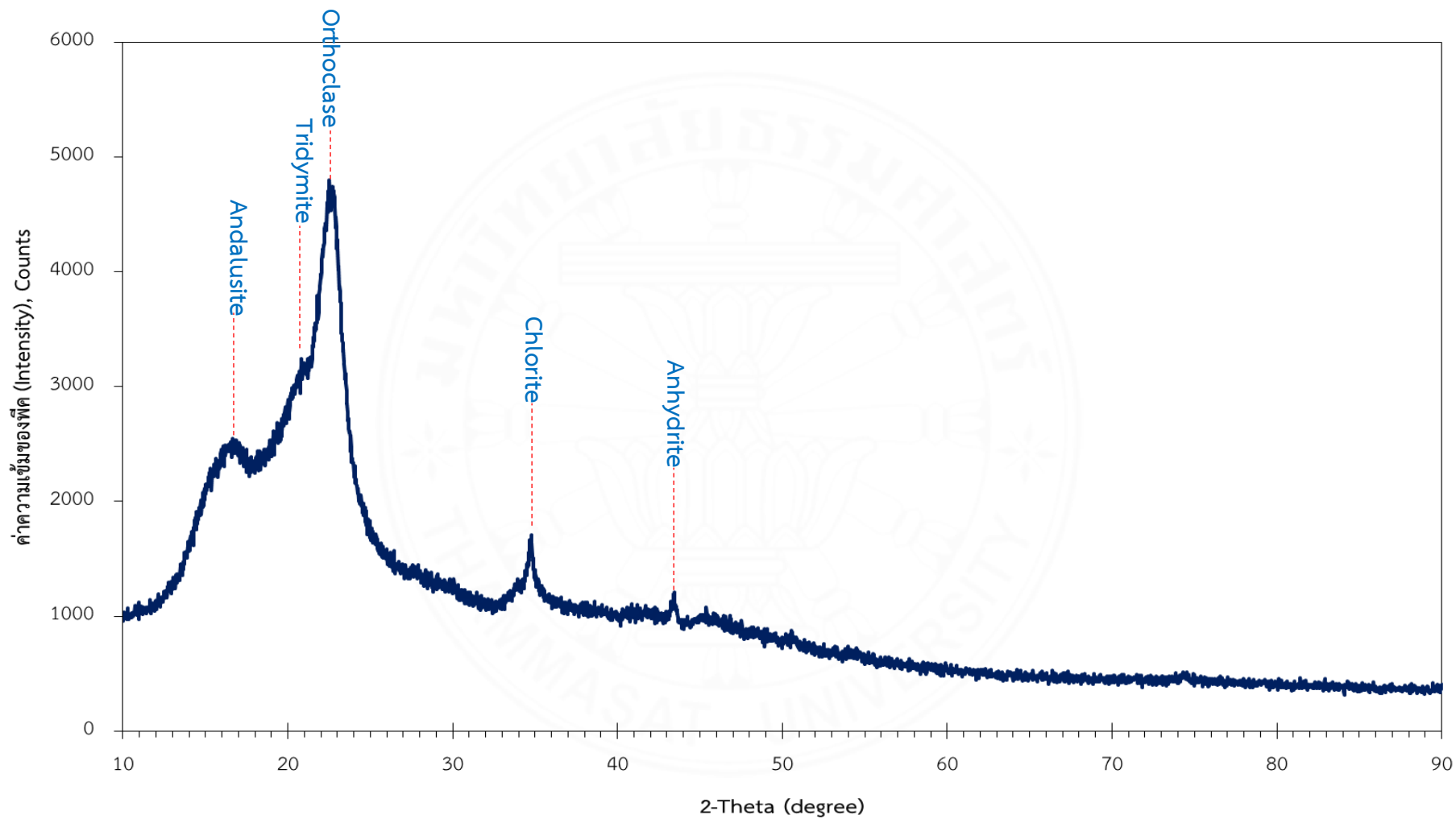
จากตารางที่ 4.10 จะพบแร่ที่เป็นวัสดุตั้งต้นในการใช้ผลิตเส้นใยแก้ว คือ แร่ไตรดิไมท์ (Tridymite) ที่เป็นรูปหนึ่งของแร่ควอตซ์ และแร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) พบในปริมาณ 20.86% และ 3.68% ตามลำดับ ส่วนแร่กลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ (Al - Si - O) ที่พบได้แก่ แร่แอนดาลไซต์ (Andalusite) ปริมาณ 14.36% แร่ดินเหนียว (Orthoclase) ปริมาณ 44.20% และแร่คลอไรต์ (Chlorite) ปริมาณ 16.90% จะเป็นแร่ประกอบของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการรวมตัวกันของแร่กลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ ทั้งนี้ สามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffraction) ของซากผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ได้ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.18 ดิฟแฟรคโทแกรมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง



ภาพที่ 4.19 ดิฟแฟรคโทแกรมของซากแพลงจอร์อเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง



ภาพที่ 4.20 ดิฟแฟรคโทแกรมของซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

4.2.2.4 ซากผงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

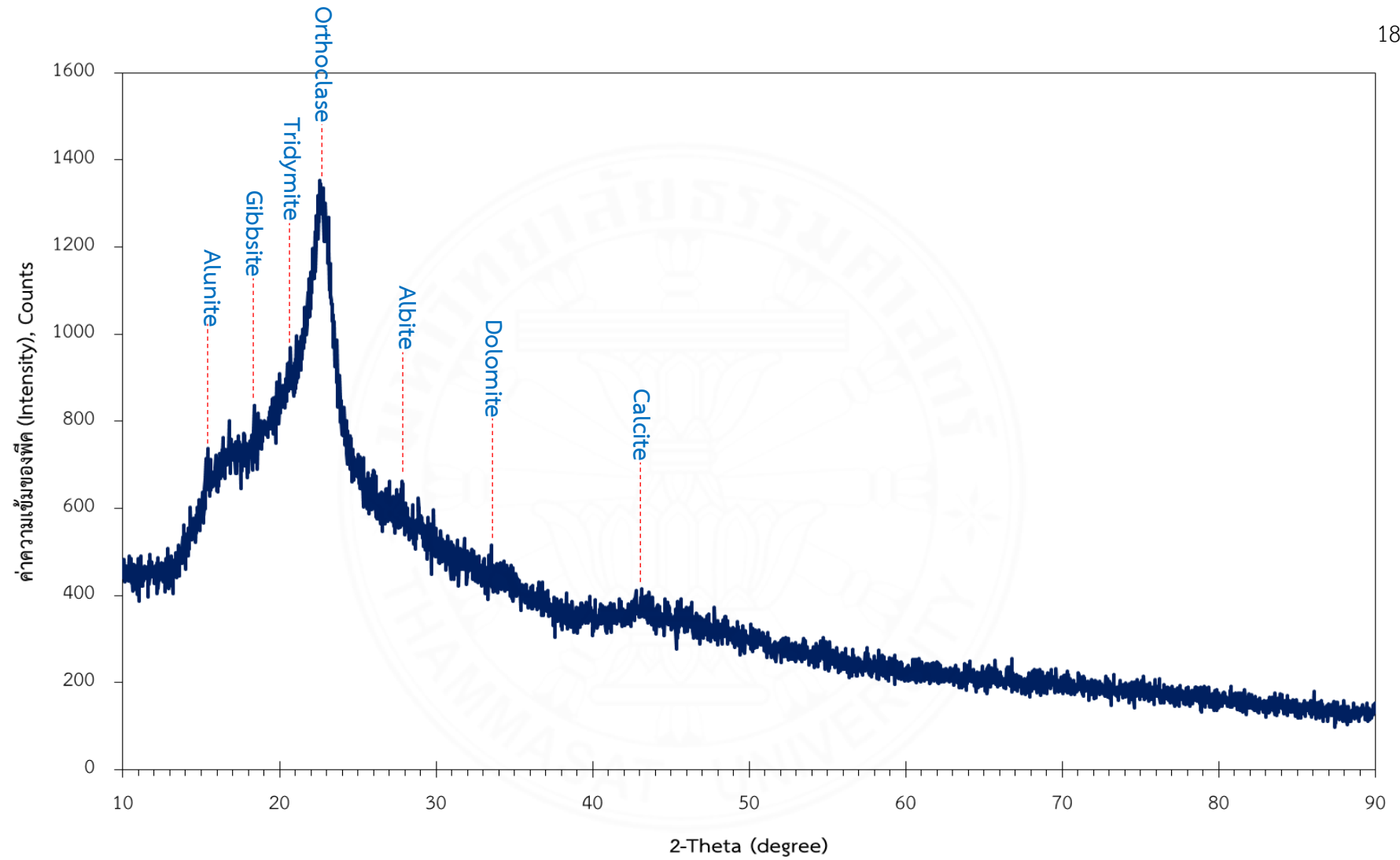
ข้อมูลความเข้มฟิคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากผงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซากผงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	15.498°	5.71279 Å	Alunite	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	6.24
2	18.389°	4.82164 Å	Gibbsite	$Al(OH)_3$	16.18
3	20.702°	4.29088 Å	Tridymite	SiO_2	24.08
4	22.665°	3.92005 Å	Orthoclase	$KAlSi_3O_8$	14.33
5	27.863°	3.19776 Å	Albite	$NaAlSi_3O_8$	18.12
6	33.511°	2.67494 Å	Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	14.22
7	42.779°	2.11273 Å	Calcite	$CaCO_3$	6.83

จากตารางที่ 4.11 จะพบแร่ที่เป็นวัสดุตั้งต้นในการใช้ผลิตเส้นใยแก้ว คือ แร่ไตรดิมท์ (Tridymite) ที่เป็นรูปหนึ่งของแร่ควอตซ์ แร่กิบไซต์ (Gibbsite) แร่โดโลไมต์ (Dolomite) และแร่แคลไซต์ (Calcite) พบในปริมาณ 24.08% 16.18% 14.22% และ 6.83% ตามลำดับ ส่วนแร่กลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ (Al - Si - O) ที่พบได้แก่ แร่อลูไนท์ (Alunite) ปริมาณ 6.24% แร่ดินเหนียว (Orthoclase) ปริมาณ 14.33% และแร่อัลไบท์ (Albite) ปริมาณ 18.12% จะเป็นแร่องค์ประกอบของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการรวมตัวกันของแร่กลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffraction) ของซากผงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย ได้ดังภาพที่ 4.21

สังเกตได้ว่าค่าความเข้มข้นของฟิคที่ปรากฏในตัวอย่างซากผงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดและซากผงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใยมีค่อนข้างน้อย อาจเนื่องมาจากตัวอย่างที่ใช้ทดสอบที่มีลักษณะเป็นเม็ดและเป็นเส้นใยที่อาจส่งผลให้เครื่องมือตรวจจับไม่พบโมเลกุลของแร่องค์ประกอบ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะต้องมีความละเอียดมาก (ขนาดน้อยกว่า 2 ไมครอน)



ภาพที่ 4.21 ดิฟแฟรคโทแกรมของซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

4.2.2.5 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000 แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	11.765	7.51612 Å	Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.60
2	15.871	5.57946 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	0.33
3	18.136	4.88744 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	3.20
4	20.943	4.23834 Å	Tridymite	SiO ₂	9.62
5	23.550	3.77477 Å	Niter	KNO ₃	1.18
6	26.729	3.33259 Å	Quartz	SiO ₂	39.48
7	29.491	3.02640 Å	Calcite	CaCO ₃	3.14
8	29.892	2.98673 Å	Calcite	CaCO ₃	3.63
9	34.166	2.62225 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	4.14
10	34.981	2.56300 Å	Pyrope	Mg ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	1.78
11	36.628	2.45141 Å	Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	1.87
12	39.547	2.27696 Å	Chlorite	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄₀ ·10(OH) ₂ · (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	2.46
13	42.525	2.12414 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	3.68
14	45.924	1.97451 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	0.99
15	50.213	1.81545 Å	Quartz	SiO ₂	3.44
16	50.745	1.79765 Å	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	1.52
17	54.994	1.66839 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	0.66
18	60.031	1.53987 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	5.78
19	67.867	1.37989 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ · .12H ₂ O	1.54
20	68.298	1.37223 Å	Biotite	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (F,OH) ₂	1.75

ตารางที่ 4.12 (ต่อ) การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

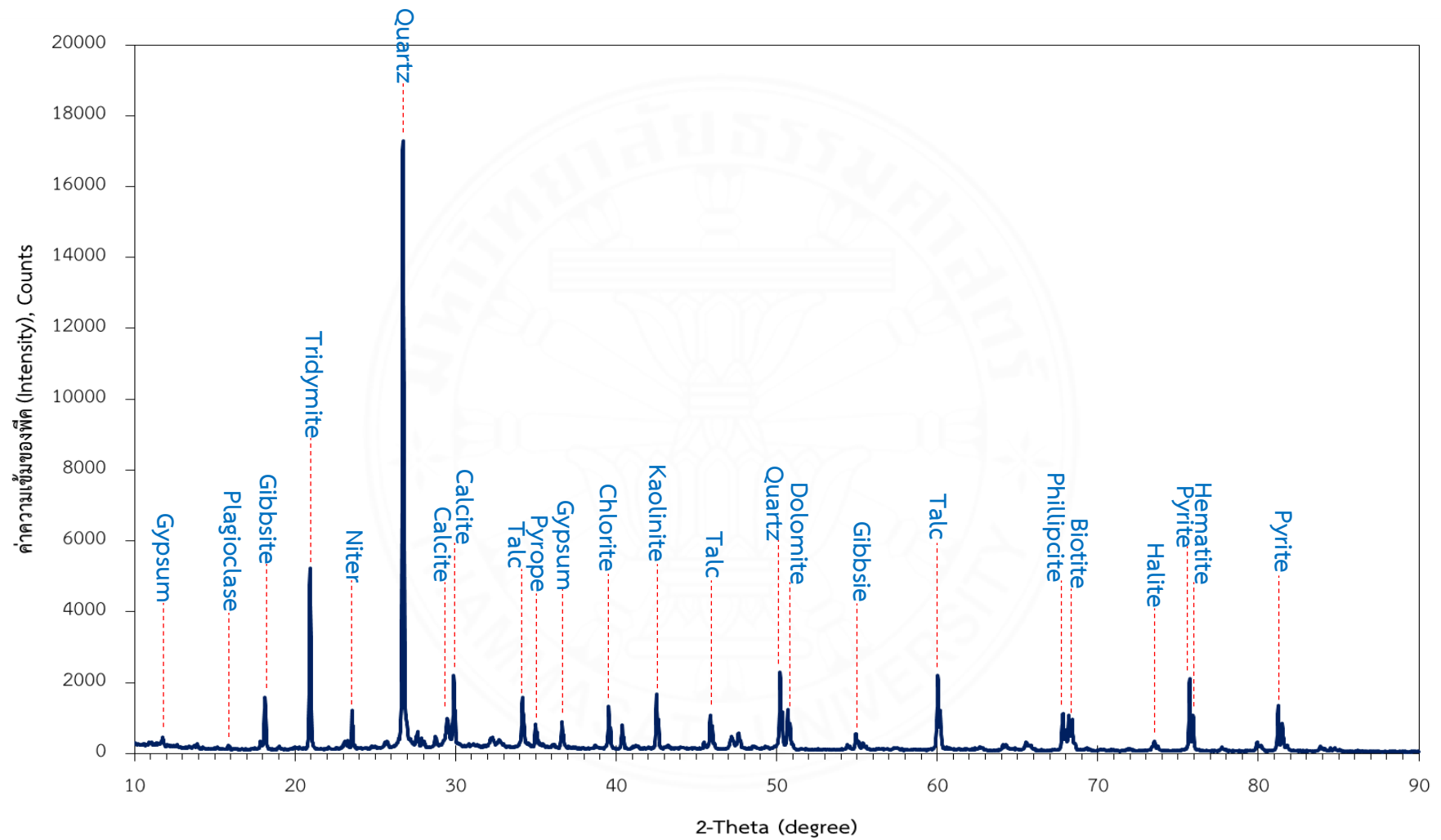
ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
21	73.530	1.28698 Å	Halite	NaCl	0.83
22	75.718	1.25514 Å	Pyrite	FeS ₂	2.92
23	75.933	1.25210 Å	Hematite	Fe ₂ O ₃	1.43
24	81.230	1.18330 Å	Pyrite	FeS ₂	4.05

จากตารางที่ 4.12 เป็นข้อมูลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในตัวอย่าง มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000 ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุมที่ยังไม่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะพบว่าแร่ประกอบในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000 ที่มีปริมาณมากที่สุดคือ กลุ่มแร่ควอตซ์ (Quartz และ Tridymite) มีปริมาณสูงถึง 52.54% ซึ่งแร่จำพวกนี้จะพบได้ในมวลรวมละเอียดที่มีปริมาณมากกว่าครึ่งหนึ่งขององค์ประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับ

ส่วนแร่ที่พบในปริมาณรองลงมาคือแร่กลุ่มที่พบในดินเหนียว (Talc, Gibbsite, Kaolinite และ Plagioclase) แร่ในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcite และ Dolomite) พบในปริมาณ 18.78% และ 8.29% ตามลำดับ ส่วนแร่ที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Pyrite และ Hematite) มีปริมาณ 8.40% แร่กลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ (Biotite, Pyrope, Chlorite) มีปริมาณ 5.99% จะเห็นได้ว่าแร่กลุ่มนี้เป็นแร่ประกอบในวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์โดยรวมแล้วมีปริมาณ 41.46%

นอกจากนี้ยังพบแร่อีกสองกลุ่ม คือ แร่กลุ่มไฮเดรต (Phillipsite และ Gypsum) มีปริมาณ 4.01% และกลุ่มแร่ที่มีสมบัติเป็นเกลือ (Halite และ Niter) ในปริมาณ 2.01% ซึ่งแร่กลุ่มนี้ถูกเติมเข้าในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เพื่อปรับปรุงสมบัติของปูนซีเมนต์ให้เป็นไปตามคุณลักษณะที่ผู้ผลิตต้องการ

ทั้งนี้สามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffractogram) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000 ได้ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

4.2.2.6 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	18.184	4.90092 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	3.65
2	20.945	4.23786 Å	Tridymite	SiO ₂	12.11
3	26.724	3.33321 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	42.17
4	27.572	3.23250 Å	Microcline	KAlSi ₃ O ₈	8.44
5	28.374	3.14301 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2.38
6	29.488	3.02671 Å	Calcite	CaCO ₃	3.02
7	34.165	2.62228 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	3.98
8	36.630	2.45128 Å	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	2.58
9	39.544	2.27771 Å	Chlorite	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄₀ .10(OH) ₂ . (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	2.07
10	40.372	2.23228 Å	Analcite	NaAlSi ₂ O ₆ .2H ₂ O	1.40
11	42.526	2.12407 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	1.51
12	50.204	1.81577 Å	Bayerite	Al(OH) ₃	3.25
13	54.998	1.66829 Å	Cristobalite	SiO ₂	0.94
14	59.976	1.54116 Å	Vermiculite	(Mg,Fe,Al) ₃ (Al,Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ . 4H ₂ O	5.47
15	68.394	1.37054 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ . .12H ₂ O	4.15
16	73.532	1.28695 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ . .12H ₂ O	0.75
17	75.730	1.25497 Å	Halite	NaCl	2.12

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 จะเริ่มใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณ 2.5% ซึ่งจากตารางที่ 4.13 จะพบว่าแร่องค์ประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีปริมาณมากที่สุด คือ กลุ่มแร่ที่พบในดินเหนียว (Gibbsite, Talc, Orthoclase, Microcline, Kaolinite และ Plagioclase) มีปริมาณสูงถึง 62.13% แร่ในกลุ่มควอตซ์ (Cristobalite และ Tridymite) มีปริมาณ 13.05% แร่แคลไซต์ (Calcite) มีปริมาณ 3.02% แร่ยิปซัม (Gypsum) มีปริมาณ 2.58% ซึ่งแร่ที่กล่าวมานี้เป็นวัสดุตั้งต้นที่ใช้ทั้งในการผลิตปูนซีเมนต์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์จะเป็นแร่ในกลุ่มแคลไซต์และดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่ จะมีกลุ่มแร่ควอตซ์และยิปซัมในปริมาณเล็กน้อย ส่วนวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นแร่ควอตซ์และดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่ จะมีแคลไซต์และยิปซัมในปริมาณเล็กน้อย

ส่วนแร่อื่นที่พบเป็นแร่กลุ่มไฮเดรตและไฮดรอกไซด์ (Chlorite, Analcite, Bayerite, Vermiculite และ Phillipsite) มีปริมาณ 17.09% นอกจากนี้ยังพบเกลือ (Halite) ในปริมาณ 2.12% โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffractogram) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 ได้ดังภาพที่ 4.23

4.2.2.7 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050 แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

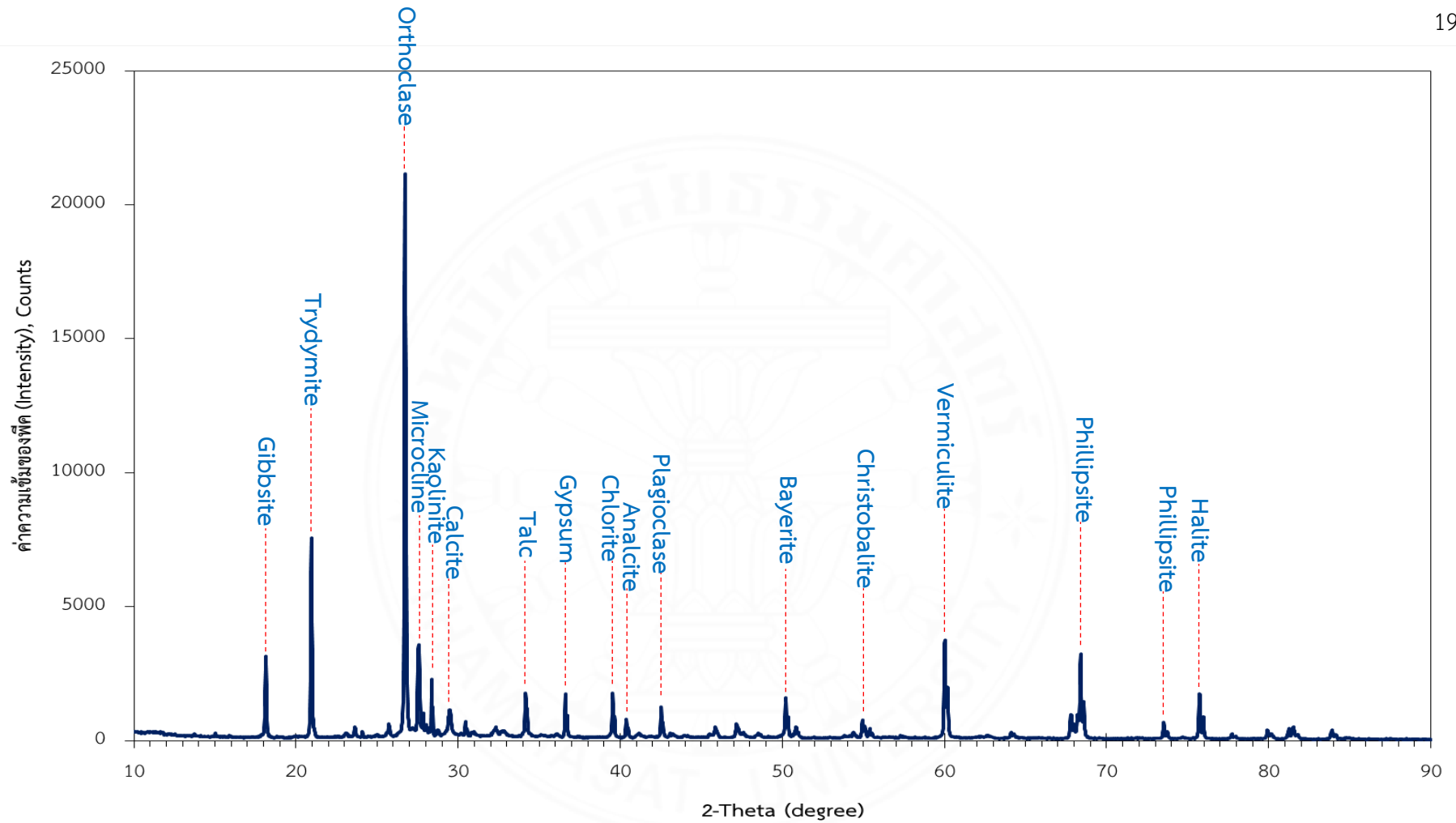
ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	18.149	4.88405 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	2.98
2	20.962	4.23459 Å	Goethite	FeO(OH)	8.43
3	23.283	3.81731 Å	Sulphur	S	1.98
4	26.759	3.32885 Å	Quartz	SiO ₂	42.62
5	29.511	3.02437 Å	Calcite	CaCO ₃	3.03
6	34.195	2.62009 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	3.35
7	36.642	2.45051 Å	Goethite	FeO(OH)	3.57

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

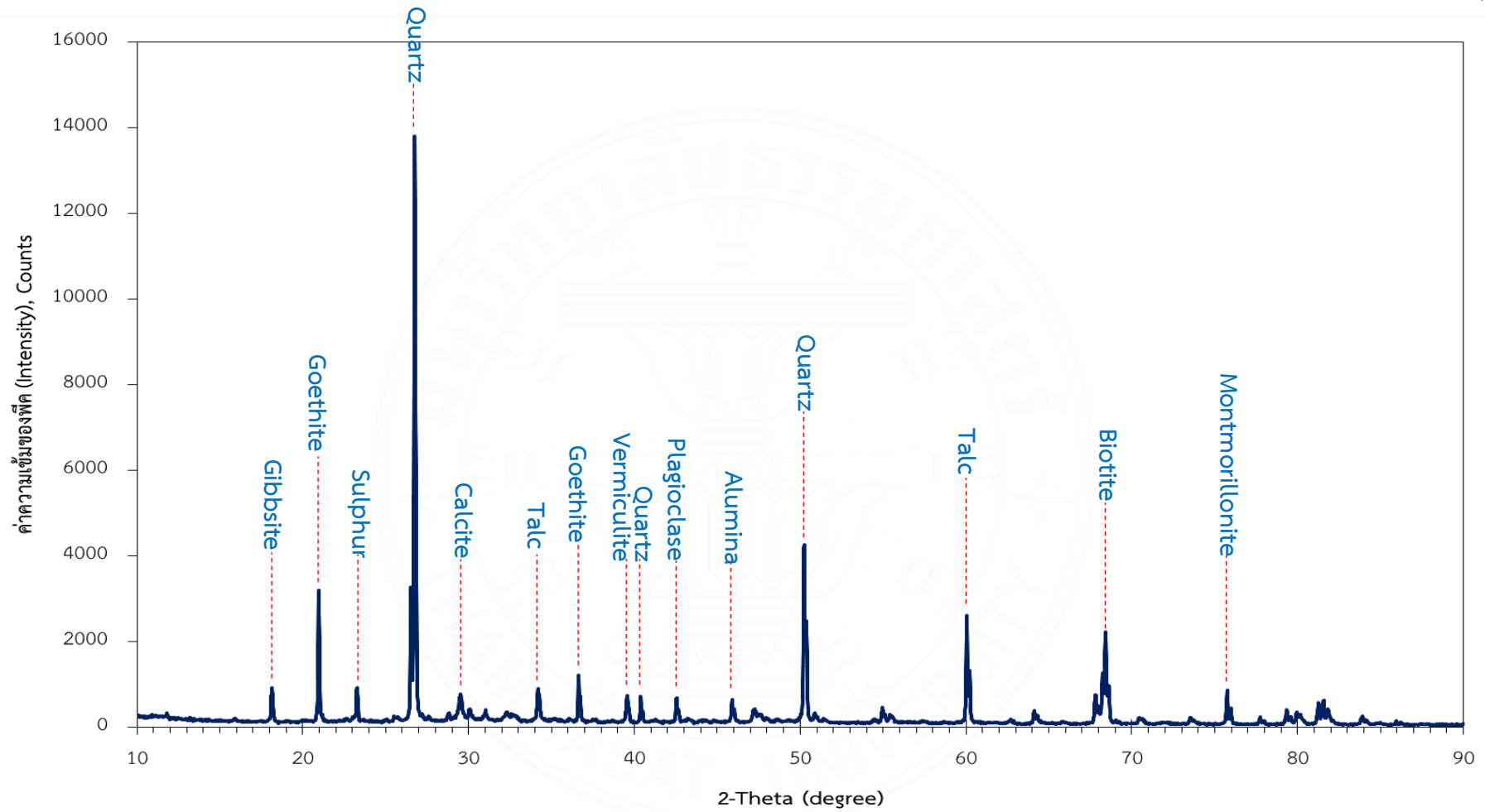
ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
8	39.573	2.27552 Å	Vermiculite	$(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2.43
9	40.386	2.23157 Å	Quartz	SiO_2	1.18
10	42.549	2.12297 Å	Plagioclase	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	2.53
11	45.900	1.97551 Å	Alumina	Al_2O_3	1.92
12	50.286	1.81300 Å	Quartz	SiO_2	10.17
13	60.051	1.53940 Å	Talc	$\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	5.21
14	68.415	1.37017 Å	Biotite	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$	9.09
15	75.750	1.25469 Å	Montmorillonite	$(\text{Al,Mg})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1.52

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050 จะใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณ 5.0% ซึ่งจากตารางที่ 4.14 จะพบว่าแร่องค์ประกอบในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีปริมาณมากที่สุด คือ กลุ่มแร่ควอตซ์ (Quartz) ที่มีปริมาณสูงถึง 53.97% กลุ่มแร่ที่พบในดินเหนียว (Talc, Montmorillonite และ Plagioclase) มีปริมาณ 12.61% แร่แคลไซต์ (Calcite) มีปริมาณ 3.03% แร่อลูมินา (Alumina) มีปริมาณ 1.92% ซึ่งแร่ที่กล่าวมานี้เป็นวัสดุตั้งต้นที่ใช้ทั้งในการผลิตปูนซีเมนต์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนแร่อื่นที่พบเป็นแร่กลุ่มไฮเดรตและไฮดรอกไซด์ (Gibbsite, Goethite, Vermiculite และ Biotite) มีปริมาณ 26.50% ที่เป็นแร่ในส่วนผสมของทั้งปูนซีเมนต์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังพบแร่กำมะถัน (Sulphur) ปริมาณ 1.98% ที่เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลซัลเฟต (Sulphate: SO_4) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffractogram) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050 ได้ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.23 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025



ภาพที่ 4.24 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

4.2.2.8 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075 แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	15.255	5.90340 Å	Mesolite	$\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{Al}_6\text{Si}_9)\text{O}_{30} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	1.05
2	18.209	4.86801 Å	Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	1.59
3	21.051	4.21680 Å	K - Feldspar	KAlSi_3O_8	5.59
4	22.484	3.95116 Å	Diaspore	$\text{AlO}(\text{OH})$	1.90
5	25.772	3.45412 Å	Barite	BaSO_4	0.88
6	26.883	3.31379 Å	Quartz	SiO_2	32.49
7	29.600	3.01548 Å	Wollastonite	CaSiO_3	3.49
8	34.361	2.60784 Å	Spessartine	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	2.79
9	36.788	2.44111 Å	Plagioclase	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	1.91
10	39.708	2.26811 Å	Chlorite	$(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_{40} \cdot 10(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH})_6$	3.30
11	40.508	2.22512 Å	Bayerite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	1.51
12	45.986	1.97200 Å	Quartz	SiO_2	1.44
13	50.386	1.80962 Å	Quartz	SiO_2	6.25
14	55.090	1.66572 Å	Quartz	SiO_2	2.14
15	60.127	1.53765 Å	Quartz	SiO_2	3.83
16	64.280	1.44797 Å	Hematite	Fe_2O_3	1.58
17	67.913	1.37908 Å	Phillipsite	$(\text{Ca},\text{Na}_2,\text{K}_2)_3\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	6.28
18	68.296	1.37228 Å	Phillipsite	$(\text{Ca},\text{Na}_2,\text{K}_2)_3\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	7.37
19	73.583	1.28618 Å	Halite	NaCl	1.78

ตารางที่ 4.15 (ต่อ) การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
20	73.792	1.28305 Å	Talc	$Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$	0.90
21	80.091	1.19724 Å	Phillipsite	$(Ca,Na_2,K_2)_3Al_6Si_{10}O_{32}$.12H ₂ O	5.72
22	80.331	1.19427 Å	Phillipsite	$(Ca,Na_2,K_2)_3Al_6Si_{10}O_{32}$.12H ₂ O	3.36
23	81.389	1.18139 Å	Pyrite	FeS ₂	1.39
24	84.003	1.15116 Å	Pyrite	FeS ₂	1.47

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075 จะใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณ 7.5% ซึ่งจากตารางที่ 4.15 จะพบว่าแร่องค์ประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีปริมาณมากที่สุด คือ แร่ในกลุ่มควอตซ์ (Quartz) มีปริมาณ 46.15% รองลงมา คือ แร่กลุ่มออกไซด์ (Phillipsite, Spessartine, Bayerite, Diaspore, Brucite, Mesolite และ Chlorite) มีปริมาณ 34.87% กลุ่มแร่ที่พบในดินเหนียว (Talc, Wollastonite, K - Feldspar และ Plagioclase) มีปริมาณ 11.89%

ส่วนแร่อื่นที่พบเป็นแร่ที่มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบ (Hematite และ Pyrite) ปริมาณ 4.44% แร่กลุ่มซัลเฟต (Barite) ปริมาณ 0.88% นอกจากนี้ยังพบเกลือ (Halite) ในปริมาณ 1.78% จะสังเกตได้ว่าการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 7.5% ไม่พบความเข้มข้นของพีคที่บ่งบอกว่าเป็นแร่แคลไซต์ (Calcite) อันเป็นแร่องค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffractogram) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 ได้ดังภาพที่ 4.25

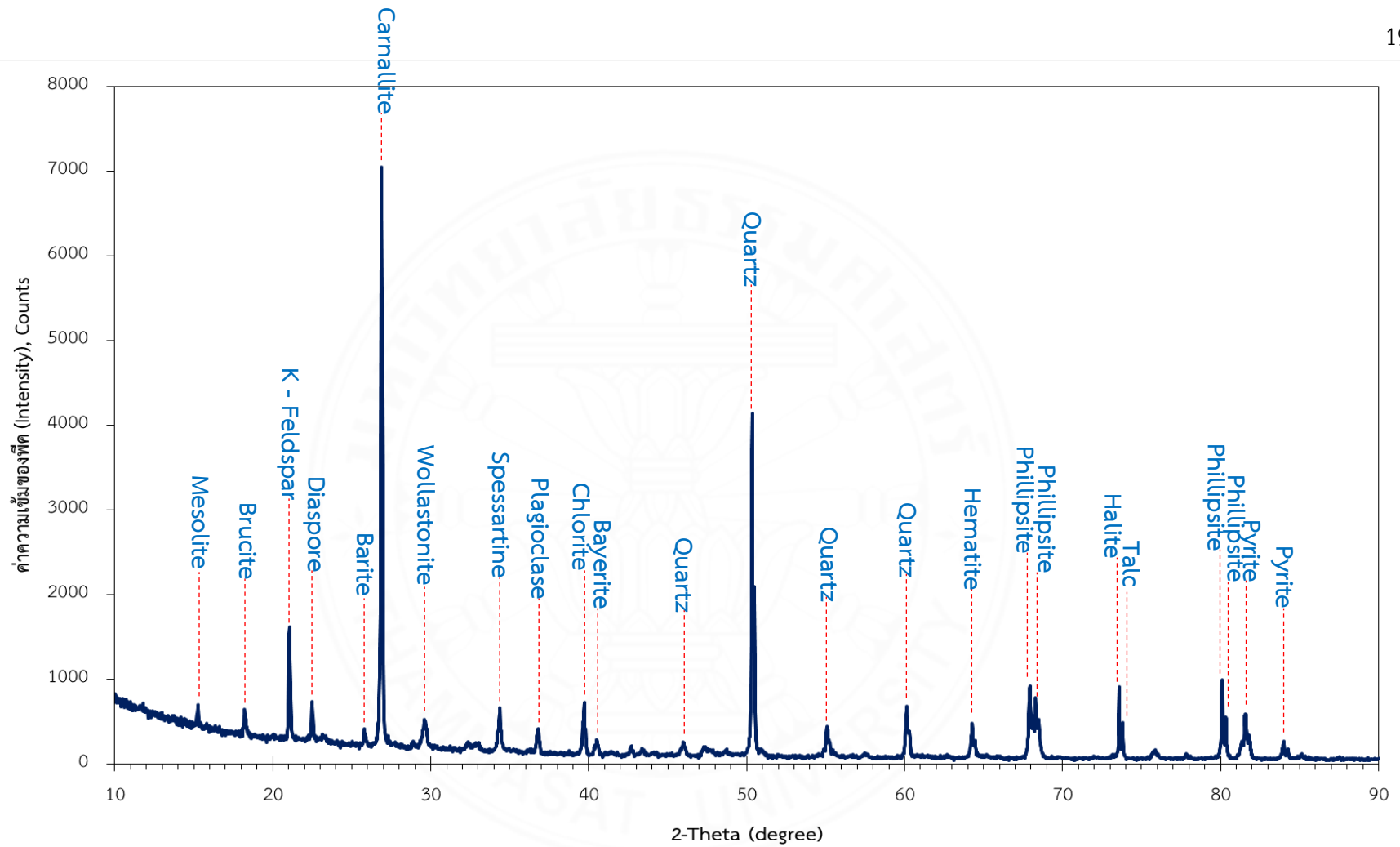
4.2.2.9 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100 แสดงดังตารางที่ 4.16

