



การนำถ้ำลอยถ่านหินและตะกั่วลูมิเนียมมาใช้เป็นวัตถุดิบ
ในการผลิตวัสดุทนไฟ

โดย

นางสาววิญญาภัทร์ สุขเข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การนำถ้ำลอยถ่านหินและตะกั่วถ่านหินมาใช้เป็นวัตถุดิบ
ในการผลิตวัสดุทนไฟ

โดย

นางสาววิญญาภัทร์ สุขเข



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

UTILIZATION OF COAL FLY ASH AND ALUMINUM DROSS AS RAW
MATERIALS FOR REFRACTORY PRODUCTION

BY

MISS RINYAPAT SUKKAE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
(MATERIALS INNOVATION AND TECHNOLOGY)
DEPARTMENT OF MATERIALS AND TEXTILE TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2017
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวริญาภัทร์ สุขเข


เรื่อง

การนำถ้ำลอยถ่านหินและตะกรันอลูมิเนียมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุทนไฟ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)

เมื่อ วันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทพร คงคะจันทร์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



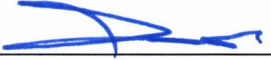
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญญา เชิดศิริบุญกร)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ชดตระการ)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำเถ้าลอยถ่านหินและตะกั่วอลูมิเนียมมาใช้เป็น วัตถุดิบในการผลิตวัสดุทนไฟ
ชื่อผู้เขียน	นางสาวริญญาภัทร์ สุขเข
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญญา เชตหิรัญกร
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการผลิตวัสดุทนไฟประเภทอิฐดินทนไฟโดยใช้วัตถุดิบจากวัสดุเหลือทิ้งของอุตสาหกรรมซึ่งได้แก่ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียม โดยการดำเนินงานได้นำเถ้าลอยถ่านหินผสมดินทนไฟซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอิฐทนไฟ จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยถ่านหินต่อดินทนไฟคือ ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 1100 - 1400 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และโครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่ผลิตขึ้น แต่เนื่องจากในองค์ประกอบของเถ้าลอยนั้นพบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณมากจึงทำให้การทนความร้อนลดต่ำลง จึงได้นำตะกั่วอลูมิเนียมมาใช้เป็นวัตถุดิบเพิ่ม เนื่องจากมีปริมาณอลูมินาสูง จึงคาดว่าจะสามารถปรับสมบัติของอิฐดินทนไฟให้ดียิ่งขึ้น การนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์จะช่วยลดปริมาณและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเหล่านี้ทั้ง รวมทั้งช่วยลดต้นทุนการผลิตอิฐดินทนไฟด้วย

ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตอิฐดินทนไฟได้โดยใช้วัตถุดิบเป็นเถ้าลอยถ่านหินและดินทนไฟ โดยการเติมเถ้าลอยถ่านหินสามารถช่วยปรับสมบัติทางกายภาพได้ เช่น ช่วยให้ค่าการหดตัวเชิงเส้นของตัวอย่างลดต่ำลง และมีค่าการนำความร้อนลดต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยถ่านหินเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดต่ำลง เมื่อเติมตะกั่วอลูมิเนียมพบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟได้ดียิ่งขึ้น เช่น ค่าการหดตัวเชิงเส้นต่ำลง โดยที่ชิ้นงานยังมีความแข็งแรงสูง

คำสำคัญ: อิฐดินทนไฟ, เถ้าลอยถ่านหิน, ตะกั่วอลูมิเนียม, ดินทนไฟ

Thesis Title	UTILIZATION OF COAL FLY ASH AND ALUMINUM DROSS AS RAW MATERIALS FOR REFRACTORY PRODUCTION
Author	Miss Rinyapat Sukkae
Degree	Master of Science (Materials Innovation and Technology)
Department /Faculty/University	Materials and Textile Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University
Thesis Advisor	Assistant Professor Benya Cherdhirunkorn, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

This research is to study the production of fireclay bricks by using raw materials from industrial wastes, coal fly ash and aluminum dross. The sample preparation was mixture containing of coal fly ash and fire clays. Coal fly ash was added to the mixture from 10-50 wt% and sintered at temperature of 1100-1400°C. And study the physical properties, mechanical properties, thermal properties and the phase structure of fireclay bricks product. However, Coal fly ash contains high amount of calcium oxide (CaO) which can reduce the heat resistance of specimen. Thus, aluminum dross was added to raw material. Because of its high alumina content. It is expected to improve the properties of fireclay bricks product. Utilization of wastes will reduce the amount and cost of disposing of these wastes and reduce in production cost of fireclay bricks.

It was found that the coal fly ash and fire clays can be used in the fabrication of fireclay bricks. It can improve the physical properties such as lower linear shrinkage and lower thermal conductivity. However, Brazillian tensile strength was lower in sample contains the coal fly ash.

Keywords: Fireclay bricks, Coal fly ash, Aluminum dross, Fire clays

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและการชี้แนะที่เป็นประโยชน์จากกรรมการวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทพร คงคะจันทร์ ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ ที่ให้ความกรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญญา เชิดศิริฎกร กรรมการและที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และคอยชี้แนะให้คำปรึกษา ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสมเกียรติ สืบถวิลกุล จากบริษัทสยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด จังหวัดสระบุรี เป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องของวัสดุดิบ รวมทั้งความรู้ และคำแนะนำตลอดการทำกรวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร. พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล และคุณศุธีรพันธ์ พันธุ์เลิศ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ให้ความอนุเคราะห์ทั้งเรื่องของอุปกรณ์ เครื่องมือต่าง ๆ รวมถึงสถานที่ปฏิบัติงาน ณ ห้องปฏิบัติการเซรามิกประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช. หรือ NSTDA) ตลอดการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติที่ได้มอบทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้ “ทุนวิจัยทั่วไป” ตามสัญญาเลขที่ ทน 22 /2561

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง ขอขอบพระคุณกำลังใจจากครอบครัว เหล่าคณาจารย์ เพื่อนๆ และอีกหลายท่านที่ได้กล่าวถึงในที่นี้ คุณความดีที่พึงจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำขอมอบให้บุคคลที่ได้กล่าวมาทั้งหมดทั้งสิ้น

นางสาวริฎญาภัทร์ สุขเข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุทนไฟ	4
2.1.1 แบ่งประเภทตามองค์ประกอบได้เป็น 3 ประเภท	4
2.1.1.1 วัสดุทนไฟประเภทกรด	4
2.1.1.2 วัสดุทนไฟประเภทกลาง	5
2.1.1.3 วัสดุทนไฟประเภทต่าง	6
2.1.1.4 วัสดุทนไฟประเภทพิเศษอื่นๆ	7
2.1.2 แบ่งประเภทวัสดุทนไฟตามลักษณะรูปร่างได้ 2 ประเภท	7
2.1.2.1 วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างแน่นอน (Shaped refractory)	7
2.1.2.2 วัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน (Unshaped refractory	8
หรือ Monolithic)	