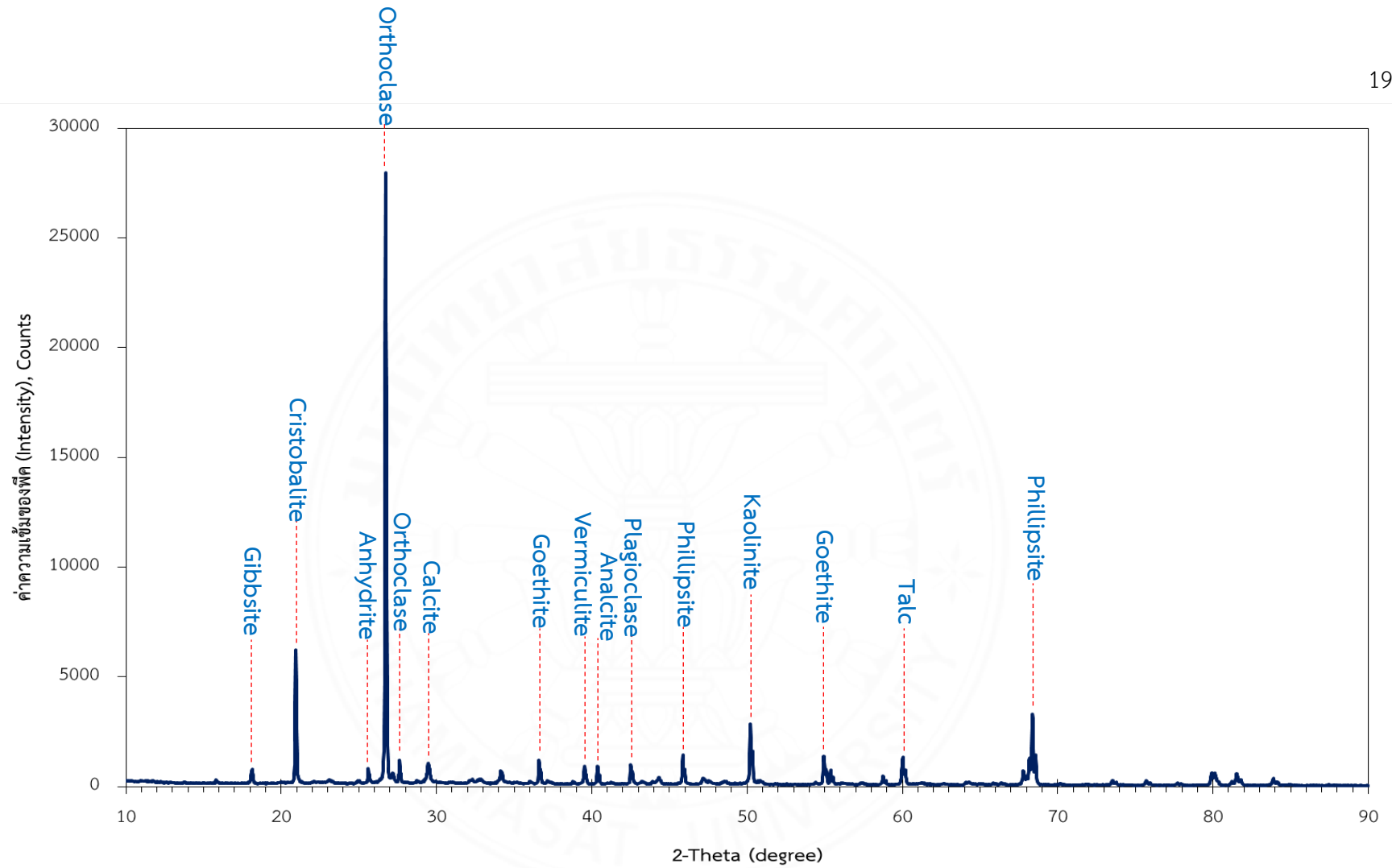
ตารางที่ 4.16 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	18.124	4.89065 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	1.69
2	20.936	4.23980 Å	Cristobalite	SiO ₂	11.48
3	25.649	3.47037 Å	Anhydrite	CaSO ₄	0.81
4	26.721	3.33356 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	55.65
5	27.639	3.22485 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	1.03
6	29.480	3.02751 Å	Calcite	CaCO ₃	2.85
7	36.610	2.45260 Å	Goethite	FeO(OH)	2.47
8	39.535	2.27763 Å	Vermiculite	(Mg,Fe,Al) ₃ (Al,Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O	1.77
9	40.385	2.23163 Å	Analcite	NaAlSi ₂ O ₆ ·H ₂ O	1.67
10	42.494	2.12560 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	2.43
11	45.860	1.97713 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	1.58
12	50.217	1.81531 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	6.99
13	54.991	1.66848 Å	Goethite	FeO(OH)	2.06
14	60.066	1.53907 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	2.33
15	68.382	1.37075 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	5.18

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100 จะใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณ 10.0% ซึ่งจากตารางที่ 4.16 จะพบว่าแร่องค์ประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีปริมาณมากที่สุด คือ กลุ่มแร่ที่พบในดินเหนียว (Orthoclase, Vermiculite, Analcite, Gibbsite, Kaolinite, Plagioclase และ Talc) มีปริมาณ 73.56% รองลงมาคือ แร่ในกลุ่มควอตซ์ (Cristobalite) มีปริมาณ 11.48% แร่กลุ่มออกไซด์ (Phillipsite) มีปริมาณ 6.76% แร่กลุ่มที่มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบ (Goethite) มีปริมาณ 4.53% นอกจากนี้ยังพบแร่แคลไซต์ (Calcite) ปริมาณ 2.85% และแอนไฮไดรต์ (Anhydrite) ปริมาณ 0.81% โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffraction) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100 ได้ดังภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.25 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075



ภาพที่ 4.26 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

4.2.2.10 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125 แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	18.167	4.87920 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	2.22
2	20.962	4.23460 Å	Cristobalite	SiO ₂	6.29
3	26.779	3.32643 Å	Calcite	CaCO ₃	45.94
4	29.521	3.02343 Å	Calcite	CaCO ₃	5.32
5	29.963	2.97977 Å	Wollastonite	CaSiO ₃	4.16
6	32.454	2.75655 Å	Cristobalite	SiO ₂	2.20
7	34.180	2.62120 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	2.19
8	36.677	2.44891 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	2.44
9	39.568	2.27582 Å	Quartz	SiO ₂	5.49
10	45.907	1.97521 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	3.25
11	50.264	1.81375 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	5.16
12	54.970	1.66906 Å	Analcite	NaAlSi ₂ O ₆ .H ₂ O	1.70
13	60.074	1.53888 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	2.02
14	61.500	1.50658 Å	Chlorite	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄₀ .10(OH) ₂ . (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	3.14
15	68.300	1.37220 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	4.35
16	75.737	1.25487 Å	Montmorillonite	(Al,Mg) ₈ (Si ₄ O ₁₀) ₃ (OH) ₁₀ .12H ₂ O	1.95
17	81.577	1.17915 Å	Pyrite	FeS ₂	2.20

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125 จะใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มีมวลรวมละเอียดในปริมาณ 12.5% ซึ่งจากตารางที่ 4.17 จะพบว่าแร่

องค์ประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีปริมาณมากที่สุด คือ แร่แคลไซต์ (Calcite) มีปริมาณ 51.26% รองลงมา คือ กลุ่มแร่ที่พบในดินเหนียว (Gibbsite, Wollastonite, Talc, Plagioclase, Kaolinite, Analcite และ Montmorillonite) มีปริมาณ 21.84% แร่ในกลุ่มควอตซ์ (Quartz และ Cristobalite) มีปริมาณ 13.98% แร่กลุ่มออกไซด์ (Phillipsite และ Chlorite) มีปริมาณ 10.74% นอกจากนี้ยังพบแร่ไพไรต์ (Pyrite) ปริมาณ 2.20% โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffraction) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125 ได้ดังภาพที่ 4.27

4.2.2.11 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150 แสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	18.253	4.85651 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	1.38
2	21.236	4.18059 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	9.78
3	26.919	3.30939 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	34.36
4	27.335	3.25998 Å	Calcite	CaCO ₃	13.65
5	29.588	3.01671 Å	Calcite	CaCO ₃	5.48
6	34.256	2.61557 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	3.40
7	36.687	2.44763 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	16.22
8	39.629	2.27242 Å	Quartz	SiO ₂	2.36
9	50.296	1.81266 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	4.79
10	55.128	1.66464 Å	Analcite	NaAlSi ₂ O ₆ .H ₂ O	1.60
11	60.146	1.53720 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	1.67
12	64.191	1.44975 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	1.41
13	68.400	1.37044 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	2.62
14	75.803	1.25394 Å	Hematite	Fe ₂ O ₃	1.28

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150 จะใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณ 15.0% ซึ่งจากตารางที่ 4.18 จะพบว่าแร่องค์ประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีปริมาณมากที่สุด คือ กลุ่มแร่ที่พบในดินเหนียว (Gibbsite, Kaolinite, Orthoclase, Talc, Plagioclase และ Analcite) มีปริมาณ 74.61% รองลงมา คือ แร่แคลไซต์ (Calcite) มีปริมาณ 19.13% แร่ในกลุ่มควอตซ์ (Quartz) มีปริมาณ 2.36% แร่กลุ่มออกไซด์ (Phillipsite) มีปริมาณ 2.62% นอกจากนี้ยังพบแร่ฮีมาไทท์ (Hematite) ในปริมาณ 1.28% โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffractogram) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150 ได้ดังภาพที่ 4.28

4.2.2.12 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175 แสดงดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

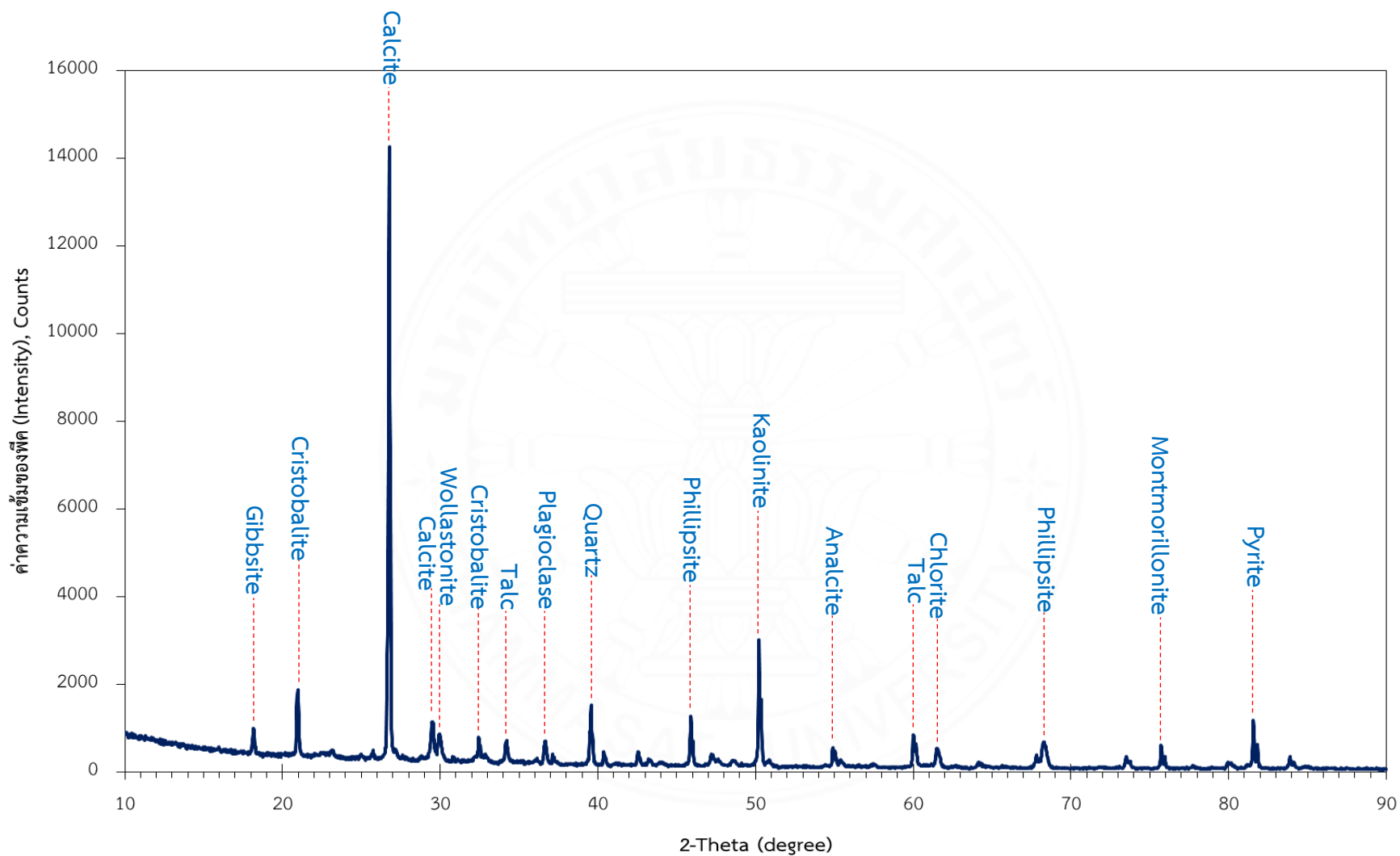
ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	18.136	4.88737 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	4.82
2	20.944	4.23822 Å	Cristobalite	SiO ₂	8.96
3	25.716	3.46152 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	1.66
4	26.731	3.33223 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	32.44
5	27.146	3.28223 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	4.11
6	29.478	3.02774 Å	Calcite	CaCO ₃	6.07
7	34.167	2.62220 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	3.07
8	35.106	2.55414 Å	Chlorite	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄₀ ·10(OH) ₂ · (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	3.05
9	36.610	2.45258 Å	Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	3.56
10	39.544	2.27710 Å	Chlorite	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄₀ ·10(OH) ₂ · (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	2.76
11	40.383	2.23171 Å	Montmorillonite	(Al,Mg) ₈ (Si ₄ O ₁₀) ₃ (OH) ₁₀ · 12H ₂ O	1.22

ตารางที่ 4.19 (ต่อ) การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

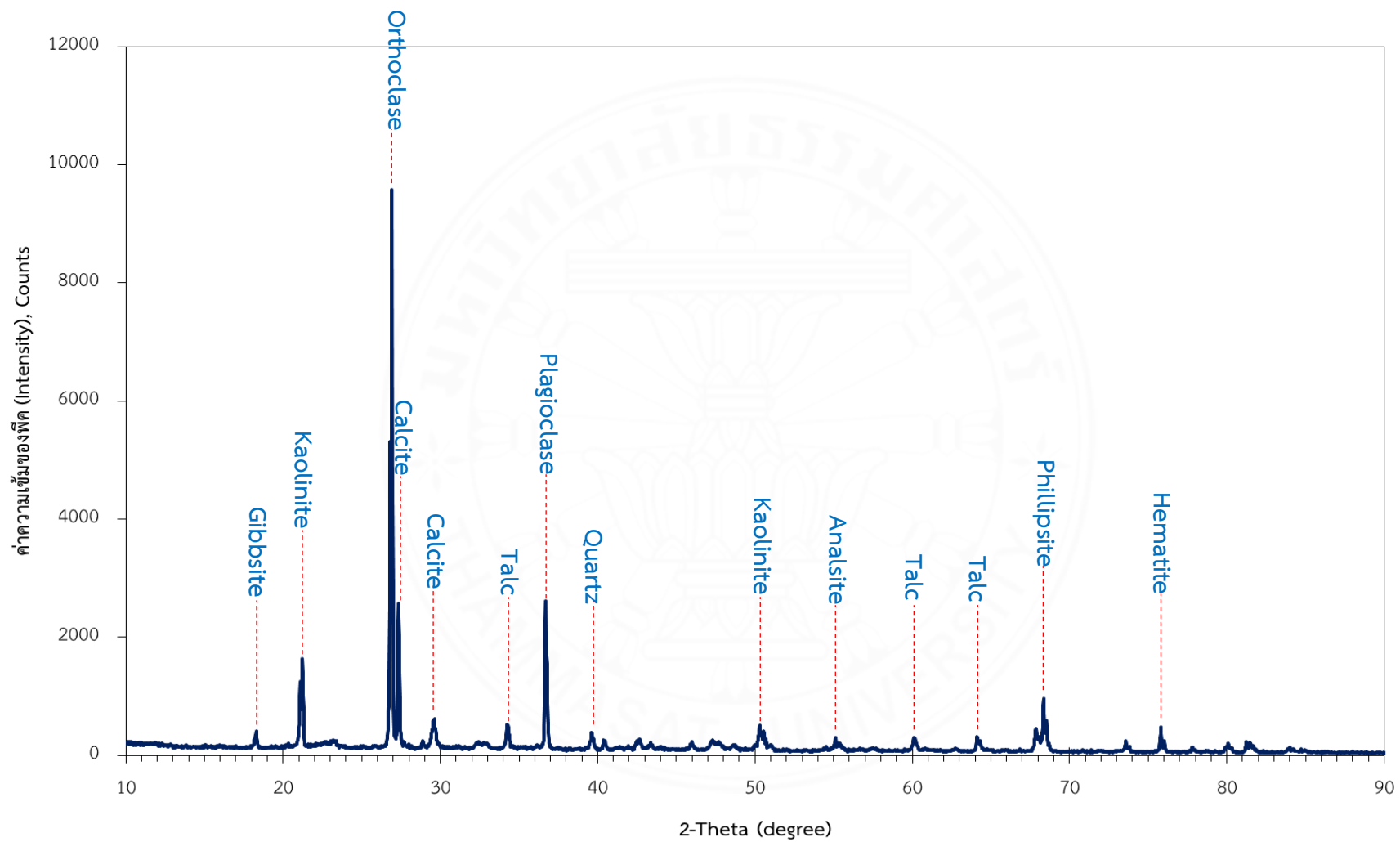
ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
12	42.519	2.12444 Å	Cristobalite	SiO ₂	4.06
13	45.874	1.97655 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	1.28
14	47.223	1.92320 Å	Pyrite	FeS ₂	2.15
15	50.224	1.81509 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	3.60
16	60.033	1.53983 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	5.40
17	63.100	1.47217 Å	Hematite	Fe ₂ O ₃	1.34
18	67.842	1.38034 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	1.10
19	68.379	1.37081 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ .12H ₂ O	2.34
20	79.951	1.19899 Å	Hematite	Fe ₂ O ₃	3.02
21	81.551	1.17945 Å	Pyrite	FeS ₂	2.55
22	83.874	1.15260 Å	Pyrite	FeS ₂	1.41

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175 จะใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณ 17.5% ซึ่งจากตารางที่ 4.19 จะพบว่าแร่องค์ประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีปริมาณมากที่สุด คือ กลุ่มแร่ที่พบในดินเหนียว (Gibbsite, Kaolinite, Orthoclase, Montmorillonite และ Talc) มีปริมาณ 56.32% รองลงมา คือ แร่ในกลุ่มควอตซ์ (Cristobalite) มีปริมาณ 13.02% แร่กลุ่มออกไซด์ (Phillipsite และ Chlorite) มีปริมาณ 10.53% แร่แคลไซต์ (Calcite) มีปริมาณ 6.07% และแรยิปซัม (Gypsum) มีปริมาณ 3.56%

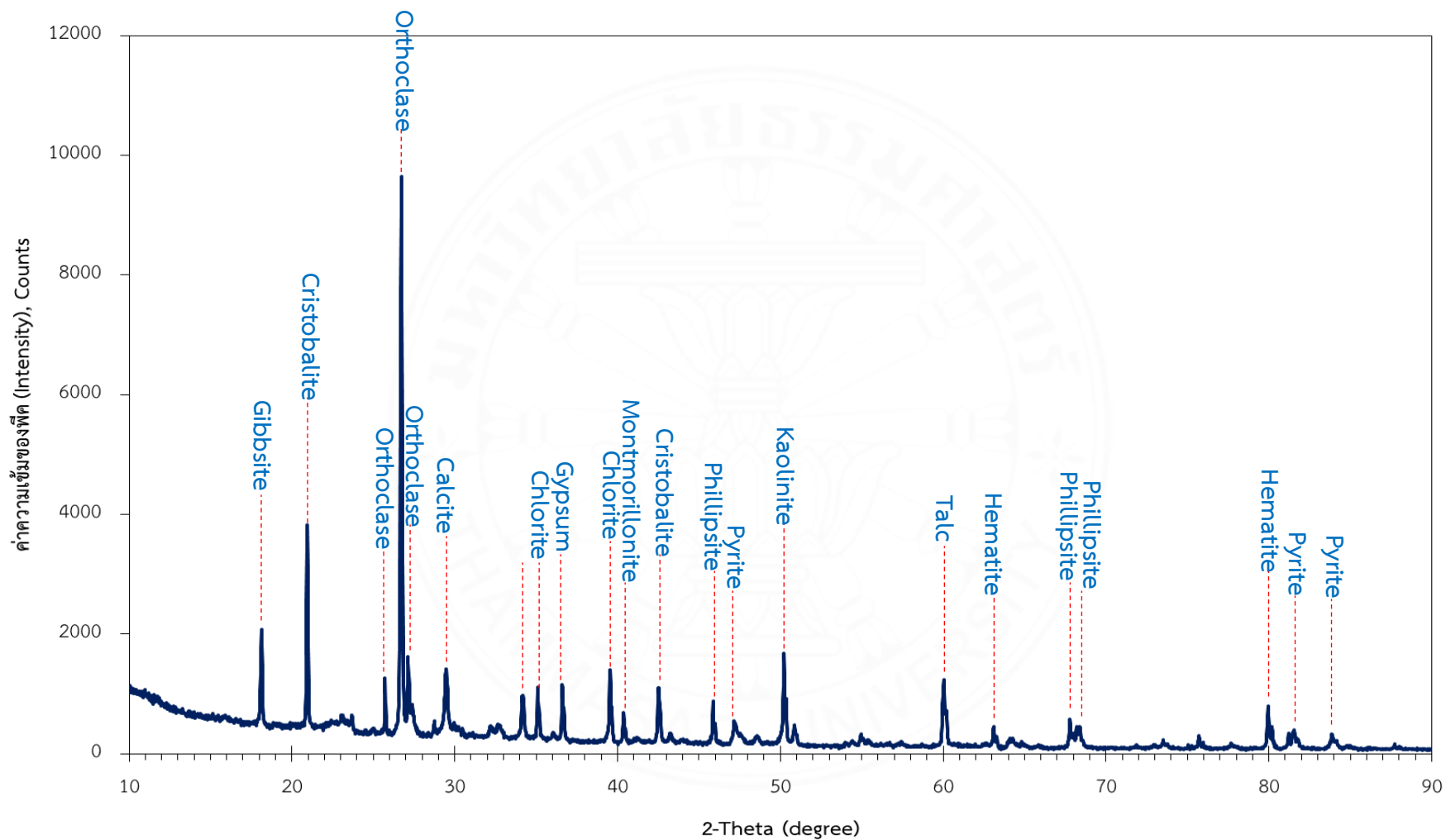
นอกจากนี้ยังพบแร่ที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Hematite และ Pyrite) ซึ่งพบในปริมาณสูงถึง 10.47% โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffractogram) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175 ได้ดังภาพที่ 4.29



ภาพที่ 4.27 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125



ภาพที่ 4.28 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150



ภาพที่ 4.29 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

4.2.2.13 มอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

ข้อมูลความเข้มพีคที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200 แสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
1	18.159	4.88148 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	1.92
2	20.951	4.23681 Å	Quartz	SiO ₂	5.10
3	25.722	3.46064 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	4.93
4	26.744	3.33075 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	40.81
5	27.616	3.22752 Å	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	3.83
6	29.500	3.02555 Å	Wollastonite	CaSiO ₃	5.01
7	34.214	2.61867 Å	Plagioclase	NaAlSi ₃ O ₈	5.10
8	36.645	2.45031 Å	Gibbsite	Al(OH) ₃	1.92
9	39.551	2.27673 Å	Chlorite	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄₀ .10(OH) ₂ . (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	4.67
10	40.379	2.23194 Å	Analcite	NaAlSi ₂ O ₆ .H ₂ O	1.01
11	42.540	2.12343 Å	Cristobalite	SiO ₂	1.51
12	43.452	2.08095 Å	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	1.33
13	45.874	1.97655 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ . .12H ₂ O	1.90
14	47.215	1.92349 Å	Pyrite	FeS ₂	1.80
15	50.214	1.81541 Å	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	5.08
16	54.962	1.66929 Å	Analcite	NaAlSi ₂ O ₆ .H ₂ O	2.83
17	60.024	1.54004 Å	Talc	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	2.32
18	67.848	1.38024 Å	Phillipsite	(Ca,Na ₂ ,K ₂) ₃ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ . .12H ₂ O	2.34

ตารางที่ 4.20 (ต่อ) การแปลผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

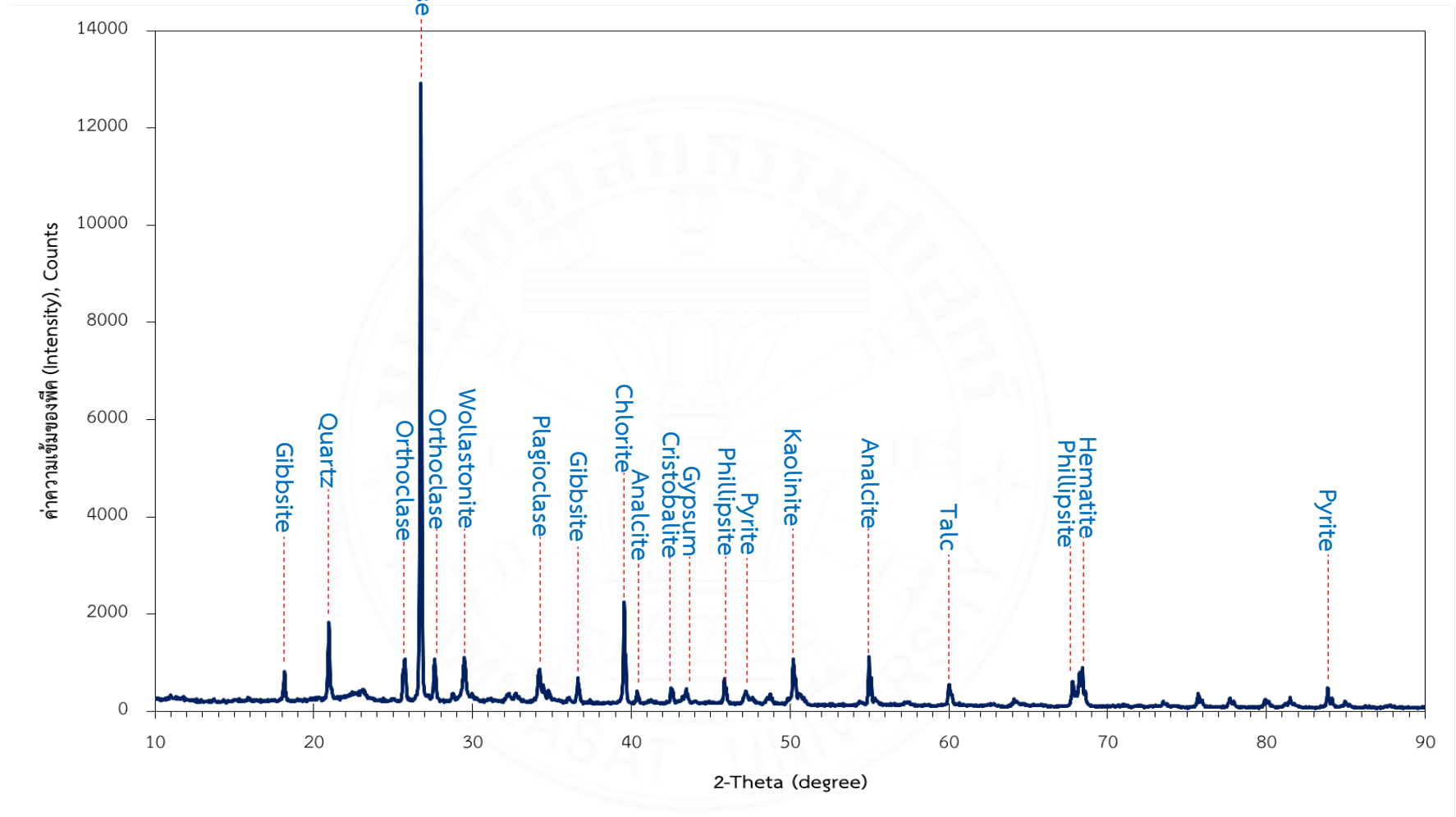
ลำดับ	2 - Theta	d - spacing	ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (%)
19	68.404	1.37030 Å	Hematite	Fe ₂ O ₃	5.56
20	83.870	1.15264 Å	Pyrite	FeS ₂	1.01

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200 จะใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณ 20.0% ซึ่งจากตารางที่ 4.20 จะพบว่าแร่องค์ประกอบในมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีปริมาณมากที่สุด คือ กลุ่มแร่ที่พบในดินเหนียว (Gibbsite, Kaolinite, Orthoclase, Plagioclase, Analcite, Wollastonite และ Talc) มีปริมาณ 74.76% รองลงมา คือ แร่กลุ่มออกไซด์ (Phillipsite และ Chlorite) มีปริมาณ 8.91% แร่ในกลุ่มควอตซ์ (Quartz และ Cristobalite) มีปริมาณ 6.61% และแร่ยิปซัม (Gypsum) มีปริมาณ 1.33%

นอกจากนี้ยังพบแร่ที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Hematite และ Pyrite) ซึ่งพบในปริมาณสูงถึง 8.37% โดยสามารถเขียนเป็นดิฟแฟรคโทแกรม (Diffractogram) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200 ได้ดังภาพที่ 4.30

การใช้ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในทางธรณีวิทยานั้นมีความหลากหลายมาก จึงเป็นไปได้ที่การวิเคราะห์ทางปริมาณเพียงอย่างเดียวนั้นสามารถใช้ได้กับสารตัวอย่างทุกชนิด วิธีการที่เฉพาะเจาะจงของการวิเคราะห์แต่ละวิธีนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุที่นำมาทดสอบและรูปแบบของผลที่ได้ต่อการใช้งานทางธรณีวิทยา สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ (Semi - quantitative Analysis) โดยสัดส่วนความสูงพีค โดยพีคที่ถูกวัดจะต้องสัมพันธ์กับเส้นฐาน (Base Line) ซึ่งจะต้องลากอย่างระมัดระวัง สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมที่ติดตั้งมาพร้อมกับเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ช่วยลากเส้นฐาน และวัดระยะทางในแนวตั้ง จากเส้นฐานถึงยอดพีค การแบ่งอย่างง่ายนี้ จะให้สัดส่วนความสูงพีค ค่าที่ได้สามารถพิจารณาได้เพียงแค่ปริมาณสัมพัทธ์เท่านั้น ถ้าต้องการปริมาณสัมบูรณ์ (Absolute Quantity) จะต้องใช้วิธีการอื่น

การเปรียบเทียบพื้นที่พีคสามารถคำนวณจากพื้นที่สามเหลี่ยมใต้พีคในพีคที่สนใจ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกคำนวณเฉพาะพีคที่สูงและอ้วนจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก จ หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาปริมาณแร่องค์ประกอบ



ภาพที่ 4.30 ดิฟแฟรคโทแกรมของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

เมื่อจำแนกกลุ่มของสารประกอบออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต กลุ่มดินเหนียว ซิลิกา และอลูมินา และกลุ่มเหล็ก ไนเตรต ซัลเฟต ซัลไฟด์ และคลอไรด์ โดยส่วนมากจะพบว่าแร่ในกลุ่มดินเหนียว ซิลิกา และอลูมินา มีปริมาณมากที่สุดในองค์ประกอบโดยมีปริมาณตั้งแต่ 46.54 - 97.15% ซึ่งแร่ในกลุ่มนี้จะพบได้มากที่สุดในส่วนมวลรวมละเอียด ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ อีกทั้งยังใช้เป็นส่วนผสมหลักในกระบวนการผลิตซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

กลุ่มของสารประกอบที่พบในปริมาณรองลงมา คือ แร่ในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีปริมาณตั้งแต่ 0.00 - 51.26% ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักในการผลิตปูนซีเมนต์ และใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะ ส่วนกลุ่มสารประกอบที่พบในปริมาณน้อยที่สุด คือ แร่กลุ่มเหล็ก ไนเตรต ซัลเฟต ซัลไฟด์ และคลอไรด์ โดยมีปริมาณ 0.00 - 14.06% ดังแสดงในภาพที่ 4.31

4.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES)

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ผู้วิจัยเลือกตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 2.5% ซึ่งจะเป็นปริมาณการชะละลายของโลหะหนักที่น้อยที่สุดในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (ICP - OES) ในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

ธาตุ	ปริมาณ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
Ag	<33.3
As	<33.3
Cd	<33.3
Co	<33.3
Cr	<33.3
Cu	257.18
Fe	8,095.89
Mn	274.67

ตารางที่ 4.21 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (ICP - OES) ในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

ธาตุ	ปริมาณ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
Ni	<33.3
Pb	<33.3
Ti	481.13
Zn	55.73

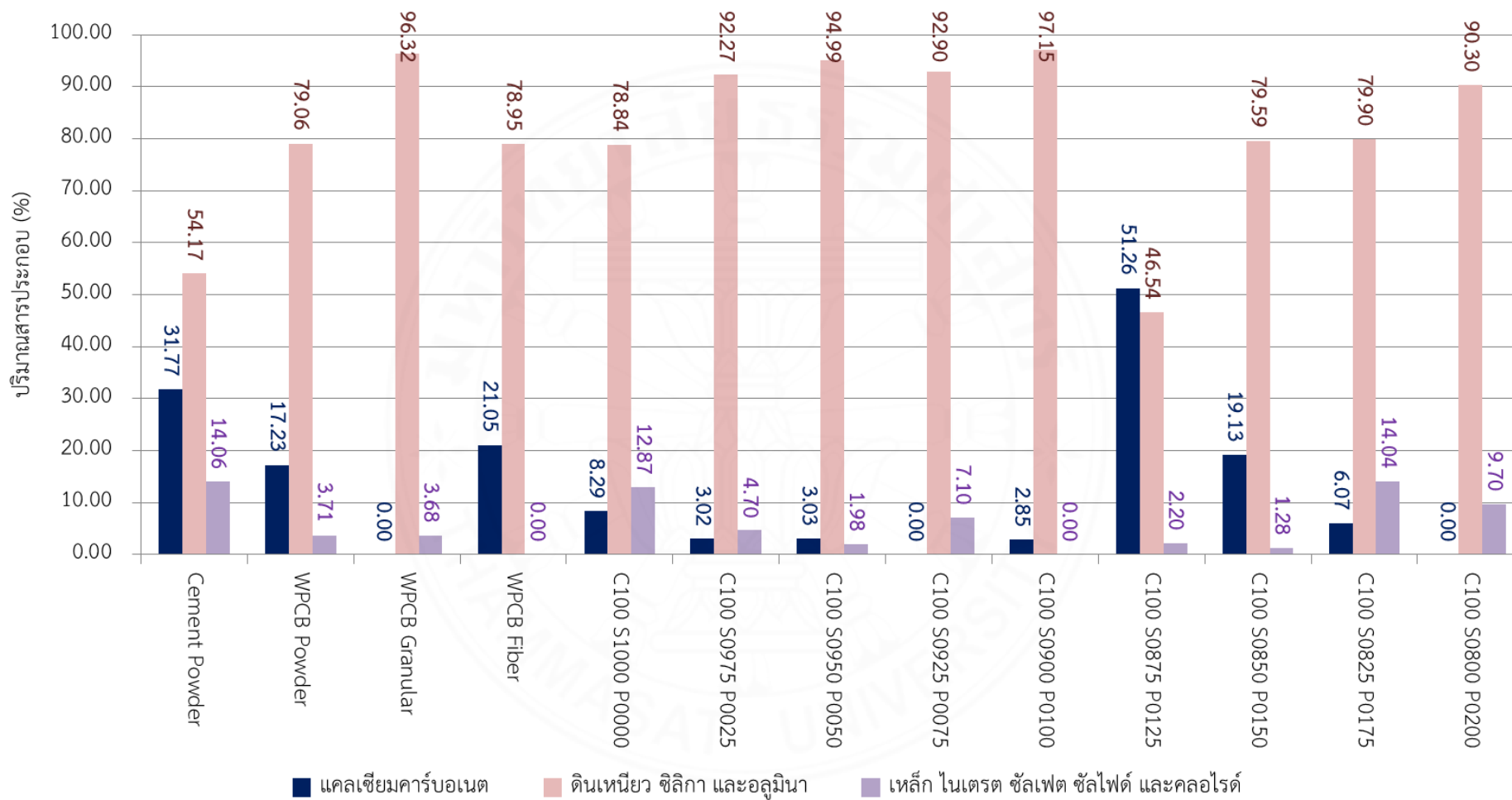
จากตารางที่ 4.21 จะพบว่าธาตุที่พบในปริมาณมากที่สุด คือ เหล็ก (Fe) พบในปริมาณ 8,095.89 มิลลิกรัม/กิโลกรัม รองลงมา คือ ไทเทเนียม (Ti) ปริมาณ 481.13 มิลลิกรัม/กิโลกรัม แมงกานีส (Mn) พบในปริมาณ 274.67 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ทองแดง (Cu) พบในปริมาณ 257.18 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และสังกะสี (Zn) พบในปริมาณ 55.73 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ส่วนธาตุโลหะหนักชนิดอื่น ได้แก่ เงิน (Ag) สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) และตะกั่ว (Pb) จะพบในปริมาณน้อยกว่า 33.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ทั้งนี้รายละเอียดของผลการทดสอบแสดงดังภาคผนวก ฉ

เมื่อพิจารณาปริมาณธาตุที่พบมากที่สุดจากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES) จะพบว่าธาตุเหล็กมีปริมาณเพียง 8 ส่วน ใน 1,000 ส่วนเท่านั้น ส่วนตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยกว่า 33.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม หรือ 0.033 ส่วน ใน 1,000 ส่วน ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก

4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP - MS)

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 ด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES) มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถตรวจจับธาตุปรอท(Hg) ได้ ผู้วิจัยจึงเลือกวิเคราะห์ปริมาณของธาตุปรอทด้วยเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP - MS) ผลการทดลองพบว่าธาตุปรอทมีปริมาณน้อยมาก ซึ่งพบในปริมาณเพียง 0.17 มิลลิกรัม/กิโลกรัม หรือ 0.00017 ส่วน ใน 1,000 ส่วนเท่านั้น โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.22 และภาคผนวก ฉ



ภาพที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณของแร่แต่ละกลุ่มที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD ในตัวอย่างวัสดุและมอร์ตาร์ปรับระดับ

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (ICP - MS) ในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

ธาตุ	ปริมาณ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
Hg	0.17

จากผลการทดสอบปริมาณการชะละลายของโลหะหนักในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักของแต่ละมาตรฐาน พบว่าปริมาณการชะละลายของโลหะหนักในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025 เทียบกับมาตรฐาน

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)				
	ผลการทดสอบ	BSEN 12457/3 Hazardous ¹⁵⁵	ECN - QAS Harmful Matter ¹⁵⁶	ข้อกำหนด ฉลากเขียว วัสดุอ่อนนึ่ง ¹⁵⁷	มาตรฐาน คุณภาพดิน เพื่อการอยู่อาศัย ¹⁵⁸
Ag	Limit of Detect	-	-	-	-
As	Limit of Detect	25	-	-	3.9
Cd	Limit of Detect	5	1.3	100	37
Co	Limit of Detect	-	-	-	-
Cr	Limit of Detect	70	60	1,000	300
Cu	257.18	100	300	-	-
Fe	8,095.89	-	-	-	-
Mn	274.67	-	-	-	1,800
Ni	Limit of Detect	40	40	-	1,600
Pb	Limit of Detect	50	130	1,000	400
Ti	481.13	-	-	-	-
Zn	55.73	200	600	-	-
Hg	0.17	2	0.45	1,000	23

4.3 ผลการทดสอบหาสมบัติทางกล

สำหรับงานวิจัยนี้สมบัติทางกลของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ ได้แก่ สมบัติการไหลแผ่ (Initial Flow) ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) โดยมีผลการทดสอบสมบัติทางกล ดังนี้