2.2	วัตถุดิบ	9
2.2.1	ดินทนไฟ (Fire clays)	9
2.4.2	ซามอตต์ (Chamotte) หรือ Grog	9
2.2.3	แร่บอกไซต์ (Bauxite)	10
2.2.4	แมกนีไซต์ (Magnrsite)	10
2.2.5	โดโลไมต์ (Dolomite)	10
2.2.6	ทัล (Talc)	11
2.2.7	แร่กลุ่มซิลิเกต	11
2.2.8	แกรไฟต์ (Graphite)	11
2.3	สมบัติทั่วไปของวัสดุทนไฟ	11
2.3.1	ซิลิกา (Quartz)	11
2.3.2	อลูมินา (Alumina)	12
2.3.3	เซอร์โคเนีย (Zirconia; ZrO ₂)	12
2.4	อิฐทนไฟ	13
2.5	ของเสียจากอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอิฐทนไฟ	14
2.5.1	เถ้าลอยถ่านหิน	14
2.5.2	ตะกรันอลูมิเนียม	18
บทที่ 3	วิธีการวิจัย	21
3.1	การเตรียมวัตถุดิบ	21
3.1.1	ดินทนไฟ (Fire clays)	21
3.1.2	เถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash)	21
3.1.3	ตะกรันอลูมิเนียม (Aluminum dross)	21
3.2	การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ	22
3.2.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหินด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	22
3.2.2	การวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของวัตถุดิบด้วยเทคนิค XRD	22
3.2.3	การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	23
3.3	การผลิตอิฐดินทนไฟ	24

3.3.1 การผลิตอิฐดินทนไฟจากเถ้าลอยถ่านหิน และดินทนไฟ	24
3.3.2 การผลิตอิฐดินทนไฟโดยเพิ่มตะกั่วอนุลูมิเนียม	25
3.3.2.1 การผลิตอิฐดินทนไฟที่มีอัตราส่วนผสมของดินทนไฟ เถ้าลอย ถ่านหิน และตะกั่วอนุลูมิเนียมที่ผ่านการแช่น้ำ	25
3.3.2.2 การผลิตอิฐดินทนไฟที่มีอัตราส่วนผสมของดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอนุลูมิเนียมที่ผ่านการเผาแคลไซน์	25
3.4 การทดสอบสมบัติของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ	30
3.4.1 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟหลังเผา	30
3.4.2 การวัดค่าความหนาแน่นชิ้นงานอิฐดินทนไฟ และร้อยละ การดูดซึมน้ำ	30
3.4.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)	31
3.4.4 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของอิฐดินทนไฟ	31
3.4.5 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้อง (Modulus of rupture)	32
3.4.6 การนำความร้อน (Thermal conductivity)	33
3.4.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient, COE)	34
3.4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	36
4.1 การศึกษาสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย	36
4.1.1 สมบัติของดินทนไฟ	36
4.1.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินทนไฟ	36
4.1.1.2 โครงสร้างเฟสของดินทนไฟ	37
4.1.1.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	38
4.1.1.4 โครงสร้างจุลภาคของดินทนไฟ	39
4.1.2 สมบัติของเถ้าลอยถ่านหิน	40
4.1.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน	40
4.1.2.2 โครงสร้างเฟสของเถ้าลอยถ่านหิน	41
4.1.2.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	41

4.1.2.4	โครงสร้างจุลภาคของถ้ำลอยถ่านหิน	42
4.1.3	สมบัติของตะกักรันอลูมิเนียม	43
4.1.3.1	องค์ประกอบทางเคมีของตะกักรันอลูมิเนียม	43
4.1.3.2	โครงสร้างเฟสของตะกักรันอลูมิเนียม	44
4.1.3.3	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของตะกักรันอลูมิเนียม	47
4.1.3.4	โครงสร้างจุลภาคของตะกักรันอลูมิเนียม	47
4.1.4	สมบัติของดินซามอตต์	49
4.1.4.1	องค์ประกอบทางเคมี	49
4.1.4.2	โครงสร้างเฟสของซามอตต์	49
4.1.4.3	โครงสร้างจุลภาคของดินซามอตต์	50
4.2	อิฐดินเหนียวที่ผลิตจากดินเหนียวและถ้ำลอยถ่านหิน	51
4.2.1	ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเหนียวจากดินเหนียวและถ้ำลอยถ่านหิน	51
4.2.1.1	ความหนาแน่น (Bulk density)	51
4.2.1.2	ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)	52
4.2.1.3	การดูดซึมน้ำ (Water absorption)	53
4.2.1.4	การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)	53
4.2.1.5	ความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินเหนียว (Brazilian test)	54
4.2.1.6	ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินเหนียว (Modulus of rupture, MOR)	55
4.2.1.7	การนำความร้อน (Thermal conductivity)	56
4.2.1.8	โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินเหนียว	56
4.2.1.9	โครงสร้างเฟสของอิฐดินเหนียว	59
4.2.1.10	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient, COE)	63
4.3	อิฐดินเหนียวที่ผลิตจากดินเหนียว ถ้ำลอยถ่านหิน และตะกักรันอลูมิเนียม	64
4.3.1	ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเหนียวจากดินเหนียว ถ้ำลอยถ่านหิน และตะกักรันอลูมิเนียมแช่น้ำ	64
4.3.1.1	ความหนาแน่น (Bulk density)	64
4.3.1.2	ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)	65

4.3.1.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)	66
4.3.1.4 ความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ (Brazillian test)	66
4.3.1.5 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงาน	67
อิฐดินทนไฟ (Modulus of rupture, MOR)	
4.3.1.6 การนำความร้อน (Thermal conductivity)	68
4.3.1.7 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ	68
4.3.1.8 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟ	71
4.3.2 การศึกษาสมบัติของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ เถ้า	72
ลอยถ่านหิน และตะกัณอนุลิเนียมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	
4.3.2.1 ความหนาแน่น (Bulk density)	72
4.3.2.2 ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)	73
4.3.2.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)	73
4.3.2.4 ความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ (Brazillian test)	74
4.3.2.5 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงาน	75
อิฐดินทนไฟ (Modulus of rupture, MOR)	
4.3.2.6 การนำความร้อน (Thermal conductivity)	76
4.3.1.7 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ	76
4.3.2.8 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟ	79
4.4 อิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และชามอท์	80
4.4.1 ความหนาแน่น (Bulk density)	80
4.4.2 ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)	80
4.4.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)	81
4.4.4 ความแข็งแรง (Brazilian test)	82
4.4.5 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ	82
(Modulus of rupture, MOR)	
4.4.6 การนำความร้อน (Thermal conductivity)	83
4.4.7 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ	84
4.4.8 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟ	86
4.5 สมบัติของอิฐดินทนไฟที่ผลิตได้ทั้งหมด	87
	87

4.5.1 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินเผาไฟ
ที่ผลิตได้ทั้งหมด (Modulus of rupture, MOR)

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	90
5.1 สรุปผลการวิจัย	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
รายการอ้างอิง	92
ประวัติผู้เขียน	96



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของถ่านหิน	15
2.2 สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนในการทดสอบ วัสดุทนไฟ	17
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านล้อยถ่านหิน	18
3.1 สัดส่วนผสมของดินทนไฟและถ่านล้อยถ่านหิน	24
3.2 สัดส่วนผสมของดินทนไฟ ถ่านล้อยถ่านหิน และตะกัณอลูมิเนียมที่ผ่าน การแช่น้ำ	26
3.3 สัดส่วนผสมของดินทนไฟ ถ่านล้อยถ่านหิน และตะกัณอลูมิเนียมที่ผ่าน การเผาแคลไซน์	26
3.4 สัดส่วนผสมของดินทนไฟ ถ่านล้อยถ่านหิน และซามอตต์	27
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินทนไฟ	37
4.2 องค์ประกอบทางเคมี ของถ่านล้อยถ่านหิน	40
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกัณอลูมิเนียม	44
4.4 องค์ประกอบทางเคมีของซามอตต์	49
4.5 สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน	63
4.6 สมบัติของอิฐดินทนไฟตามมาตรฐาน ASTM-SK30	64
4.7 สมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้ง	89

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ภาพถ่ายขยายของเก้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า ประเทศกรีซ	16
2.2 กระบวนการหลอมเศษอลูมิเนียม	19
3.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	23
3.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก	24
3.3 แผนภาพงานวิจัยการผลิตอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟและเก้าถ่านหิน	28
3.4 แผนภาพงานวิจัยการผลิตอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ เก้าถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียม	29
3.5 ลักษณะการทดสอบชิ้นงาน Brazilian tensile strength	32
3.6 ลักษณะการทดสอบชิ้นงานความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้อง	33
3.7 เครื่องวิเคราะห์การนำความร้อน Thermal Constant Analyzer	33
3.8 ลักษณะการเตรียมและวางตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการนำความร้อน	34
4.1 โครงสร้างเฟสของดินทนไฟ	38
4.2 ขนาดและการกระจายตัวอนุภาคของดินทนไฟ	39
4.3 โครงสร้างจุลภาคของดินทนไฟ	39
4.4 โครงสร้างเฟสของเก้าถ่านหิน	41
4.5 ขนาดและการกระจายตัวอนุภาคของเก้าถ่านหิน	42
4.6 โครงสร้างจุลภาคของเก้าถ่านหิน	42
4.7 โครงสร้างเฟสของตะกั่วอลูมิเนียม	45
4.8 โครงสร้างเฟสของตะกั่วอลูมิเนียมหลังแช่น้ำเป็นเวลา 3 วัน	46
4.9 โครงสร้างเฟสของตะกั่วอลูมิเนียมหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	46
4.10 ขนาดและการกระจายตัวอนุภาคของตะกั่วอลูมิเนียมที่ผ่านการแช่น้ำ 3 วัน และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	47
4.11 โครงสร้างจุลภาคของตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำ	48
4.12 โครงสร้างจุลภาคของตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซน์	48
4.13 โครงสร้างเฟสของดินซามอตต์ (Chamotte)	50
4.14 โครงสร้างจุลภาคของดินซามอตต์	50
4.15 ความหนาแน่นรวมของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและเก้าถ่านหิน	51

4.16 ความพรุนปรากฏของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและถ้ำลอยถ่านหิน	52
4.17 การดูดซึมน้ำของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและถ้ำลอยถ่านหิน	53
4.18 การหดตัวเชิงเส้นของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ และถ้ำลอยถ่านหิน	54
4.19 ความแข็งแรงของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและถ้ำลอยถ่านหิน	54
4.20 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินไฟ	55
4.21 ค่าการนำความร้อนของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและถ้ำลอยถ่านหิน	56
4.22 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและถ้ำลอยถ่านหิน เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส (F0-F20)	57
4.23 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส	59
4.24 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่ไม่มีถ้ำลอยถ่านหินผสม (F0)	60
4.25 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีถ้ำลอยถ่านหินผสม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F10)	60
4.26 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีถ้ำลอยถ่านหินผสม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F20)	61
4.27 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีถ้ำลอยถ่านหินผสม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F30)	61
4.28 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีถ้ำลอยถ่านหินผสม 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F40)	62
4.29 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีถ้ำลอยถ่านหินผสม 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F50)	62
4.30 ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ ถ้ำลอยถ่านหินและตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ	65
4.31 ความพรุนปรากฏของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ ถ้ำลอยถ่านหินและตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ	65
4.32 การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ ถ้ำลอยถ่านหินและตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ	66
4.33 ความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ ถ้ำลอยถ่านหินและตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ	67

4.34 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่มี ส่วนผสมของตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	67
4.35 ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและ ตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำ	68
4.36 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่ว อลูมิเนียมแช่น้ำ เผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส (10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	69
4.37 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและตะกั่ว อลูมิเนียมแช่น้ำ เผาที่ 1300 องศาเซลเซียส	71
4.38 ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และ ตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์	72
4.39 ความพรุนปรากฏของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและ ตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์	73
4.40 การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและ ตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์	74
4.41 ความแข็งแรงของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่ว อลูมิเนียมแคลไซต์	74
4.42 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่มี ส่วนผสมของตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	75
3.43 การนำความร้อนของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและ ตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์	76
4.44 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและตะกั่ว อลูมิเนียมแคลไซต์ เผาที่ 1300 องศาเซลเซียส (10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	77
4.45 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและตะกั่ว อลูมิเนียมแคลไซต์ เผาที่ 1300 องศาเซลเซียส	79
4.46 ความหนาแน่นรวมของอิฐดินทนไฟที่ผสมและดินซามอท์ตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	80
4.47 ความพรุนปรากฏของอิฐดินทนไฟที่ผสมซามอท์ตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก	81
4.48 การหดตัวเชิงเส้นของอิฐดินทนไฟที่ผสมซามอท์ตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก	81

4.49 ความแข็งแรงของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของซามอทท์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก	82
4.50 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่มี ส่วนผสมของซามอทท์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	83
4.51 ค่าการนำความร้อนของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของซามอทท์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	83
4.52 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของซามอทท์ เเผที่ 1300 องศา เซลเซียส (10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	84
4.53 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของซามอทท์ 10-50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เเผที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส	86
4.54 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐ ดินทนไฟ เมื่อเเผที่อุณหภูมิ 1200-1300 องศาเซลเซียส	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