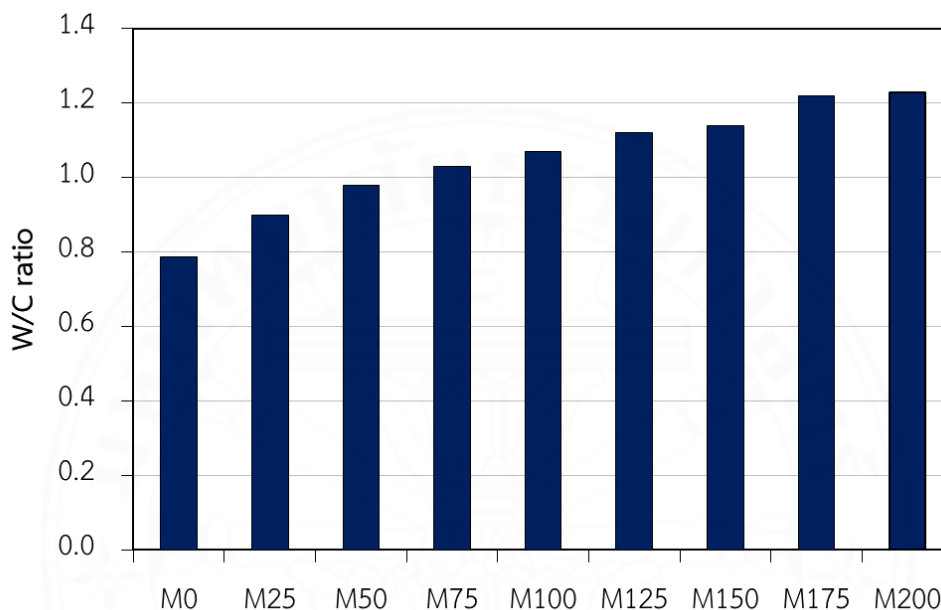
4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติการไหลแผ่ (Flow Test)

ผลการทดสอบสมบัติการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ปรับระดับจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าการไหลเริ่มต้น (Initial Flow) ซึ่งจะพิจารณาค่าการไหลที่ 240 วินาที และค่าการไหลแผ่ (Flow Retention) ซึ่งจะพิจารณาค่าการไหลที่ 20 นาที และ 30 นาที ทั้งนี้จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1708 Standard Method for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 3057 - 2563¹⁵⁹ มอร์ตาร์เทพปรับระดับไหลได้ด้วยตัวเอง (Self-leveling Mortar) ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบสมบัติการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mixed Code	Cement (กรัม)	Water (กรัม)	W/C Ratio	Initial Flow (ซม.)	Flow Retention (ซม.)	
					20 min	30 min
C100 S1000 P0000	500.00	393.33	0.79	13.91	14.12	14.25
C100 S0975 P0025	500.00	450.00	0.90	13.77	14.00	14.02
C100 S0950 P0050	500.00	490.00	0.98	13.63	13.88	13.91
C100 S0925 P0075	500.00	515.00	1.03	13.48	13.54	13.60
C100 S0900 P0100	500.00	535.00	1.07	13.33	13.38	13.45
C100 S0875 P0125	500.00	560.00	1.12	13.21	13.26	13.32
C100 S0850 P0150	500.00	570.00	1.14	13.11	13.27	13.31
C100 S0825 P0175	500.00	610.00	1.22	12.95	13.01	13.04
C100 S0800 P0200	500.00	615.00	1.23	12.83	12.86	12.92

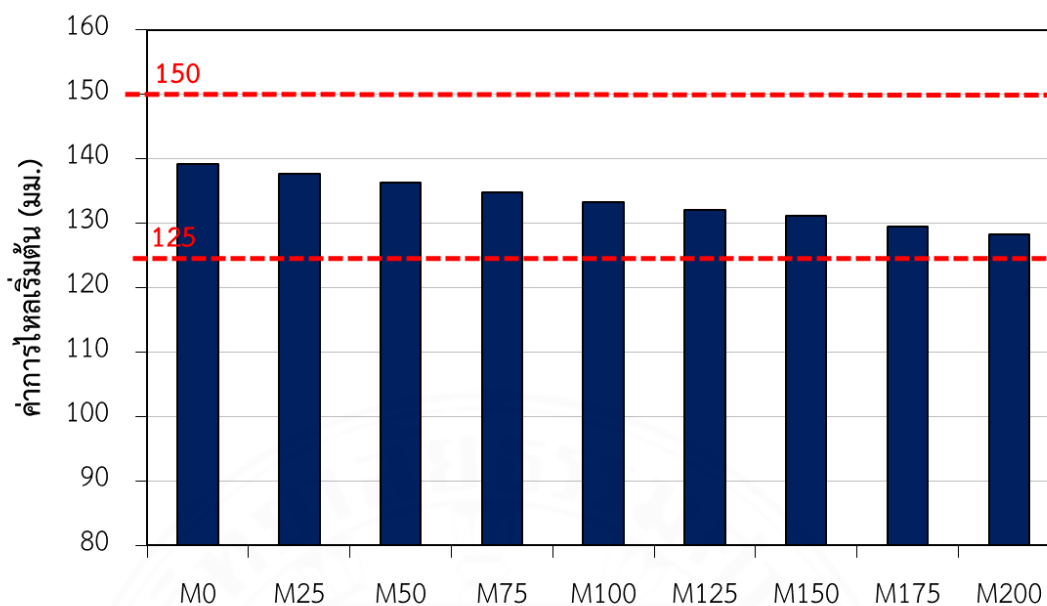
จากตารางที่ 4.24 เมื่อพิจารณาจากปริมาณน้ำและค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio) ที่ใช้ในส่วนผสมจะพบว่าเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณสูงขึ้น ปริมาณน้ำและค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ก็จะสูงขึ้นตาม ดังแสดงในภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากภาพที่ 4.32 พบว่าเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณ 20% จะพบว่าต้องใช้น้ำในปริมาณสูงขึ้นไปกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 1.56 เท่า จึงอาจกล่าวได้ว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้มีผลทำให้อัตราการใช้ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าการไหลเริ่มต้น (Initial Flow) ที่ระยะเวลาการไหล 240 นาที จะพบว่าค่าการไหลอยู่ระหว่าง 12.83 - 13.91 เซนติเมตร ส่วนค่าอัตราการไหลแฝงที่เวลา 20 นาที มีค่าอยู่ระหว่าง 12.86 - 14.12 เซนติเมตร และค่าอัตราการไหลแฝงที่เวลา 30 นาที มีค่าอยู่ระหว่าง 12.92 - 14.05 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.33



ภาพที่ 4.33 ค่าการไหลเริ่มต้นและปริมาณซากผงวงจรอเล็กทรอนิกส์

จากภาพที่ 4.33 พบว่าเมื่อปริมาณซากผงวงจรอเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น ค่าการไหลเริ่มต้น (Initial Flow) ของมอร์ตาร์ปรับระดับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอนุภาคของซากผงวงจรอเล็กทรอนิกส์มีลักษณะสับสน ไม่มีความกลมมนเหมือนกับมวลรวมละเอียดตามธรรมชาติ จึงส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลงไปด้วย ทั้งนี้ ค่าการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ปรับระดับยังเป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตราฐาน มอก. 3057 กำหนด

4.3.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของมอร์ตาร์ปรับระดับ คือ เวลาที่เข็มไวแคตจมลงในมอร์ตาร์ปรับระดับเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร ส่วนระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย คือ ระยะเวลาที่เมื่อปล่อยเข็มไวแคตลงบนตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับแล้วไม่เกิดร่องรอยบนตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ โดยผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากผงวงจรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดแสดงดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับ

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)								
	C100 S1000 P0000	C100 S0975 P0025	C100 S0950 P0050	C100 S0925 P0075	C100 S0900 P0100	C100 S0875 P0125	C100 S0850 P0150	C100 S0825 P0175	C100 S0800 P0200
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	42	42	42	43	42	43	42	43	42
45	42	42	42	43	42	43	42	43	42
60	42	42	41	43	42	43	42	42	42
75	41	42	41	42	42	42	41	42	42
90	40	41	41	42	42	42	40	41	41
105	40	41	40	41	40	42	40	40	41
120	39	40	40	41	39	41	40	39	38
135	38	40	39	38	38	41	40	39	38
150	38	38	38	36	37	41	39	38	38
165	36	36	37	35	37	40	39	38	37
180	35	35	36	35	36	40	39	37	37
195	34	33	34	34	36	38	39	37	36
210	34	32	32	33	36	37	39	35	36
225	32	30	29	32	35	36	38	35	35
240	28	27	27	29	35	36	37	34	35
255	25	26	26	27	34	35	37	33	34
270	22	25	26	26	32	33	37	32	34
285	18	23	25	26	32	32	36	32	33
300	14	19	24	25	30	30	35	31	33

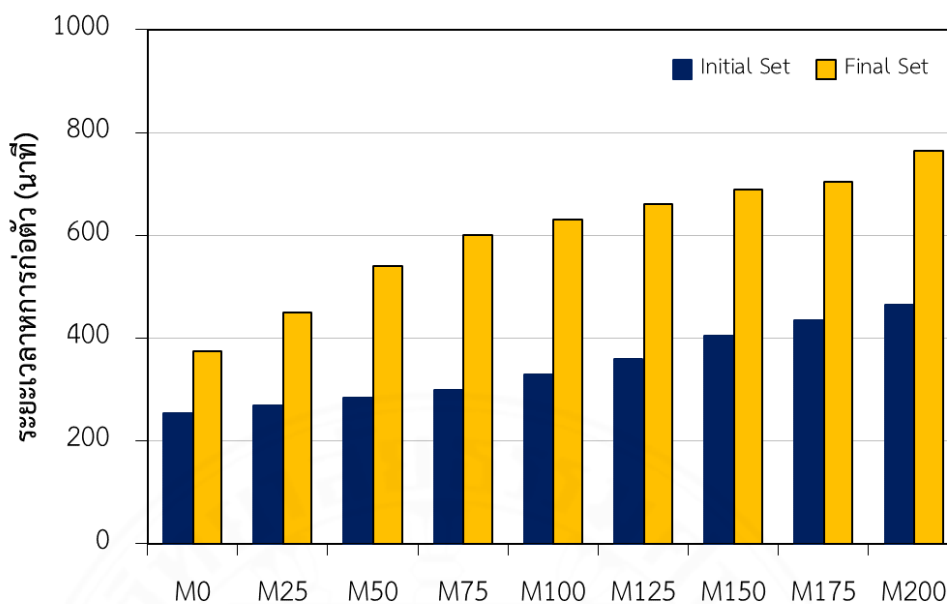
ตารางที่ 4.25 (ต่อ) ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับ

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)								
	C100 S1000 P0000	C100 S0975 P0025	C100 S0950 P0050	C100 S0925 P0075	C100 S0900 P0100	C100 S0875 P0125	C100 S0850 P0150	C100 S0825 P0175	C100 S0800 P0200
315	9	16	24	23	29	29	34	30	32
330	5	12	23	21	25	28	34	29	31
345	3	8	23	20	24	27	33	28	30
360	2	5	23	19	24	25	30	27	30
375	0	4	22	17	24	24	28	27	30
390		3	21	16	23	24	27	26	29
405		3	18	15	23	21	25	26	29
420		2	15	14	22	19	22	26	28
435		2	13	12	21	18	20	25	27
450		0	10	10	20	16	19	22	27
465			9	9	19	15	17	21	25
480			7	7	17	15	15	19	24
495			5	7	16	14	14	18	23
510			3	6	14	13	12	17	23
525			2	5	11	11	10	15	21
540			0	5	9	10	9	13	20
555				4	7	8	8	12	18
570				3	5	7	7	11	16
585				2	3	6	7	9	15
600				0	2	5	6	7	12

ตารางที่ 4.25 (ต่อ) ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับ

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)								
	C100 S1000 P0000	C100 S0975 P0025	C100 S0950 P0050	C100 S0925 P0075	C100 S0900 P0100	C100 S0875 P0125	C100 S0850 P0150	C100 S0825 P0175	C100 S0800 P0200
615					2	3	5	5	10
630					0	3	5	5	9
645						1	4	4	9
660						0	2	3	7
675							1	1	6
690							0	1	5
705								0	5
720									3
735									2
750									2
765									0

ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจรรอเล็กทรอนิกส์ มีแนวโน้มแปรผันตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.34 โดยมอร์ตาร์ควบคุม C100 S1000 P0000 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 255 นาที และระยะเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้ายเมื่อเวลาผ่านไป 375 นาที พิจารณาปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจรรอเล็กทรอนิกส์ในปริมาณร้อยละ 2.5 – 20.0 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 270 – 465 นาที คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น 1.06 – 1.82 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 375 – 765 นาที คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น 1.47 – 2.04 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม



ภาพที่ 4.34 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับ

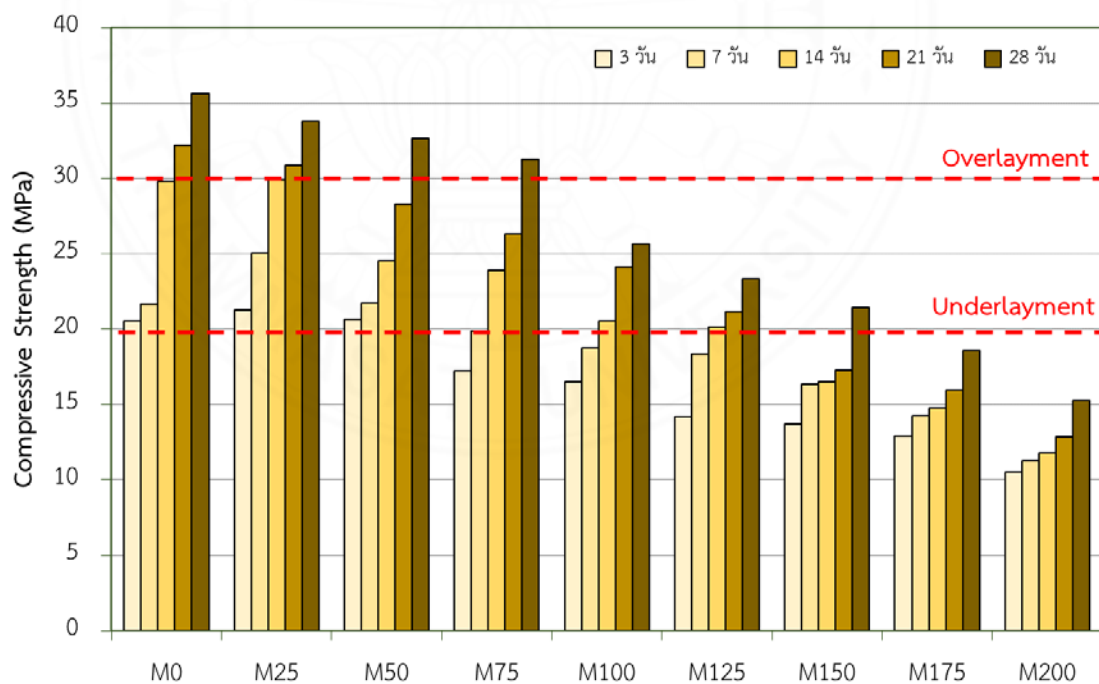
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับในทุกส่วนผสมที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กับระยะเวลาที่ยอมให้ตามมาตรฐาน ASTM C 1708 [14] และ มอก. 3057 [1] พบว่า มีค่าระยะเวลาในการก่อตัวอยู่ในช่วงยอมรับได้ กล่าวคือ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และระยะเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้ายไม่มากกว่า 1,440 นาที

4.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยอากาศ ในช่วง 5 อายุการบ่ม ได้แก่ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4.26 และตารางที่ 4.27 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์สำหรับการบ่มในน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.35 พบว่าที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม C100 S1000 P0000 มีค่าเท่ากับ 35.62 เมกะปาสกาล เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณร้อยละ 2.5 – 20.0 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงในช่วงร้อยละ 5.14 – 57.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.26 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ

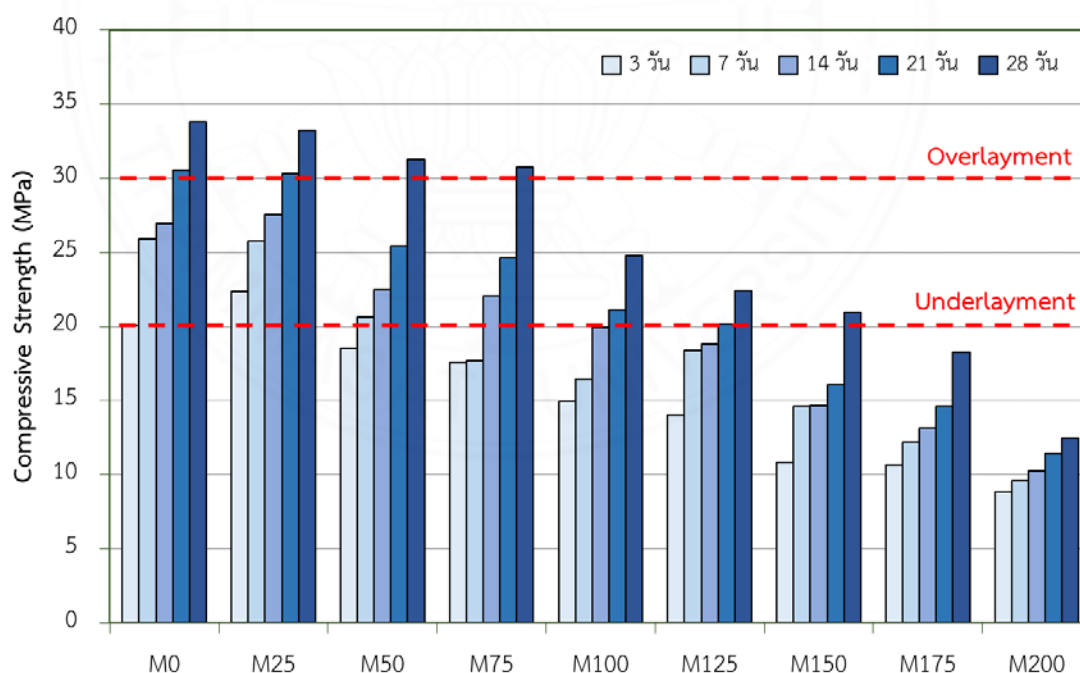
Mixed Code	กำลังรับแรงอัด (MPa)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
C100 S1000 P0000	20.55	21.64	29.8	32.22	35.62
C100 S0975 P0025	21.26	25.01	29.93	30.86	33.79
C100 S0950 P0050	20.63	21.69	24.53	28.26	32.66
C100 S0925 P0075	17.25	19.88	23.92	26.29	31.24
C100 S0900 P0100	16.52	18.73	20.52	24.12	25.67
C100 S0875 P0125	14.19	18.37	20.13	21.18	23.32
C100 S0850 P0150	13.72	16.33	16.51	17.30	21.41
C100 S0825 P0175	12.91	14.27	14.76	15.96	18.56
C100 S0800 P0200	10.51	11.28	11.81	12.83	15.27



ภาพที่ 4.35 การพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ

ตารางที่ 4.27 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ

Mixed Code	กำลังรับแรงอัด (MPa)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
C100 S1000 P0000	20.08	25.94	26.93	30.54	30.58
C100 S0975 P0025	22.35	25.74	27.53	30.29	33.25
C100 S0950 P0050	18.53	20.64	22.47	25.39	31.26
C100 S0925 P0075	17.59	17.69	22.04	24.63	30.74
C100 S0900 P0100	14.93	16.45	19.93	21.14	24.82
C100 S0875 P0125	14.02	18.36	18.85	20.19	22.42
C100 S0850 P0150	10.86	14.58	14.68	16.09	20.98
C100 S0825 P0175	10.66	12.20	13.14	14.63	18.28
C100 S0800 P0200	8.89	9.62	10.25	11.47	12.49



ภาพที่ 4.36 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ

สำหรับผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์สำหรับการบ่มในอากาศดังแสดงในภาพที่ 4.36 พบว่าที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าเท่ากับ 33.79 เมกะปาส

กาล เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณร้อยละ 2.5 – 20 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงในช่วงร้อยละ 1.59 – 63.04 ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำจะสูงกว่ามอร์ตาร์ที่บ่มในอากาศในช่วงร้อยละ 1.53 – 22.26 โดยตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับทั้งการบ่มตัวอย่างในน้ำและบ่มในอากาศมีลักษณะการวิบัติแบบ Non-Explosive Failure ดังแสดงในภาพที่ 4.37



ภาพที่ 4.37 การวิบัติแบบ Non-Explosive Failure

เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในสถานะต่างกันจะพบว่าสภาวะในการบ่มมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศส่วนใหญ่จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ โดยค่าความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดที่มากที่สุด คือ ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200 ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะบ่มในอากาศสูงกว่าสภาวะบ่มในน้ำ 22.3% ทั้งนี้ รายละเอียดผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับแสดงในภาคผนวก ข

4.3.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยอากาศ จะพบว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า จึงเลือกทดสอบกำลังรับแรงดัดเฉพาะตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ 28 วันโดยผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดแสดงดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่ปมในน้ำ

Mixed Code	Load (N)	กำลังรับแรงดัด (MPa)
C100 S1000 P0000	4,101.05	11.48
C100 S0975 P0025	2,776.48	7.77
C100 S0950 P0050	3,027.98	8.48
C100 S0925 P0075	3,027.98	8.48
C100 S0900 P0100	3,782.48	10.59
C100 S0875 P0125	3,732.18	10.45
C100 S0850 P0150	3,581.28	10.03
C100 S0825 P0175	3,681.88	10.31
C100 S0800 P0200	3,229.18	9.04

จากตารางที่ 4.28 จะพบว่าเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ปรับระดับจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นจนสูงสุดเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เม็ดในปริมาณ 10 - 15 % และจึงค่อย ๆ ลดลงอีกเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เม็ดในปริมาณมากกว่า 15%

จากข้อมูลสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) จะสามารถเขียนเป็นข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.29

ทั้งนี้จากข้อมูลในตารางที่ 4.29 จะพบว่ามอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดไม่เกิน 5% มีสมบัติเป็นไปตามที่ มอก. กำหนด จึงสามารถนำไปใช้งานได้จริง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าหากมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณตั้งแต่ 20% ขึ้นไป ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับจะไม่สามารถขึ้นรูปหรือไม่สามารถถอดแบบได้ภายใน 24 ชั่วโมงตามที่มาตรฐาน ASTM กำหนด

ตารางที่ 4.29 ข้อมูลสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ปรับระดับเทียบกับ มอก. 3057-2563

ลำดับ	สมบัติทางกล	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด มอก. 3057-2563		Mixed Code								
			ชนิดทรง พื้น	ชนิดเททับ หน้า	C100 S1000 P0000	C100 S0975 P0025	C100 S0950 P0050	C100 S0925 P0075	C100 S0900 P0100	C100 S0875 P0125	C100 S0850 P0150	C100 S0825 P0175	C100 S0800 P0200
1	การไหลเริ่มต้น (Initial Flow)	mm	125 ถึง 150	125 ถึง 150	127.8	139.7	128.3	130.8	133.4	132.1	132.1	129.5	128.3
2	การไหลแผ่ (Flow Retention)	mm											
	- 20 min		125 ถึง 150	125 ถึง 150	128.2	140.0	128.8	131.4	133.8	132.6	132.7	130.1	128.6
	- 30 min		125 ถึง 150	125 ถึง 150	128.5	140.2	129.1	132.0	134.5	133.2	133.1	130.4	129.2
3	ระยะเวลาก่อตัว (Setting Time)	min											
	- การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time)		ไม่น้อยกว่า 45	45	255	270	285	300	330	360	405	435	465
	- การก่อตัวระยะปลาย (Final Set)		ไม่มากกว่า 1,440	1,440	375	450	540	600	630	660	690	705	765

ตารางที่ 4.29 (ต่อ) ข้อมูลสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ปรับระดับเทียบกับ มอก.

ลำดับ	สมบัติทางกล	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด		Mixed Code									
			มอก.3057-2563		C100 S1000 P0000	C100 S0975 P0025	C100 S0950 P0050	C100 S0925 P0075	C100 S0900 P0100	C100 S0875 P0125	C100 S0850 P0150	C100 S0825 P0175	C100 S0800 P0200	
			ชนิด ทรงพื้น	ชนิด เทบหน้า										
4	ความต้านแรงอัด (Compressive Strength)	MPa												
	- อายุ 3 d		10.0	15.0	20.55	22.35	20.63	17.59	16.52	14.19	13.72	12.91	10.51	
	- อายุ 7 d		15.0	20.0	25.94	25.74	21.69	19.88	18.73	18.37	16.33	14.27	11.28	
	- อายุ 28 d	20.0	30.0	35.62	33.79	32.66	31.24	25.67	23.32	21.41	18.56	15.27		
5	ความต้านแรงดัด (Flexural Strength)	MPa												
	- อายุ 3 d		1.0	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	- อายุ 7 d		2.0	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	- อายุ 28 d	4.0	7.0	11.48	7.77	8.48	8.48	10.59	10.45	10.03	10.31	9.04		

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรม และการชะละลายของโลหะหนักในมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีส่วนผสมของซากแผ่นวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด ทั้งสมบัติทางด้านกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกล จะสามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

1. ซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง จะมีหลายรูปร่างทั้งกลมมน ลีบบน เป็นแท่งทรงกระบอก และทรงลูกบาศก์ ส่วนมากมีขนาดละเอียดมาก (น้อยกว่า 200 ไมครอน) ซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด มีรูปร่างโดยรวมเป็นลักษณะลีบบน ผิวค่อนข้างขรุขระ มีขนาดตั้งแต่ 20 - 100 ไมครอน ซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใยส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มีความยาวตั้งแต่ 30 - 200 ไมครอน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง จะมีลักษณะเป็นผงละเอียด มีขนาดตั้งแต่ 2 - 20 ไมครอน ส่วนมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดจะพบว่าเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณเพิ่มขึ้น จะพบว่ามีช่องว่างภายในส่วนผสมมากขึ้น และมีการยึดเกาะตัวกันได้น้อยลง

2. องค์ประกอบทางเคมีของซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสามชนิด จะประกอบด้วยธาตุแคลเซียม (Ca) ซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ส่วนแร่องค์ประกอบที่พบจะเป็นแร่ในกลุ่มดินเหนียว ซิลิกา และอลูมินา ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเส้นใยแก้วถักทอที่ใช้ผลิตแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ TPI สีแดง ส่วนมากจะประกอบด้วยธาตุแคลเซียม (Ca) และแร่แคลไซต์ (Calcite) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดจะพบว่ามีองค์ประกอบของแร่ในกลุ่มดินเหนียว ซิลิกา และอลูมินามากที่สุด

3. อัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด คือ ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สามารถนำไปใช้ได้จริง ทั้งในงานเทรองพื้น (Underlayment) และงานเททับหน้า (Overlayment) กรณีที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดมากกว่าร้อยละ 5 จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดไม่เป็นตามที่ มอก.

3057-2563 กำหนด และเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดมากกว่าร้อยละ 20 จะทำให้ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับจะไม่สามารถขึ้นรูปหรือไม่สามารถถอดแบบได้ภายใน 24 ชั่วโมงตามที่มาตรฐาน ASTM กำหนด

4. มอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณเพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C Ratio) และระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มมากขึ้น แต่มีหน่วยน้ำหนักและความหนาแน่นลดลง

5. มอร์ตาร์ปรับระดับที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดกรณีบ่มในอากาศจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ และเมื่อมีอายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นก็จะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

6. กำลังรับแรงตัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณมากขึ้น มีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงช่วงที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณร้อยละ 10 และจะเริ่มมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

7. ค่าความต้านทานความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดในปริมาณมากขึ้น จะมีค่าความต้านทานความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนใกล้เคียงกับฉนวนกันความร้อน

8. จากการทดสอบปริมาณการชะละลายของโลหะหนัก จะพบธาตุเหล็ก (Fe) ในปริมาณมากที่สุด รองลงมา คือ ไทเทเนียม (Ti) แมงกานีส (Mn) และทองแดง (Cu) ส่วนธาตุโลหะหนักชนิดอื่น ได้แก่ เงิน (Ag) สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) และปรอท (Hg) จะพบในปริมาณน้อยมาก ซึ่งปริมาณการชะละลายของโลหะหนักยังเป็นไปตามมาตรฐาน ECN - QAS Harmful Matter ข้อกำหนดฉลากเขียวผลิตภัณฑ์วัสดุก่อผนังและประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อที่อยู่อาศัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการนำซากแพลงจอร์อเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ดมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ ซึ่งมีข้อดีทางด้านวิศวกรรม ได้แก่ ความหนาแน่นที่อาจนำไปใช้เป็นวัสดุมวลเบา ค่าความต้านทานความร้อนที่สามารถนำไปใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อน กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงตัดที่สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งงานเทรื่องพื้น และงานเทพื้นหน้า

รายการอ้างอิง

1. Chang I, Lee M, Cho GC, Global CO₂ Emission-Related Geotechnical Engineering Hazards and the Mission for Sustainable Geotechnical Engineering. MDPI. 2019 Jul 3;12(2567):10-11.
2. องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), ศูนย์ข้อมูลก๊าซเรือนกระจก. ศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศไทย (Greenhouse Gas Mitigation Potential of Cement Industry in Thailand) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2559 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: http://conference.tgo.or.th/download/tgo_or_th/Article/2016/Article_MA%20plan_Cement_Final.pdf.
3. กระทรวงทรัพยากรธรณี. ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากการทำเหมือง และมาตรการป้องกันและแก้ไข: เหมืองแร่หินอุตสาหกรรม เหมืองแร่ควอตซ์ และเหมืองแร่โดยทั่วไป [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <http://www.dmr.go.th/ewtadmin/ewt/minerals/images/%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%97%E0%B8%9A%E0%B8%AA%E0%B8%B4%E0%B9%88%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%A7%E0%B8%94%E0%B8%A5%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%88%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B4%E0%B8%94%E0%B8%82%E0%B8%B6%E0%B9%89%E0%B8%99%20%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%A3.pdf>.
4. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. สถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2562 [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2562 [ปรับปรุงข้อมูลเมื่อวันที่ 14 ม.ค. 2563; สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <http://pcd.go.th/Public/News/GetNewsThai.cfm?task=lt2020&id=19259>.
5. พิรนาฏ คิตดี, สุทธิพร บุญมาก. การขับเคลื่อนและอุปสรรคของการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย (Drivers and Barriers of Electronic Waste Management in Thailand). วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. ม.ค. - ธ.ค. 2559;8(8):2-8.

6. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม. คู่มือหลักปฏิบัติที่ดีสำหรับการให้บริการบำบัด กำจัดกากอุตสาหกรรม: โครงการจัดระดับโรงงานจัดการกากอุตสาหกรรม ประเภท 101 105 และ 106. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2564.
7. มงคลชัย อัครดิษฐเลิศ, เจริศ จำปา. การใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ส่วนโลหะ) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม. วารสารสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ม.ค. - มี.ค.2561;22(1).
8. สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ราชบัณฑิตยสถาน; 2546 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <https://dictionary.orst.go.th/>.
9. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5903 (พ.ศ. 2563) เรื่อง ยกเลิกมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2563.
10. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ปูนซีเมนต์ คืออะไร? [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2554 [ปรับปรุงข้อมูลเมื่อวันที่ 30 ต.ค. 2559; สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <https://www.nstda.or.th/th/vdo-nstda/science-day-techno/4047-cement%20%E0%B8%AA%E0%B8%A7%E0%B8%97%E0%B8%8A>.
11. กรมทรัพยากรธรณี. ปูนซีเมนต์ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2550 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=603&filename=m.
12. รองศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. เรื่องของปูนซีเมนต์ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <https://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue5/articles/article4.html>.
13. บริษัท ปูนซีเมนต์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. Cement and Applications: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0149>.
14. บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน). กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <https://www.asiacement.co.th/th/discovering-cement>.

15. สำนักงานพลังงานแห่งชาติ, กองควบคุมและส่งเสริมพลังงาน. รายงานการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม: ปูนซีเมนต์. กรุงเทพฯ: สำนักงานพลังงานแห่งชาติ; 2525
16. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4420 (พ.ศ. 2555) เรื่อง แก้ไขมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ (แก้ไขครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2555.
17. American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Portland Cement. ASTM C 150/C 150 M-12. ASTM International. 2012.
18. American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. ASTM C 595-12. ASTM International. 2012.
19. American Society for Testing and Materials. Standard Performance Specification for Hydraulic Cements. ASTM C 1157/C 1157 M-2011. ASTM International. 2011.
20. American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Expansive Hydraulic Cements. ASTM C 845-04. ASTM International. 2004.
21. บริษัท ปูนซีเมนต์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. คอนกรีตเทคโนโลยี: Concrete Technology [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0063>.
22. วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วน ป.สัมพันธ์พาณิชย์ การพิมพ์ จำกัด; 2539.
23. Kosmatka SH, Kerkhoff B, Panarese WC. Design and Control of Concrete Mixtures. 16th edition. Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA; 2016.
24. Metwally AE. Compressive Strength Prediction of Portland Cement Concrete with Age Using a New Model. Housing and Building National Research Center Journal. Jan 2013;10(1).
25. โรงเรียนทหารช่าง, กรมทหารช่าง. แนวสอนวิชาคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปฐมนิเทศ). กรุงเทพฯ: แผนกวิชาก่อสร้างและสาธารณูปโภค กองการศึกษา; 2555.
26. กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร มยผ. 1101-64 ถึง มยผ. 1106-64. ปรับปรุงครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร; 2564.

27. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4515 (พ.ศ. 2556) เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอาคารคอนกรีต เล่ม 2 วัสดุที่ใช้ในอาคารคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2556.
28. รัชชัย คุณประคัลภ์. มวลรวมหยาบ COARSE AGGREGATE [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: http://research.rid.go.th/download_ss/Testing%20and%20analysis/Presentation/Coarse%20Agg.pdf.
29. นพวรรณ แทนเล็ก (คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช). รายงานการวิจัยการศึกษากำลังอัดคอนกรีตโดยใช้หินฝุ่นเป็นวัสดุผสมทดแทนทรายหยาบ: The Study of “Compressive Strength of Concrete” by Using Siltstone Instead of Sand. นครศรีธรรมราช: คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช; 2559.
30. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. การวิเคราะห์หาส่วนขนาดคละของมวลรวมด้วยตะแกรง Gradation of Aggregates by Sieve Analysis [อินเทอร์เน็ต]. เชียงใหม่: สำนักงาน; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ค. 2563]. จาก: <https://civil.eng.cmu.ac.th/courses/materials-testing/c2>.
31. เจนศักดิ์ คชนิล, สุวิทย์ บุรณะชนอภา, มานิตย์ บางแก้ว, สรวุฒิ หงส์ชูเวช. อิทธิพลของแก้วลอยที่มีต่อความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้า และคอนกรีต. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา; 2545.
32. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5391 (พ.ศ. 2562) เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมวิธีทดสอบปูนซีเมนต์ เล่ม 9 วิธีทดสอบระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ไฮดรอลิกเพสต์ โดยใช้เข็มแบบไวแคต. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2562.
33. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1532 (พ.ศ. 2532) เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 12 วิธีทดสอบความต้านทานแรงอัดของมอร์ต้าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2532.
34. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต. E.I.T.Standard-2546. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2546.
35. อรวรรณ พุทธิสุทธิ์, ศุภิพร แสงกระจ่าง. ความเป็นพิษของขยะอิเล็กทรอนิกส์. วารสารพิษวิทยาไทย. 2553;25(1):67-76.
36. สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร. คู่มือการคัดแยกขยะอันตรายสำหรับเยาวชน. กรุงเทพฯ: สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร ศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร 2; 2556.

37. สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย. คู่มือประชาชน ขยะอิเล็กทรอนิกส์ของเสียที่มาพร้อมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ; 2558.
38. สายใจ วิทยาอนุมาส, จิรากร ยิ่งไพบูลย์วงศ์, ทิพวัลย์ แก้วมีศรี, วัฒนา กาญจนานิจ, บรรณาธิการ. รายงานที่ตีอาร์ไอ. ล. 133, กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย (ทีดีอาร์ไอ); 2560. 24 น.
39. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. แนวทางการจัดการของเสียและอันตราย (WEEE) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ส่วนของเสียอันตราย, กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ; 2563 [ปรับปรุงข้อมูลเมื่อวันที่ 5 พ.ย. 2563; สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: http://pcd.go.th/info_serv/haz_battery.htm.
40. คัดค้านรัฐ ชี้นวงศ้อรณ. ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (e-Waste) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน); 2564 [ปรับปรุงข้อมูลเมื่อวันที่ 12 ม.ค. 2564; สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <https://ngthai.com/science/33111/e-waste/>.
41. Goosey M, Kellner R. A Scoping Study End-of-Life Printed Circuit Boards. Europe: Shipley Europe Limited; 2002.
42. Hino T, Agawa R, Moriya Y, Nishida M, Tsugita Y, Araki T. Techniques to Separate Metal from Waste Printed Circuit Boards from Discarded Personal Computers. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2009(11):42-54.
43. Shuey SA, Vildal EE, Taylor PR. Pyrometallurgical Processing of Electronic Waste. Paper Present at: SME Annual Meeting; 2006 Mar 27-29; St. Louis MO, USA. Preprint 06-037.
44. ชาญวิทย์ แก้วอาษา (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม). รายงานการวิจัย เรื่อง การศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการกัดแผ่นวงจรพิมพ์: Study of the Methods for Increasing the Efficiency of Printed Circuit Board Milling. มหาสารคาม: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม; 2561.
45. กระทรวงอุตสาหกรรม; กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, บรรณาธิการ. การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์. ล. 4, การคาดการณ์ปริมาณซากผลิตภัณฑ์ฯ. กรุงเทพฯ: WASTE TALK; 2562. 36 น.
46. เปรมฤดี กาญจนปิยะ. e-Waste การรีไซเคิลซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <http://infofile.pcd.go.th/haz/8e-waste.pdf?CFID=2826&CFTOKEN=14856960>.

47. สุจิตรา วาสนาดำรงดี. สถานการณ์ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์. วารสารสิ่งแวดล้อม. 2558;19(3).
48. Kaliyaraj D, Rajendran M, Angamuthu V, Antony AR, Kaari M, Thangavel S, et al. Bioleaching of Heavy Metals from Printed Circuit Board (PCB) by *Streptomyces Albidoflavus* TN10 Isolated from Insect Nest. *Bioresources and Bioprocessing*. 2019;6(47).
49. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5115 (พ.ศ. 2561) เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2561.
50. พันธุ์เทพ โกมารกุล ณ นคร. สารผสมเพิ่มและประเภทของสารผสมเพิ่ม. ราชบุรี: สำนักชลประทานที่ 13; 2556.
51. American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM C 494/ C 494 M-99. ASTM International. 1999.
52. พรพรรณ พนาปวุฒิกุล. โลหะหนัก : ตัวการปัญหาสิ่งแวดล้อม [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย; 2549 [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=7>.
53. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ. ภัยร้ายจากโลหะหนัก ไม่รู้ไม่ได้แล้ว [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์; 2556 [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/itemlist/tag/%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%81>.
54. กลุ่มพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพทางเคมี. โลหะหนัก (Heavy Metals). กรุงเทพฯ: กองตรวจสอบคุณภาพสินค้าประมง, กรมประมง; 2558.
55. กรมควบคุมมลพิษ, สมาคมสิ่งแวดล้อมไทย. คู่มือการประเมินความเสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของมลพิษในดินหรือน้ำใต้ดิน. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; 2561.
56. Spiegel H. Trace Element Accumulation in Selected Bioindicators Exposed to Emissions along the Industrial Facilities of Danube Lowland. *Turkish Journal of Chemistry*, 2002;26(6):815-23. ISSN : 1300-0527

57. Hoodaji M, Ataabadi M, Najafi P. Biomonitoring of Airborne Heavy Metal Contamination. *Air Pollution - Monitoring, Modelling, Health and Control*, 2012 March: 97-122. DOI:10.5772/32963.
58. Rana J. Periodic Table Guide Blog [Internet]. [place unknown]. 2021 - [cited 2021 Jan 23]. from: <https://periodictableguide.com/what-are-heavy-metals-on-the-periodic-table/>.
59. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. คอนกรีตที่ดีต้องบ่ม (ให้สุก). *วารสารคอนกรีต*. ส.ค. 2552;(7): 1-11.
60. Price WH. Factors Influencing Concrete Strength. *Journal of the American Concrete Institute*. 1951;Vol.47(2):417-32.
61. Sustainable Concrete, Part of The Concrete Centre. Mortar [Internet]. United Kingdom: Mineral Products Association; 2020 [cited 2021 Jan 23]. from: <https://www.sustainableconcrete.org.uk/Sustainable-Concrete/What-is-Concrete/Mortar.aspx>.
62. The Clay Brick Association of Southern Africa. What is the difference between cement, concrete and mortar? [Internet]. Bedfordview: Association; 2020 [cited 2021 Jan 23]. from: <https://www.claybrick.org/what-difference-between-cement-concrete-and-mortar>.
63. อรรถนพ ประวัตินวงศ์. การพัฒนาซีเมนต์ไลม์มอร์ตาร์ สำหรับใช้ในประเทศไทย: Development of Cement-Lime Mortar to Use in Thailand. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. SUT7-712-41-12-22. เงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2541.
64. American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. ASTM C 270 - 14a. ASTM International. 2014.
65. Hassanein A, Shalaby E, Amer O, Ahmed R, Orban S, Fathi A, et al. Self-Leveling Mortar: Why and How?. Paper Presented at Resilience Infrastructure Conference; 2016 Jun 1-4; London, England.
66. The Constructor Organization. Qualities and Properties of a good Mortar for Masonry Construction [Internet]. Oklahoma: Organization; 2020 [cited 2021 Jan 23]. from: <https://theconstructor.org/construction/mortar-qualities-properties/21455/>.
67. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวงศึกษาธิการ. หนังสือเรียนรายวิชาพื้นฐาน วิทยาศาสตร์ ชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 เล่ม 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ สกสค.ลาดพร้าว; 2561.

68. อนุสิษฐ์ เกื้อกุล. สารและการจำแนก [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.); 2561 [ปรับปรุงข้อมูลเมื่อวันที่ 26 ก.พ. 2561; สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7872-2018-02-26-08-48-26>.
69. MADHAV University. Types of Properties of Engineering Materials [Internet]. Rajasthan, India: University; 2021 [cited 2021 Jan 23]. from: <https://madhavuniversity.edu.in/types-of-properties-of-engg-materials.html>.
70. The Science Learning Hub. Properties of materials - introduction [Internet]. Hamilton, New Zealand: The University of Waikato Te Whare Wananga o Waikato; 2020 [cited 2021 Jan 23]. from: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/2659-properties-of-materials-introduction>.
71. The LibreTexts Organization. Physical and Chemical Properties of Matter [Internet]. California: California State University; 2020 [cited 2021 Jan 23]. from: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Supplemental_Modules_and_Websites_\(Inorganic_Chemistry\)/Chemical_Reactions/Properties_of_Matter](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Supplemental_Modules_and_Websites_(Inorganic_Chemistry)/Chemical_Reactions/Properties_of_Matter).
72. คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล. 120 ชิ้นเอกของศิริราช. กรุงเทพฯ: บริษัท แพลนพรีนซ์ดีจิ่ง จำกัด; 2551.
73. มหาวิทยาลัยมหิดล. Electron Microscope: กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้; 2564? [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.
74. กรองทิพย์ เต็มเกาะ. การทดสอบสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2555;60(190):9-11.
75. สมจิตร พุฒดี. การวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: บริษัท อีพีจี อินโนเวชัน เซ็นเตอร์ จำกัด; 2564? [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <http://www.eic.co.th/Portals/4/download/Thermal%20conductivity%20measurement.pdf>.
76. Bird RB, Steward WE, Lightfoot EN. Transport Phenomena. 2nd edition. USA: John Wiley & Sons Inc; 2007.

77. ไทย. กฎหมาย, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 113 ตอนพิเศษ 21 ง ลงวันที่ 17 กรกฎาคม 2539. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร สัมประสิทธิ์การบังแดดของหน้าต่าง และค่าตัวประกอบรังสีอาทิตย์. กรุงเทพฯ: คณะกรรมการกฤษฎีกา; 2539.
78. สมเกียรติ พิกุลแก้ว. สมบัติของสารและการจำแนก [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ; 2545 [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <https://www.nectec.or.th/schoolnet/library/create-web/10000/science/10000-4849.html>.
79. สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X ray Fluorescence Spectroscopy) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สมาคม; 2564? [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <https://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>.
80. ศันศินีย์ รักไทยเจริญชีพ. ประโยชน์ จากเอกซเรย์ ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2558;63(197):38-40.
81. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. การวิเคราะห์ตัวอย่าง (Sample Analysis) [อินเทอร์เน็ต]. เชียงใหม่: ภาควิชาธรณีวิทยา; 2538 [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2538/geol1038py_ch4.pdf.
82. ศรัญญา พรหมโคตร. การวิเคราะห์ทางธรณีเคมี: Geochemical Analysis. ขอนแก่น: หจก. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา; 2554.
83. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland - Cement Clinker Using X - Ray Powder Diffraction Analysis. ASTM C 1365 - 98. ASTM International. 1998.
84. นมนต์ หิรัญ. หลักการของ Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy และการเตรียมตัวอย่าง. ปทุมธานี: สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; [ม.ป.ป.].
85. Boss CB, Fredeen KJC. Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. USA: PerkinElmer Instruments; 2004.
86. ลาวัลย์ ศรีพงษ์. เทคนิค ICP - MS ในงานเภสัชวิเคราะห์: ICP - MS Technique in Pharmaceutical Analysis. วารสารไทยเภสัชวิทยานพ. 2552;4(3):1-19.

87. Seubert A. On-line Coupling of Ion Chromatography with ICP-AES and ICP-MS. *TrAC Trends Anal Chem.* 2001;20(6-7):274-87.
88. สถาบันยานยนต์. สมบัติเชิงกลของโลหะ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ศูนย์สารสนเทศยานยนต์; 2553 [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <https://data.thaiauto.or.th/component/content/article/24-technology/auto-technology/303-2010-11-11-09-19-57.html>.
89. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวงศึกษาธิการ. คู่มือครู รายวิชาเพิ่มเติม วิทยาศาสตร์ โลก ดาราศาสตร์ และอวกาศ เล่ม 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ สกสค.ลาดพร้าว; 2560.
90. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สมบัติทางกล (Mechanical Properties) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัย; 2549? [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~psuvanch/101-49-2-3mech1c.pdf>.
91. American Society for Testing and Materials. Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 - in. or [50 - mm] Cube Specimens). ASTM C 109/C109 M - 07. ASTM International. 2007.
92. American Society for Testing and Materials. Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars. ASTM C 348 - 02. ASTM International. 2002.
93. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM C 192/C 192M - 00. ASTM International. 2000.
94. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39/C39M - 09a. ASTM International. 2009.
95. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C 496/C 496M - 04. ASTM International. 2004.
96. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third - Point Loading). ASTM C 78 - 02. ASTM International. 2002.
97. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center - Point Loading). ASTM C293/C293M - 16. ASTM International. 2016.

98. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. C4: Hardened Concrete Properties [อินเทอร์เน็ต]. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา; ม.ป.ป. [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ม.ค. 2564]. จาก: <https://civil.eng.cmu.ac.th/courses/materials-testing/c4>.
99. กรมทางหลวง. วิธีการทดลองหาค่ารับแรงดัดของแท่งคอนกรีตรูปคานโดยวิธี Third - Point Loading. Test Number DH - T 305/2548: การทดลองที่ ทล. - ท. 305/2548. กรม. 2548.
100. Wang R, Zhang T, Wang P. Waste Printed Circuit Boards Nonmetallic Powder as Admixture in Cement Mortar. *Materials and Structures*. 2012;45(10):1439-45.
101. Lakshmi R, Nagan S. Utilization of Waste E Plastic Particles in Cementitious Mixtures. *Journal of Structural Engineering*. 2011;31(1):26-35.
102. Kumar KS, Baskar K. Response Surfaces for Fresh and Hardened Properties of Concrete with E-Waste (HIPS). *Journal of Waste Management*. 2014;34(11). Article ID 517219.
103. Iniyana LNA, Shanmugasundaram M. Utilization of Waste Printed Circuit Boards as Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete. *PAIDEUMA Journal of Research*. 2010;16(3):28-32.
104. Wang R, Meyer C. Performance of Cement Mortar Made with recycled High Impact Polystyrene. *Cement and Concrete Composites*. 2012;Vol.34:975-81.
105. Schneider EL, Veit HM, Hartmann WL, Stolz CM, Robinson LC, Oliveira CT, et al. Cement Matrix Containing Lightweight Aggregates Based on Non-Metallic Fraction Printed Circuit Boards (NMFPCB'S). *Journal of Materials Research and Technology*. 2021; PII: S2238-7854(21)00918-2.
106. Lakshmi R, Nagan S. Studies on Concrete Containing E-plastic Waste. *Int J Environ Sci*. 2010;1(3):270-81.
107. Lakshmi R, Nagan S. Investigations on Durability Characteristics of E-plastic Waste Incorporated Concrete. *Asian J Civ Eng Build House*. 2011;12(6):773-87.
108. Kumar KS, Baskar K. Recycle of E-plastic Waste as a Construction Material in Developing Countries. *J Mater Cycles Waste Manag*. 2014; DOI 10.1007/s10163-014-0303-5.

109. Mohamad SSB. Potential Reuse of Recovered Nonmetallic Printed Circuit Board Waste as Sand Replacement in Construction Materials [Master's Thesis]. Johor: Universiti Teknologi Malaysia; 2014.
110. Ban BC, Song JY, Lim JY, Wang SK, An KG, Kim DS. Studies on the Reuse of Waste Printed Circuit Board as an Additive for Cement Mortar. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.* 2005;40(3):645-56. PMID: 15756975; DOI: 10.1081/ese-200046618.
111. Huang HL, Hwang CL, Peng SS, Wang EH, Chen CT, Chiang CC. Assessing the Adequacy of Concrete Mixes Utilizing PCB Powders. *Journal of Testing and Evaluation.* 2014;42(1).
112. Nagajothi PG, Kala F. A study on Reusing Waste Printed Circuit Board Powders and Chips in Cement Mixes. *International Journal of Earth Sciences and Engineering.* 2015;8(2):460-4. ISSN 0974-5904.
113. Sawitri Pianchaiyaphum, Suphaphat Kwonpongsagoon, Premrudee Kanchanapiya, Chakrapan Tuakta. Recycling of Non – metallic Residue from Waste Printed Circuit Boards to Produce Interlocking Concrete Blocks. *International Journal of Environmental Science and Development.* 2021;12(6): doi: 10.18178/ijesd.2021.12.6.1336.
114. Pongsatorn Saengpaeng, Premrudee Kanchanapiya, Chakrapan Tuakta. Properties of Alternative Concrete Mixed with Non – metallic Powder from Recycled Printed Circuit Boards. Paper Presented at IASTEM International Conference; 2017 July 5-6; Bangkok, Thailand.
115. Pothinathan SKM, Muthukannan M, Ganaraj SC. Examination of Strength and Durability Properties of E-Concrete Using PCB as Coarse Aggregate. *International Journal of Engineering and Advance Technology (IJEAT).* 2019;9(1S4): ISSN: 2249 - 8958.
116. Ahirwar S, Malviya P, Patidar V, Singh VK. An Experimental Study on Concrete by using EWaste as Partial Replacement for Course Aggregate. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering.* 2016;3(4): ISSN (online): 2349 - 784X.

117. Saranya K, Muthuswamy PV, Sathiyaraj R, Sudharsan A. An Experimental Study on Partial Replacement for Coarse Aggregate by E-waste in Concrete. IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2017;4(3): ISSN (Online) 2348 - 7968.
118. Kumar SK, Gandhimathi R, Baskar K. Assessment of Heavy Metals in Leachate of Concrete Made With E-Waste Plastic. ASTM International: Advances in Civil Engineering Materials. 2016; 5(1): DOI:10.1520/ACEM20160003.
119. Shilpa B, Deshpande G, Nagarajan K, Narwade R. E-Waste: An Alternative to Partial Replacement of Coarse Aggregate in Concrete. International journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2019; 8(7): ISSN:2278 – 0181.
120. Damal VS, Londhe SS, Mane AB. Utilization of Electronic Waste Plastic in Concrete. Journal of Engineering Research and Application. 2015; 5(4 part - 2): 35 – 8: ISSN: 2248 – 9622.
121. Prasanna PK, Rao MK. Strength Variations in Concrete by Using E-Waste as Coarse Aggregate. International Journal of Education and Applied Research. 2014;4(SPL – 2): ISSN: 2348 – 0033(Online).
122. Dawande B, Jain D, Singh G. Utilization of E-Waste as a Partial Replacement of Coarse Aggregate in Concrete. International Journal for Scientific Research & Development. 2015; 3(11): ISSN(Online): 2321 - 0613.
123. Nagajothi PG, Felixkala T. A Study on Reusing Waste Printed Circuit Board Powder and Chips in Cement Mixes. Paper Presented at 2nd International Conference on Earth Sciences and Engineering [ICEE 2015]; 2015 March; Hyderabad, India: DOI:10.13140/RG.2.2.33947.57125.
124. Huang HL, Hwang CL, Peng SS, Wang E, Chen CT, Chiang CC. Assessing the Adequacy of Concrete Mixes Utilizing PCB Powders. Journal of Testing and Evaluation. 2014; 42(1): DOI:10.1520/JTE20120218.
125. Wang R, Zhang T, Wang P. Waste Printed Circuit Boards Nonmetallic Powder as Admixture in Cement Mortar. Journal of Materials and Structures. 2012; 45(10): p 1439 – 45: DOI:10.1617/s11527-012-9843-0.
126. Suchithra S, Indu VS. Study on Replacement of Coarse Aggregate by E-waste in Concrete. International Journal of Technical Research and Applications. 2015;3(4).

127. Shamili SR, Natarajan C, Karthikeyan J. An Overview of Electronic Waste as Aggregate in Concrete. *International Journal of Structural and Construction Engineering*. 2017; 11(10).
128. Mishra SM, Trivedi MK. Utilization of PCB and Cost-Reduction of Concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018;13(14):pp.11461-5: ISSN 0973-4562.
129. Priya TK, Santhosh R. Experimental Study on Strength of Concrete by Partial Replacement of E-waste. *International Journal of Innovative Research in Technology*. 2020;6(11):pp.324-7: ISSN: 2349-6002.
130. Manjunath ABT. Partial Replacement of E-plastic Waste as Coarse Aggregate in Concrete. *Procedia Environmental Science*. 2016;6(11):pp.324-7: ISSN: 2349-6002.
131. บริษัท ทีพีโอ โพลีน จำกัด (มหาชน). ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราทีพีโอ สีแดง [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: บริษัทฯ; 2564? [สืบค้นเมื่อวันที่ 16 มี.ค. 2564]. จาก: <https://www.tpipolene.co.th/th/brochure-cement#>.
132. บริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด. Sika® ViscoCrete®-10 TH: น้ำยาผสมคอนกรีตคุณภาพสูงประเภทลดน้ำอย่างมาก [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: บริษัทฯ; 2564? [สืบค้นเมื่อวันที่ 16 มี.ค. 2564]. จาก: <https://tha.sika.com/th/construction/concrete-admixtures/admixtures-for-ready-mix-concrete/sika-viscocrete-10th.html>.
133. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. ASTM C 305 - 06. ASTM International. 2006.
134. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. พลาสติกแรป (Plastic Wrap) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2557 [ปรับปรุงข้อมูลเมื่อวันที่ 30 ต.ค. 2559; สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เม.ย. 2564]. จาก: <https://www.nstda.or.th/th/nstda-knowledge/1829-plastic-wrap>.
135. บริษัท เอส.เอ.เจ.ไอ.(ประเทศไทย) จำกัด. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Calipers) คืออะไร และ ใช้งานยังไง [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: AdminSAJI; 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เม.ย. 2564]. จาก: <https://sa-thai.com/%E0%B9%80%E0%B8%A7%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B9%80%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%9B%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C-vernier-calipers-%E0%B8%84/>.

136. JEOL Ltd. JCM-6000 Benchtop SEM [Internet]. Tokyo: Company; 2020? [Cited on 25 April 2021]. จาก: https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/product_file/file/p_jcm-6000_en_catalogue.pdf.
137. Quorum Technologies Ltd. Q150R Plus – Rotary Pumped Coater [Internet]. United Kingdom: Company; 2021? [Cited on 25 April 2021]. จาก: <https://www.quorumtech.com/q150r-rotary-pumped-sputter-coatercarbon-coater/>.
138. NETZSCH Ltd. Heat Flow Meter – HFM 436 Lambda [Internet]. Germany: Company; 2021? [Cited on 25 April 2021]. จาก: https://www.strath.ac.uk/media/departments/mechanicalengineering/compositematerials/officedocuments/HFM_436_Lambda_brochure.pdf.
139. Geotek Ltd. Integration of the Olympus Vanta [Internet]. United Kingdom: Company; 2021? [Cited on 25 April 2021]. จาก: <https://www.geotek.co.uk/2018/02/07/integration-of-the-olympus-vanta/>.
140. Bruker Ltd. X-ray Diffraction (XRD) D8 Advance [Internet]. Germany: Company; 2021? [Cited on 25 April 2021]. จาก: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-scattering-systems/x-ray-diffractometers/d8-advance-family/d8-advance.html>.
141. กองวิจัยและพัฒนาประมงทะเล. ร่างคู่มือการปฏิบัติงานวิเคราะห์โลหะหนักในสัตว์น้ำ. กรุงเทพฯ: กลุ่มตรวจสอบและรับรองแหล่งประมง, กองวิจัยและพัฒนาประมงทะเล, กรมประมง, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; 2562.
142. PerkinElmer Ltd. Titan MPS 16 Position Microwave Sample Preparation System [Internet]. USA: Company; 2021? [Cited on 25 April 2021]. จาก: <https://www.perkinelmer.com/th/product/titan-16-pos-sys-230v-50-60hz-n3130100?searchTerm=N3130100&pushBackUrl=?searchName=N3130100>.
143. PerkinElmer Ltd. Optima 8x00 Series ICP Optical Emission Spectrometers [Internet]. Singapore: Company; 2021? [Cited on 25 April 2021]. จาก: https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/BRO_Optima-8x00-Family.pdf.
144. PerkinElmer Ltd. NexION 2000S ICP Mass Spectrometer [Internet]. USA: Company; 2021? [Cited on 25 April 2021]. จาก: <https://www.perkinelmer.com/th/product/nexion-2000s-icp-ms-configuration-n8150047>.

145. American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Standard Sand. ASTM C 778 - 02. ASTM International. 2002.
146. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements. ASTM C 1708 / C 1708 M - 16. ASTM International. 2016.
147. American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. ASTM C 191 - 08. ASTM International. 2008.
148. บริษัท วอลเทคโนโลยี จำกัด. K R U 3 Value ต้องรู้ก่อนซื้อแผ่นฉนวน [อินเทอร์เน็ต]. นครปฐม: ศูนย์บริการลูกค้าสัมพันธ์; 2564? [สืบค้นเมื่อวันที่ 13 เม.ย. 2565]. จาก: <https://wtg.co.th/th/news/wall-tech-knowledge/491-k-r-u-3-value-must-know-before-buying-sandwich-panel-insulation>.
149. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วงกลม. ค่าการนำความร้อน ของ คอนกรีตบล็อก [อินเทอร์เน็ต]. สระบุรี: สำนักงานขาย; 2564 [สืบค้นเมื่อวันที่ 13 เม.ย. 2565]. จาก: <http://www.wkblock.com/block-talk/64-thermalconductivityblocks.html>.
150. บริษัท พอร์ทัลการก่อสร้างและซ่อมแซม จำกัด. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่างๆ ค่าการนำความร้อนและลักษณะอื่นๆ ของวัสดุก่อสร้างเป็นตัวเลข [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการลูกค้าสัมพันธ์; 2564? [สืบค้นเมื่อวันที่ 13 เม.ย. 2565]. จาก: <https://kapus.ru/th/coefficient-of-thermal-conductivity-of-various-materials-thermal-conductivity-and-other-characteristics-of-building-materials-in-figures.html>.
151. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5147 (พ.ศ. 2562) เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2561.
152. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5145 (พ.ศ. 2562) เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกกลวงรับน้ำหนัก. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2562.
153. บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดักส์ จำกัด (มหาชน). ความรู้เกี่ยวกับอิฐมวลเบา [อินเทอร์เน็ต]. พระนครศรีอยุธยา: สำนักงาน; 2564? [สืบค้นเมื่อวันที่ 13 เม.ย. 2565]. จาก: <https://qcon.co.th/th/what-is-alc-block->

154. สายสุนีย์ จำรัส, บุรฉัตร ฉัตรวีระ. อิทธิพลของสัดส่วนผสมที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 2553;33(2):pp.145-62.
155. British and European Standard. Characterisation of Waste Leaching Compliance Test for Leaching of Granular Waste Materials and Sludges. BS EN 12457. British Standards Institution. 2000.
156. Europe. Quality Assurance. European Quality Assurance Scheme for Compost and Digest. EU: ECN - QAS; 2014.
157. ไทย. กฎหมาย, โครงการฉลากเขียว. ข้อกำหนดฉลากเขียวผลิตภัณฑ์วัสดุก่อผนัง (bricks and blocks). กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2561.
158. ไทย. กฎหมาย, ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ; 2547.
159. ไทย. กฎหมาย, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯลฯ. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5792 (พ.ศ. 2563) เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์เทปรับระดับไหลได้ด้วยตัวเอง. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2563.



ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน
และค่าการต้านทานความร้อนของมอร์ตาร์ปรับระดับ
(Thermal Conductivity and Thermal Resistivity of Self-leveling Mortar)



ที่ อว 0307/ 14011

ถึง นายอิทธิวัชร ศิริวัฒน์ศานนท์

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ ตัวอย่าง มอร์ตาร์ปรับระดับ PK-01 หมายเลขปฏิบัติการ L64/07049.2 จำนวน 1 ตัวอย่าง ตามคำร้อง เลขรับ L64/07049 วันที่ 9 กันยายน 2564

พร้อมนี้ได้แนบผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ มาเพื่อทราบ



กองวัสดุวิศวกรรม
โทร. 0 2201 7130
โทรสาร 0 2201 7127
E-mail : physics@dss.go.th

หน้า 1/2

ภาพที่ ก - 1 หนังสือรายงานผลการทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อนของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

แบบ วศ.1



กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง	เครื่องหมาย / ตรา	หมายเลขปฏิบัติการ
มอร์ตาร์ปรับระดับ PK-01	-	กรมวิ:L64/07049.2

ผลการทดสอบ

สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 24.3 องศาเซลเซียส, วัดต่อเมตร-เคลวิน	0.304
สภาพต้านทานความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 24.3 องศาเซลเซียส, ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์	0.106

ชื่อผู้ให้บริการ	นายธิดิวรรค์ ศิริวัฒนศาสนันท์
ที่อยู่ผู้ให้บริการ	613/7 ถนนพหลโยธิน ตำบลปากเพรียว อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี 18000
ลักษณะตัวอย่าง	แผ่นวัสดุแข็ง ขนาดโดยประมาณ 300 มิลลิเมตร x 300 มิลลิเมตร x 36 มิลลิเมตร
วันที่ทดสอบ	27 กันยายน 2564
วิธีทดสอบ	ASTM C 518-17

ผู้รับรอง

(นายอนันท์ บ่อมประสิทธิ์)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

ผู้รายงาน

(นางสาวเสาวลักษณ์ อุกฤษฏาวิทิต)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดถ่ายไปรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2

ภาพที่ ก - 2 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อนของตัวอย่างมอร์ตาร์
ปรับระดับ C100 S1000 P0000



ที่ อว 0307/ **14012**

ถึง นายอิติวัชร ศิริวัฒนศานนท์

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ ตัวอย่าง มอเตอร์ปรับ
ระดับ PK-02 หมายเลขปฏิบัติการ L64/07049.3 จำนวน 1 ตัวอย่าง ตามคำร้อง เลขรับ L64/07049 วันที่ 9
กันยายน 2564

พร้อมนี้ได้แนบผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ มาเพื่อทราบ



กองวัสดุวิศวกรรม
โทร. 0 2201 7130
โทรสาร 0 2201 7127
E-mail : physics@dss.go.th

หน้า 1/2

ภาพที่ ก - 3 หนังสือรายงานผลการทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อนของ
ตัวอย่างมอเตอร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

แบบ วต.1



กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง
มอร์ตาร์ปรับระดับ PK-02

เครื่องหมาย / ตรา

หมายเลขปฏิบัติการ

กรมวิ L64/07049.3

ผลการทดสอบ

สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 23.1 องศาเซลเซียส, วัดต่อเมตร-เคลวิน	0.358
สภาพต้านทานความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 23.1 องศาเซลเซียส, ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์	0.098

ชื่อผู้ให้บริการ	นายธิตวิฑูร์ ศิริวัฒนทานนท์
ที่อยู่ผู้ให้บริการ	613/7 ถนนพหลโยธิน ตำบลปากเพรียว อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี 18000
ลักษณะตัวอย่าง	แผ่นวัสดุแข็ง ขนาดโดยประมาณ 300 มิลลิเมตร x 300 มิลลิเมตร x 36 มิลลิเมตร
วันที่ทดสอบ	28 กันยายน 2564
วิธีทดสอบ	ASTM C 518-17

ผู้รับรอง

(นายอนนท์ ป้อมประสิทธิ์)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

ผู้รายงาน

(นางสาวเสาวลักษณ์ อุกฤษฏาวิฑิต)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

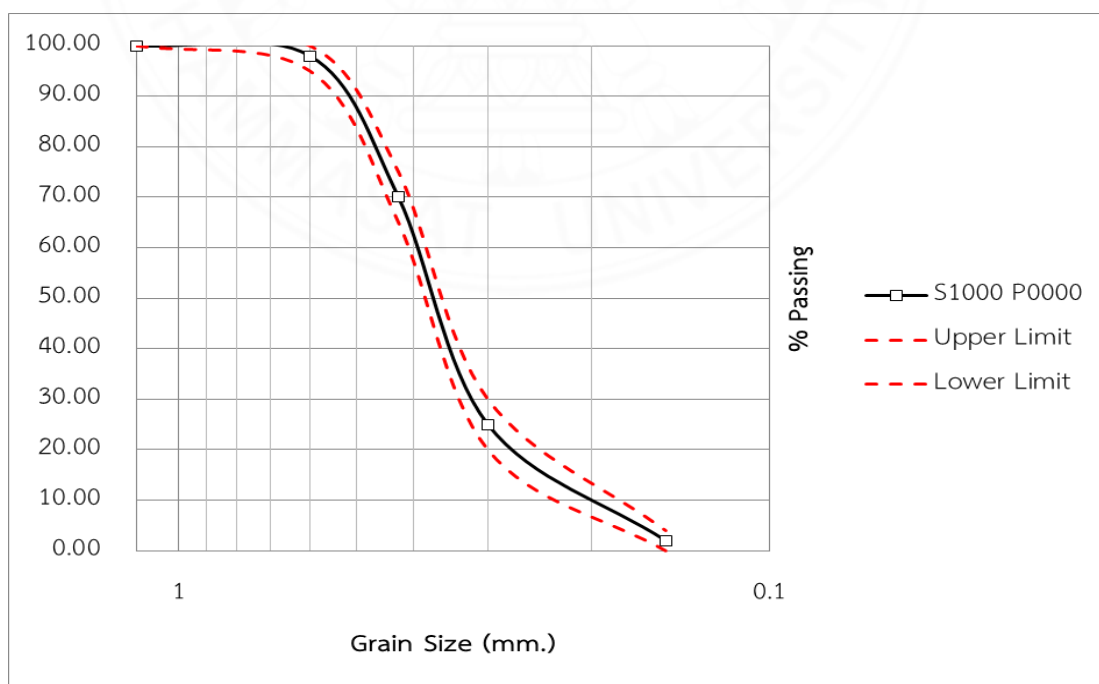
หน้า 2/2

ภาพที่ ก - 4 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าการต้านทานความร้อนของ ตัวอย่างมอร์ตาร์
ปรับระดับ C100 S0800 P0200

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบการวิเคราะห์ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียด
(Sieve Analysis of Fine Aggregate)

ตารางที่ ข - 1 ผลการทดสอบขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียด S1000 P0000

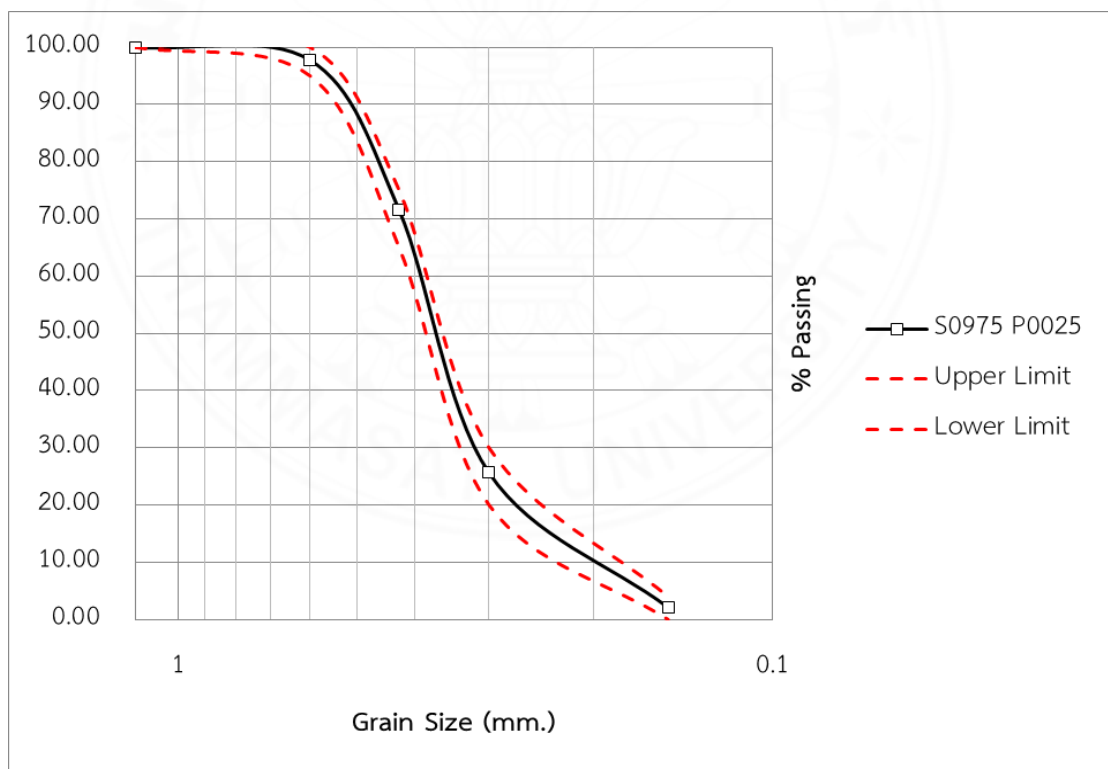
No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.00	0.00	0.00	100.00
30	0.600	20.00	2.00	2.00	98.00
40	0.425	280.00	28.00	30.00	70.00
50	0.300	450.00	45.00	75.00	25.00
100	0.150	230.00	23.00	98.00	2.00
pan	-	20.00	2.00	100.00	0.00
Total		1,000.00	100.00		



ภาพที่ ข - 1 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S1000 P0000

ตารางที่ ข - 2 ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด S0975 P0025

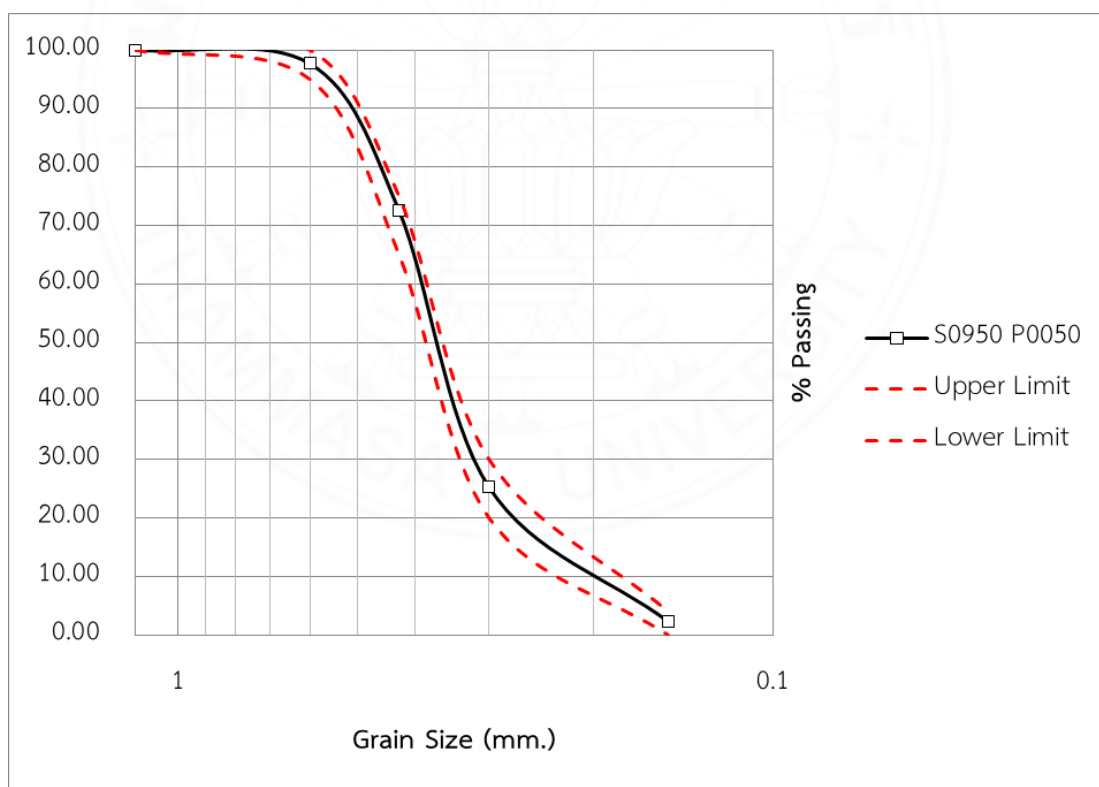
No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.0	0.00	0.00	100.00
30	0.600	30.9	2.25	2.25	97.75
40	0.425	360.2	26.20	28.45	71.55
50	0.300	631.5	45.93	74.38	25.62
100	0.150	323.2	23.51	97.89	2.11
pan	-	29.0	2.11	100.00	0.00
Total		1,374.80	100.00		



ภาพที่ ข - 2 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S0975 P0025

ตารางที่ ข - 3 ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด S0950 P0050

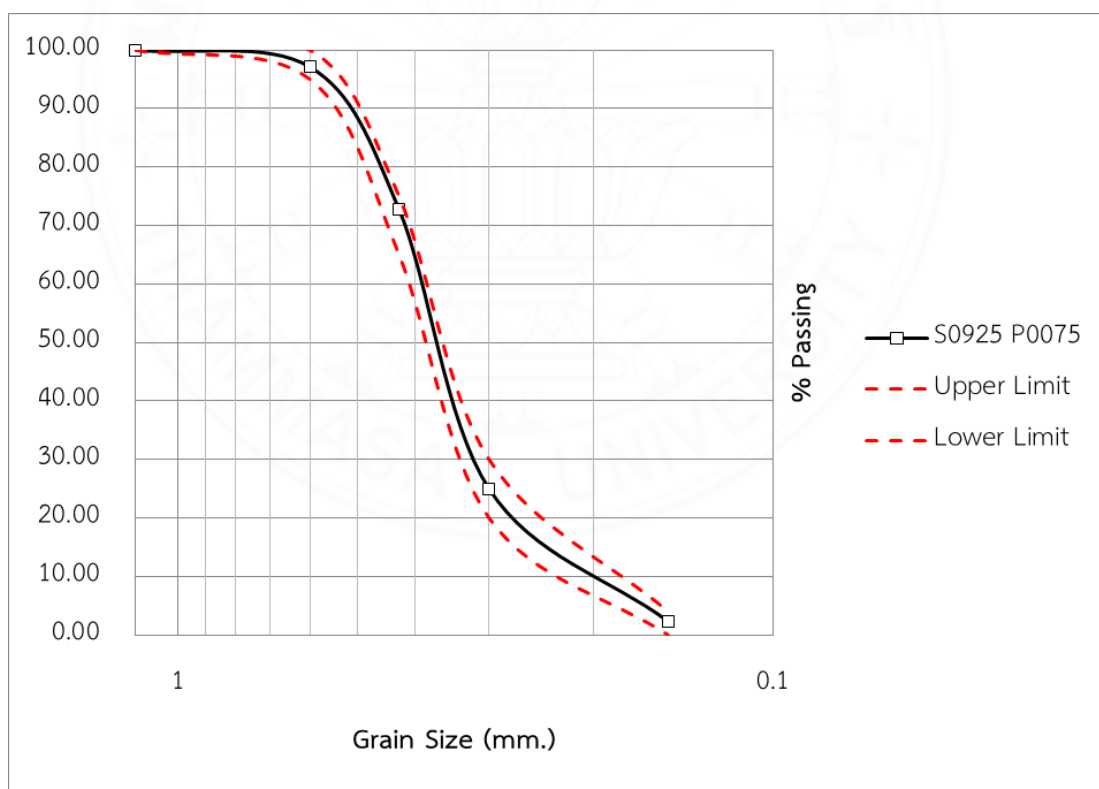
No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.00	0.00	0.00	100.00
30	0.600	32.20	2.34	2.34	97.66
40	0.425	345.30	25.12	27.46	72.54
50	0.300	650.20	47.30	74.76	25.24
100	0.150	315.50	22.95	97.71	2.29
pan	-	31.50	2.29	100.00	0.00
Total		1,374.70	100.00		



ภาพที่ ข - 3 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S0950 P0050

ตารางที่ ข - 4 ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด S0925 P0075