วัสดุทนไฟเป็นวัสดุที่มีการผลิตขึ้นมาใช้เป็นเวลาานแล้ว เพื่อประโยชน์สำหรับการนำไปใช้งานที่ต้องใช้วัสดุที่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ โดยเฉพาะการนำไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรม เช่น เตาหลอมโลหะ เตาเผาเซรามิก เตาเผาปูนซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งวัสดุทนไฟอาจแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักตามลักษณะการใช้งานคือ แบบมีรูปร่าง (Shaped refractory) และแบบไม่มีรูปร่าง (Unshaped refractory) จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่ทันสมัยทำให้มีการพัฒนาปรับปรุงวัสดุทนไฟให้มีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น สมบัติที่สำคัญของวัสดุทนไฟนั้นต้องสามารถทนความร้อนได้สูง โดยที่วัสดุทนไฟจะต้องมีสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง และสามารถรับน้ำหนักขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้โดยไม่เกิดการยุบตัว สามารถทนการขีดสีจากลม ฝุ่น หรือสารเคมีได้ดีที่อุณหภูมิสูง วัสดุทนไฟยังสามารถแบ่งประเภทตามองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ สมบัติทางเคมีที่เป็นกรด กลาง และด่าง ซึ่งอิฐดินทนไฟ (Fireclay bricks) ก็เป็นวัสดุทนไฟประเภทกรดชนิดหนึ่งที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมเซรามิก และอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น เตาหลอมเหล็ก เตาเผาผลิตไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและอื่นๆ อิฐดินทนไฟที่มีการใช้กันมากประมาณเกือบร้อยละ 90 ของการผลิตอิฐทั้งหมด เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูงมาก มีอายุการใช้งานที่สูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี วัตถุประสงค์หลักในการผลิตอิฐดินทนไฟคือ ดินทนไฟ (Fire clays) ที่มีความเหนียวเป็นตัวประสาน และดินเชื้อ (Chamotte) เป็นโครงสร้างของอิฐ โดยมีสารประกอบของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก ปัจจุบันอุตสาหกรรมอิฐดินทนไฟมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น จึงมีความต้องการในการผลิตในปริมาณมาก รวมทั้งต้องการให้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลง ดังนั้นการหาวัสดุทดแทนวัตถุดิบ เช่น วัสดุเหลือทิ้ง หรือกากของเสียต่างๆ ที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินา เช่น เถ้าลอยถ่านหิน และตะกอนจากการหลอมโลหะอลูมิเนียมจึงได้รับความสนใจ เนื่องจากมีวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ในปริมาณมาก ซึ่งปกติต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด และยังมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยอยู่

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash) เป็นเถ้าวัสดุเหลือทิ้งหรือกากของเสียประเภทหนึ่งที่ได้จากการเผาถ่านหิน เพื่อให้ได้เป็นพลังงาน ซึ่งเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กและเบาจะลอยขึ้นเหนือเตาไปกับอากาศร้อน และจะถูกดักจับโดยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitation) เพื่อไม่ให้เป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เถ้าลอยส่วนใหญ่ได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสำหรับต้มน้ำในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โรงงานกระดาษ และโรงงานที่ต้องการไอน้ำในการผลิตอื่นๆ เฉพาะที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จะมีการนำถ่านหินมาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าปีละประมาณ 15-17 ล้านตันต่อปี ทำให้มีเถ้าถ่านหินเหลือในปริมาณมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปการ

กำจัดแก๊สลอยจะสามารถทำได้โดยการฝังกลบ แต่เนื่องจากในแต่ละปีโรงงานอุตสาหกรรมมีความต้องการการผลิต และการใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก จึงทำให้มีของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทแก๊สลอยถ่านหินสะสมอยู่ในปริมาณมาก การกำจัดโดยการฝังกลบต้องเสียค่าใช้จ่ายและทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ในปัจจุบันมีการนำแก๊สลอยถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในงานปูนซีเมนต์และคอนกรีต ใช้ผลิตซีโอไลท์ (Zeolite) และใช้ในงานก่อสร้างถนน แต่การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากแก๊สลอยทั้งหมดนั้นก็ยังมีปริมาณการใช้ที่น้อยกว่าร้อยละ 40 ดังนั้นจึงต้องการพัฒนานำมาใช้ในงานใหม่ๆ เพิ่มขึ้น เพื่อลดการกำจัดแบบฝังกลบ และลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

ตะแกรงอลูมิเนียม (Aluminum cross) เป็นวัสดุเหลือทิ้งอีกประเภทหนึ่งที่ได้หลังจากการหลอมสกัดเอาอลูมิเนียมออกของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอลูมิเนียม ซึ่งตะแกรงอลูมิเนียมสามารถนำมาทำการรีไซเคิลได้โดยการแยกเศษตะแกรงขนาดใหญ่ซึ่งมีโลหะอลูมิเนียมผสมอยู่สูง (มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์) ออกจากเศษตะแกรงขนาดเล็ก (มีอลูมิเนียมอยู่น้อยมาก) ซึ่งเศษตะแกรงขนาดใหญ่สามารถนำไปหลอมเพื่อแยกเอาโลหะอลูมิเนียมออกมาได้ แต่เศษตะแกรงขนาดเล็กนั้นไม่คุ้มค่าจะนำไปหลอมจึงต้องมีการกำจัดทิ้ง แต่เนื่องจากตะแกรงอลูมิเนียมมีความอันตรายคือ เมื่อถูกความชื้นหรือน้ำจะเกิดกลิ่นฉุนแสบจมูกของก๊าซแอมโมเนียก่อความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ จึงต้องมีความปลอดภัยและรัดกุมเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อบุคคล ชุมชน และสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำแก๊สลอยถ่านหินและเศษเหลือทิ้งของตะแกรงอลูมิเนียมขนาดเล็กกลับมาใช้ประโยชน์ โดยใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับดินทนไฟในกระบวนการผลิตวัสดุทนไฟประเภทอิฐดินทนไฟ ซึ่งการนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ขึ้นจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตอิฐดินทนไฟที่มีต้นทุนต่ำ โดยที่ยังคงสมบัติและประสิทธิภาพของวัสดุทนไฟให้ดีเท่าเดิม หรือดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทนไฟในเชิงพาณิชย์ และยังเป็นการช่วยลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผลิตอิฐดินทนไฟที่มาจากแก๊สลอยถ่านหินและวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม ได้แก่ ตะแกรงอลูมิเนียม ให้มีสมบัติตรงตามมาตรฐาน ASTM-K30 ของอิฐดินทนไฟ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงตรงตามความต้องการของผู้ใช้
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ
3. เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุทนไฟที่ผลิตจากแก๊สลอยถ่านหินและวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง และเพื่อนำเศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอื่นมาใช้ประโยชน์ เป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐดินทนไฟ และเพื่อลดต้นทุนในการผลิต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาการนำถ่านลอยถ่านหิน และวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุทนไฟนั้น เป็นการของเสียมาใช้เพื่อหาแนวทางในการจัดการทรัพยากรที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับมีดังนี้

1. ได้องค์ความรู้ด้านการพัฒนาการผลิตวัสดุทนไฟ ที่ใช้วัตถุดิบเป็นของเสียจากอุตสาหกรรม และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าและประยุกต์ใช้ถ่านลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียม
2. ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมและสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้ง เนื่องจากในการกำจัดจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดตามกฎหมายที่ได้ระบุไว้
4. สามารถนำวัสดุทนไฟประเภทอิฐดินทนไฟที่ผลิตได้ไปประยุกต์ในเชิงอุตสาหกรรม และสามารถนำออกขายได้ในเชิงพาณิชย์

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุทนไฟมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า โรงงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตเซรามิก ใช้เป็นผนังเตาเผาเซรามิก ทำให้มีการพัฒนาปรับปรุงวัสดุทนไฟให้สามารถใช้งานได้ตามความต้องการของแต่ละงาน และทำให้วัสดุทนไฟมีราคาเพิ่มสูงขึ้นจากการเตรียมวัตถุดิบที่ต้องการให้สามารถทนความร้อนได้สูงมากยิ่งขึ้น ปัจจุบันจึงมีการนำวัตถุดิบที่หลากหลาย และมีต้นทุนที่ต่ำลงมาใช้แทนวัตถุดิบเดิม แต่ยังคงสมบัติที่ดีของวัสดุทนไฟอยู่ เช่น การนำขยะหรือของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน