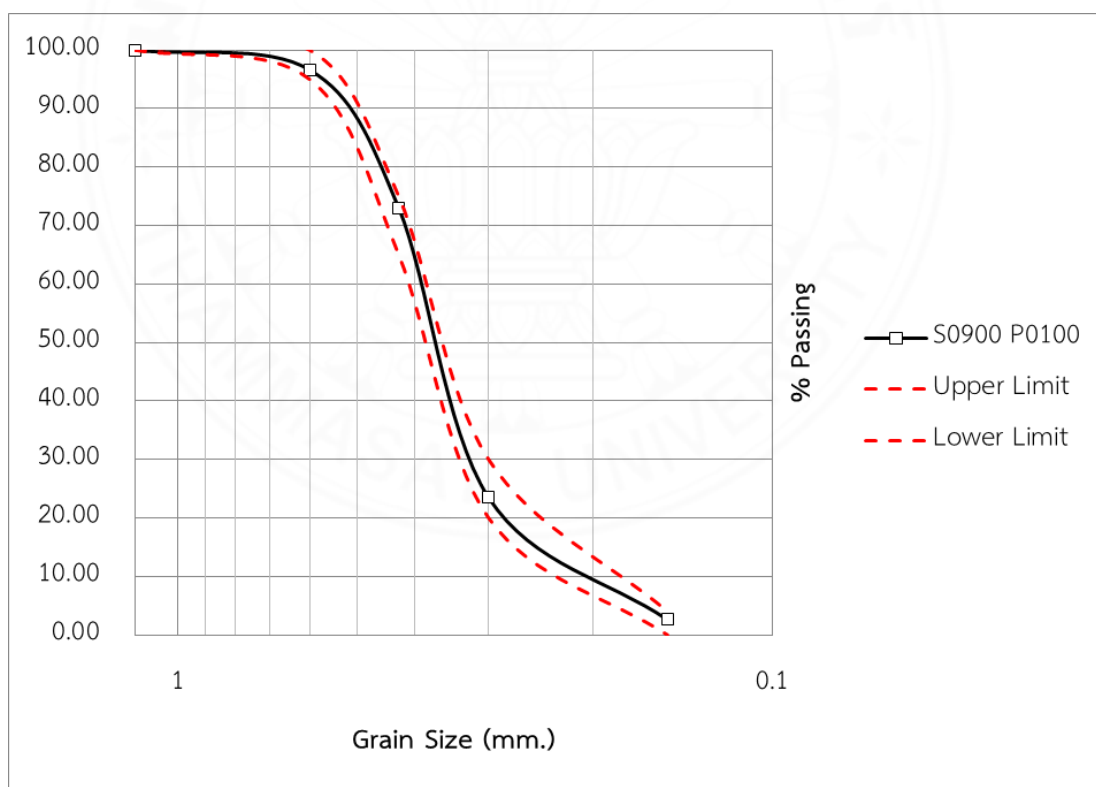
No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.0	0.00	0.00	100.00
30	0.600	39.7	2.89	2.89	97.11
40	0.425	334.5	24.34	27.22	72.78
50	0.300	657.1	47.81	75.03	24.97
100	0.150	311.2	22.64	97.67	2.33
pan	-	32.0	2.33	100.00	0.00
Total		1,374.50	100.00		



ภาพที่ ข - 4 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S0925 P0075

ตารางที่ ข - 5 ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด S0900 P0100

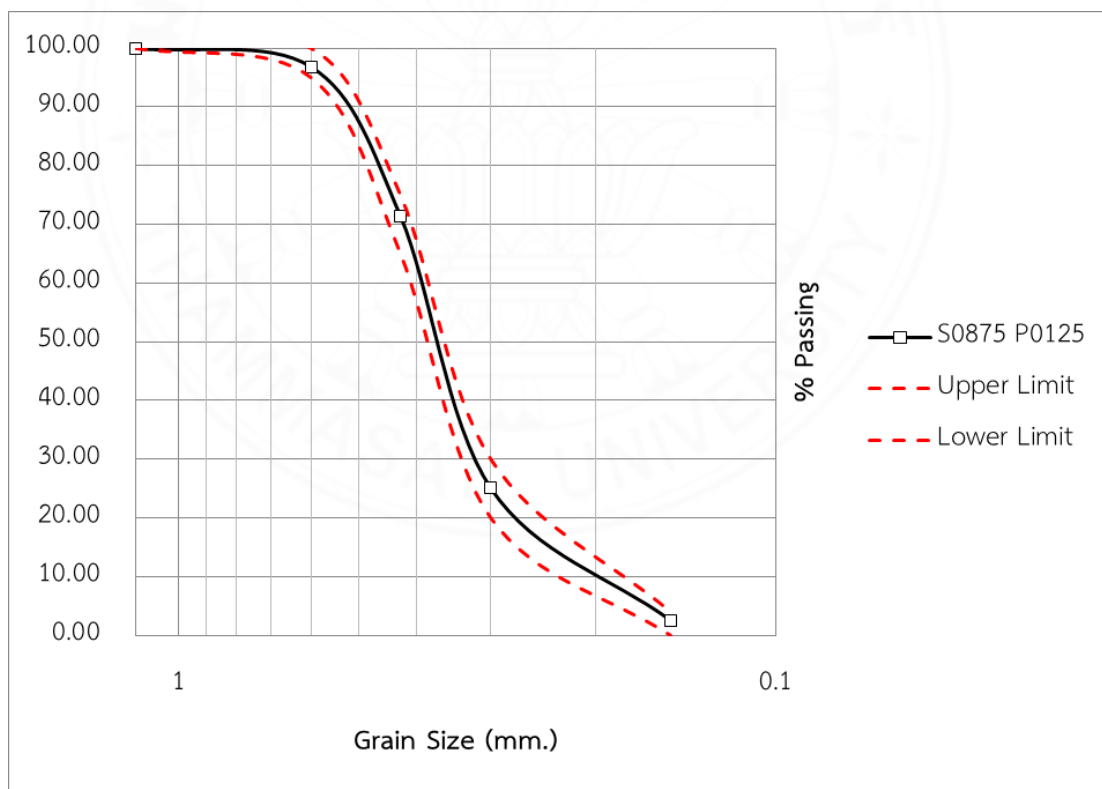
No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.00	0.00	0.00	100.00
30	0.600	46.50	3.38	3.38	96.62
40	0.425	324.50	23.60	26.98	73.02
50	0.300	681.20	49.55	76.53	23.47
100	0.150	287.10	20.88	97.41	2.59
pan	-	35.60	2.59	100.00	0.00
Total		1,374.90	100.00		



ภาพที่ ข - 5 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S0900 P0100

ตารางที่ ข - 6 ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด S0875 P0125

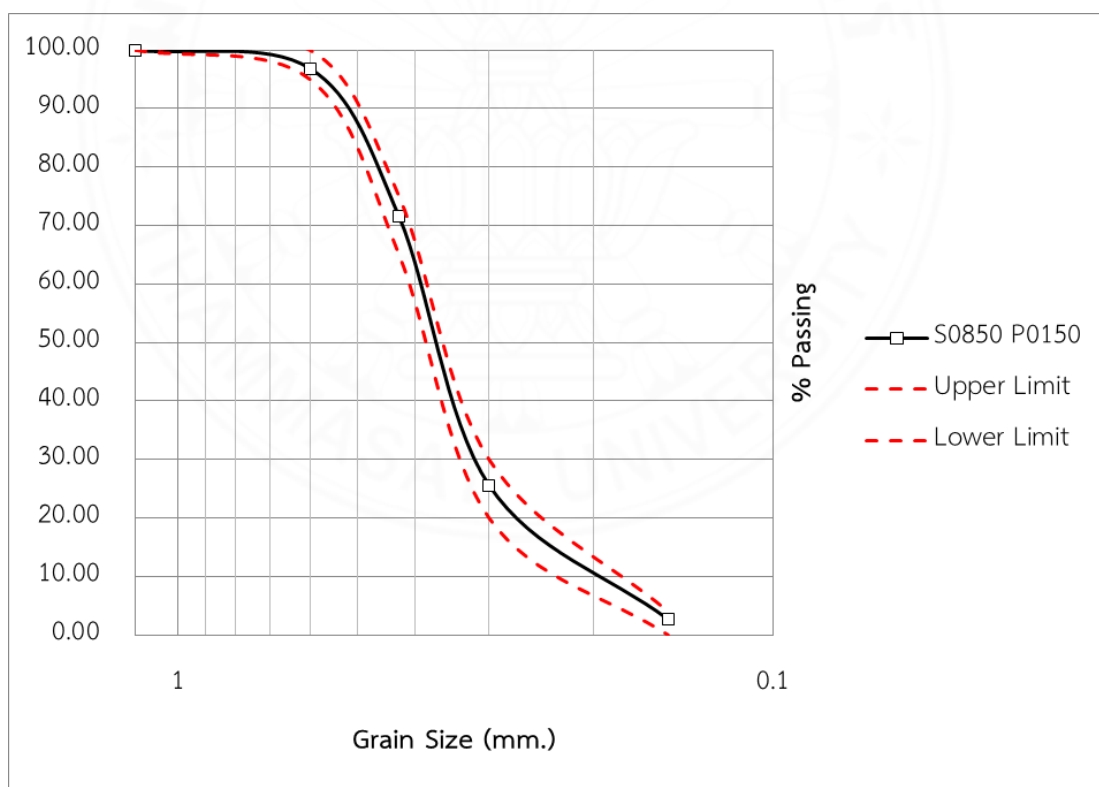
No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.0	0.00	0.00	100.00
30	0.600	43.6	3.17	3.17	96.83
40	0.425	349.5	25.42	28.59	71.41
50	0.300	637.4	46.36	74.95	25.05
100	0.150	309.3	22.50	97.45	2.55
pan	-	35.1	2.55	100.00	0.00
Total		1,374.90	100.00		



ภาพที่ ข - 6 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S0875 P0125

ตารางที่ ข - 7 ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด S0850 P0150

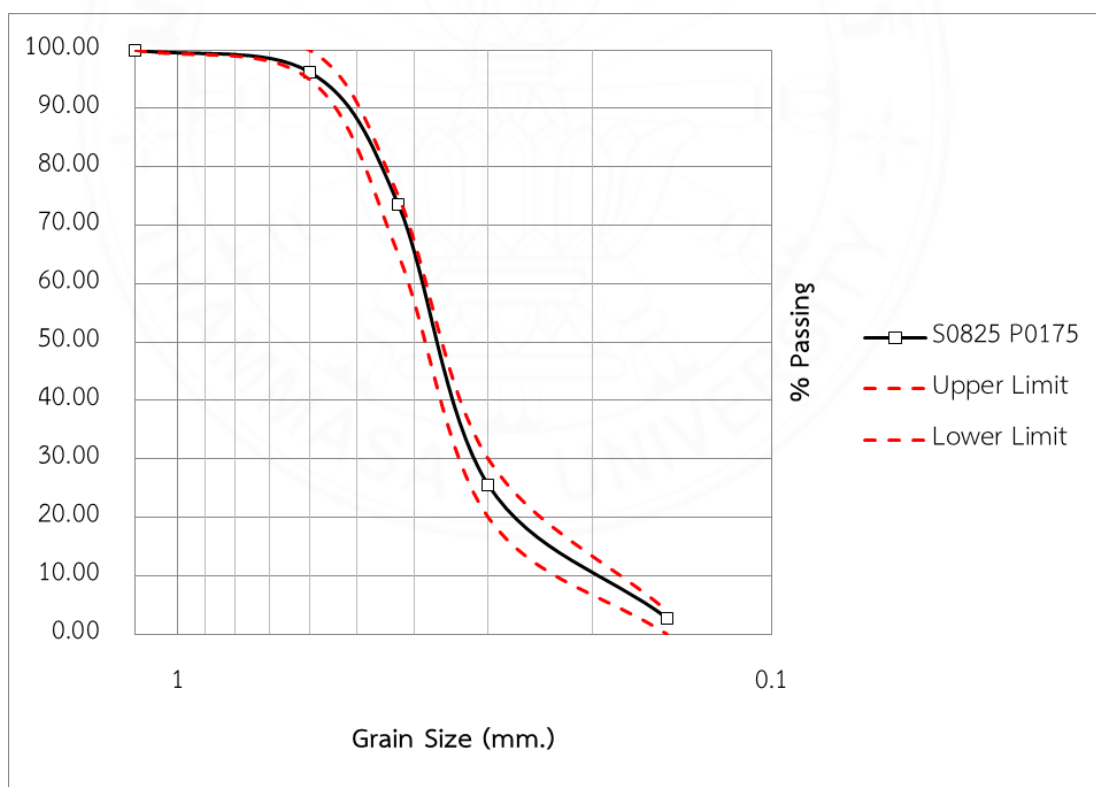
No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.0	0.00	0.00	100.00
30	0.600	43.0	3.13	3.13	96.87
40	0.425	348.1	25.32	28.45	71.55
50	0.300	631.7	45.95	74.40	25.60
100	0.150	315.3	22.94	97.34	2.66
pan	-	36.6	2.66	100.00	0.00
Total		1,374.70	100.00		



ภาพที่ ข - 7 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S0850 P0150

ตารางที่ ข - 8 ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด S0825 P0175

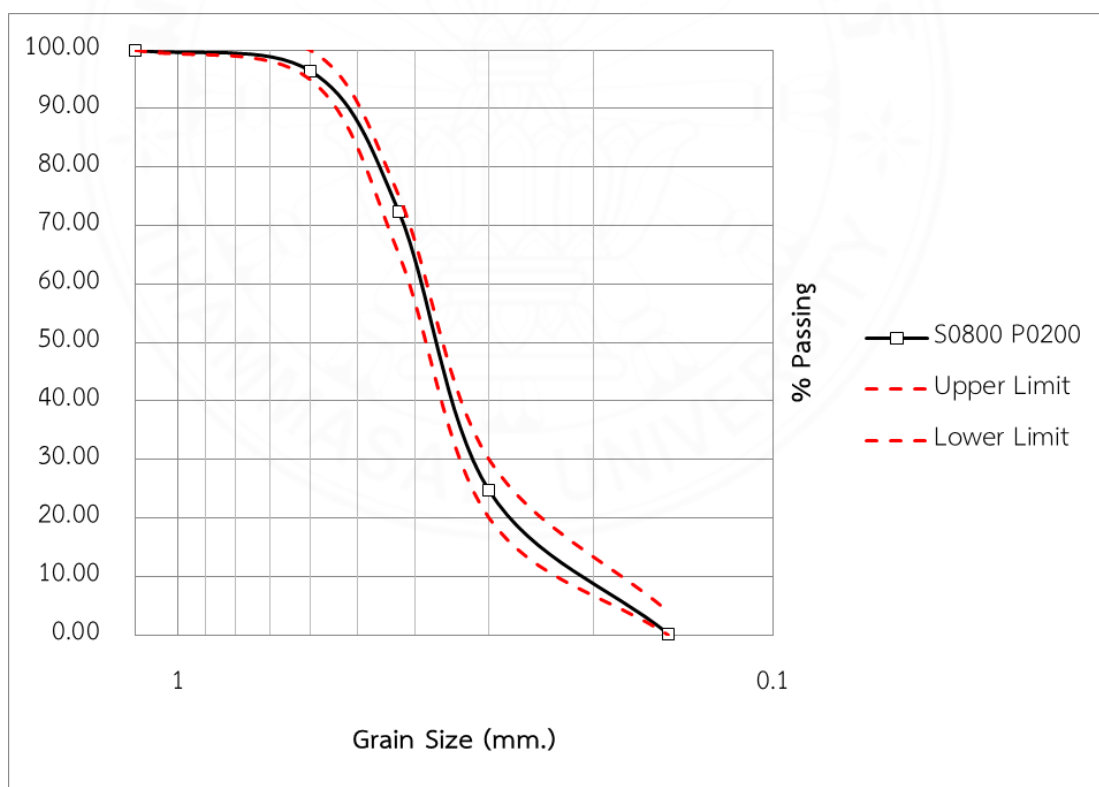
No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.0	0.00	0.00	100.00
30	0.600	51.5	3.75	3.75	96.25
40	0.425	312.3	22.72	26.46	73.54
50	0.300	659.5	47.97	74.43	25.57
100	0.150	313.3	22.79	97.22	2.78
pan	-	38.2	2.78	100.00	0.00
Total		1,374.80	100.00		



ภาพที่ ข - 8 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S0825 P0175

ตารางที่ ข - 9 ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด S0800 P0200

No.	Grain Size (mm)	Weight Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
16	1.180	0.00	0.00	0.00	100.00
30	0.600	48.50	3.53	3.53	96.47
40	0.425	332.70	24.20	27.73	72.27
50	0.300	654.20	47.59	75.32	24.68
100	0.150	336.20	24.46	99.78	0.22
pan	-	3.00	0.22	100.00	0.00
Total		1,374.60	100.00		



ภาพที่ ข - 9 กราฟการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด S0800 P0200

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบหาน้ำหนักและค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ
(Weight and Density of Self - leveling Mortar)

ตารางที่ ค - 1 ผลการทดสอบหาน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix Code	Weight (g)									
	Water Curing					Air Curing				
	3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
C100 S1000 P0000	225.8	236.8	242.5	264.5	276.0	214.8	225.5	236.8	256.0	260.7
	235.6	236.5	247.6	259.8	278.1	220.3	235.5	238.7	262.5	257.7
	232.4	231.7	245.8	262.0	274.5	225.6	224.5	243.5	252.8	263.6
	232.0	242.7	255.5	272.5	279.7	221.3	236.9	247.6	260.5	262.4
ค่าเฉลี่ย	231.5	236.9	247.9	264.7	277.1	220.5	230.6	241.7	258.0	261.1
C100 S0975 P0025	253.1	268.7	262.9	263.8	267.7	252.2	251.0	255.2	253.1	249.3
	256.5	264.6	264.9	261.4	265.4	251.4	266.6	255.1	253.4	257.3
	256.5	256.6	265.4	255.9	258.4	251.4	249.0	258.5	237.9	258.1
	252.8	252.6	262.1	264.6	264.9	253.4	246.8	261.1	229.2	249.4
ค่าเฉลี่ย	254.7	260.6	263.8	261.4	264.1	252.1	253.4	257.5	243.4	253.5
C100 S0950 P0050	251.1	254.2	245.3	244.8	253.5	245.4	247.5	247.8	237.3	250.1
	256.1	253.0	253.9	249.3	259.5	250.9	251.3	232.8	234.9	250.2
	247.4	255.5	255.1	254.3	257.8	249.1	256.9	232.0	239.6	248.2
	257.9	253.8	247.2	259.0	265.5	248.6	250.7	244.7	233.4	245.5
ค่าเฉลี่ย	253.1	254.1	250.4	251.9	259.1	248.5	251.6	239.3	236.3	248.5

ตารางที่ ค - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบหาน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix Code	Weight (g)									
	Water Curing					Air Curing				
	3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
C100 S0925 P0075	250.2	247.0	255.3	248.7	259.0	245.3	245.9	237.9	239.3	241.8
	250.1	251.6	256.1	250.3	258.4	246.5	243.6	250.3	242.2	248.3
	253.4	252.1	262.4	255.0	254.9	243.4	245.4	233.3	241.6	248.5
	252.5	252.6	260.0	250.4	258.2	248.7	244.0	230.5	247.2	248.4
ค่าเฉลี่ย	251.6	250.8	258.5	251.1	257.6	246.0	244.7	238.0	242.6	246.8
C100 S0900 P0100	233.5	250.2	255.8	254.7	257.7	233.6	241.8	233.1	218.4	242.9
	238.3	250.9	249.3	242.1	243.3	227.8	241.1	228.1	240.3	237.4
	227.2	254.4	260.3	238.5	259.9	230.3	243.2	240.7	229.2	235.8
	232.7	251.9	256.8	255.1	261.9	240.7	233.7	240.9	238.4	237.4
ค่าเฉลี่ย	232.9	251.9	255.6	247.6	255.7	233.1	240.0	235.7	231.6	238.4
C100 S0875 P0125	241.9	243.1	236.3	251.1	250.5	220.8	241.3	235.1	228.3	231.3
	236.3	251.1	249.5	253.2	251.3	232.7	248.2	229.1	237.1	232.0
	243.5	249.8	239.8	251.2	254.8	233.2	247.6	244.5	231.8	236.4
	237.9	248.1	252.2	250.6	253.3	227.7	231.4	235.7	221.1	233.3
ค่าเฉลี่ย	239.9	248.0	244.5	251.5	252.5	228.6	242.1	236.1	229.6	233.3
C100 S0850 P0150	220.0	241.9	230.6	236.4	231.0	221.3	219.9	226.7	228.5	226.3
	221.6	243.4	239.7	240.5	232.8	224.2	228.1	224.5	230.4	227.2
	232.0	240.5	237.7	248.3	226.9	220.8	236.1	228.3	230.4	220.3
	232.9	237.5	240.7	244.7	236.6	218.4	222.2	220.5	231.7	218.3
ค่าเฉลี่ย	226.6	240.8	237.2	242.5	231.8	221.2	226.6	225.0	230.3	223.0

ตารางที่ ค - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบหาน้ำหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix Code	Weight (g)									
	Water Curing					Air Curing				
	3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
C100 S0825 P0175	233.5	227.0	237.1	247.5	225.9	217.2	220.2	215.8	224.7	214.8
	238.2	235.3	234.9	241.9	243.9	214.4	221.2	218.0	222.8	216.6
	224.8	227.7	233.1	242.5	237.3	213.2	220.3	216.7	225.2	218.2
	230.9	234.9	228.3	239.9	236.1	219.5	217.2	216.0	224.2	223.5
ค่าเฉลี่ย	231.9	231.2	233.4	243.0	235.8	216.1	219.7	216.6	224.2	218.3
C100 S0800 P0200	225.2	225.1	227.6	242.4	241.2	209.9	213.6	207.9	217.2	205.0
	230.5	223.8	232.3	238.7	240.7	211.0	205.1	207.3	210.2	216.0
	224.8	221.4	230.1	241.4	237.7	204.2	207.0	209.1	215.2	208.3
	226.0	227.7	228.2	237.6	228.4	202.8	198.5	207.2	214.4	213.5
ค่าเฉลี่ย	226.6	224.5	229.6	240.0	237.0	207.0	206.1	207.9	214.3	210.7

ตารางที่ ค - 2 ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix Code	ความหนาแน่น (g/cm ³)									
	Water Curing					Air Curing				
	3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
C100 S1000 P0000	1.81	1.89	1.94	2.12	2.21	1.72	1.80	1.89	2.05	2.09
	1.88	1.89	1.98	2.08	2.22	1.76	1.88	1.91	2.10	2.06
	1.86	1.85	1.97	2.10	2.20	1.80	1.80	1.95	2.02	2.11
	1.86	1.94	2.04	2.18	2.24	1.77	1.90	1.98	2.08	2.10
ค่าเฉลี่ย	1.85	1.90	1.98	2.12	2.22	1.76	1.84	1.93	2.06	2.09
C100 S0975 P0025	2.02	2.15	2.10	2.11	2.14	2.02	2.01	2.04	2.02	1.99
	2.05	2.12	2.12	2.09	2.12	2.01	2.13	2.04	2.03	2.06
	2.05	2.05	2.12	2.05	2.07	2.01	1.99	2.07	1.90	2.06
	2.02	2.02	2.10	2.12	2.12	2.03	1.97	2.09	1.83	2.00
ค่าเฉลี่ย	2.04	2.09	2.11	2.09	2.11	2.02	2.03	2.06	1.95	2.03
C100 S0950 P0050	2.01	2.03	1.96	1.96	2.03	1.96	1.98	1.98	1.90	2.00
	2.05	2.02	2.03	1.99	2.08	2.01	2.01	1.86	1.88	2.00
	1.98	2.04	2.04	2.03	2.06	1.99	2.06	1.86	1.92	1.99
	2.06	2.03	1.98	2.07	2.12	1.99	2.01	1.96	1.87	1.96
ค่าเฉลี่ย	2.03	2.03	2.00	2.01	2.07	1.99	2.01	1.91	1.89	1.99
C100 S0925 P0075	2.00	1.98	2.04	1.99	2.07	1.96	1.97	1.90	1.91	1.93
	2.00	2.01	2.05	2.00	2.07	1.97	1.95	2.00	1.94	1.99
	2.03	2.02	2.10	2.04	2.04	1.95	1.96	1.87	1.93	1.99
	2.02	2.02	2.08	2.00	2.07	1.99	1.95	1.84	1.98	1.99
ค่าเฉลี่ย	2.01	2.01	2.07	2.01	2.06	1.97	1.96	1.90	1.94	1.97

ตารางที่ ค - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix Code	ความหนาแน่น (g/cm ³)									
	Water Curing					Air Curing				
	3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
C100 S0900 P0100	1.87	2.00	2.05	2.04	2.06	1.87	1.93	1.86	1.75	1.94
	1.91	2.01	1.99	1.94	1.95	1.82	1.93	1.82	1.92	1.90
	1.82	2.04	2.08	1.91	2.08	1.84	1.95	1.93	1.83	1.89
	1.86	2.02	2.05	2.04	2.10	1.93	1.87	1.93	1.91	1.90
ค่าเฉลี่ย	1.86	2.01	2.04	1.98	2.05	1.86	1.92	1.89	1.85	1.91
C100 S0875 P0125	1.94	1.94	1.89	2.01	2.00	1.77	1.93	1.88	1.83	1.85
	1.89	2.01	2.00	2.03	2.01	1.86	1.99	1.83	1.90	1.86
	1.95	2.00	1.92	2.01	2.04	1.87	1.98	1.96	1.85	1.89
	1.90	1.98	2.02	2.00	2.03	1.82	1.85	1.89	1.77	1.87
ค่าเฉลี่ย	1.92	1.98	1.96	2.01	2.02	1.83	1.94	1.89	1.84	1.87
C100 S0850 P0150	1.76	1.94	1.84	1.89	1.85	1.77	1.76	1.81	1.83	1.81
	1.77	1.95	1.92	1.92	1.86	1.79	1.82	1.80	1.84	1.82
	1.86	1.92	1.90	1.99	1.82	1.77	1.89	1.83	1.84	1.76
	1.86	1.90	1.93	1.96	1.89	1.75	1.78	1.76	1.85	1.75
ค่าเฉลี่ย	1.81	1.93	1.90	1.94	1.85	1.77	1.81	1.80	1.84	1.78
C100 S0825 P0175	1.87	1.82	1.90	1.98	1.81	1.74	1.76	1.73	1.80	1.72
	1.91	1.88	1.88	1.94	1.95	1.72	1.77	1.74	1.78	1.73
	1.80	1.82	1.86	1.94	1.90	1.71	1.76	1.73	1.80	1.75
	1.85	1.88	1.83	1.92	1.89	1.76	1.74	1.73	1.79	1.79
ค่าเฉลี่ย	1.85	1.85	1.87	1.94	1.89	1.73	1.76	1.73	1.79	1.75

ตารางที่ ค - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix Code	ความหนาแน่น (g/cm ³)									
	Water Curing					Air Curing				
	3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
C100 S0800 P0200	1.80	1.80	1.82	1.94	1.93	1.68	1.71	1.66	1.74	1.64
	1.84	1.79	1.86	1.91	1.93	1.69	1.64	1.66	1.68	1.73
	1.80	1.77	1.84	1.93	1.90	1.63	1.66	1.67	1.72	1.67
	1.81	1.82	1.83	1.90	1.83	1.62	1.59	1.66	1.72	1.71
ค่าเฉลี่ย	1.81	1.80	1.84	1.92	1.90	1.66	1.65	1.66	1.71	1.69

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ (X - Ray Fluorescence)

ตารางที่ ง - 1 ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา TPI สีแดง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		Light Element (เลขอะตอม < 11)	โลหะแอลคาไลน์		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ	
			Potassium	Rubidium	Magnesium	Calcium
			โพแทสเซียม	รูบิเดียม	แมกนีเซียม	แคลเซียม
		K	Rb	Mg	Ca	
1	ปูนซีเมนต์ 1	50.76328	0.25710	0.00373	<LOD	40.88159
2	ปูนซีเมนต์ 2	52.64135	0.24093	0.00227	<LOD	38.86590
3	ปูนซีเมนต์ 3	60.99321	0.17821	<LOD	<LOD	33.72882
4	ปูนซีเมนต์ 4	53.80657	0.26212	0.00299	<LOD	39.94649
5	ปูนซีเมนต์ 5	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา TPI สีแดง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ		โลหะแอกทีไนต์		โลหะหนัก
		Strontium	Barium	Thorium	Uranium	Vanadium
		สตรอนเซียม	แบเรียม	ทอเรียม	ยูเรเนียม	วานาเดียม
		Sr	Ba	Th	U	V
1	ปูนซีเมนต์ 1	0.02861	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
2	ปูนซีเมนต์ 2	0.02947	<LOD	0.00688	<LOD	<LOD
3	ปูนซีเมนต์ 3	0.02756	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
4	ปูนซีเมนต์ 4	0.03001	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
5	ปูนซีเมนต์ 5	1.44652	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา TPI สีแดง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนัก				
		Yttrium	Niobium	Molybdenum	Tin	Tungsten
		อิตเทรียม	ไนโอเบียม	โมลิบดีนัม	ดีบุก	ทังสแตน
		Y	Nb	Mo	Sn	W
1	ปูนซีเมนต์ 1	0.00219	<LOD	0.00604	<LOD	<LOD
2	ปูนซีเมนต์ 2	0.00357	<LOD	0.0033	<LOD	<LOD
3	ปูนซีเมนต์ 3	0.00463	<LOD	0.00548	<LOD	<LOD
4	ปูนซีเมนต์ 4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
5	ปูนซีเมนต์ 5	3.11463	2.67727	<LOD	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา TPI สีแดง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Titanium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt
		ไทเทเนียม	โครเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	โคบอลต์
		Ti	Cr	Mn	Fe	Co
1	ปูนซีเมนต์ 1	0.38992	0.04782	0.06427	1.93037	0.03608
2	ปูนซีเมนต์ 2	0.21413	<LOD	0.05689	1.99449	<LOD
3	ปูนซีเมนต์ 3	<LOD	<LOD	0.04846	1.78808	<LOD
4	ปูนซีเมนต์ 4	<LOD	<LOD	0.07103	1.85853	<LOD
5	ปูนซีเมนต์ 5	<LOD	<LOD	17.57451	9.63024	10.97951

ตารางที่ ง - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา TPI สีแดง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Nickel	Copper	Zinc	Zirconium	Silver
		นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี	เซอร์โคเนียม	เงิน
		Ni	Cu	Zn	Zr	Ag
1	ปูนซีเมนต์ 1	<LOD	0.01737	0.02063	0.00486	<LOD
2	ปูนซีเมนต์ 2	<LOD	0.01441	0.01791	0.00540	<LOD
3	ปูนซีเมนต์ 3	<LOD	0.02270	0.01804	0.00692	<LOD
4	ปูนซีเมนต์ 4	<LOD	0.01693	0.01782	0.00892	<LOD
5	ปูนซีเมนต์ 5	<LOD	<LOD	<LOD	3.45431	15.49885

ตารางที่ ง - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา TPI สีแดง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				กึ่งโลหะ
		Cadmium	Mercury	Lead	Bismuth	Aluminium
		แคดเมียม	ปรอท	ตะกั่ว	บิสมัท	อลูมิเนียม
		Cd	Hg	Pb	Bi	Al
1	ปูนซีเมนต์ 1	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.63087
2	ปูนซีเมนต์ 2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.71963
3	ปูนซีเมนต์ 3	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
4	ปูนซีเมนต์ 4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.46448
5	ปูนซีเมนต์ 5	20.34294	<LOD	<LOD	13.24783	<LOD

ตารางที่ ง - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา TPI สีแดง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		กึ่งโลหะ			อโลหะ	
		Silicon	Arsenic	Antimony	Phosphorus	Sulphur
		ซิลิคอน	สารหนู	พลวง	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน
		Si	As	Sb	P	S
1	ปูนซีเมนต์ 1	4.06998	<LOD	<LOD	<LOD	0.84531
2	ปูนซีเมนต์ 2	4.32985	<LOD	<LOD	<LOD	0.85362
3	ปูนซีเมนต์ 3	2.46619	<LOD	<LOD	<LOD	0.71171
4	ปูนซีเมนต์ 4	2.73524	<LOD	<LOD	<LOD	0.77886
5	ปูนซีเมนต์ 5	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา TPI สีแดง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)
		อโลหะ
		Selenium
		ซีลีเนียม
		Se
1	ปูนซีเมนต์ 1	<LOD
2	ปูนซีเมนต์ 2	<LOD
3	ปูนซีเมนต์ 3	<LOD
4	ปูนซีเมนต์ 4	<LOD
5	ปูนซีเมนต์ 5	2.03341

ตารางที่ ง - 2 ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		Light Element (เลขอะตอม < 11)	โลหะแอลคาไลน์		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ	
			Potassium	Rubidium	Magnesium	Calcium
			โพแทสเซียม	รูบิเดียม	แมกนีเซียม	แคลเซียม
		K	Rb	Mg	Ca	
1	WPCB Powder 1	73.38671	<LOD	0.69074	<LOD	10.01679
2	WPCB Powder 2	52.19241	<LOD	0.66640	<LOD	15.98234
3	WPCB Powder 3	69.46911	<LOD	0.67586	<LOD	11.26888
4	WPCB Powder 4	66.73177	<LOD	0.69075	<LOD	14.33938
5	WPCB Powder 5	78.26917	<LOD	0.65152	<LOD	10.27186

ตารางที่ ง - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ		โลหะแอกทีไนต์		โลหะหนัก
		Strontium	Barium	Thorium	Uranium	Vanadium
		สตรอนเซียม	แบเรียม	ทอเรียม	ยูเรเนียม	วานาเดียม
		Sr	Ba	Th	U	V
1	WPCB Powder 1	0.12183	0.67053	0.00485	<LOD	<LOD
2	WPCB Powder 2	0.11995	0.73415	<LOD	<LOD	<LOD
3	WPCB Powder 3	0.12298	0.56478	0.00719	<LOD	<LOD
4	WPCB Powder 4	0.12225	0.66798	<LOD	<LOD	<LOD
5	WPCB Powder 5	0.11947	<LOD	0.00763	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนัก				
		Yttrium	Niobium	Molybdenum	Tin	Tungsten
		อิตเทรียม	ไนโอเบียม	โมลิบดีนัม	ดีบุก	ทังสแตน
		Y	Nb	Mo	Sn	W
1	WPCB Powder 1	<LOD	0.01442	0.0063	0.01682	<LOD
2	WPCB Powder 2	<LOD	0.01342	0.00425	0.01407	0.00991
3	WPCB Powder 3	<LOD	0.0133	0.00477	<LOD	<LOD
4	WPCB Powder 4	<LOD	0.01423	0.00499	0.02456	<LOD
5	WPCB Powder 5	<LOD	0.0145	0.00525	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Titanium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt
		ไทเทเนียม	โครเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	โคบอลต์
		Ti	Cr	Mn	Fe	Co
1	WPCB Powder 1	0.29556	<LOD	<LOD	0.22982	<LOD
2	WPCB Powder 2	0.25890	0.03640	<LOD	0.23945	0.00875
3	WPCB Powder 3	0.25394	0.02748	<LOD	0.22955	<LOD
4	WPCB Powder 4	0.23715	0.04850	<LOD	0.22808	<LOD
5	WPCB Powder 5	0.28391	0.03664	<LOD	0.20839	<LOD

ตารางที่ ง - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Nickel	Copper	Zinc	Zirconium	Silver
		นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี	เซอร์โคเนียม	เงิน
		Ni	Cu	Zn	Zr	Ag
1	WPCB Powder 1	0.00924	0.15896	0.00440	0.00678	<LOD
2	WPCB Powder 2	0.00407	0.10266	<LOD	0.00559	<LOD
3	WPCB Powder 3	0.00420	0.15790	0.00542	0.00501	<LOD
4	WPCB Powder 4	0.00805	0.15690	<LOD	0.00688	<LOD
5	WPCB Powder 5	<LOD	0.18416	<LOD	0.00572	<LOD

ตารางที่ ง - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				กึ่งโลหะ
		Cadmium	Mercury	Lead	Bismuth	Aluminium
		แคดเมียม	ปรอท	ตะกั่ว	บิสมัท	อลูมิเนียม
		Cd	Hg	Pb	Bi	Al
1	WPCB Powder 1	<LOD	0.02496	0.01779	0.23031	4.91244
2	WPCB Powder 2	<LOD	0.01784	0.02098	0.22290	10.72584
3	WPCB Powder 3	<LOD	0.02129	0.01907	0.22532	5.87035
4	WPCB Powder 4	<LOD	0.02336	0.01899	0.23791	5.45054
5	WPCB Powder 5	<LOD	0.0198	0.02066	0.22607	3.09268

ตารางที่ ง - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		กึ่งโลหะ			อโลหะ	
		Silicon	Arsenic	Antimony	Phosphorus	Sulphur
		ซิลิคอน	สารหนู	พลวง	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน
		Si	As	Sb	P	S
1	WPCB Powder 1	9.08657	<LOD	<LOD	<LOD	0.08350
2	WPCB Powder 2	18.49158	<LOD	<LOD	<LOD	0.12082
3	WPCB Powder 3	10.87850	<LOD	<LOD	<LOD	0.16711
4	WPCB Powder 4	10.77418	<LOD	0.01897	<LOD	0.18680
5	WPCB Powder 5	6.40395	<LOD	<LOD	<LOD	0.17177

ตารางที่ ง - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)
		อโลหะ
		Selenium
		ซีลีเนียม
		Se
1	WPCB Powder 1	0.01069
2	WPCB Powder 2	0.00731
3	WPCB Powder 3	0.00802
4	WPCB Powder 4	0.00778
5	WPCB Powder 5	0.00685

ตารางที่ ง - 3 ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		Light Element (เลขอะตอม < 11)	โลหะแอลคาไลน์		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ	
			Potassium	Rubidium	Magnesium	Calcium
			โพแทสเซียม	รูบิเดียม	แมกนีเซียม	แคลเซียม
		K	Rb	Mg	Ca	
1	WPCB Granular 1	95.83038	<LOD	0.59605	<LOD	0.67774
2	WPCB Granular 2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
3	WPCB Granular 3	91.10996	<LOD	0.54206	<LOD	1.29516
4	WPCB Granular 4	84.04816	<LOD	0.52680	<LOD	2.41067
5	WPCB Granular 5	88.27536	<LOD	0.54092	<LOD	1.36873
6	WPCB Granular 6	88.58077	<LOD	0.57179	<LOD	0.93991

ตารางที่ ง - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ		โลหะแอกทีไนต์		โลหะหนัก
		Strontium	Barium	Thorium	Uranium	Vanadium
		สตรอนเซียม	แบเรียม	ทอเรียม	ยูเรเนียม	วานาเดียม
		Sr	Ba	Th	U	V
1	WPCB Granular 1	0.00989	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
2	WPCB Granular 2	3.70723	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
3	WPCB Granular 3	0.00907	<LOD	0.00354	<LOD	<LOD
4	WPCB Granular 4	0.00880	0.30825	<LOD	<LOD	<LOD
5	WPCB Granular 5	0.00839	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
6	WPCB Granular 6	0.00495	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจระอเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนัก				
		Yttrium	Niobium	Molybdenum	Tin	Tungsten
		อิตเทรียม	ไนโอเบียม	โมลิบดีนัม	ดีบุก	ทังสแตน
		Y	Nb	Mo	Sn	W
1	WPCB Granular 1	<LOD	0.01437	0.00673	<LOD	<LOD
2	WPCB Granular 2	<LOD	<LOD	8.21085	<LOD	<LOD
3	WPCB Granular 3	<LOD	0.01189	0.00458	<LOD	<LOD
4	WPCB Granular 4	<LOD	0.01061	0.0036	<LOD	0.00451
5	WPCB Granular 5	<LOD	0.01166	0.00401	<LOD	0.00408
6	WPCB Granular 6	<LOD	0.01277	0.00464	0.00671	0.00439