ดังนั้นในส่วนนี้จึงกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการศึกษาและพัฒนาวัสดุทนไฟประเภทอิฐดินทนไฟและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้ รวมถึงการศึกษาคำแนะนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุทนไฟ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียอีกด้วย

2.1 วัสดุทนไฟ

วัสดุทนไฟนั้นมีการใช้งานมาเป็นเวลานานแล้ว ผลิตขึ้นเพื่อประโยชน์สำหรับการนำไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรม เช่น ผลิตเตาหลอมเหล็ก เตาเผาเซรามิก เป็นต้น ซึ่งมีลักษณะและรูปแบบแตกต่างกัน จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่ทันสมัยทำให้มีการพัฒนาและปรับปรุงวัสดุทนไฟเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS) R 2001-1985 [1] วัสดุทนไฟหมายถึง สารประกอบประเภทอนินทรีย์ ที่ใช้งานภายใต้อุณหภูมิสูงสามารถทนความร้อนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้มากกว่า 1500 องศาเซลเซียส โดยที่สมบัติของวัสดุนั้นต้องไม่เปลี่ยนแปลง สามารถรับน้ำหนักขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้โดยไม่เกิดการยุบตัว สามารถทนการขัดสีจากลม ฝุ่น หรือวัสดุต่างๆ ได้ดีที่อุณหภูมิสูง วัสดุทนไฟสามารถแบ่งประเภทได้หลายลักษณะ ได้แก่

2.1.1 แบ่งประเภทตามองค์ประกอบได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ [2] ได้แก่

2.1.1.1 วัสดุทนไฟประเภทกรด

มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบที่มีลักษณะ $[MO_2]$ เช่น SiO_2 เป็นต้น ตัวอย่างอิฐทนไฟประเภทนี้ได้แก่

(1) อิฐทนไฟไฟล์เคลย์ หรืออิฐดินทนไฟ (Fire Clay Brick) [2] หมายถึง อิฐที่มีปริมาณอลูมินาอยู่ไม่เกิน 47.5 เปอร์เซ็นต์ สามารถทนความร้อนได้ไม่ต่ำกว่า 1430 องศาเซลเซียส

โดยมีส่วนประกอบหลักคือ ดินขาวกับดินเชื้อ หรือดินขาวที่ผ่านกระบวนการแคลไซน์แล้ว (Grog) เพื่อลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ความทนไฟจะสูงขึ้นตามปริมาณอลูมินา วัตถุดิบนี้เหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป อย่างเตาเผาในโรงงานอุตสาหกรรมซีเมนต์ (Rotary kiln) อิฐมีสมบัติทางเคมีเป็นกรด จึงทำให้ไม่ทนต่อซัลโฟลหะที่เป็นต่างที่อุณหภูมิสูง

(2) อิฐทนไฟซิลิกาสูง (High silica brick) ทำจากแร่ควอตซ์ หรือวัตถุดิบที่มีซิลิกาสูง มักใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว อิฐประเภทนี้มีการขยายตัวสูงช่วงอุณหภูมิสูง 600-700 องศาเซลเซียส มีการแตกร้าวได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใช้งาน ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟสในควอตซ์ (Quartz inversion) แต่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส อิฐจะมีสมบัติในการทนทานต่อการแตกร้าวได้ดี จะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าอิฐชนิดอื่น

2.1.1.2 วัสดุทนไฟประเภทกลาง

มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบที่มีลักษณะ $[M_2O_3]$ เช่น Al_2O_3 เป็นต้น ตัวอย่างอิฐทนไฟประเภทนี้ได้แก่

(1) อิฐทนไฟอลูมินาสูง (High Alumina Brick) [3-4] จะต้องมอลูมินาไม่น้อยกว่า 47.5 เปอร์เซ็นต์ สามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 1763 องศาเซลเซียส อิฐทนไฟอลูมินาสูงจะสามารถแบ่งได้เป็น 7 ชนิด ตามมาตรฐานมอก. 547-2541 ได้แก่

- อ 50 (มีอลูมินา 50 เปอร์เซ็นต์)
- อ 60 (มีอลูมินา 60 เปอร์เซ็นต์)
- อ 70 (มีอลูมินา 70 เปอร์เซ็นต์)
- อ 80 (มีอลูมินา 80 เปอร์เซ็นต์)
- อ 85 (มีอลูมินา 85 เปอร์เซ็นต์)
- อ 90 (มีอลูมินา 90 เปอร์เซ็นต์)
- อ 99 (มีอลูมินา 99 เปอร์เซ็นต์)

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตอิฐทนไฟอลูมินาสูงจะมีปริมาณอลูมินาสูง ได้แก่ ไดอะสปอร์ บอกรีท เมื่อผ่านการเผาจะเกิดเฟสคอร์รันดัมและเฟสมัลไลท์ จึงทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ทนไฟสูง ถ้าปริมาณอลูมินามากจะยิ่งมีความทนไฟสูง ต้านทานต่อซัลโฟลหะได้ดี แต่มีน้ำหนักมากกว่าอิฐทนไฟธรรมดา จึงนิยมใช้ทำหลังคา กำแพง ในเตาเผา และเตาหลอม

(2) อิฐทนไฟโครม (Chrome) มีสูตรโครงสร้างเป็น Cr_2O_3 เริ่มแรกการผลิตจะนำแร่โครมมาบดกับน้ำและใส่ตัวช่วยยึดเกาะเล็กน้อยจึงทำการขึ้นรูปอิฐ อบแห้ง และเผาอิฐจึงเกิดเป็นอิฐโครม โดยมีการนำแร่โครมมาใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าในช่วงปี ค.ศ. 1880 โดยใช้เป็นวัสดุ

ชั้นกลางระหว่างวัสดุทนไฟชนิดต่างและกรด อย่างเช่น ชั้นกลางระหว่าง MgO กับ SiO₂ แร่โครมสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงก่อน ซึ่งต่างจากวัสดุทนไฟชนิดแมกนีไซต์ แต่เพื่อให้ได้สมบัติที่มีความเฉพาะจึงมีการนำไปเผาก่อน เพื่อให้ได้สมบัติที่ดียิ่งขึ้น

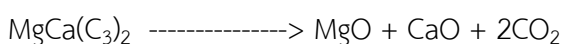
2.1.1.3 วัสดุทนไฟประเภทต่าง

มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบที่มีลักษณะ [MO] เช่น CaO, MgO เป็นต้น ตัวอย่างอิฐทนไฟประเภทนี้ได้แก่

(1) อิฐแมกนีไซต์ (Magnesite Brick) เกิดมาแล้วประมาณ 100 ปี เกิดในอุตสาหกรรมการถลุงโลหะ เนื่องจากอิฐชนิดนี้ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะที่อุณหภูมิสูงได้ดี ในช่วงต้น ค.ศ. 1930 มีการใช้สารเคมีเพื่อช่วยในการยึดเกาะ สำหรับใช้ในการผลิตอิฐมากขึ้นและปัจจุบันก็ยังใช้กันอยู่ ในการเกิดกระบวนการ Linz-Donawitz (LD) หรือกระบวนการถลุงโลหะโดยใช้ ออกซิเจนในกระบวนการ Basic Oxygen Furnance Process (BOFP) ได้มีการผลิตอิฐและบล็อกแมกนีไซต์ โดยใช้น้ำมันดิน (tar-bonded) เป็นตัวยึดเกาะ โดยอิฐชนิดนี้จะใช้สำหรับการกรุเตา