ตารางที่ ง - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจระอเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Titanium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt
		ไทเทเนียม	โครเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	โคบอลต์
		Ti	Cr	Mn	Fe	Co
1	WPCB Granular 1	<LOD	0.01787	<LOD	0.04208	<LOD
2	WPCB Granular 2	74.86261	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
3	WPCB Granular 3	0.09672	0.01160	0.01133	0.05177	0.00629
4	WPCB Granular 4	0.13856	0.01562	<LOD	0.06137	<LOD
5	WPCB Granular 5	<LOD	0.01162	0.01075	0.05565	<LOD
6	WPCB Granular 6	0.16394	0.01394	<LOD	0.04490	<LOD

ตารางที่ ง - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Nickel	Copper	Zinc	Zirconium	Silver
		นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี	เซอร์โคเนียม	เงิน
		Ni	Cu	Zn	Zr	Ag
1	WPCB Granular 1	0.00519	0.43439	0.00369	<LOD	<LOD
2	WPCB Granular 2	<LOD	<LOD	9.05845	<LOD	<LOD
3	WPCB Granular 3	0.00285	0.31944	<LOD	<LOD	<LOD
4	WPCB Granular 4	0.00329	0.37905	0.00274	<LOD	<LOD
5	WPCB Granular 5	0.00278	0.32444	0.00240	<LOD	<LOD
6	WPCB Granular 6	0.00395	0.34624	0.00264	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				กึ่งโลหะ
		Cadmium	Mercury	Lead	Bismuth	Aluminium
		แคดเมียม	ปรอท	ตะกั่ว	บิสมัท	อลูมิเนียม
		Cd	Hg	Pb	Bi	Al
1	WPCB Granular 1	<LOD	0.02127	0.02485	0.20934	1.02038
2	WPCB Granular 2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
3	WPCB Granular 3	<LOD	0.01984	0.02494	0.19073	3.38764
4	WPCB Granular 4	<LOD	0.01903	0.02504	0.18184	5.80508
5	WPCB Granular 5	<LOD	0.02003	0.02512	0.19088	5.51603
6	WPCB Granular 6	<LOD	0.02117	0.02871	0.20647	5.73034

ตารางที่ ง - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		กึ่งโลหะ			อโลหะ	
		Silicon	Arsenic	Antimony	Phosphorus	Sulphur
		ซิลิคอน	สารหนู	พลวง	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน
		Si	As	Sb	P	S
1	WPCB Granular 1	0.83125	<LOD	0.02867	0.15922	0.04674
2	WPCB Granular 2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
3	WPCB Granular 3	2.48621	<LOD	0.01313	0.34540	0.03813
4	WPCB Granular 4	5.56726	<LOD	0.01587	0.28096	0.16455
5	WPCB Granular 5	3.01988	<LOD	0.01670	0.51508	0.05763
6	WPCB Granular 6	2.58617	<LOD	0.01977	0.59700	0.08707

ตารางที่ ง - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)
		อโลหะ
		Selenium
		ซีลีเนียม
		Se
1	WPCB Granular 1	0.01990
2	WPCB Granular 2	4.16086
3	WPCB Granular 3	0.01773
4	WPCB Granular 4	0.01832
5	WPCB Granular 5	0.01786
6	WPCB Granular 6	0.02175

ตารางที่ ง - 4 ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		Light Element (เลขอะตอม < 11)	โลหะแอลคาไลน์		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ	
			Potassium	Rubidium	Magnesium	Calcium
			โพแทสเซียม	รูบิเดียม	แมกนีเซียม	แคลเซียม
		K	Rb	Mg	Ca	
1	WPCB Fiber 1	62.12004	<LOD	0.50028	<LOD	12.78982
2	WPCB Fiber 2	65.81918	<LOD	0.64998	<LOD	12.43366
3	WPCB Fiber 3	61.31213	<LOD	0.51856	<LOD	12.88174
4	WPCB Fiber 4	65.08283	<LOD	0.54241	<LOD	12.72561
5	WPCB Fiber 5	62.09427	<LOD	0.52360	<LOD	13.42243

ตารางที่ ง - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ		โลหะแอกทีไนต์		โลหะหนัก
		Strontium	Barium	Thorium	Uranium	Vanadium
		สตรอนเซียม	แบเรียม	ทอเรียม	ยูเรเนียม	วานาเดียม
		Sr	Ba	Th	U	V
1	WPCB Fiber 1	0.13691	<LOD	0.00388	<LOD	<LOD
2	WPCB Fiber 2	0.14857	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
3	WPCB Fiber 3	0.13562	0.29248	<LOD	<LOD	<LOD
4	WPCB Fiber 4	0.14068	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
5	WPCB Fiber 5	0.13909	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนัก				
		Yttrium	Niobium	Molybdenum	Tin	Tungsten
		อิตเทรียม	ไนโอเปียม	โมลิบดีนัม	ดีบุก	ทังสแตน
		Y	Nb	Mo	Sn	W
1	WPCB Fiber 1	<LOD	0.00991	0.00302	0.02239	0.00572
2	WPCB Fiber 2	<LOD	0.01453	0.00625	0.02729	0.00689
3	WPCB Fiber 3	<LOD	0.01037	0.00411	0.01649	0.00507
4	WPCB Fiber 4	<LOD	0.01073	0.00395	0.02336	0.00647
5	WPCB Fiber 5	<LOD	0.01093	0.00437	0.01928	<LOD

ตารางที่ ง - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Titanium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt
		ไทเทเนียม	โครเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	โคบอลต์
		Ti	Cr	Mn	Fe	Co
1	WPCB Fiber 1	0.32195	<LOD	0.01632	0.18432	<LOD
2	WPCB Fiber 2	0.38929	0.04381	<LOD	0.15401	<LOD
3	WPCB Fiber 3	0.38136	0.03261	0.01878	0.18748	<LOD
4	WPCB Fiber 4	0.36208	0.02847	<LOD	0.18568	<LOD
5	WPCB Fiber 5	0.40800	0.03137	<LOD	0.18475	<LOD

ตารางที่ ง - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Nickel	Copper	Zinc	Zirconium	Silver
		นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี	เซอร์โคเนียม	เงิน
		Ni	Cu	Zn	Zr	Ag
1	WPCB Fiber 1	0.00598	0.63942	<LOD	0.00660	<LOD
2	WPCB Fiber 2	0.00679	0.14006	<LOD	0.00702	<LOD
3	WPCB Fiber 3	0.00666	0.09610	<LOD	0.00780	<LOD
4	WPCB Fiber 4	0.00643	0.18152	<LOD	0.00694	<LOD
5	WPCB Fiber 5	0.00794	0.12909	<LOD	0.00746	<LOD

ตารางที่ ง - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				กึ่งโลหะ
		Cadmium	Mercury	Lead	Bismuth	Aluminium
		แคดเมียม	ปรอท	ตะกั่ว	บิสมัท	อลูมิเนียม
		Cd	Hg	Pb	Bi	Al
1	WPCB Fiber 1	0.00582	0.01554	0.01524	0.17255	8.31065
2	WPCB Fiber 2	<LOD	0.02314	0.01904	0.21693	7.35269
3	WPCB Fiber 3	<LOD	0.01691	0.01637	0.17023	8.65542
4	WPCB Fiber 4	<LOD	0.01555	0.02109	0.17158	7.04293
5	WPCB Fiber 5	<LOD	0.01579	0.02053	0.17085	7.95015

ตารางที่ ง - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		กึ่งโลหะ			อโลหะ	
		Silicon	Arsenic	Antimony	Phosphorus	Sulphur
		ซิลิคอน	สารหนู	พลวง	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน
		Si	As	Sb	P	S
1	WPCB Fiber 1	14.59128	<LOD	<LOD	<LOD	0.11493
2	WPCB Fiber 2	12.36142	<LOD	<LOD	<LOD	0.17207
3	WPCB Fiber 3	15.07048	<LOD	<LOD	<LOD	0.15713
4	WPCB Fiber 4	13.28826	<LOD	<LOD	<LOD	0.14801
5	WPCB Fiber 5	14.73353	<LOD	<LOD	<LOD	0.11985

ตารางที่ ง - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซากแมงวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)
		อโลหะ
		Selenium
		ซีลีเนียม
		Se
1	WPCB Fiber 1	0.00744
2	WPCB Fiber 2	0.00740
3	WPCB Fiber 3	0.00611
4	WPCB Fiber 4	0.00543
5	WPCB Fiber 5	0.00670

ตารางที่ ง - 5 ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		Light Element (เลขอะตอม < 11)	โลหะแอลคาไลน์		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ	
			Potassium	Rubidium	Magnesium	Calcium
			โพแทสเซียม	รูบิเดียม	แมกนีเซียม	แคลเซียม
		K	Rb	Mg	Ca	
1	Cement Paste 1	56.12703	2.38119	0.00899	<LOD	35.50392
2	Cement Paste 2	54.20343	2.57374	0.00978	<LOD	35.10814
3	Cement Paste 3	52.57962	0.15277	<LOD	<LOD	39.25304
4	Cement Paste 4	57.33085	0.14085	0.00120	<LOD	34.68817
5	Cement Paste 5	61.06855	0.21020	0.00248	<LOD	31.65703

ตารางที่ ง - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ		โลหะแอกทีไนต์		โลหะหนัก
		Strontium	Barium	Thorium	Uranium	Vanadium
		สตรอนเซียม	แบเรียม	ทอเรียม	ยูเรเนียม	วานาเดียม
		Sr	Ba	Th	U	V
1	Cement Paste 1	0.02825	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
2	Cement Paste 2	0.02856	<LOD	0.00702	<LOD	<LOD
3	Cement Paste 3	0.02547	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
4	Cement Paste 4	0.02585	<LOD	0.00588	<LOD	<LOD
5	Cement Paste 5	0.02995	<LOD	0.00594	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนัก				
		Yttrium	Niobium	Molybdenum	Tin	Tungsten
		อิตเทรียม	ไนโอเปียม	โมลิบดีนัม	ดีบุก	ทังสเทน
		Y	Nb	Mo	Sn	W
1	Cement Paste 1	<LOD	<LOD	0.00582	<LOD	<LOD
2	Cement Paste 2	0.00173	<LOD	0.00442	<LOD	<LOD
3	Cement Paste 3	0.00217	<LOD	0.00434	0.01217	<LOD
4	Cement Paste 4	0.00209	<LOD	0.00263	<LOD	<LOD
5	Cement Paste 5	0.00254	<LOD	0.00382	<LOD	<LOD

ตารางที่ ง - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Titanium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt
		ไทเทเนียม	โครเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	โคบอลต์
		Ti	Cr	Mn	Fe	Co
1	Cement Paste 1	0.27763	0.04344	<LOD	1.51287	<LOD
2	Cement Paste 2	0.20128	<LOD	0.04411	1.70214	<LOD
3	Cement Paste 3	0.31317	<LOD	0.06350	1.70403	<LOD
4	Cement Paste 4	0.22480	<LOD	0.05026	1.88443	<LOD
5	Cement Paste 5	<LOD	<LOD	0.04305	2.00998	<LOD

ตารางที่ ง - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				
		Nickel	Copper	Zinc	Zirconium	Silver
		นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี	เซอร์โคเนียม	เงิน
		Ni	Cu	Zn	Zr	Ag
1	Cement Paste 1	<LOD	0.01062	0.01816	0.00595	<LOD
2	Cement Paste 2	<LOD	0.01597	0.01974	0.00429	<LOD
3	Cement Paste 3	<LOD	0.01608	0.01921	0.00557	0.00779
4	Cement Paste 4	<LOD	0.01359	0.01628	0.00530	<LOD
5	Cement Paste 5	0.00809	0.01675	0.02122	0.00600	<LOD

ตารางที่ ง - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		โลหะหนักอันตราย				กึ่งโลหะ
		Cadmium	Mercury	Lead	Bismuth	Aluminium
		แคดเมียม	ปรอท	ตะกั่ว	บิสมัท	อลูมิเนียม
		Cd	Hg	Pb	Bi	Al
1	Cement Paste 1	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.34588
2	Cement Paste 2	0.00942	<LOD	<LOD	<LOD	0.50796
3	Cement Paste 3	0.01039	<LOD	<LOD	<LOD	0.65645
4	Cement Paste 4	<LOD	<LOD	0.00382	<LOD	0.62986
5	Cement Paste 5	<LOD	<LOD	0.00449	<LOD	0.45825

ตารางที่ ง - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)				
		กึ่งโลหะ			อโลหะ	
		Silicon	Arsenic	Antimony	Phosphorus	Sulphur
		ซิลิคอน	สารหนู	พลวง	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน
		Si	As	Sb	P	S
1	Cement Paste 1	2.50755	<LOD	<LOD	<LOD	1.22271
2	Cement Paste 2	3.82308	0.00192	<LOD	0.02988	1.70339
3	Cement Paste 3	4.30723	<LOD	0.02107	<LOD	0.84591
4	Cement Paste 4	4.16648	<LOD	<LOD	0.03746	0.77021
5	Cement Paste 5	3.65704	<LOD	0.01936	<LOD	0.77526

ตารางที่ ง - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (%)
		อโลหะ
		Selenium
		ซีลีเนียม
		Se
1	Cement Paste 1	<LOD
2	Cement Paste 2	<LOD
3	Cement Paste 3	<LOD
4	Cement Paste 4	<LOD
5	Cement Paste 5	<LOD

ภาคผนวก จ
ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X - Ray Diffraction)

ตารางที่ จ - 1 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ สีแดง

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	11.653 °	7.58799 Å	467.0	763.0	14.10%	11.653	466.759	0.093	0.0466
2	Peak #2	12.124 °	7.29392 Å	190.0	449.0	5.70%	12.124	189.689	0.165	0.0827
3	Peak #3	14.925 °	5.93085 Å	243.0	377.0	7.40%	14.925	243.295	0.109	0.0543
4	Peak #4	16.139 °	5.48756 Å	63.7	177.0	1.90%	16.139	63.666	0.232	0.1158
5	Peak #5	19.057 °	4.65329 Å	50.4	134.0	1.50%	19.057	50.375	0.158	0.0792
6	Peak #6	20.745 °	4.27834 Å	171.0	248.0	5.20%	20.745	170.860	0.087	0.0435
7	Peak #7	21.828 °	4.06840 Å	39.3	113.0	1.20%	21.828	39.279	0.110	0.0551
8	Peak #8	22.976 °	3.86773 Å	193.0	269.0	5.80%	22.976	193.152	0.143	0.0716
9	Peak #9	23.333 °	3.80928 Å	60.5	135.0	1.80%	23.333	60.549	0.160	0.0801

ตารางที่ จ - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ สีแดง

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
10	Peak #10	24.381 °	3.64786 Å	72.5	147.0	2.20%	24.381	72.522	0.220	0.1102
11	Peak #11	25.235 °	3.52630 Å	92.2	170.0	2.80%	25.235	92.190	0.325	0.1626
12	Peak #12	25.551 °	3.48344 Å	66.6	144.0	2.00%	25.551	66.574	0.241	0.1203
13	Peak #13	25.703 °	3.46320 Å	52.7	129.0	1.60%	25.703	52.675	0.240	0.1202
14	Peak #14	26.333 °	3.38174 Å	79.0	159.0	2.40%	26.333	78.977	0.112	0.0559
15	Peak #15	27.524 °	3.23807 Å	59.7	149.0	1.80%	27.524	59.723	0.295	0.1473
16	Peak #16	28.034 °	3.18035 Å	94.4	187.0	2.90%	28.034	94.360	0.339	0.1693
17	Peak #17	29.452 °	3.03030 Å	1,655.0	1,758.0	50.00%	29.452	1,654.598	0.182	0.0909
18	Peak #18	30.108 °	2.96578 Å	432.0	536.0	13.10%	30.108	432.349	0.167	0.0834
19	Peak #19	31.075 °	2.87563 Å	207.0	322.0	6.20%	31.075	206.514	0.161	0.0807
20	Peak #20	32.236 °	2.77466 Å	3,310.0	3,443.0	100.00%	32.236	3,310.025	0.168	0.0838
21	Peak #21	32.624 °	2.74255 Å	2,175.0	2,311.0	65.70%	32.624	2,174.702	0.209	0.1047

ตารางที่ จ - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ สีแดง

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
22	Peak #22	33.246 °	2.69267 Å	557.0	693.0	16.80%	33.246	556.598	0.254	0.1272
23	Peak #23	33.898 °	2.64239 Å	480.0	612.0	14.50%	33.898	479.854	0.160	0.0800
24	Peak #24	34.384 °	2.60609 Å	2,224.0	2,350.0	67.20%	34.384	2,224.455	0.157	0.0784
25	Peak #25	36.001 °	2.49265 Å	37.1	138.0	1.10%	36.001	37.127	0.270	0.1352
26	Peak #26	36.725 °	2.44515 Å	300.0	404.0	9.10%	36.725	300.362	0.180	0.0899
27	Peak #27	37.322 °	2.40742 Å	82.3	183.0	2.50%	37.322	82.336	0.211	0.1056
28	Peak #28	38.808 °	2.31859 Å	342.0	443.0	10.30%	38.808	341.870	0.270	0.1351
29	Peak #29	39.421 °	2.28392 Å	170.0	266.0	5.10%	39.421	169.594	0.438	0.2189
30	Peak #30	41.316 °	2.18345 Å	1,109.0	1,211.0	33.50%	41.316	1,108.764	0.209	0.1043
31	Peak #31	41.636 °	2.16742 Å	275.0	380.0	8.30%	41.636	275.115	0.400	0.2002
32	Peak #32	42.333 °	2.13331 Å	31.6	137.0	1.00%	42.333	31.599	0.268	0.1339
33	Peak #33	43.136 °	2.09543 Å	105.0	210.0	3.20%	43.136	104.806	0.318	0.1589

ตารางที่ จ - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ สีแดง

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
34	Peak #34	44.157 °	2.04935 Å	114.0	219.0	3.50%	44.157	114.457	0.468	0.2342
35	Peak #35	45.819 °	1.97879 Å	221.0	317.0	6.70%	45.819	221.193	0.283	0.1416
36	Peak #36	46.990 °	1.93217 Å	288.0	388.0	8.70%	46.990	288.295	0.274	0.1372
37	Peak #37	47.428 °	1.91536 Å	205.0	306.0	6.20%	47.428	204.663	0.160	0.0800
38	Peak #38	47.652 °	1.90686 Å	159.0	260.0	4.80%	47.652	159.186	0.160	0.0800
39	Peak #39	50.013 °	1.82224 Å	152.0	252.0	4.60%	50.013	151.585	0.386	0.1929
40	Peak #40	50.858 °	1.79394 Å	37.8	133.0	1.10%	50.858	37.788	0.225	0.1127
41	Peak #41	51.805 °	1.76334 Å	651.0	738.0	19.70%	51.805	650.520	0.235	0.1174
42	Peak #42	53.444 °	1.71308 Å	39.2	124.0	1.20%	53.444	39.156	0.438	0.2191
43	Peak #43	54.167 °	1.69190 Å	51.4	132.0	1.60%	54.167	51.394	0.295	0.1474
44	Peak #44	55.163 °	1.66368 Å	38.6	110.0	1.20%	55.163	38.598	0.138	0.0692
45	Peak #45	56.553 °	1.62605 Å	395.0	491.0	11.90%	56.553	395.018	0.256	0.1281

ตารางที่ จ - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ สีแดง

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
46	Peak #46	57.430 °	1.60327 Å	30.9	141.0	0.90%	57.430	30.886	0.210	0.1052
47	Peak #47	58.653 °	1.57273 Å	37.9	155.0	1.10%	58.653	37.941	0.270	0.1349
48	Peak #48	59.451 °	1.55351 Å	57.6	178.0	1.70%	59.451	57.555	0.222	0.1110
49	Peak #49	60.013 °	1.54031 Å	306.0	424.0	9.20%	60.013	305.804	0.206	0.1031
50	Peak #50	60.615 °	1.52644 Å	82.2	194.0	2.50%	60.615	82.227	0.350	0.1752
51	Peak #51	62.432 °	1.48630 Å	405.0	499.0	12.20%	62.432	404.630	0.366	0.1830
52	Peak #52	63.738 °	1.45897 Å	135.0	220.0	4.10%	63.738	135.212	0.266	0.1329
53	Peak #53	63.911 °	1.45542 Å	74.0	157.0	2.20%	63.911	73.957	0.266	0.1328
54	Peak #54	67.429 °	1.38778 Å	64.7	140.0	2.00%	67.429	64.667	0.190	0.0951
55	Peak #55	68.371 °	1.37094 Å	50.7	125.0	1.50%	68.371	50.705	0.293	0.1464
56	Peak #56	69.951 °	1.34379 Å	32.0	95.3	1.00%	69.951	31.997	0.392	0.1958
57	Peak #57	73.392 °	1.28905 Å	19.2	73.9	0.60%	73.392	19.245	0.322	0.1609

ตารางที่ จ - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ สีแดง

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
58	Peak #58	79.428 °	1.20556 Å	29.5	86.9.0	0.90%	79.428	29.542	0.268	0.1338
59	Peak #59	80.197 °	1.19592 Å	51.2	106.0	1.50%	80.197	51.196	0.266	0.1332
60	Peak #60	85.506 °	1.13473 Å	36.6	106.0	1.10%	85.506	36.603	0.194	0.0969
61	Peak #61	86.366 °	1.12562 Å	59.0	124.0	1.80%	86.366	59.042	0.270	0.1351

ตารางที่ จ - 2 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฝุ่นผง

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	18.314 °	4.84034 Å	812.0	1473.0	100.00%	18.314	812.179	0.123	0.0617
2	Peak #2	20.329 °	4.36485 Å	251.0	971.0	30.80%	20.329	250.503	0.236	0.1181
3	Peak #3	25.901 °	3.43711 Å	89.2	816.0	11.00%	25.901	89.202	0.120	0.0602
4	Peak #4	26.662 °	3.34078 Å	156.0	867.0	19.20%	26.662	155.553	0.271	0.1357
5	Peak #5	28.755 °	3.10213 Å	101.0	750.0	12.50%	28.755	101.454	0.191	0.0954
6	Peak #6	37.719 °	2.38298 Å	102.0	467.0	12.50%	37.719	101.788	0.202	0.1008
7	Peak #7	42.556 °	2.12265 Å	52.4	410.0	6.50%	42.556	52.412	0.163	0.0815

ตารางที่ จ - 3 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเม็ด

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	16.672 °	5.31318 Å	1,032.0	2,544.0	32.50%	16.672	1032.020	0.160	0.0800
2	Peak #2	20.717 °	4.28414 Å	1,499.0	3,132.0	47.20%	20.717	1499.114	0.160	0.0800
3	Peak #3	22.521 °	3.94487 Å	3,176.0	4,790.0	100.00%	22.521	3175.523	0.160	0.0800
4	Peak #4	34.686 °	2.58414 Å	503.0	1,608.0	15.80%	34.686	502.538	0.387	0.1933
5	Peak #5	43.166 °	2.09405 Å	98.1	1,047.0	3.10%	43.166	98.062	0.431	0.2156

ตารางที่ จ - 4 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเส้นใย

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	15.498 °	5.71279 Å	116.0	676.0	18.00%	15.498	116.499	0.388	0.1941
2	Peak #2	22.665 °	3.92005 Å	648.0	1,326.0	100.00%	22.665	648.419	0.160	0.0800

ตารางที่ จ - 5 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอรัลาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	11.004 °	8.03429 Å	50.4	295.0	0.30%	11.0	50.448	0.21	0.1033
2	Peak #2	11.765 °	7.51612 Å	221.0	447.0	1.30%	11.8	220.693	0.14	0.0679
3	Peak #3	12.636 °	7.00004 Å	72.6	260.0	0.40%	12.6	72.555	0.06	0.0298
4	Peak #4	13.901 °	6.36550 Å	138.0	282.0	0.80%	13.9	137.544	0.17	0.0837
5	Peak #5	15.871 °	5.57946 Å	121.0	241.0	0.70%	15.9	120.612	0.14	0.0685
6	Peak #6	17.862 °	4.96184 Å	211.0	337.0	1.20%	17.9	210.670	0.32	0.1599
7	Peak #7	18.136 °	4.88744 Å	1,440.0	1,566.0	8.50%	18.1	1,439.750	0.11	0.0556
8	Peak #8	18.992 °	4.66901 Å	67.4	189.0	0.40%	19.0	67.416	0.13	0.0624
9	Peak #9	20.007 °	4.43452 Å	64.0	191.0	0.40%	20.0	64.008	0.24	0.1189
10	Peak #10	20.943 °	4.23834 Å	5,011.0	5,146.0	29.50%	20.9	5,010.970	0.10	0.0481
11	Peak #11	22.109 °	4.01728 Å	54.8	184.0	0.30%	22.1	54.817	0.06	0.0282
12	Peak #12	23.114 °	3.84484 Å	172.0	315.0	1.00%	23.1	172.450	0.30	0.1519

ตารางที่ จ - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	23.550 °	3.77477 Å	980.0	1,126.0	5.80%	23.6	980.102	0.06	0.0302
14	Peak #14	24.985 °	3.56113 Å	51.1	202.0	0.30%	25.0	51.051	0.20	0.1007
15	Peak #15	25.736 °	3.45888 Å	174.0	348.0	1.00%	25.7	174.017	0.19	0.0933
16	Peak #16	26.729 °	3.33259 Å	16,988.0	17,183.0	100.00%	26.7	16,988.000	0.12	0.0582
17	Peak #17	27.604 °	3.22886 Å	327.0	520.0	1.90%	27.6	327.179	0.24	0.1222
18	Peak #18	28.000 °	3.18410 Å	166.0	350.0	1.00%	28.0	165.608	0.29	0.1464
19	Peak #19	28.769 °	3.10071 Å	212.0	408.0	1.20%	28.8	211.967	0.12	0.0591
20	Peak #20	29.491 °	3.02640 Å	776.0	989.0	4.60%	29.5	775.807	0.20	0.1013
21	Peak #21	29.892 °	2.98673 Å	1,953.0	2,169.0	11.50%	29.9	1,952.640	0.09	0.0466
22	Peak #22	32.285 °	2.77062 Å	265.0	460.0	1.60%	32.3	265.417	0.27	0.1371
23	Peak #23	32.710 °	2.73553 Å	175.0	367.0	1.00%	32.7	175.147	0.28	0.1383
24	Peak #24	34.166 °	2.62225 Å	1,388.0	1,582.0	8.20%	34.2	1,388.360	0.15	0.0747

ตารางที่ จ - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	34.981 °	2.56300 Å	616	813.0	3.60%	35.0	616.442	0.15	0.0724
26	Peak #26	35.442 °	2.53067 Å	85.3	277.0	0.50%	35.4	85.294	0.09	0.0472
27	Peak #27	36.095 °	2.48642 Å	76.6	251.0	0.50%	36.1	76.633	0.19	0.0931
28	Peak #28	36.628 °	2.45141 Å	700.0	862.0	4.10%	36.6	700.369	0.13	0.0667
29	Peak #29	38.754 °	2.32169 Å	31.8	174.0	0.20%	38.8	31.763	0.10	0.0502
30	Peak #30	39.547 °	2.27696 Å	1,189.0	1,327.0	7.00%	39.5	1,189.380	0.10	0.0518
31	Peak #31	40.376 °	2.23210 Å	677.0	807.0	4.00%	40.4	676.904	0.08	0.0399
32	Peak #32	41.248 °	2.18688 Å	100.0	240.0	0.60%	41.2	100.151	0.23	0.1166
33	Peak #33	42.525 °	2.12414 Å	1,530.0	1,679.0	9.00%	42.5	1,530.300	0.12	0.0602
34	Peak #34	43.222 °	2.09147 Å	82.8	231.0	0.50%	43.2	82.797	0.18	0.0905
35	Peak #35	44.067 °	2.05331 Å	31.0	177.0	0.20%	44.1	31.027	0.20	0.1016
36	Peak #36	45.559 °	1.98950 Å	110.0	245.0	0.60%	45.6	109.683	0.10	0.0508

ตารางที่ จ - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	45.924 °	1.97451 Å	403.0	540.0	2.40%	45.9	402.611	0.12	0.0615
38	Peak #38	47.193 °	1.92436 Å	339.0	479.0	2.00%	47.2	339.132	0.22	0.1116
39	Peak #39	47.623 °	1.90797 Å	436.0	575.0	2.60%	47.6	436.493	0.15	0.0744
40	Peak #40	48.578 °	1.87268 Å	65.7	207.0	0.40%	48.6	65.663	0.18	0.0906
41	Peak #41	49.341 °	1.84546 Å	45.5	191.0	0.30%	49.3	45.479	0.13	0.0664
42	Peak #42	50.213 °	1.81545 Å	2,109.0	2,251.0	12.40%	50.2	2,108.870	0.08	0.0408
43	Peak #43	50.745 °	1.79765 Å	535.0	668.0	3.20%	50.7	535.224	0.14	0.0711
44	Peak #44	50.507 °	1.80558 Å	111.0	249.0	0.70%	50.5	110.984	0.14	0.0712
45	Peak #45	54.418 °	1.68470 Å	135.0	252.0	0.80%	54.4	135.111	0.16	0.0819
46	Peak #46	54.994 °	1.66839 Å	228.0	350.0	1.30%	55.0	227.560	0.15	0.0723
47	Peak #47	55.402 °	1.65708 Å	164.0	284.0	1.00%	55.4	164.140	0.10	0.0503
48	Peak #48	57.426 °	1.60337 Å	41.2	150.0	0.20%	57.4	41.186	0.30	0.1499

ตารางที่ จ - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
49	Peak #49	60.031 °	1.53987 Å	2,078.0	2,201.0	12.20%	60.0	2,078.360	0.14	0.0696
50	Peak #50	59.986 °	1.54094 Å	1,159.0	1,281.0	6.80%	60.0	1,158.880	0.14	0.0697
51	Peak #51	62.656 °	1.48152 Å	91.3	192.0	0.50%	62.7	91.307	0.34	0.1701
52	Peak #52	64.211 °	1.44935 Å	76.5	184.0	0.50%	64.2	76.482	0.18	0.0886
53	Peak #53	65.583 °	1.42232 Å	173.0	282.0	1.00%	65.6	173.201	0.25	0.1237
54	Peak #54	65.743 °	1.41924 Å	111.0	218.0	0.70%	65.7	110.920	0.25	0.1235
55	Peak #55	67.867 °	1.37989 Å	515.0	620.0	3.00%	67.9	515.027	0.15	0.0749
56	Peak #56	68.298 °	1.37223 Å	375.0	483.0	2.20%	68.3	375.308	0.23	0.1166
57	Peak #57	69.318 °	1.35451 Å	59.3	155.0	0.30%	69.3	59.307	0.21	0.1025
58	Peak #58	70.184 °	1.33991 Å	29.0	116.0	0.20%	70.2	28.996	0.17	0.0853
59	Peak #59	71.949 °	1.31132 Å	51.0	130.0	0.30%	71.9	50.994	0.20	0.0995
60	Peak #60	73.530 °	1.28698 Å	250.0	335.0	1.50%	73.5	249.655	0.17	0.0834

ตารางที่ จ - 5 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S1000 P0000

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
61	Peak #61	75.718 °	1.25514 Å	1,996.0	2,087.0	11.80%	75.7	1,996.310	0.07	0.0366
62	Peak #62	75.933 °	1.25210 Å	978.0	1,067.0	5.80%	75.9	977.920	0.07	0.0366
63	Peak #63	77.728 °	1.22762 Å	123.0	200.0	0.70%	77.7	123.054	0.09	0.0443
64	Peak #64	79.899 °	1.19963 Å	222.0	303.0	1.30%	79.9	221.555	0.18	0.0915
65	Peak #65	80.152 °	1.19649 Å	160.0	242.0	0.90%	80.2	159.522	0.19	0.0943
66	Peak #66	81.230 °	1.18330 Å	1,263.0	1,350.0	7.40%	81.2	1,263.140	0.16	0.0802
67	Peak #67	81.480 °	1.18030 Å	759.0	847.0	4.50%	81.5	759.300	0.20	0.0987
68	Peak #68	81.778 °	1.17676 Å	156.0	243.0	0.90%	81.8	156.205	0.16	0.0777
69	Peak #69	83.874 °	1.15260 Å	137.0	212.0	0.80%	83.9	136.752	0.10	0.0507
70	Peak #70	84.125 °	1.14981 Å	60.4	137.0	0.40%	84.1	60.354	0.23	0.1137
71	Peak #71	84.482 °	1.14585 Å	77.6	154.0	0.50%	84.5	77.631	0.19	0.0967
72	Peak #72	84.750 °	1.14291 Å	82.6	156.0	0.50%	84.8	82.644	0.27	0.1370

ตารางที่ จ - 6 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	11.694 °	7.56169 Å	53.2	305.0	0.30%	11.694	53.225	0.316	0.1581
2	Peak #2	13.727 °	6.44556 Å	82.4	260.0	0.40%	13.727	82.358	0.279	0.1396
3	Peak #3	15.033 °	5.88857 Å	140	292.0	0.70%	15.033	139.532	0.070	0.0351
4	Peak #4	15.881 °	5.57616 Å	60.5	208.0	0.30%	15.881	60.546	0.128	0.0642
5	Peak #5	18.145 °	4.88506 Å	2994	3,131.0	14.50%	18.145	2,993.530	0.102	0.0510
6	Peak #6	19.044 °	4.65657 Å	40.4	164.0	0.20%	19.044	40.382	0.257	0.1286
7	Peak #7	20.045 °	4.42604 Å	50.1	181.0	0.20%	20.045	50.083	0.326	0.1629
8	Peak #8	20.945 °	4.23786 Å	7,320.0	7,460.0	35.50%	20.945	7,320.299	0.095	0.0476
9	Peak #9	23.102 °	3.84682 Å	124.0	272.0	0.60%	23.102	123.893	0.217	0.1084
10	Peak #10	23.638 °	3.76087 Å	349.0	499.0	1.70%	23.638	349.342	0.101	0.0506
11	Peak #11	24.101 °	3.68971 Å	202.0	347.0	1.00%	24.101	202.351	0.057	0.0284
12	Peak #12	24.462 °	3.63605 Å	44.0	180.0	0.20%	24.462	43.960	0.399	0.1997

ตารางที่ จ - 6 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	25.009 °	3.55774 Å	92.5	239.0	0.40%	25.009	92.504	0.247	0.1234
14	Peak #14	25.723 °	3.46053 Å	460.0	631.0	2.20%	25.723	460.100	0.117	0.0584
15	Peak #15	26.724 °	3.33321 Å	20,639.0	20,843.0	100.00%	26.724	20,638.78	0.118	0.0588
16	Peak #16	27.174 °	3.27897 Å	280.0	494.0	1.40%	27.174	280.059	0.160	0.0800
17	Peak #17	27.572 °	3.23250 Å	3,347.0	3,564.0	16.20%	27.572	3,347.256	0.145	0.0726
18	Peak #18	27.859 °	3.19987 Å	784.0	1,000.0	3.80%	27.859	783.654	0.193	0.0967
19	Peak #19	27.980 °	3.18630 Å	225.0	441.0	1.10%	27.980	225.472	0.084	0.0421
20	Peak #20	28.374 °	3.14301 Å	2,054.0	2,265.0	10.00%	28.374	2,054.424	0.067	0.0333
21	Peak #21	28.779 °	3.09965 Å	181.0	393.0	0.90%	28.779	180.547	0.143	0.0713
22	Peak #22	29.488 °	3.02671 Å	927.0	1,152.0	4.50%	29.488	926.998	0.188	0.0939
23	Peak #23	30.190 °	2.95787 Å	54.3	278.0	0.30%	30.190	54.306	0.325	0.1626
24	Peak #24	30.462 °	2.93216 Å	502.0	721.0	2.40%	30.462	501.965	0.076	0.0380

ตารางที่ จ - 6 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	30.888 °	2.89266 Å	118.0	327.0	0.60%	30.888	117.877	0.144	0.0718
26	Peak #26	32.323 °	2.76745 Å	342.0	530.0	1.70%	32.323	341.879	0.368	0.1839
27	Peak #27	32.768 °	2.73086 Å	192.0	374.0	0.90%	32.768	191.803	0.351	0.1755
28	Peak #28	34.165 °	2.62228 Å	1,624.0	1,795.0	7.90%	34.165	1,623.956	0.141	0.0706
29	Peak #29	35.203 °	2.54732 Å	51.2	219.0	0.20%	35.203	51.155	0.262	0.1312
30	Peak #30	35.372 °	2.53557 Å	42.8	208.0	0.20%	35.372	42.822	0.285	0.1425
31	Peak #31	36.087 °	2.48696 Å	56.3	215.0	0.30%	36.087	56.336	0.158	0.0792
32	Peak #32	36.630 °	2.45128 Å	1,509.0	1,660.0	7.30%	36.630	1,509.142	0.098	0.0492
33	Peak #33	39.544 °	2.27711 Å	1,632.0	1,762.0	7.90%	39.544	1,631.967	0.073	0.0365
34	Peak #34	40.372 °	2.23228 Å	678.0	802.0	3.30%	40.372	677.993	0.119	0.0595
35	Peak #35	41.137 °	2.19254 Å	139.0	273.0	0.70%	41.137	139.416	0.286	0.1430
36	Peak #36	42.526 °	2.12407 Å	1,121.0	1,265.0	5.40%	42.526	1,120.766	0.078	0.0388

ตารางที่ จ - 6 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	43.216 °	2.09177 Å	92.5	233.0	0.40%	43.216	92.452	0.221	0.1105
38	Peak #38	43.980 °	2.05716 Å	55.8	191.0	0.30%	43.980	55.755	0.250	0.1249
39	Peak #39	45.587 °	1.98832 Å	80.9	217.0	0.40%	45.587	80.871	0.454	0.2271
40	Peak #40	45.864 °	1.97695 Å	381.0	517.0	1.80%	45.864	381.366	0.176	0.0879
41	Peak #41	47.193 °	1.92434 Å	463.0	596.0	2.20%	47.193	463.125	0.186	0.0932
42	Peak #42	47.581 °	1.90953 Å	168.0	304.0	0.80%	47.581	167.699	0.582	0.2909
43	Peak #43	48.544 °	1.87388 Å	123.0	258.0	0.60%	48.544	123.224	0.246	0.1231
44	Peak #44	50.204 °	1.81577 Å	1,434.0	1,568.0	6.90%	50.204	1,434.219	0.131	0.0653
45	Peak #45	50.846 °	1.79434 Å	387.0	507.0	1.90%	50.846	386.747	0.140	0.0700
46	Peak #46	53.862 °	1.70076 Å	66.6	189.0	0.30%	53.862	66.551	0.204	0.1018
47	Peak #47	54.390 °	1.68548 Å	185.0	320.0	0.90%	54.390	184.982	0.130	0.0649
48	Peak #48	54.998 °	1.66829 Å	361.0	500.0	1.80%	54.998	361.211	0.150	0.0752