(2) อิฐโครม-แมกนีไซต์ และแมกนีไซต์-โครม (chrome-magnesite, magnesite-chrome) [5] เริ่มมีผลิตขึ้นตั้งแต่ช่วงต้นปี ค.ศ. 1930 ทั้งในอเมริกา เยอรมนี และ UK ในช่วงปี ค.ศ. 1937 ส่วนประกอบของอิฐโครมที่มีอัตราส่วน 50-70 เปอร์เซ็นต์ มีสมบัติเชิงกลแข็งแรงที่สุด แม้ใช้งานที่อุณหภูมิสูง Austro-American Magnesite Company ได้พบว่าการใช้ส่วนผสมที่เป็นวัตถุดิบหยาบ 60 เปอร์เซ็นต์ ขนาดกลาง 10-20 เปอร์เซ็นต์ และส่วนผสมที่เหลือเป็นขนาดละเอียดจะทำให้อิฐที่ได้มีความทนทานต่อความร้อนได้ดี มีข้อเสนอแนะว่าให้ใช้ส่วนผสมประกอบไปด้วยโครมนำไปผสมกับ SiO₂ 3-6 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของ FeO ไม่ควรเกิน 18 เปอร์เซ็นต์ เพื่อลดปัญหาเนื่องจากการรีดิวซ์ภายในเตา ปริมาณของ CaO ควรน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อลดปริมาณสารที่จะเป็นตัวลุดจุดหลอมเหลว และปริมาณของ Cr₂O₃ ควรอยู่ระหว่าง 40-50 เปอร์เซ็นต์ ไม่ว่าจะใช้อิฐในสภาวะที่ผ่านการเผามาแล้วหรือไม่ อิฐเหล่านี้ควรขึ้นรูปด้วยแรงอัดที่สูงเช่นเดียวกับการอัดขึ้นรูปอิฐแมกนีไซต์ อิฐที่ไม่ผ่านการเผา หรืออิฐที่อาศัยสารเคมีเป็นตัวยึดเกาะ โดยใช้ H₂SO₄ หรือ MgSO₄ ซึ่งเป็นตัวทำให้อิฐมีความแข็งแรงหลังจากการการอบแห้ง อิฐชนิดนี้จะไม่มีปัญหาในเรื่องของปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) เหมือนปัญหาที่เกิดในอิฐแมกนีไซต์เนื่องจากปริมาณ MgO ในอิฐโครม-แมกนีไซต์จะมีไม่เกิน 30-40 เปอร์เซ็นต์ และแร่โครมเป็นวัตถุดิบที่ไม่รวมตัวกับน้ำ

(3) อิฐโดโลไมต์ (Dolomite Brick) [6] ในการผลิตอิฐประเภทนี้สิ่งที่สำคัญในการผลิตคือ ต้องเผาให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์



เพราะถ้าไม่เผาสมบูรณ์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไวต่อปฏิกิริยาและมีความพรุนตัวสูง ซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้ในงานอุตสาหกรรมเหล็กกล้า การเผาต้องเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1700 องศาเซลเซียส จนความพรุนตัวประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเผาแล้วจะได้เป็นแป้งขาวและเมื่อเติมสารซิลิเกต (Silicate) เช่น Talc เพื่อให้ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งมีสมบัติในการคงตัวที่ดี (Stabilised) อิฐประเภทนี้จะเก็บไว้ได้นานหลายสัปดาห์ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของอิฐทนไฟโดโลไมต์

2.1.1.4 วัสดุทนไฟประเภทพิเศษอื่นๆ เช่น คาร์บอนและแกรไฟต์ (C) เป็นกลาง, ซิลิกอนคาร์ไบด์ SiC เป็นกรด, วัสดุทนไฟกลุ่มบอไรด์ และคาร์ไบด์อื่น ๆ

2.1.2 แบ่งประเภทวัสดุทนไฟตามลักษณะรูปร่างได้ 2 ประเภท ได้แก่

2.1.2.1 วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างแน่นอน (Shaped refractory) เช่น อิฐทนไฟ (Refractory brick) อิฐฉนวนทนไฟ (Insulator Brick) เป็นต้น

(1) อิฐทนไฟ (Refractory brick) อิฐทนไฟเป็นวัสดุทนไฟประเภทที่มีรูปร่างแน่นอน ที่มีการพัฒนาขึ้นตั้งแต่ 475-221 ปีก่อนคริสตกาล ในประเทศจีน ซึ่งได้รับชื่อเสียงอย่างมากในโลก [11] อิฐทนไฟเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในหลากหลายอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ความร้อนสูงในกระบวนการผลิต เช่น เตาเผาเซรามิก เตาหลอมโลหะในอุตสาหกรรมเหล็ก เตาเผาผลิตไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอื่นๆ อิฐทนไฟส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในงานก่อสร้างเตาเผา รูปร่างและขนาดของอิฐจึงมีความแตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมสำหรับการใช้งาน ปัจจุบันอุตสาหกรรมภาคผลิตในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกที่ภาครัฐให้ความสำคัญสนับสนุนและส่งเสริมอย่างจริงจัง ทั้งนี้เพราะอุตสาหกรรมเซรามิกจัดเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ และมีฐานการผลิตในประเทศไทยมายาวนาน ถึงแม้ว่าวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตจะสามารถหาได้ภายในประเทศก็ตาม แต่ก็ยังเกิดการแข่งขันในเชิงธุรกิจมากมาย โดยขึ้นกับปัจจัยหลักที่สำคัญ อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมการผลิตชนิดหนึ่งที่ต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูงทั้งทางด้านแรงงาน และค่าใช้จ่ายในส่วน of วัตถุดิบ ทำให้นักวิจัยหลายท่านมีแนวคิดในการนำทรัพยากรที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและราคาถูกมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้น จึงมีการนำวัสดุจากธรรมชาติที่เหลือใช้ เช่น เปลือกทุเรียน แกลบ สายใยบัว และชีวมวลอื่น ๆ มาเป็นส่วนผสมหนึ่งของอิฐทนไฟที่ใช้ในกระบวนการผลิตเซรามิก โดยความหมายของอิฐทนไฟ คือ อิฐที่มีความสามารถในการทนความร้อนและมีความต้านทานการแตกร้าวในแนวขวางได้สูงเมื่อนำมาใช้งาน นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการยุบตัวของแรงเฉือน โครงสร้างหลักของอิฐทนไฟประกอบไปด้วยซิลิกาและอลูมินา

(2) อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating Fire Brick) [7] เป็นอิฐที่มีค่าการนำความร้อน และความจุความร้อนต่ำ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นรวมและการเปลี่ยนแปลงโดยการเผาซ้ำลดลง การเกิดอิฐฉนวนทนไฟเป็นการเกิดวิวัฒนาการที่ยิ่งใหญ่อย่างหนึ่งของวัสดุทนไฟ การสร้างให้เกิดเป็นฉนวนความร้อนสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ในผนังเตา วิธีการเช่นนี้ทำให้การออกแบบเตาเผาและเตาถลุงเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากมาย ช่วยทำให้ผนังเตามีขนาดและน้ำหนักลดลงอย่างมากมาย ปัจจุบันผนังเตาจะมีความหนาประมาณ 9 นิ้ว หรือ 4.5 นิ้ว มีใช้อย่างแพร่หลาย อิฐฉนวนทนไฟสามารถใช้งานได้ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1648.9 องศาเซลเซียส มีข้อดีกว่าอิฐทนไฟประเภทอื่นคือ สามารถกักเก็บความร้อนไว้ในผนังเตาและหลังคาเตาได้น้อยกว่า จึงช่วยส่งเสริมให้เตาเผาแบบเป็นครั้งคราวมีประสิทธิภาพการใช้งานสูงมากขึ้น อิฐฉนวนทนไฟไม่ควรใช้กับขีดสูงหรือแก้วที่เหลว เพราะว่ารูพรุนที่มีในอิฐจะถูกของเหลวแทรกตัวเข้าไป และทำให้ค่าความเป็นฉนวนลดลง นอกจากนี้อิฐฉนวนทนไฟจะมีโครงสร้างที่เปราะ รุน จึงถูกกัดกร่อนได้ง่าย สมบัติของอิฐฉนวนทนไฟคือ สภาพนำความร้อนเพราะฉนวนความร้อนเมื่อใช้งานในที่ที่มีความร้อนสูงมากขึ้นจะมีปริมาตรมากขึ้นและสภาพนำความร้อนก็จะสูงขึ้นด้วย ความสามารถในการกักเก็บความร้อนไว้ในตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความหนาแน่น ทนทานต่อแรงกดและการขีดสีต่ำกว่าอิฐทนไฟ อิฐทนไฟหลายชนิดแตกเสียหายเมื่อใช้งานในบรรยากาศของไฮโดรเจน หรือในเตาถลุงโลหะบางชนิด อิฐที่ทนทานต่อปฏิกิริยาได้ดีควรเป็นอิฐที่ประกอบด้วย Al_2O_3 95 เปอร์เซ็นต์ CaO 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่ควรมี SiO_2 Fe_2O_3 และ TiO_2 เพราะจะถูกรีดิวซ์ได้เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่กล่าวมา

2.1.2.2 วัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน (Unshaped refractory หรือ Monolithic) ซึ่งได้แก่ คอนกรีตทนไฟ (Refractory concrete) ปูนทนไฟ (Refractory mortar) พลาสติกทนไฟ (Plastic refractory) ผงดำ (Ramming mixes) และผงยิง (Gunning mixes)

(1) คอนกรีตทนไฟ (Refractory Concrete) เป็นเม็ดวัสดุทนไฟชนิดต่างๆ ที่นำมาผสมกับซีเมนต์ทนไฟที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อนำไปผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะแล้ว จะสามารถเทลงแบบที่มีในรูปแบบต่างๆ ได้คล้ายกับงานคอนกรีต โดยปกติจะมีองค์ประกอบของอลูมินา-ซิลิกา เท่านั้น

(2) ปูนทนไฟ (Refractory Mortar) เป็นวัสดุทนไฟชนิดพิเศษที่มีเนื้อละเอียด เนื้อค่อนข้างเหลว โดยมีการผสมกับน้ำ สามารถใช้ในการก่ออิฐทนไฟ ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอิฐ และป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส และของเหลวออกจากรอยต่อระหว่างอิฐ มีส่วนประกอบเหมือนอิฐทนไฟ

(3) พลาสติกทนไฟ (Plastic Refractory) มีลักษณะคล้ายกับดินน้ำมันเป็นก้อนเหนียว โดยใช้เม็ดวัสดุทนไฟชนิดต่างๆ ผสมกับดินหรือสารเคมี ซึ่งทำให้เกิดความเหนียว ส่วนมากใช้ในการปะซ่อมแซมผนังเตาที่แตกบิ่น เนื่องจากสะดวกและรวดเร็วในการซ่อมแซม

(4) ผงตำ (Ramming Mixes) ลักษณะเป็นผงเหนียว มีส่วนประกอบคล้ายพลาสติกทนไฟ แต่มีความชื้นและความเหนียวน้อยกว่า ปกติจะใช้ก้อนลมตำให้แน่นตามแบบและรูปร่างที่ต้องการ

(5) ผงยิง (Gunning Mixes) ลักษณะเป็นผงแห้ง ประกอบด้วยเม็ดวัสดุทนไฟและสารเคมีต่างๆ หรือซีเมนต์ทนไฟ โดยในการติดตั้งจะต้องใช้เครื่องผสมพิเศษ ที่เรียกว่า Gunning Machine ผงยิงที่แห้งไปผสมกับน้ำบริเวณปลายท่อยิง และถูกพ่นไปติดตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยมีแรงอัดจากลมที่เครื่องยิง

2.2 วัตถุดิบ

วัตถุดิบในการผลิตวัสดุทนไฟมีหลายชนิด เช่น ดินทนไฟ (Fire clay) ดินชามอตต์ (Chamotte) บอกไซต์ (Bauxite) โครไมต์ (Chromite) แมกนีไซต์ (Magnesite) โดโลไมต์ (Dolomite) แกรไฟต์ (Graphite) และกลุ่มแร่ซิลิเกต (Silicate) โดยมีแหล่งแร่และสมบัติในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบดังนี้

2.2.1 ดินทนไฟ (Fire clays)

เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอิฐดินทนไฟ เหมาะสำหรับใช้ในงานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากในดินทนไฟมีสารประกอบของมีซิลิกา และอลูมินาผสมอยู่มาก โดยมีปริมาณอลูมินาสูง 25 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ขององค์ประกอบทั้งหมด มีเหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และอัลคาไลน์น้อย สามารถทนต่อการหลอมเหลว (Fusion) ได้ถึงอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส โดยขึ้นอยู่กับปริมาณองค์ประกอบของอลูมินาที่มีอยู่ ดินทนไฟบางประเภทจะต้องผ่านกระบวนการแคลไซน์ (Calcined) ก่อน เพื่อให้มีความทนความร้อนสูงขึ้น ถึงจะนำมาใช้ผลิตอิฐดินทนไฟได้ จึงทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูงขึ้น ดินทนไฟสามารถนำมาใช้ผลิตวัสดุทนไฟโดยใช้เป็นส่วนหนึ่งของเตาเผาได้ ดังงานวิจัยของ C.N. Djangang และคณะ [9] ได้นำดินชามอตต์ (Clay-chamotte) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุทนไฟ โดยสามารถนำไปใช้ผลิตเตาเผาที่ใช้งานอุณหภูมิสูงไม่เกิน 1200 องศาเซลเซียสได้

2.2.2 ชามอตต์ (Chamotte) หรือ Grog

เป็นดินที่ผ่านกระบวนการเผามาแล้ว สามารถทนไฟได้สูง มีการหดตัวและการขยายตัวต่ำ (CTE; $5.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) หลังจากเผาจะมีความแข็งแรงสูง ดูดซึมน้ำต่ำประมาณ 7

เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีองค์ประกอบของอลูมินา 40 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกา 30 เปอร์เซ็นต์ และแมกนีเซียม-แคลเซียมออกไซด์รวมกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ [10]