ตารางที่ จ - 6 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
49	Peak #49	55.394 °	1.65729 Å	302.0	437.0	1.50%	55.394	301.638	0.128	0.0638
50	Peak #50	57.380 °	1.60457 Å	29.0	144.0	0.10%	57.380	28.955	0.130	0.0652
51	Peak #51	60.067 °	1.53904 Å	1,948.0	2,069.0	9.40%	60.067	1,948.333	0.142	0.0709
52	Peak #52	59.976 °	1.54116 Å	2,221.0	2,340.0	10.80%	59.976	2,221.181	0.142	0.0709
53	Peak #53	62.655 °	1.48155 Å	76.0	189.0	0.40%	62.655	76.001	0.352	0.1761
54	Peak #54	64.180 °	1.44998 Å	86.9	191.0	0.40%	64.180	86.925	0.148	0.0740
55	Peak #55	64.278 °	1.44800 Å	158.0	262.0	0.80%	64.278	157.508	0.148	0.0740
56	Peak #56	67.795 °	1.38119 Å	883.0	987.0	4.30%	67.795	883.389	0.163	0.0817
57	Peak #57	68.394 °	1.37054 Å	3,064.0	3,171.0	14.80%	68.394	3,063.806	0.078	0.0390
58	Peak #58	68.581 °	1.36726 Å	1,353.0	1,459.0	6.60%	68.581	1,352.708	0.078	0.0389
59	Peak #59	73.532 °	1.28695 Å	580.0	670.0	2.80%	73.532	579.639	0.074	0.0371
60	Peak #60	73.742 °	1.28379 Å	271.0	361.0	1.30%	73.742	270.938	0.074	0.0371

ตารางที่ จ - 6 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
61	Peak #61	74.702 °	1.26966 Å	47.3	132.0	0.20%	74.702	47.283	0.154	0.0772
62	Peak #62	75.730 °	1.25497 Å	1,677.0	1,762.0	8.10%	75.730	1,677.062	0.073	0.0364
63	Peak #63	75.952 °	1.25184 Å	807.0	892.0	3.90%	75.952	806.598	0.074	0.0369
64	Peak #64	77.724 °	1.22767 Å	177.0	256.0	0.90%	77.724	177.015	0.144	0.0720
65	Peak #65	77.941 °	1.22480 Å	82.2	161.0	0.40%	77.941	82.225	0.144	0.0719
66	Peak #66	79.981 °	1.19861 Å	238.0	323.0	1.20%	79.981	237.652	0.181	0.0904
67	Peak #67	80.153 °	1.19647 Å	167.0	251.0	0.80%	80.153	167.024	0.188	0.0938
68	Peak #68	81.244 °	1.18314 Å	375.0	455.0	1.80%	81.244	375.004	0.207	0.1036
69	Peak #69	81.512 °	1.17992 Å	445.0	526.0	2.20%	81.512	445.451	0.219	0.1093
70	Peak #70	81.757 °	1.17701 Å	134.0	212.0	0.60%	81.757	133.511	0.222	0.1112
71	Peak #71	83.896 °	1.15235 Å	324.0	402.0	1.60%	83.896	324.257	0.101	0.0503
72	Peak #72	84.135 °	1.14970 Å	158.0	238.0	0.80%	84.135	158.154	0.185	0.0923

ตารางที่ จ - 6 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
73	Peak #73	84.763 °	1.14277 Å	41.0	119.0	0.20%	84.763	41.001	0.201	0.1003
74	Peak #74	84.947 °	1.14076 Å	30.0	106.0	0.10%	84.947	30.032	0.139	0.0696
75	Peak #75	87.500 °	1.11393 Å	19.6	80.1	0.10%	87.500	19.640	0.247	0.1234

ตารางที่ จ - 7 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอ์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	11.755 °	7.52256 Å	65.6	278.0	0.50%	11.755	65.605	0.085	0.0425
2	Peak #2	13.210 °	6.69690 Å	58.6	231.0	0.40%	13.210	58.640	0.061	0.0305
3	Peak #3	15.908 °	5.56665 Å	65.2	204.0	0.50%	15.908	65.200	0.113	0.0567
4	Peak #4	18.149 °	4.88405 Å	776.0	906.0	5.70%	18.149	776.411	0.139	0.0696
5	Peak #5	20.962 °	4.23459 Å	3,012.0	3,148.0	22.20%	20.962	3,012.013	0.101	0.0507
6	Peak #6	22.633 °	3.92549 Å	65.9	202.0	0.50%	22.633	65.939	0.273	0.1364
7	Peak #7	23.283 °	3.81731 Å	753.0	893.0	5.60%	23.283	753.419	0.095	0.0476
8	Peak #8	23.678 °	3.75457 Å	44.9	182.0	0.30%	23.678	44.914	0.393	0.1963
9	Peak #9	25.021 °	3.55605 Å	62.1	191.0	0.50%	25.021	62.067	0.102	0.0508
10	Peak #10	25.590 °	3.47829 Å	69.8	215.0	0.50%	25.590	69.816	0.233	0.1165
11	Peak #11	25.785 °	3.45243 Å	73.9	225.0	0.50%	25.785	73.908	0.363	0.1814
12	Peak #12	26.515 °	3.35897 Å	3,013.0	3,178.0	22.20%	26.515	3,012.807	0.272	0.1362

ตารางที่ จ - 7 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	26.759 °	3.32885 Å	13,552.0	13,719.0	100.00%	26.759	13551.98	0.114	0.0570
14	Peak #14	27.611 °	3.22803 Å	66.8	230.0	0.50%	27.611	66.797	0.110	0.0550
15	Peak #15	28.795 °	3.09794 Å	168.0	329.0	1.20%	28.795	168.090	0.139	0.0696
16	Peak #16	29.511 °	3.02437 Å	562.0	740.0	4.10%	29.511	561.712	0.196	0.0978
17	Peak #17	30.073 °	2.96917 Å	212.0	396.0	1.60%	30.073	212.372	0.154	0.0772
18	Peak #18	31.027 °	2.88003 Å	223.0	400.0	1.60%	31.027	223.406	0.089	0.0443
19	Peak #19	32.342 °	2.76586 Å	193.0	354.0	1.40%	32.342	192.702	0.253	0.1267
20	Peak #20	32.656 °	2.73992 Å	135.0	294.0	1.00%	32.656	135.405	0.458	0.2291
21	Peak #21	32.780 °	2.72986 Å	115.0	271.0	0.80%	32.780	114.672	0.458	0.2291
22	Peak #22	34.195 °	2.62009 Å	735.0	884.0	5.40%	34.195	735.315	0.165	0.0825
23	Peak #23	35.164 °	2.55009 Å	50.3	199.0	0.40%	35.164	50.266	0.331	0.1656
24	Peak #24	36.103 °	2.48589 Å	51.0	188.0	0.40%	36.103	51.039	0.163	0.0816

ตารางที่ จ - 7 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	36.642 °	2.45051 Å	1,076.0	1,206.0	7.90%	36.642	1,075.910	0.120	0.0601
26	Peak #26	37.598 °	2.39041 Å	50.0	167.0	0.40%	37.598	49.966	0.121	0.0603
27	Peak #27	39.573 °	2.27552 Å	594.0	717.0	4.40%	39.573	593.825	0.148	0.0742
28	Peak #28	40.386 °	2.23157 Å	609.0	729.0	4.50%	40.386	608.554	0.070	0.0351
29	Peak #29	42.549 °	2.12297 Å	559.0	681.0	4.10%	42.549	559.344	0.164	0.0821
30	Peak #30	43.268 °	2.08939 Å	87.3	205.0	0.60%	43.268	87.307	0.274	0.1372
31	Peak #31	44.171 °	2.04873 Å	28.9	144.0	0.20%	44.171	28.950	0.293	0.1464
32	Peak #32	45.900 °	1.97551 Å	518.0	637.0	3.80%	45.900	517.596	0.135	0.0674
33	Peak #33	47.211 °	1.92365 Å	288.0	416.0	2.10%	47.211	288.124	0.346	0.1728
34	Peak #34	47.544 °	1.91096 Å	152.0	284.0	1.10%	47.544	152.307	0.392	0.1959
35	Peak #35	47.983 °	1.89450 Å	72.0	204.0	0.50%	47.983	71.951	0.219	0.1095
36	Peak #36	48.592 °	1.87217 Å	41.3	175.0	0.30%	48.592	41.316	0.170	0.0851

ตารางที่ จ - 7 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	50.286 °	1.81300 Å	2,663.0	2,810.0	19.70%	50.286	2,663.381	0.138	0.0692
38	Peak #38	50.883 °	1.79309 Å	196.0	336.0	1.40%	50.883	196.288	0.172	0.0858
39	Peak #39	51.437 °	1.77510 Å	59.4	186.0	0.40%	51.437	59.410	0.160	0.0801
40	Peak #40	54.430 °	1.68433 Å	82.3	186.0	0.60%	54.430	82.337	0.179	0.0896
41	Peak #41	54.956 °	1.66946 Å	347.0	461.0	2.60%	54.956	346.714	0.164	0.0821
42	Peak #42	55.480 °	1.65492 Å	141.0	259.0	1.00%	55.480	140.586	0.217	0.1086
43	Peak #43	57.391 °	1.60428 Å	30.8	133.0	0.20%	57.391	30.786	0.241	0.1204
44	Peak #44	60.051 °	1.53940 Å	2,485.0	2,593.0	18.30%	60.051	2,484.643	0.076	0.0380
45	Peak #45	60.100 °	1.53828 Å	1,152.0	1,260.0	8.50%	60.100	1,151.598	0.076	0.0380
46	Peak #46	62.680 °	1.48101 Å	86.7	174.0	0.60%	62.680	86.696	0.171	0.0856
47	Peak #47	64.182 °	1.44993 Å	194.0	279.0	1.40%	64.182	194.300	0.176	0.0882
48	Peak #48	65.851 °	1.41717 Å	46.2	125.0	0.30%	65.851	46.208	0.167	0.0835

ตารางที่ จ - 7 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
49	Peak #49	67.811 °	1.38089 Å	654.0	753.0	4.80%	67.811	653.924	0.175	0.0877
50	Peak #50	68.415 °	1.37017 Å	2,094.0	2,196.0	15.50%	68.415	2,093.846	0.157	0.0787
51	Peak #51	68.599 °	1.36695 Å	878.0	979.0	6.50%	68.599	878.226	0.157	0.0786
52	Peak #52	69.020 °	1.35963 Å	72.6	169.0	0.50%	69.020	72.562	0.078	0.0392
53	Peak #53	70.532 °	1.33415 Å	104.0	188.0	0.80%	70.532	104.365	0.270	0.1352
54	Peak #54	71.892 °	1.31222 Å	40.0	118.0	0.30%	71.892	39.990	0.244	0.1222
55	Peak #55	73.541 °	1.28681 Å	158.0	234.0	1.20%	73.541	158.116	0.171	0.0855
56	Peak #56	73.730 °	1.28398 Å	84.2	160.0	0.60%	73.730	84.185	0.171	0.0854
57	Peak #57	75.750 °	1.25469 Å	790.0	862.0	5.80%	75.750	789.715	0.070	0.0348
58	Peak #58	75.971 °	1.25159 Å	375.0	448.0	2.80%	75.971	375.409	0.140	0.0699
59	Peak #59	77.744 °	1.22741 Å	162.0	233.0	1.20%	77.744	161.728	0.170	0.0852
60	Peak #60	77.978 °	1.22432 Å	82.9	153.0	0.60%	77.978	82.888	0.193	0.0967

ตารางที่ จ - 7 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0950 P0050

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
61	Peak #61	79.334 °	1.20676 Å	327.0	405.0	2.40%	79.334	326.675	0.152	0.0758
62	Peak #62	79.561 °	1.20387 Å	164.0	246.0	1.20%	79.561	164.209	0.151	0.0757
63	Peak #63	80.024 °	1.19808 Å	137.0	222.0	1.00%	80.024	137.031	0.185	0.0923
64	Peak #64	80.121 °	1.19687 Å	177.0	262.0	1.30%	80.121	177.412	0.184	0.0922
65	Peak #65	81.251 °	1.18305 Å	496.0	581.0	3.70%	81.251	496.239	0.213	0.1065
66	Peak #66	81.555 °	1.17940 Å	532.0	617.0	3.90%	81.555	532.285	0.326	0.1628
67	Peak #67	81.830 °	1.17614 Å	332.0	414.0	2.40%	81.830	331.529	0.319	0.1597
68	Peak #68	83.910 °	1.15220 Å	194.0	262.0	1.40%	83.910	193.532	0.190	0.0952
69	Peak #69	84.157 °	1.14944 Å	96.9	165.0	0.70%	84.157	96.942	0.234	0.1168
70	Peak #70	85.951 °	1.12999 Å	89.9	148.0	0.70%	85.951	89.881	0.177	0.0886
71	Peak #71	86.233 °	1.12702 Å	48.2	106.0	0.40%	86.233	48.189	0.173	0.0867

ตารางที่ จ - 8 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอ์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	15.255 °	5.80340 Å	252.0	691.0	3.70%	15.255	251.751	0.103	0.0516
2	Peak #2	18.209 °	4.86801 Å	284.0	631.0	4.20%	18.209	283.799	0.139	0.0694
3	Peak #3	21.051 °	4.21680 Å	1,300.0	1,601.0	19.20%	21.051	1,300.162	0.107	0.0533
4	Peak #4	22.484 °	3.95116 Å	448.0	733.0	6.60%	22.484	448.295	0.105	0.0526
5	Peak #5	23.214 °	3.82856 Å	70.8	334.0	1.00%	23.214	70.763	0.230	0.1151
6	Peak #6	25.772 °	3.45412 Å	188.0	408.0	2.80%	25.772	187.798	0.116	0.0579
7	Peak #7	26.883 °	3.31379 Å	6,775.0	6,988.0	100.00%	26.883	6,775.106	0.119	0.0594
8	Peak #8	27.714 °	3.21624 Å	48.8	253.0	0.70%	27.714	48.788	0.398	0.1991
9	Peak #9	28.876 °	3.08941 Å	57.0	244.0	0.80%	28.876	57.032	0.179	0.0896
10	Peak #10	29.600 °	3.01548 Å	331.0	520.0	4.90%	29.600	331.316	0.261	0.1305
11	Peak #11	32.368 °	2.76367 Å	71.9	237.0	1.10%	32.368	71.866	0.258	0.1290
12	Peak #12	32.905 °	2.71982 Å	64.2	226.0	0.90%	32.905	64.210	0.292	0.1460

ตารางที่ จ - 8 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	34.361 °	2.60784 Å	476.0	633.0	7.00%	34.361	476.148	0.145	0.0726
14	Peak #14	36.788 °	2.44111 Å	282.0	411.0	4.20%	36.788	282.417	0.167	0.0837
15	Peak #15	39.708 °	2.26811 Å	600.0	715.0	8.90%	39.708	600.297	0.136	0.0680
16	Peak #16	40.508 °	2.22512 Å	184.0	290.0	2.70%	40.508	184.496	0.202	0.1011
17	Peak #17	41.435 °	2.17745 Å	36.8	140.0	0.50%	41.435	36.751	0.307	0.1534
18	Peak #18	42.686 °	2.11652 Å	101.0	210.0	1.50%	42.686	100.837	0.125	0.0626
19	Peak #19	43.336 °	2.08623 Å	41.8	150.0	0.60%	43.336	41.815	0.147	0.0734
20	Peak #20	45.986 °	1.97200 Å	150.0	247.0	2.20%	45.986	150.441	0.237	0.1186
21	Peak #21	47.387 °	1.91690 Å	98.0	202.0	1.40%	47.387	97.974	0.293	0.1464
22	Peak #22	47.698 °	1.90516 Å	59.2	165.0	0.90%	47.698	59.227	0.524	0.2622
23	Peak #23	48.690 °	1.86862 Å	49.9	155.0	0.70%	48.690	49.870	0.202	0.1011
24	Peak #24	50.386 °	1.80962 Å	2,028.0	2,130.0	29.90%	50.386	2,028.070	0.076	0.0382

ตารางที่ จ - 8 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	50.904 °	1.79243 Å	82.4	177.0	1.20%	50.904	82.382	0.270	0.1352
26	Peak #26	54.538 °	1.68127 Å	26.5	113.0	0.40%	54.538	26.486	0.270	0.1348
27	Peak #27	55.090 °	1.66572 Å	331	420.0	4.90%	55.090	330.720	0.160	0.0801
28	Peak #28	55.456 °	1.65559 Å	79.3	168.0	1.20%	55.456	79.321	0.297	0.1487
29	Peak #29	57.526 °	1.60082 Å	27.8	106.0	0.40%	57.526	27.796	0.195	0.0976
30	Peak #30	60.127 °	1.53765 Å	587.0	669.0	8.70%	60.127	587.234	0.162	0.0809
31	Peak #31	62.724 °	1.48008 Å	25.8	97.3	0.40%	62.724	25.788	0.116	0.0582
32	Peak #32	64.280 °	1.44797 Å	392.0	468.0	5.80%	64.280	391.583	0.100	0.0501
33	Peak #33	65.188 °	1.42997 Å	30.7	106.0	0.50%	65.188	30.729	0.302	0.1511
34	Peak #34	65.997 °	1.41439 Å	24.8	87.0	0.40%	65.997	24.773	0.285	0.1423
35	Peak #35	67.913 °	1.37908 Å	826.0	898.0	12.20%	67.913	825.621	0.188	0.0942
36	Peak #36	68.296 °	1.37228 Å	707.0	780.0	10.40%	68.296	706.954	0.258	0.1292

ตารางที่ จ - 8 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0925 P0075

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	73.583 °	1.28618 Å	797.0	864.0	11.80%	73.583	797.063	0.055	0.0277
38	Peak #38	73.792 °	1.28305 Å	403.0	469.0	6.00%	73.792	403.239	0.055	0.0277
39	Peak #39	75.806 °	1.25389 Å	65.6	132.0	1.00%	75.806	65.586	0.258	0.1290
40	Peak #40	77.858 °	1.22590 Å	35.5	93.7	0.50%	77.858	35.499	0.171	0.0854
41	Peak #41	80.091 °	1.19724 Å	916.0	987.0	13.50%	80.091	916.162	0.155	0.0773
42	Peak #42	80.331 °	1.19427 Å	476.0	548.0	7.00%	80.331	475.776	0.175	0.0874
43	Peak #43	81.389 °	1.18139 Å	169.0	239.0	2.50%	81.389	169.408	0.203	0.1013
44	Peak #44	81.568 °	1.17926 Å	510.0	579.0	7.50%	81.568	510.112	0.197	0.0986
45	Peak #45	81.809 °	1.17639 Å	270.0	336.0	4.00%	81.809	269.885	0.198	0.0990
46	Peak #46	84.003 °	1.15116 Å	188.0	254.0	2.80%	84.003	188.173	0.193	0.0967
47	Peak #47	84.254 °	1.14837 Å	110.0	177.0	1.60%	84.254	110.485	0.217	0.1085
48	Peak #48	85.089 °	1.13923 Å	48.5	110.0	0.70%	85.089	48.489	0.178	0.0888

ตารางที่ จ - 9 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	11.033 °	8.01324 Å	48.4	284.0	0.20%	11.033	48.358	0.269	0.1344
2	Peak #2	13.743 °	6.43844 Å	41.0	212.0	0.20%	13.743	40.994	0.077	0.0386
3	Peak #3	15.838 °	5.59094 Å	114.0	277.0	0.40%	15.838	114.014	0.093	0.0466
4	Peak #4	18.124 °	4.89065 Å	660.0	815.0	2.40%	18.124	660.364	0.134	0.0671
5	Peak #5	20.936 °	4.23980 Å	5,997.0	6,173.0	22.10%	20.936	5,996.911	0.100	0.0501
6	Peak #6	22.116 °	4.01609 Å	59.3	240.0	0.20%	22.116	59.293	0.103	0.0516
7	Peak #7	23.107 °	3.84606 Å	149.0	330.0	0.50%	23.107	148.544	0.235	0.1175
8	Peak #8	24.964 °	3.56398 Å	79.0	243.0	0.30%	24.964	79.004	0.160	0.0801
9	Peak #9	25.649 °	3.47037 Å	417.0	604.0	1.50%	25.649	417.136	0.102	0.0511
10	Peak #10	26.721 °	3.33356 Å	27,131.0	27,338.0	100.00%	26.721	27,130.650	0.107	0.0537
11	Peak #11	27.190 °	3.27713 Å	426.0	629.0	1.60%	27.190	425.609	0.186	0.0931
12	Peak #12	27.639 °	3.22485 Å	996.0	1,190.0	3.70%	27.639	996.22	0.054	0.0270

ตารางที่ จ - 9 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	28.753 °	3.10237 Å	104.0	277.0	0.40%	28.753	103.999	0.137	0.0683
14	Peak #14	29.480 °	3.02751 Å	802.0	990.0	3.00%	29.480	802.471	0.186	0.0929
15	Peak #15	30.890 °	2.89248 Å	57.6	230.0	0.20%	30.890	57.589	0.222	0.1108
16	Peak #16	32.265 °	2.77229 Å	155.0	323.0	0.60%	32.265	155.097	0.364	0.1821
17	Peak #17	32.829 °	2.72589 Å	167.0	330.0	0.60%	32.829	166.705	0.395	0.1975
18	Peak #18	34.183 °	2.62100 Å	541.0	702.0	2.00%	34.183	540.522	0.187	0.0934
19	Peak #19	36.063 °	2.48852 Å	72.4	218.0	0.30%	36.063	72.420	0.120	0.0602
20	Peak #20	36.610 °	2.45260 Å	1,008.0	1,156.0	3.70%	36.610	1008.248	0.138	0.0692
21	Peak #21	37.170 °	2.41691 Å	94.8	239.0	0.30%	37.170	94.820	0.158	0.0789
22	Peak #22	38.776 °	2.32041 Å	102.0	236.0	0.40%	38.776	102.475	0.095	0.0475
23	Peak #23	39.535 °	2.27763 Å	798.0	935.0	2.90%	39.535	798.174	0.116	0.0582
24	Peak #24	40.385 °	2.23163 Å	804.0	936.0	3.00%	40.385	804.402	0.109	0.0545

ตารางที่ จ - 9 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	41.232 °	2.18772 Å	69.5	201.0	0.30%	41.232	69.513	0.199	0.0995
26	Peak #26	42.494 °	2.12560 Å	802.0	945.0	3.00%	42.494	801.720	0.159	0.0794
27	Peak #27	43.265 °	2.08951 Å	91.0	232.0	0.30%	43.265	91.047	0.205	0.1024
28	Peak #28	43.963 °	2.05794 Å	74.7	215.0	0.30%	43.963	74.728	0.160	0.0800
29	Peak #29	44.326 °	2.04190 Å	286.0	426.0	1.10%	44.326	286.232	0.177	0.0886
30	Peak #30	45.860 °	1.97713 Å	1,214.0	1,339.0	4.50%	45.860	1,214.073	0.068	0.0340
31	Peak #31	47.188 °	1.92452 Å	270.0	401.0	1.00%	47.188	270.209	0.231	0.1155
32	Peak #32	47.557 °	1.91045 Å	121.0	255.0	0.40%	47.557	121.325	0.467	0.2334
33	Peak #33	48.570 °	1.87295 Å	102.0	238.0	0.40%	48.570	101.872	0.229	0.1145
34	Peak #34	50.217 °	1.81531 Å	2,703.0	2,845.0	10.00%	50.217	2,703.305	0.135	0.0677
35	Peak #35	50.847 °	1.79428 Å	164.0	292.0	0.60%	50.847	163.755	0.302	0.1510
36	Peak #36	51.816 °	1.76299 Å	56.4	160.0	0.20%	51.816	56.408	0.098	0.0489

ตารางที่ จ - 9 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	54.420 °	1.68462 Å	88.4	206.0	0.30%	54.420	88.361	0.071	0.0353
38	Peak #38	54.991 °	1.66848 Å	765.0	896.0	2.80%	54.991	765.324	0.141	0.0703
39	Peak #39	55.387 °	1.65747 Å	636.0	769.0	2.30%	55.387	635.78	0.072	0.0360
40	Peak #40	56.187 °	1.63575 Å	56.3	182.0	0.20%	56.187	56.285	0.118	0.0591
41	Peak #41	57.431 °	1.60325 Å	63.3	168.0	0.20%	57.431	63.285	0.118	0.0588
42	Peak #42	58.772 °	1.56982 Å	377.0	474.0	1.40%	58.772	376.915	0.148	0.0742
43	Peak #43	60.066 °	1.53907 Å	799.0	915.0	2.90%	60.066	798.989	0.153	0.0764
44	Peak #44	61.251 °	1.51211 Å	74.8	190.0	0.30%	61.251	74.780	0.222	0.1110
45	Peak #45	61.807 °	1.49982 Å	56.9	159.0	0.20%	61.807	56.939	0.237	0.1186
46	Peak #46	62.658 °	1.48149 Å	57.0	149.0	0.20%	62.658	57.035	0.150	0.0752
47	Peak #47	64.270 °	1.44817 Å	141.0	228.0	0.50%	64.270	141.076	0.299	0.1494
48	Peak #48	65.824 °	1.41769 Å	55.7	156.0	0.20%	65.824	55.733	0.167	0.0837

ตารางที่ จ - 9 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
49	Peak #49	66.392 °	1.40692 Å	96.2	194.0	0.40%	66.392	96.160	0.152	0.0761
50	Peak #50	67.787 °	1.38134 Å	621.0	726.0	2.30%	67.787	621.013	0.176	0.0880
51	Peak #51	68.193 °	1.37409 Å	1,197.0	1,305.0	4.40%	68.193	1,196.868	0.159	0.0795
52	Peak #52	68.382 °	1.37075 Å	3,156.0	3,265.0	11.60%	68.382	3,156.177	0.086	0.0430
53	Peak #53	68.532 °	1.36812 Å	847.0	955.0	3.10%	68.532	847.217	0.086	0.0430
54	Peak #54	70.184 °	1.33991 Å	44.9	130.0	0.20%	70.184	44.861	0.182	0.0908
55	Peak #55	73.527 °	1.28702 Å	201.0	286.0	0.70%	73.527	200.734	0.170	0.0852
56	Peak #56	73.748 °	1.28372 Å	125.0	212.0	0.50%	73.748	125.301	0.170	0.0851
57	Peak #57	75.712 °	1.25521 Å	222.0	292.0	0.80%	75.712	221.681	0.101	0.0505
58	Peak #58	75.917 °	1.25234 Å	91.0	162.0	0.30%	75.917	91.034	0.101	0.0504
59	Peak #59	77.722 °	1.22770 Å	96.2	167.0	0.40%	77.722	96.176	0.147	0.0734
60	Peak #60	80.034 °	1.19796 Å	324.0	406.0	1.20%	80.034	324.413	0.291	0.1453

ตารางที่ จ - 9 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0900 P0100

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
61	Peak #61	80.120 °	1.19688 Å	532.0	613.0	2.00%	80.120	532.279	0.291	0.1453
62	Peak #62	81.216 °	1.18347 Å	162.0	242.0	0.60%	81.216	161.806	0.095	0.0474
63	Peak #63	81.534 °	1.17966 Å	532.0	612.0	2.00%	81.534	532.471	0.126	0.0629
64	Peak #64	81.796 °	1.17655 Å	249.0	325.0	0.90%	81.796	248.972	0.222	0.1112
65	Peak #65	83.898 °	1.15234 Å	284.0	364.0	1.00%	83.898	284.410	0.110	0.0551
66	Peak #66	84.136 °	1.14969 Å	130.0	212.0	0.50%	84.136	130.362	0.198	0.0992
67	Peak #67	85.007 °	1.14011 Å	33.7	105.0	0.10%	85.007	33.714	0.169	0.0843
68	Peak #68	87.488 °	1.11405 Å	33.1	93.8.0	0.10%	87.488	33.106	0.245	0.1223

ตารางที่ จ - 10 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	15.943 °	5.55444 Å	81.3	562.0	0.60%	15.943	81.326	0.181	0.0903
2	Peak #2	18.167 °	4.87920 Å	578.0	997.0	4.20%	18.167	578.316	0.141	0.0704
3	Peak #3	20.962 °	4.23460 Å	1,466.0	1,840.0	10.50%	20.962	1,465.720	0.158	0.0788
4	Peak #4	22.543 °	3.94103 Å	82.3	441.0	0.60%	22.543	82.298	0.467	0.2335
5	Peak #5	23.135 °	3.84151 Å	159.0	505.0	1.10%	23.135	159.322	0.287	0.1436
6	Peak #6	24.986 °	3.56091 Å	88.6	397.0	0.60%	24.986	88.555	0.110	0.0550
7	Peak #7	25.750 °	3.45702 Å	202.0	504.0	1.50%	25.750	202.118	0.090	0.0452
8	Peak #8	26.779 °	3.32643 Å	13,928.0	14,229.0	100.00%	26.779	13,928.17	0.121	0.0606
9	Peak #9	27.171 °	3.27934 Å	222.0	520.0	1.60%	27.171	221.840	0.160	0.0800
10	Peak #10	28.798 °	3.09765 Å	101.0	374.0	0.70%	28.798	100.630	0.283	0.1415
11	Peak #11	29.521 °	3.02343 Å	874.0	1,148.0	6.30%	29.521	874.426	0.223	0.1117
12	Peak #12	29.963 °	2.97977 Å	605.0	873.0	4.30%	29.963	605.498	0.252	0.1261

ตารางที่ จ - 10 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	30.821 °	2.89876 Å	83.4	327.0	0.60%	30.821	83.397	0.213	0.1066
14	Peak #14	32.307 °	2.76877 Å	129.0	367.0	0.90%	32.307	129.409	0.148	0.0739
15	Peak #15	32.454 °	2.75655 Å	548.0	784.0	3.90%	32.454	547.740	0.148	0.0739
16	Peak #16	32.830 °	2.72581 Å	166.0	395.0	1.20%	32.830	165.786	0.268	0.1342
17	Peak #17	34.180 °	2.62120 Å	440.0	664.0	3.20%	34.180	439.941	0.183	0.0916
18	Peak #18	36.091 °	2.48667 Å	41.7	248.0	0.30%	36.091	41.665	0.120	0.0602
19	Peak #19	36.667 °	2.44891 Å	507.0	706.0	3.60%	36.667	507.316	0.176	0.0882
20	Peak #20	37.177 °	2.41646 Å	79.4	267.0	0.60%	37.177	79.403	0.092	0.0459
21	Peak #21	39.568 °	2.27582 Å	1,362.0	1,534.0	9.80%	39.568	1,361.943	0.148	0.0740
22	Peak #22	40.426 °	2.22948 Å	237.0	397.0	1.70%	40.426	237.326	0.130	0.0652
23	Peak #23	41.187 °	2.19002 Å	50.9	205.0	0.40%	41.187	50.905	0.190	0.0948
24	Peak #24	41.240 °	2.18733 Å	49.3	204.0	0.40%	41.240	49.294	0.190	0.0948

ตารางที่ จ - 10 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	42.559 °	2.12254 Å	295.0	462.0	2.10%	42.559	295.363	0.176	0.0879
26	Peak #26	43.291 °	2.08830 Å	110.0	278.0	0.80%	43.291	109.525	0.204	0.1018
27	Peak #27	44.029 °	2.05502 Å	61.4	222.0	0.40%	44.029	61.382	0.204	0.1020
28	Peak #28	45.907 °	1.97521 Å	1,100.0	1,248.0	7.90%	45.907	1,100.494	0.109	0.0543
29	Peak #29	47.254 °	1.92199 Å	235.0	386.0	1.70%	47.254	234.859	0.368	0.1841
30	Peak #30	47.621 °	1.90805 Å	132.0	287.0	0.90%	47.621	131.612	0.226	0.1131
31	Peak #31	48.609 °	1.87154 Å	105.0	260.0	0.80%	48.609	104.779	0.277	0.1385
32	Peak #32	50.264 °	1.81375 Å	1,559.0	1,699.0	11.20%	50.264	1,558.677	0.122	0.0608
33	Peak #33	50.867 °	1.79364 Å	150.0	280.0	1.10%	50.867	149.607	0.209	0.1046
34	Peak #34	54.464 °	1.68338 Å	29.3	149.0	0.20%	54.464	29.329	0.185	0.0926
35	Peak #35	54.970 °	1.66906 Å	321.0	448.0	2.30%	54.970	321.281	0.194	0.0970
36	Peak #36	55.410 °	1.65686 Å	147.0	275.0	1.10%	55.410	146.667	0.216	0.1079

ตารางที่ จ - 10 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	57.487 °	1.60183 Å	83.1	193.0	0.60%	57.487	83.105	0.196	0.0979
38	Peak #38	60.074 °	1.53888 Å	452.0	572.0	3.20%	60.074	451.668	0.164	0.0822
39	Peak #39	60.153 °	1.53705 Å	428.0	549.0	3.10%	60.153	428.275	0.164	0.0821
40	Peak #40	61.500 °	1.50658 Å	432.0	543.0	3.10%	61.500	431.834	0.267	0.1335
41	Peak #41	64.203 °	1.44951 Å	65.0	160.0	0.50%	64.203	65.036	0.200	0.1002
42	Peak #42	67.823 °	1.38069 Å	296.0	395.0	2.10%	67.823	296.307	0.205	0.1023
43	Peak #43	68.300 °	1.37220 Å	570.0	669.0	4.10%	68.300	569.676	0.281	0.1404
44	Peak #44	73.516 °	1.28719 Å	258.0	351.0	1.90%	73.516	258.387	0.199	0.0994
45	Peak #45	73.714 °	1.28422 Å	156.0	246.0	1.10%	73.714	155.619	0.199	0.0993
46	Peak #46	75.737 °	1.25487 Å	506.0	590.0	3.60%	75.737	506.343	0.141	0.0707
47	Peak #47	75.950 °	1.25187 Å	270.0	353.0	1.90%	75.950	270.334	0.146	0.0730
48	Peak #48	77.748 °	1.22736 Å	38.5	116.0	0.30%	77.748	38.482	0.071	0.0355

ตารางที่ จ - 10 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0875 P0125

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
49	Peak #49	80.065 °	1.19756 Å	91.9	179.0	0.70%	80.065	91.903	0.274	0.1372
50	Peak #50	81.216 °	1.18348 Å	68.8	156.0	0.50%	81.216	68.832	0.160	0.0800
51	Peak #51	81.577 °	1.17915 Å	1,083.0	1,173.0	7.80%	81.577	1,083.138	0.075	0.0373
52	Peak #52	81.823 °	1.17622 Å	538.0	627.0	3.90%	81.823	537.634	0.187	0.0934
53	Peak #53	83.892 °	1.15240 Å	247.0	334.0	1.80%	83.892	247.188	0.170	0.0851
54	Peak #54	84.138 °	1.14966 Å	133.0	222.0	1.00%	84.138	133.436	0.215	0.1073
55	Peak #55	84.907 °	1.14120 Å	41.0	127.0	0.30%	84.907	40.982	0.202	0.1012
56	Peak #56	87.506 °	1.11387 Å	35.4	102.0	0.30%	87.506	35.370	0.238	0.1188
57	Peak #57	88.241 °	1.10649 Å	22.7	87.8	0.20%	88.241	22.678	0.234	0.1170

ตารางที่ จ - 11 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	13.829 °	6.39831 Å	30.7	176.0	0.30%	13.829	30.691	0.114	0.0571
2	Peak #2	18.253 °	4.85651 Å	224.0	354.0	2.50%	18.253	224.384	0.141	0.0707
3	Peak #3	21.236 °	4.18059 Å	1,452.0	1,617.0	16.10%	21.236	1,452.484	0.155	0.0774
4	Peak #4	23.226 °	3.82670 Å	97.2	256.0	1.10%	23.226	97.171	0.447	0.2233
5	Peak #5	25.112 °	3.54336 Å	37.3	164.0	0.40%	25.112	37.330	0.179	0.0897
6	Peak #6	25.808 °	3.44930 Å	33.1	170.0	0.40%	25.808	33.141	0.155	0.0777
7	Peak #7	26.919 °	3.30939 Å	9,038.0	9,185.0	100.00%	26.919	9,037.589	0.087	0.0437
8	Peak #8	27.335 °	3.25998 Å	2,381.0	2,527.0	26.30%	27.335	2,380.990	0.132	0.0659
9	Peak #9	28.883 °	3.08873 Å	121.0	251.0	1.30%	28.883	120.880	0.290	0.1448
10	Peak #10	29.588 °	3.01671 Å	471.0	607.0	5.20%	29.588	471.218	0.267	0.1336
11	Peak #11	32.434 °	2.75821 Å	101.0	228.0	1.10%	32.434	100.627	0.388	0.1941
12	Peak #12	32.813 °	2.72724 Å	80.1	207.0	0.90%	32.813	80.146	0.413	0.2064

ตารางที่ จ - 11 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	34.256 °	2.61557 Å	399.0	521.0	4.40%	34.256	398.988	0.196	0.0979
14	Peak #14	36.157 °	2.48229 Å	51.2	179.0	0.60%	36.157	51.151	0.252	0.1259
15	Peak #15	36.687 °	2.44763 Å	2,473.0	2,598.0	27.40%	36.687	2,473.132	0.151	0.0754
16	Peak #16	39.629 °	2.27242 Å	274.0	382.0	3.00%	39.629	273.921	0.198	0.0989
17	Peak #17	40.429 °	2.22927 Å	107.0	207.0	1.20%	40.429	106.543	0.162	0.0809
18	Peak #18	41.180 °	2.19035 Å	40.4	144.0	0.40%	41.180	40.428	0.283	0.1417
19	Peak #19	41.417 °	2.17837 Å	31.8	140.0	0.40%	41.417	31.761	0.294	0.1471
20	Peak #20	41.922 °	2.15327 Å	31.3	144.0	0.30%	41.922	31.275	0.202	0.1008
21	Peak #21	42.621 °	2.11956 Å	138.0	253.0	1.50%	42.621	138.166	0.272	0.1361
22	Peak #22	43.373 °	2.08453 Å	109.0	220.0	1.20%	43.373	109.055	0.186	0.0931
23	Peak #23	43.930 °	2.05941 Å	32.3	139.0	0.40%	43.930	32.314	0.243	0.1213
24	Peak #24	45.993 °	1.97170 Å	139.0	238.0	1.50%	45.993	139.252	0.170	0.0848

ตารางที่ จ - 11 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	47.319 °	1.91952 Å	127.0	239.0	1.40%	47.319	127.304	0.372	0.1862
26	Peak #26	47.615 °	1.90828 Å	73.9	187.0	0.80%	47.615	73.923	0.405	0.2027
27	Peak #27	48.650 °	1.87006 Å	66.9	175.0	0.70%	48.650	66.942	0.174	0.0869
28	Peak #28	49.994 °	1.82290 Å	70.5	173.0	0.80%	49.994	70.542	0.160	0.0800
29	Peak #29	50.296 °	1.81266 Å	401.0	502.0	4.40%	50.296	400.586	0.275	0.1375
30	Peak #30	50.996 °	1.78939 Å	90.4	183.0	1.00%	50.996	90.422	0.285	0.1426
31	Peak #31	54.537 °	1.68129 Å	48.2	136.0	0.50%	54.537	48.157	0.238	0.1192
32	Peak #32	55.128 °	1.66464 Å	209.0	297.0	2.30%	55.128	208.857	0.176	0.0880
33	Peak #33	55.393 °	1.65731 Å	122.0	209.0	1.40%	55.393	122.138	0.333	0.1663
34	Peak #34	57.508 °	1.60128 Å	39.8	130.0	0.40%	57.508	39.848	0.263	0.1313
35	Peak #35	60.146 °	1.53720 Å	177.0	267.0	2.00%	60.146	177.363	0.217	0.1083
36	Peak #36	62.733 °	1.47990 Å	38.0	118.0	0.40%	62.733	38.042	0.177	0.0885

ตารางที่ จ - 11 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	64.191 °	1.44975 Å	171.0	247.0	1.90%	64.191	170.917	0.190	0.0950
38	Peak #38	67.865 °	1.37993 Å	383.0	462.0	4.20%	67.865	382.590	0.222	0.1110
39	Peak #39	68.400 °	1.37044 Å	414.0	490.0	4.60%	68.400	414.414	0.145	0.0726
40	Peak #40	68.537 °	1.36804 Å	499.0	573.0	5.50%	68.537	498.649	0.145	0.0725
41	Peak #41	73.580 °	1.28623 Å	171.0	239.0	1.90%	73.580	171.455	0.099	0.0493
42	Peak #42	73.788 °	1.28312 Å	66.9	134.0	0.70%	73.788	66.887	0.098	0.0492
43	Peak #43	75.803 °	1.25394 Å	404.0	467.0	4.50%	75.803	404.265	0.073	0.0363
44	Peak #44	76.022 °	1.25087 Å	183.0	245.0	2.00%	76.022	182.567	0.073	0.0363
45	Peak #45	77.832 °	1.22624 Å	53.9	115.0	0.60%	77.832	53.905	0.112	0.0560
46	Peak #46	80.072 °	1.19748 Å	140.0	197.0	1.60%	80.072	140.255	0.153	0.0764
47	Peak #47	80.173 °	1.19622 Å	72.6	130.0	0.80%	80.173	72.555	0.153	0.0764
48	Peak #48	81.237 °	1.18322 Å	165.0	226.0	1.80%	81.237	164.511	0.218	0.1088

ตารางที่ จ - 11 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0850 P0150

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
49	Peak #49	81.469 °	1.18044 Å	148.0	210.0	1.60%	81.469	147.684	0.259	0.1296
50	Peak #50	83.984 °	1.15137 Å	67.9	133.0	0.80%	83.984	67.936	0.244	0.1218
51	Peak #51	84.220 °	1.14875 Å	40.6	107.0	0.40%	84.220	40.574	0.245	0.1225

ตารางที่ จ - 12 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	11.666 °	7.57945 Å	87.1	958.0	1.00%	11.666	87.062	0.343	0.1717
2	Peak #2	18.136 °	4.88737 Å	1,589.0	2,077.0	17.40%	18.136	1,588.663	0.113	0.0563
3	Peak #3	20.944 °	4.23822 Å	3,291.0	3,760.0	36.10%	20.944	3,291.079	0.101	0.0505
4	Peak #4	23.117 °	3.84441 Å	238.0	650.0	2.60%	23.117	238.049	0.468	0.2342
5	Peak #5	23.690 °	3.75278 Å	268.0	651.0	2.90%	23.69	268.246	0.335	0.1676
6	Peak #6	24.978 °	3.56208 Å	81.8	431.0	0.90%	24.978	81.836	0.213	0.1065
7	Peak #7	25.716 °	3.46152 Å	900.0	1,252.0	9.90%	25.716	899.658	0.069	0.0343
8	Peak #8	26.731 °	3.33223 Å	9,129.0	9,478.0	100.00%	26.731	9,128.982	0.132	0.0659
9	Peak #9	27.146 °	3.28223 Å	1,166.0	1,510.0	12.80%	27.146	1,166.324	0.131	0.0653
10	Peak #10	27.389 °	3.25369 Å	485.0	824.0	5.30%	27.389	485.492	0.237	0.1185
11	Peak #11	28.751 °	3.10264 Å	207.0	526.0	2.30%	28.751	206.893	0.083	0.0417
12	Peak #12	29.478 °	3.02774 Å	1,063.0	1,383.0	11.60%	29.478	1,063.157	0.212	0.1058

ตารางที่ จ - 12 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	29.970 °	2.97913 Å	166.0	481.0	1.80%	29.97	165.780	0.274	0.1370
14	Peak #14	32.248 °	2.77366 Å	155.0	437.0	1.70%	32.248	154.799	0.321	0.1606
15	Peak #15	32.734 °	2.73365 Å	212.0	491.0	2.30%	32.734	211.558	0.408	0.2039
16	Peak #16	34.167 °	2.62220 Å	653.0	923.0	7.20%	34.167	652.883	0.174	0.0872
17	Peak #17	35.106 °	2.55414 Å	857.0	1,120.0	9.40%	35.106	856.813	0.132	0.0661
18	Peak #18	36.047 °	2.48962 Å	122.0	366.0	1.30%	36.047	121.632	0.165	0.0824
19	Peak #19	36.610 °	2.45258 Å	904.0	1,133.0	9.90%	36.61	903.883	0.146	0.0730
20	Peak #20	39.544 °	2.27710 Å	1,185.0	1,387.0	13.00%	39.544	1,184.706	0.086	0.0432
21	Peak #21	40.383 °	2.23171 Å	481.0	680.0	5.30%	40.383	480.818	0.094	0.0472
22	Peak #22	41.229 °	2.18785 Å	54.6	257.0	0.60%	41.229	54.633	0.252	0.1259
23	Peak #23	42.519 °	2.12444 Å	904.0	1,110.0	9.90%	42.519	904.346	0.166	0.0832
24	Peak #24	43.245 °	2.09040 Å	103.0	304.0	1.10%	43.245	103.065	0.162	0.0808

ตารางที่ จ - 12 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	43.939 °	2.05900 Å	39.5	229.0	0.40%	43.939	39.493	0.265	0.1326
26	Peak #26	45.874 °	1.97655 Å	682.0	854.0	7.50%	45.874	682.020	0.070	0.0349
27	Peak #27	47.223 °	1.92320 Å	338.0	517.0	3.70%	47.223	337.698	0.236	0.1180
28	Peak #28	47.551 °	1.91067 Å	156.0	338.0	1.70%	47.551	156.148	0.560	0.2802
29	Peak #29	48.586 °	1.87239 Å	124.0	300.0	1.40%	48.586	124.385	0.277	0.1384
30	Peak #30	50.224 °	1.81509 Å	1,487.0	1,656.0	16.30%	50.224	1487.324	0.090	0.0449
31	Peak #31	50.860 °	1.79386 Å	326.0	483.0	3.60%	50.860	326.040	0.207	0.1036
32	Peak #32	54.095 °	1.69397 Å	36.8	164.0	0.40%	54.095	36.815	0.200	0.0998
33	Peak #33	54.399 °	1.68522 Å	69.0	203.0	0.80%	54.399	68.989	0.327	0.1633
34	Peak #34	54.941 °	1.66987 Å	168.0	311.0	1.80%	54.941	168.342	0.155	0.0776
35	Peak #35	55.396 °	1.65723 Å	82.7	228.0	0.90%	55.396	82.726	0.210	0.1048
36	Peak #36	56.613 °	1.62446 Å	32.2	172.0	0.40%	56.613	32.212	0.164	0.0821

ตารางที่ จ - 12 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	57.423 °	1.60345 Å	45.3	178.0	0.50%	57.423	45.315	0.143	0.0717
38	Peak #38	58.711 °	1.57131 Å	35.7	157.0	0.40%	58.711	35.657	0.111	0.0555
39	Peak #39	60.033 °	1.53983 Å	1,093.0	1,225.0	12.00%	60.033	1,092.624	0.183	0.0917
40	Peak #40	62.606 °	1.48258 Å	43.4	163.0	0.50%	62.606	43.390	0.263	0.1317
41	Peak #41	63.100 °	1.47217 Å	339.0	452.0	3.70%	63.1	339.244	0.147	0.0735
42	Peak #42	64.181 °	1.44995 Å	94.8	199.0	1.00%	64.181	94.831	0.340	0.1701
43	Peak #43	64.871 °	1.43618 Å	80.0	184.0	0.90%	64.871	80.039	0.216	0.1079
44	Peak #44	65.840 °	1.41737 Å	54.7	152.0	0.60%	65.84	54.737	0.229	0.1144
45	Peak #45	67.842 °	1.38034 Å	237.0	346.0	2.60%	67.842	237.12	0.173	0.0864
46	Peak #46	68.379 °	1.37081 Å	351.0	462.0	3.80%	68.379	350.934	0.248	0.1238
47	Peak #47	72.958 °	1.29564 Å	32.4	139.0	0.40%	72.958	32.449	0.157	0.0786
48	Peak #48	73.518 °	1.28716 Å	120.0	227.0	1.30%	73.518	120.411	0.198	0.0992

ตารางที่ จ - 12 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
49	Peak #49	73.752 °	1.28365 Å	64.3	169.0	0.70%	73.752	64.253	0.220	0.1100
50	Peak #50	75.043 °	1.26473 Å	63.2	154.0	0.70%	75.043	63.242	0.124	0.0621
51	Peak #51	75.716 °	1.25516 Å	199.0	293.0	2.20%	75.716	199.019	0.086	0.0428
52	Peak #52	77.707 °	1.22790 Å	76.4	170.0	0.80%	77.707	76.395	0.150	0.0750
53	Peak #53	79.951 °	1.19899 Å	699.0	794.0	7.70%	79.951	698.931	0.160	0.0802
54	Peak #54	80.186 °	1.19607 Å	359.0	453.0	3.90%	80.186	359.069	0.187	0.0937
55	Peak #55	81.273 °	1.18279 Å	154.0	249.0	1.70%	81.273	154.281	0.100	0.0498
56	Peak #56	81.551 °	1.17945 Å	299.0	395.0	3.30%	81.551	299.376	0.316	0.1580
57	Peak #57	81.788 °	1.17663 Å	149.0	244.0	1.60%	81.788	149.075	0.325	0.1623
58	Peak #58	83.874 °	1.15260 Å	237.0	327.0	2.60%	83.874	236.885	0.221	0.1104
59	Peak #59	84.142 °	1.14961 Å	105.0	198.0	1.20%	84.142	105.235	0.343	0.1715
60	Peak #60	84.789 °	1.14249 Å	48.5	142.0	0.50%	84.789	48.537	0.246	0.1231

ตารางที่ จ - 12 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0825 P0175

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
61	Peak #61	87.727 °	1.11164 Å	78.7	163.0	0.90%	87.727	78.700	0.066	0.0329
62	Peak #62	88.009 °	1.10880 Å	37.4	121.0	0.40%	88.009	37.447	0.165	0.0827

ตารางที่ จ - 13 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
1	Peak #1	10.988 °	8.04558 Å	74.0	325.0	0.60%	10.988	74.002	0.168	0.0840
2	Peak #2	11.716 °	7.54747 Å	42.4	284.0	0.30%	11.716	42.426	0.251	0.1253
3	Peak #3	13.708 °	6.45449 Å	52.6	248.0	0.40%	13.708	52.582	0.238	0.1191
4	Peak #4	15.887 °	5.57394 Å	50.4	267.0	0.40%	15.887	50.414	0.055	0.0276
5	Peak #5	18.159 °	4.88148 Å	598.0	816.0	4.80%	18.159	598.293	0.113	0.0563
6	Peak #6	20.951 °	4.23681 Å	1,539.0	1,808.0	12.30%	20.951	1,539.308	0.116	0.0581
7	Peak #7	23.086 °	3.84954 Å	186.0	445.0	1.50%	23.086	186.259	0.435	0.2174
8	Peak #8	24.995 °	3.55966 Å	43.0	259.0	0.30%	24.995	43.005	0.129	0.0646
9	Peak #9	25.722 °	3.46064 Å	833.0	1059.0	6.70%	25.722	832.757	0.207	0.1037
10	Peak #10	26.744 °	3.33075 Å	12,522.0	12,755.0	100.00%	26.744	12,522.12	0.114	0.0581
11	Peak #11	27.616 °	3.22752 Å	854.0	1,077.0	6.80%	27.616	853.704	0.157	0.0786
12	Peak #12	28.767 °	3.10093 Å	155.0	374.0	1.20%	28.767	154.576	0.149	0.0744

ตารางที่ จ - 13 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
13	Peak #13	29.500 °	3.02555 Å	874.0	1,105.0	7.00%	29.500	873.819	0.201	0.1004
14	Peak #14	30.001 °	2.97609 Å	113.0	345.0	0.90%	30.001	113.200	0.248	0.1242
15	Peak #15	32.238 °	2.77456 Å	161.0	364.0	1.30%	32.238	160.795	0.376	0.1882
16	Peak #16	32.737 °	2.73335 Å	163.0	364.0	1.30%	32.737	163.455	0.344	0.1720
17	Peak #17	34.214 °	2.61867 Å	646.0	853.0	5.20%	34.214	645.612	0.277	0.1385
18	Peak #18	34.454 °	2.60095 Å	346.0	557.0	2.80%	34.454	346.479	0.286	0.1429
19	Peak #19	34.813 °	2.57494 Å	189.0	402.0	1.50%	34.813	189.460	0.152	0.0758
20	Peak #20	36.072 °	2.48796 Å	62.3	263.0	0.50%	36.072	62.269	0.147	0.0733
21	Peak #21	36.645 °	2.45031 Å	490.0	681.0	3.90%	36.645	490.168	0.137	0.0686
22	Peak #22	39.551 °	2.27673 Å	2,035.0	2,214.0	16.30%	39.551	2,034.870	0.080	0.0402
23	Peak #23	40.379 °	2.23194 Å	236.0	411.0	1.90%	40.379	235.964	0.150	0.0750
24	Peak #24	42.540 °	2.12343 Å	287.0	467.0	2.30%	42.540	287.478	0.185	0.0923

ตารางที่ จ - 13 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
25	Peak #25	43.452 °	2.08095 Å	268.0	453.0	2.10%	43.452	268.030	0.174	0.0869
26	Peak #26	45.874 °	1.97655 Å	504.0	672.0	4.00%	45.874	504.231	0.132	0.0660
27	Peak #27	47.215 °	1.92349 Å	240.0	402.0	1.90%	47.215	239.696	0.264	0.1319
28	Peak #28	47.555 °	1.91053 Å	94.1	258.0	0.80%	47.555	94.138	0.443	0.2214
29	Peak #29	48.587 °	1.87235 Å	87.7	253.0	0.70%	48.587	87.700	0.214	0.1071
30	Peak #30	48.753 °	1.86634 Å	196.0	362.0	1.60%	48.753	195.682	0.214	0.1070
31	Peak #31	50.214 °	1.81541 Å	889.0	1,050.0	7.10%	50.214	889.027	0.200	0.1001
32	Peak #32	50.589 °	1.80284 Å	204.0	358.0	1.60%	50.589	203.887	0.388	0.1942
33	Peak #33	54.437 °	1.68413 Å	42.6	181.0	0.30%	54.437	42.573	0.177	0.0885
34	Peak #34	54.962 °	1.66929 Å	844.0	989.0	6.70%	54.962	844.447	0.117	0.0587
35	Peak #35	55.345 °	1.65864 Å	111.0	256.0	0.90%	55.345	110.641	0.232	0.1161
36	Peak #36	57.381 °	1.60452 Å	60.0	186.0	0.50%	57.381	59.988	0.327	0.1636

ตารางที่ จ - 13 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ทัลร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
37	Peak #37	57.388 °	1.60434 Å	53.8	180.0	0.40%	57.388	53.824	0.327	0.1636
38	Peak #38	60.024 °	1.54004 Å	432.0	557.0	3.50%	60.024	432.134	0.188	0.0940
39	Peak #39	64.128 °	1.45103 Å	140.0	249.0	1.10%	64.128	139.519	0.238	0.1191
40	Peak #40	64.284 °	1.44789 Å	94.9	207.0	0.80%	64.284	94.887	0.238	0.1190
41	Peak #41	67.848 °	1.38024 Å	436.0	551.0	3.50%	67.848	435.819	0.188	0.0940
42	Peak #42	68.408 °	1.37030 Å	781.0	896.0	6.20%	68.408	780.555	0.249	0.1247
43	Peak #43	73.486 °	1.28764 Å	101.0	203.0	0.80%	73.486	100.697	0.174	0.0871
44	Peak #44	75.739 °	1.25484 Å	226.0	320.0	1.80%	75.739	225.693	0.179	0.0893
45	Peak #45	75.919 °	1.25231 Å	129.0	224.0	1.00%	75.919	129.244	0.178	0.0892
46	Peak #46	77.711 °	1.22784 Å	183.0	275.0	1.50%	77.711	183.169	0.206	0.1029
47	Peak #47	77.946 °	1.22473 Å	108.0	199.0	0.90%	77.946	108.316	0.213	0.1065
48	Peak #48	79.916 °	1.19943 Å	166.0	253.0	1.30%	79.916	165.562	0.185	0.0925

ตารางที่ จ - 13 (ต่อ) ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0800 P0200

Index	Name	Angle	d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	Position	Intensity	FWHM	Width (Low)
49	Peak #49	80.142 °	1.19661 Å	124.0	212.0	1.00%	80.142	124.242	0.185	0.0923
50	Peak #50	81.174 °	1.18398 Å	70.3	158.0	0.60%	81.174	70.333	0.153	0.0765
51	Peak #51	81.503 °	1.18003 Å	167.0	257.0	1.30%	81.503	167.269	0.111	0.0557
52	Peak #52	83.870 °	1.15264 Å	400.0	490.0	3.20%	83.870	400.446	0.089	0.0444
53	Peak #53	84.123 °	1.14982 Å	181.0	273.0	1.40%	84.123	181.473	0.202	0.1009
54	Peak #54	84.968 °	1.14054 Å	109.0	200.0	0.90%	84.968	109.493	0.123	0.0613



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อการวิจัยขั้นสูง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
โทรศัพท์ 0-2564-4568, โทรสาร 0-2564-4568, E-mail: tucsear@tu.ac.th

ใบรายงานผลเลขที่: -
วันที่รายงานผล: 14 ตุลาคม 2564

อ้างอิงใบเสนอราคาเลขที่: -
เลขที่คำขอ: R2-640520

ผลการทดสอบ: ปริมาณธาตุ

ชื่อตัวอย่าง: PK-20	ลักษณะตัวอย่าง: ของแข็ง	วิธีทดสอบ: ICP-OES
น้ำหนักตัวอย่าง: 0.3043 กรัม		
ธาตุ	ปริมาณ	หน่วย
Ag	<33.3*	mg/kg
As	<33.3*	mg/kg
Cd	<33.3*	mg/kg
Co	<33.3*	mg/kg
Cr	<33.3*	mg/kg
Cu	257.18	mg/kg
Fe	8,905.89	mg/kg
Mn	274.67	mg/kg
Ni	<33.3*	mg/kg
Pb	<33.3*	mg/kg
Ti	481.13	mg/kg
Zn	55.73	mg/kg

หมายเหตุ:

* ปริมาณคำนวณจากน้ำหนักตัวอย่าง 0.3000 กรัม

ภาพที่ ฉ - 1 ผลการทดสอบปริมาณโลหะหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025
ด้วยเทคนิค ICP - OES

ภาพที่ ฉ - 2 ผลการทดสอบปริมาณโลหะหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ C100 S0975 P0025
ด้วยเทคนิค ICP - MS

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับ

ตารางที่ ข - 1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ (หน่วย: กิโลกรัม)

Mix Code	Compressive Strength (kg)				
	Air Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S1000 P0000	5,860.0	6,240.0	6,860.0	7,430.0	7,620.0
	5,180.0	6,740.0	6,780.0	7,020.0	7,530.0
	4,700.0	6,730.0	6,940.0	8,340.0	8,050.0
	4,725.0	6,728.0	6,875.0	8,343.0	7,970.0
ค่าเฉลี่ย	5,116.3	6,609.5	6,863.8	7,783.3	7,792.5
C100 S0975 P0025	5,700.0	6,560.0	7,230.0	6,900.0	8,720.0
	6,580.0	6,190.0	6,980.0	8,040.0	8,310.0
	5,870.0	6,740.0	6,600.0	8,280.0	8,090.0
	4,630.0	6,750.0	7,250.0	7,660.0	8,770.0
ค่าเฉลี่ย	5,695.0	6,560.0	7,015.0	7,720.0	8,472.5
C100 S0950 P0050	4,860.0	5,180.0	5,950.0	6,710.0	7,540.0
	4,410.0	5,200.0	5,600.0	6,070.0	8,220.0
	4,440.0	5,310.0	5,660.0	6,630.0	7,160.0
	5,180.0	5,345.0	5,700.0	6,470.0	6,950.0
ค่าเฉลี่ย	4,722.5	5,258.8	5,727.5	6,470.0	7,467.5

ตารางที่ ช - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ
(หน่วย: กิโลกรัม)

Mix Code	Compressive Strength (kg)				
	Air Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S0925 P0075	4,290.0	5,060.0	5,630.0	6,470.0	7,030.0
	4,520.0	3,620.0	5,400.0	6,320.0	7,960.0
	4,630.0	4,550.0	5,610.0	6,130.0	7,530.0
	4,490.0	4,800.0	5,830.0	6,190.0	8,820.0
ค่าเฉลี่ย	4,482.5	4,507.5	5,617.5	6,277.5	7,835.0
C100 S0900 P0100	3,780.0	4,270.0	4,890.0	5,500.0	6,980.0
	3,610.0	4,010.0	5,110.0	5,640.0	6,090.0
	3,880.0	4,250.0	5,110.0	4,840.0	5,830.0
	3,950.0	4,240.0	5,210.0	5,570.0	6,400.0
ค่าเฉลี่ย	3,805.0	4,192.5	5,080.0	5,387.5	6,325.0
C100 S0875 P0125	3,680.0	4,680.0	5,000.0	5,230.0	5,370.0
	3,470.0	4,840.0	4,780.0	5,090.0	5,490.0
	3,570.0	4,540.0	4,620.0	5,120.0	5,920.0
	3,570.0	4,660.0	4,810.0	5,140.0	6,070.0
ค่าเฉลี่ย	3,572.5	4,680.0	4,802.5	5,145.0	5,712.5
C100 S0850 P0150	2,290.0	3,770.0	4,080.0	4,250.0	4,880.0
	2,650.0	3,740.0	4,100.0	4,340.0	5,710.0
	3,190.0	3,600.0	3,980.0	3,500.0	5,640.0
	2,940.0	3,750.0	2,800.0	4,310.0	5,160.0
ค่าเฉลี่ย	2,767.5	3,715.0	3,740.0	4,100.0	5,347.5

ตารางที่ ช - 1 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มอากาศ
(หน่วย: กิโลกรัม)

Mix Code	Compressive Strength (kg)				
	Air Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S0825 P0175	2,880.0	3,040.0	3,440.0	3,460.0	4,550.0
	2,930.0	3,080.0	3,410.0	4,000.0	4,510.0
	2,190.0	3,130.0	3,260.0	3,890.0	4,870.0
	2,870.0	3,190.0	3,280.0	3,560.0	4,700.0
ค่าเฉลี่ย	2,717.5	3,110.0	3,347.5	3,727.5	4,657.5
C100 S0800 P0200	1,950.0	2,300.0	2,690.0	2,860.0	3,410.0
	2,410.0	2,260.0	2,440.0	2,950.0	3,150.0
	2,340.0	2,620.0	2,870.0	2,980.0	3,030.0
	2,360.0	2,630.0	2,450.0	2,900.0	3,145.0
ค่าเฉลี่ย	2,265.0	2,452.5	2,612.5	2,922.5	3,183.8

ตารางที่ ช - 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่ป่มในน้ำ (หน่วย: นิวตัน)

Mix Code	Compressive Strength (N)				
	Water Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S1000 P0000	57,486.6	61,214.4	67,296.6	72,888.3	74,752.2
	50,815.8	66,119.4	66,511.8	68,866.2	73,869.3
	46,107.0	66,021.3	68,081.4	81,815.4	78,970.5
	46,352.3	66,001.7	67,443.8	81,844.8	78,185.7
ค่าเฉลี่ย	50,190.4	64,839.2	67,333.4	76,353.7	76,444.4
C100 S0975 P0025	55,917.0	64,353.6	70,926.3	67,689.0	85,543.2
	64,549.8	60,723.9	68,473.8	78,872.4	81,521.1
	57,584.7	66,119.4	64,746.0	81,226.8	79,362.9
	45,420.3	66,217.5	71,122.5	75,144.6	86,033.7
ค่าเฉลี่ย	55,868.0	64,353.6	68,817.2	75,733.2	83,115.2
C100 S0950 P0050	47,676.6	50,815.8	58,369.5	65,825.1	73,967.4
	43,262.1	51,012.0	54,936.0	59,546.7	80,638.2
	43,556.4	52,091.1	55,524.6	65,040.3	80,049.6
	50,815.8	52,434.5	55,917.0	63,470.7	77,989.5
ค่าเฉลี่ย	46,327.7	51,588.3	56,186.8	63,470.7	78,161.2
C100 S0925 P0075	42,084.9	49,638.6	55,230.3	63,470.7	68,964.3
	44,341.2	35,512.2	52,974.0	61,999.2	78,087.6
	45,420.3	44,635.5	55,034.1	60,135.3	73,869.3
	44,046.9	47,088.0	57,192.3	60,723.9	86,524.2
ค่าเฉลี่ย	43,973.3	44,218.6	55,107.7	61,582.3	76,861.4

ตารางที่ ช - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ
(หน่วย: นิวตัน)

Mix Code	Compressive Strength (N)				
	Air Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S0900 P0100	37,081.8	41,888.7	47,970.9	53,955.0	68,473.8
	35,414.1	39,338.1	50,129.1	55,328.4	59,742.9
	38,062.8	41,692.5	50,129.1	47,480.4	57,192.3
	38,749.5	41,594.4	51,110.1	54,641.7	62,784.0
ค่าเฉลี่ย	37,327.1	41,128.4	49,834.8	52,851.4	62,048.3
C100 S0875 P0125	36,100.8	45,910.8	49,050.0	51,306.3	52,679.7
	34,040.7	47,480.4	46,891.8	49,932.9	53,856.9
	35,021.7	44,537.4	45,322.2	50,227.2	58,075.2
	35,021.7	45,714.6	47,186.1	50,423.4	59,546.7
ค่าเฉลี่ย	35,046.2	45,910.8	47,112.5	50,472.5	56,039.6
C100 S0850 P0150	22,464.9	36,983.7	40,024.8	41,692.5	47,872.8
	25,996.5	36,689.4	40,221.0	42,575.4	56,015.1
	31,293.9	35,316.0	39,043.8	34,335.0	55,328.4
	28,841.4	36,787.5	27,468.0	42,281.1	50,619.6
ค่าเฉลี่ย	27,149.2	36,444.2	36,689.4	40,221.0	52,459.0
C100 S0825 P0175	28,252.8	29,822.4	33,746.4	33,942.6	44,635.5
	28,743.3	30,214.8	33,452.1	39,240.0	44,243.1
	21,483.9	30,705.3	31,980.6	38,160.9	47,774.7
	28,154.7	31,293.9	32,176.8	34,923.6	46,107.0
ค่าเฉลี่ย	26,658.7	30,509.1	32,839.0	36,566.8	45,690.1

ตารางที่ ช - 2 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ
(หน่วย: นิวตัน)

Mix Code	Compressive Strength (N)				
	Air Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S0800 P0200	19,129.5	22,563.0	26,388.9	28,056.6	33,452.1
	23,642.1	22,170.6	23,936.4	28,939.5	30,901.5
	22,955.4	25,702.2	28,154.7	29,233.8	29,724.3
	23,151.6	25,800.3	24,034.5	28,449.0	30,852.5
ค่าเฉลี่ย	22,219.7	24,059.0	25,628.6	28,669.7	31,232.6

ตารางที่ ช - 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ (หน่วย: กิโลกรัม)

Mix Code	Compressive Strength (Kg)				
	Water Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S1000 P0000	5,950.0	5,520.0	7,820.0	6,780.0	8,040.0
	5,950.0	6,710.0	7,410.0	7,010.0	8,120.0
	6,030.0	6,400.0	7,560.0	8,160.0	10,090.0
	3,013.0	3,425.0	7,589.0	8,262.0	10,060.0
ค่าเฉลี่ย	5,235.8	5,513.8	7,594.8	7,553.0	9,077.5
C100 S0975 P0025	6,260.0	6,590.0	7,890.0	7,520.0	9,060.0
	4,490.0	6,520.0	8,200.0	7,820.0	8,590.0
	4,940.0	6,100.0	7,160.0	7,910.0	8,230.0
	5,980.0	6,280.0	7,260.0	7,410.0	8,560.0
ค่าเฉลี่ย	5,417.5	6,372.5	7,627.5	7,665.0	8,610.0
C100 S0950 P0050	5,680.0	5,610.0	5,790.0	7,250.0	8,700.0
	5,040.0	5,520.0	6,270.0	7,320.0	7,930.0
	5,060.0	5,550.0	7,160.0	7,220.0	8,300.0
	5,250.0	5,430.0	5,780.0	7,020.0	8,360.0
ค่าเฉลี่ย	5,257.5	5,527.5	6,250.0	7,202.5	8,322.5
C100 S0925 P0075	4,170.0	4,910.0	6,380.0	6,650.0	8,590.0
	4,510.0	5,060.0	5,720.0	6,850.0	7,460.0
	4,130.0	5,240.0	6,000.0	6,810.0	7,310.0
	4,770.0	5,060.0	6,280.0	6,490.0	8,490.0
ค่าเฉลี่ย	4,395.0	5,067.5	6,095.0	6,700.0	7,962.5

ตารางที่ ช - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ
(หน่วย: กิโลกรัม)

Mix Code	Compressive Strength (Kg)				
	Water Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S0900 P0100	3,800.0	4,540.0	4,970.0	6,080.0	6,290.0
	4,140.0	4,670.0	5,570.0	6,250.0	6,750.0
	4,410.0	5,030.0	5,190.0	6,400.0	6,640.0
	4,490.0	4,850.0	5,190.0	5,860.0	6,490.0
ค่าเฉลี่ย	4,210.0	4,772.5	5,230.0	6,147.5	6,542.5
C100 S0875 P0125	3,060.0	4,630.0	5,260.0	5,770.0	5,890.0
	3,760.0	4,340.0	5,060.0	5,230.0	5,740.0
	3,830.0	4,830.0	5,120.0	5,260.0	6,180.0
	3,810.0	4,930.0	5,080.0	5,330.0	5,960.0
ค่าเฉลี่ย	3,615.0	4,682.5	5,130.0	5,397.5	5,942.5
C100 S0850 P0150	3,540.0	5,040.0	4,010.0	4,860.0	5,340.0
	3,490.0	4,300.0	4,280.0	4,650.0	5,760.0
	3,540.0	3,870.0	4,450.0	3,830.0	5,270.0
	3,420.0	3,440.0	4,090.0	4,290.0	5,450.0
ค่าเฉลี่ย	3,497.5	4,162.5	4,207.5	4,407.5	5,455.0
C100 S0825 P0175	3,280.0	3,660.0	3,760.0	4,150.0	4,960.0
	3,250.0	3,580.0	3,500.0	4,020.0	4,670.0
	3,270.0	3,700.0	3,970.0	4,140.0	4,720.0
	3,360.0	3,610.0	3,820.0	3,960.0	4,570.0
ค่าเฉลี่ย	3,290.0	3,637.5	3,762.5	4,067.5	4,730.0

ตารางที่ ช - 3 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ
(หน่วย: กิโลกรัม)

Mix Code	Compressive Strength (Kg)				
	Water Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S0800 P0200	2,680.0	2,990.0	3,070.0	3,270.0	4,210.0
	2,200.0	2,930.0	2,900.0	3,140.0	3,730.0
	2,350.0	2,590.0	3,100.0	3,570.0	3,870.0
	3,485.0	2,990.0	2,970.0	3,100.0	3,760.0
ค่าเฉลี่ย	2,678.8	2,875.0	3,010.0	3,270.0	3,892.5

ตารางที่ ช - 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ (หน่วย: นิวตัน)

Mix Code	Compressive Strength (N)				
	Water Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S1000 P0000	58,369.5	54,151.2	76,714.2	66,511.8	78,872.4
	58,369.5	65,825.1	72,692.1	68,768.1	79,657.2
	59,154.3	62,784.0	74,163.6	80,049.6	98,982.9
	29,557.5	33,599.3	74,448.1	81,050.2	98,688.6
ค่าเฉลี่ย	51,362.7	54,089.9	74,504.5	74,094.9	89,050.3
C100 S0975 P0025	61,410.6	64,647.9	77,400.9	73,771.2	88,878.6
	44,046.9	63,961.2	80,442.0	76,714.2	84,267.9
	48,461.4	59,841.0	70,239.6	77,597.1	80,736.3
	58,663.8	61,606.8	71,220.6	72,692.1	83,973.6
ค่าเฉลี่ย	53,145.7	62,514.2	74,825.8	75,193.7	84,464.1
C100 S0950 P0050	55,720.8	55,034.1	56,799.9	71,122.5	85,347.0
	49,442.4	54,151.2	61,508.7	71,809.2	77,793.3
	49,638.6	54,445.5	70,239.6	70,828.2	81,423.0
	51,502.5	53,268.3	56,701.8	68,866.2	82,011.6
ค่าเฉลี่ย	51,576.1	54,224.8	61,312.5	70,656.5	81,643.7
C100 S0925 P0075	40,907.7	48,167.1	62,587.8	65,236.5	84,267.9
	44,243.1	49,638.6	56,113.2	67,198.5	73,182.6
	40,515.3	51,404.4	58,860.0	66,806.1	71,711.1
	46,793.7	49,638.6	61,606.8	63,666.9	83,286.9
ค่าเฉลี่ย	43,115.0	49,712.2	59,792.0	65,727.0	78,112.1

ตารางที่ ช - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ
(หน่วย: นิวตัน)

Mix Code	Compressive Strength (N)				
	Water Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S0900 P0100	37,278.0	44,537.4	48,755.7	59,644.8	61,704.9
	40,613.4	45,812.7	54,641.7	61,312.5	66,217.5
	43,262.1	49,344.3	50,913.9	62,784.0	65,138.4
	44,046.9	47,578.5	50,913.9	57,486.6	63,666.9
ค่าเฉลี่ย	41,300.1	46,818.2	51,306.3	60,307.0	64,181.9
C100 S0875 P0125	30,018.6	45,420.3	51,600.6	56,603.7	57,780.9
	36,885.6	42,575.4	49,638.6	51,306.3	56,309.4
	37,572.3	47,382.3	50,227.2	51,600.6	60,625.8
	37,376.1	48,363.3	49,834.8	52,287.3	58,467.6
ค่าเฉลี่ย	35,463.2	45,935.3	50,325.3	52,949.5	58,295.9
C100 S0850 P0150	34,727.4	49,442.4	39,338.1	47,676.6	52,385.4
	34,236.9	42,183.0	41,986.8	45,616.5	56,505.6
	34,727.4	37,964.7	43,654.5	37,572.3	51,698.7
	33,550.2	33,746.4	40,122.9	42,084.9	53,464.5
ค่าเฉลี่ย	34,310.5	40,834.1	41,275.6	43,237.6	53,513.6
C100 S0825 P0175	32,176.8	35,904.6	36,885.6	40,711.5	48,657.6
	31,882.5	35,119.8	34,335.0	39,436.2	45,812.7
	32,078.7	36,297.0	38,945.7	40,613.4	46,303.2
	32,961.6	35,414.1	37,474.2	38,847.6	44,831.7
ค่าเฉลี่ย	32,274.9	35,683.9	36,910.1	39,902.2	46,401.3

ตารางที่ ช - 4 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ
(หน่วย: นิวตัน)

Mix Code	Compressive Strength (N)				
	Water Curing				
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days
C100 S0800 P0200	26,290.8	29,331.9	30,116.7	32,078.7	41,300.1
	21,582.0	28,743.3	28,449.0	30,803.4	36,591.3
	23,053.5	25,407.9	30,411.0	35,021.7	37,964.7
	34,187.9	29,331.9	29,135.7	30,411.0	36,885.6
ค่าเฉลี่ย	26,278.5	28,203.8	29,528.1	32,078.7	38,185.4

ภาคผนวก ซ
ภาพประกอบการทำวิจัย



ภาพที่ ซ - 1 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว



ภาพที่ ซ - 2 เครื่องย่อยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ ซ - 3 กระบวนการคัดแยกซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะออกจากส่วนอโลหะ



ภาพที่ ซ - 4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคัดแยกซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ ๕ - 5 การทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด



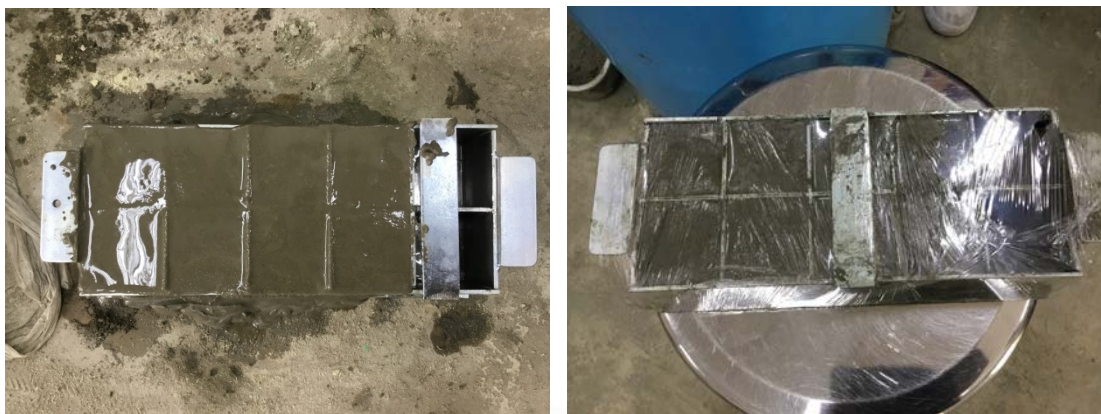
ภาพที่ ๖ - 6 การทดสอบอัตราการไหลของmortarปรับระดับ (Initial Flow)



ภาพที่ ๗ - 7 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับ (Setting Time)



ภาพที่ ๘ - 8 การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ



ภาพที่ ๘ - 8 (ต่อ) การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ



ภาพที่ ๙ - 9 ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศ



ภาพที่ ๑๐ - 10 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ



ภาพที่ ซ - 11 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างmortarปรับระดับ



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาววิณา บัวผาย
วันเดือนปีเกิด	31 พฤษภาคม 2533
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2562: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีปทุม ปีการศึกษา 2555: วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ตำแหน่ง	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ กลุ่มงานพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสีย ส่วนวิชาการจัดการคุณภาพน้ำ สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร
ทุนการศึกษา	-
ผลงานทางวิชาการ	-
ประสบการณ์ทำงาน	2565: กลุ่มงานพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสีย ส่วนวิชาการจัดการคุณภาพน้ำ สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร 2564: วิศวกรโยธาปฏิบัติการ กลุ่มงานตรวจสอบระบบสาธารณสุขปโศค กองแผนงานและประสานสาธารณสุขปโศค สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร 2560: นักจัดการงานทั่วไปปฏิบัติการ กลุ่มงานประกันสุขภาพ โรงพยาบาลกลาง สำนักการแพทย์ กรุงเทพมหานคร