2.2.3 แร่บอกไซต์ (Bauxite)

แร่ประเภทนี้จะมียังมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือ อลูมินา (Al_2O_3) [8] มีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก เมื่อเผาถึงช่วงอุณหภูมิ 1700-1800 องศาเซลเซียส จะมีความแข็งแรงมาก มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่างที่อุณหภูมิสูงโดยไม่เกิดการแตกหัก เหมาะกับการนำไปทำเป็นเบ้าหลอม แหล่งแร่บอกไซต์สามารถพบได้ในออสเตรเลีย กินี จาไมกา บราซิล จีน เวเนซุเอลา อินเดีย สุรินัม รัสเซีย คาซัคสถาน ไกยานา และกรีซ

2.2.4 โครไมต์ (Chromite)

โครไมต์เป็นแร่ที่มีแร่โครมเป็นส่วนประกอบ และประกอบด้วยธาตุโลหะต่างๆ คือ โครเมียม เหล็ก แมกนีเซียม ออกซิเจน และมีหินสีต่างๆ ที่ไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ เป็นอัญมณี และมีโครงสร้างเป็นสปีเนล โดยสินแร่โครมเกิดจาก Fe^{2+} มีการแทนที่ในบางส่วนของ Mg และ Cr^{3+} หรือ Fe^{3+} แทนที่ใน Al โดยแหล่งแร่ที่พบได้แก่ รัสเซีย ฟิลิปินส์ อเมริกาเหนือ ซิมบับเวย์ ตุรกี และกรีซ

2.2.4 แมกนีไซต์ (Magnrsite)

แร่ประเภทนี้จะจัดอยู่ในกลุ่มแคลไซต์ และโดโลไมต์ มีสูตรทางเคมีคือ $MgCO_3$ ในการจะนำแร่แมกนีไซต์มาใช้จะต้องทำการเผาก่อน เพื่อแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา จะได้เป็น



จะได้เป็นสตุ (Sinter) เรียกว่า Caustic-calcined magnesia หรือ Caustic magnesite เมื่อเผาถึงช่วง 1450-1750 องศาเซลเซียส จะสามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เกือบทั้งหมด เมื่อเย็นตัวลงจะได้สารที่มีเนื้อแน่นและไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น สามารถเรียกได้ว่า แมกนีเซียมทนไฟ ยังสามารถนำแร่อื่นๆมาทำแมกนีเซียมทนไฟได้ เช่น โดโลไมต์ บรูไซต์ น้ำทะเล หรือน้ำเค็มใต้ดิน (Brines) ที่ทำการสกัดเอาเกลือออกหมดแล้ว แหล่งแร่ที่พบคือ ออสเตรีย เชคโกสโลวาเกีย กรีซ ยูโกสลาเวีย รัสเซีย แคนาดา สหรัฐ จีน และบราซิล [8]

2.2.5 โดโลไมต์ (Dolomite)

โดโลไมต์เป็นคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม สูตรทางเคมีคือ $CaMg(CO_3)_2$ สามารถพบได้ที่อเมริกาเหนือ ยุโรป อินเดีย และที่ประเทศพบมากที่สุดที่กาญจนบุรี

2.2.6 ทัล (Talc)

ทัล หรือ Steatite ซึ่งรู้จักกันในนาม “French chalk” เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส จะได้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตสามารถพบได้ที่สหรัฐอเมริกา เยอรมัน ฝรั่งเศส มอ รอคโค แอฟริกาใต้ อินเดีย และที่ประเทศไทยจะพบที่อุตรดิตถ์

2.2.7 แร่กลุ่มซิลิเกต

แร่กลุ่มนี้ได้แก่ Silicate, Kyanite และ Andalusite ซึ่งมีสูตรเคมีคือ Al_2SiO_5 หรือ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ โดยแร่ทั้งสามนี้มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันมาก เมื่อได้รับความร้อนถึงช่วงอุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส จะเกิดเฟสมลิลท์ ซึ่งจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง มีการ ทนความร้อนและทนต่อการรับน้ำหนักได้ดี

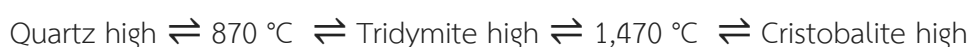
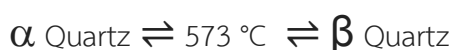
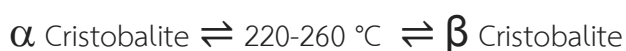
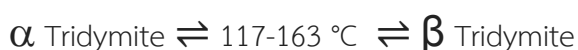
2.2.8 แกรไฟต์ (Graphite)

แกรไฟต์จะมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นคาร์บอน 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาทำเป็น วัสดุทนไฟจะมีความทนทานมาก และทนต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี สามารถพบได้ที่สหรัฐอเมริกา แคนาดา อังกฤษ จีน อินเดีย บราซิล เป็นต้น

2.3 สมบัติทั่วไปของวัสดุทนไฟประเภทต่างๆ

2.3.1 ซิลิกา (Quartz)

ควอตซ์ หรือ ซิลิกา คือ องค์ประกอบหลักของเนื้อทรายที่พบโดยทั่วไป มีสูตร ทางเคมีคือ SiO_2 มีปริมาณ Si 46.7 เปอร์เซ็นต์ และ O 53.3 เปอร์เซ็นต์ สามารถทนต่อการกัดกร่อน ได้สูงมาก มีองค์ประกอบทางเคมีที่บริสุทธิ์และมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่คงที่ ควอตซ์มีรูปผลึกเฮกซะ โทนอนอล บางครั้งเกิดผลึกแฝด มีเนื้อสमानแน่น มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 วาวคล้ายแก้วเนื้อควอตซ์ โปร่งใสถึงโปร่งแสง ซิลิกาเมื่อผ่านความร้อนจะเปลี่ยนโครงสร้างของผลึกในหลายช่วงอุณหภูมิของ การเผา โดยอะตอมของผลึกจะถูกเรียงตัวใหม่ ในแต่ละแบบจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิ หนึ่ง การเปลี่ยนรูปผลึกนี้เรียกว่า อินเวอร์ชัน (Inversion) การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดเมื่อซิลิกาถูกเผา โดยความร้อน แต่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเผา ซิลิกาจะเย็นตัวลงผลึกต่างๆจะกลับมาอยู่รูปแบบเดิม



2.3.2 อลูมินา (Alumina)

อลูมินามีชื่อทางเคมีว่า อลูมิเนียมออกไซด์ สูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 สามารถพบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์รันดัม (Corundum) โดยปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่ถ้ามีสิ่งเจือปนในโครงสร้างของ อลูมินาเล็กน้อยจะทำให้เกิดสีต่างๆ เช่น ถ้ามีโครเมียมปนในโครงสร้างของอลูมินาจะทำให้เกิดเป็นสีแดงเรียกว่าทับทิม เป็นต้น อลูมินาที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตขึ้นจากแร่บอกไซต์โดยกระบวนการของเบเยอร์ (Bayer Process) ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

- (1) การย่อย (Digestion)
- (2) การทำให้ใส (Clarification)
- (3) การตกตะกอน (Precipitation)
- (4) การเผาไล่ไอน้ำ (Calcination)

เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนและเปลี่ยนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นอลูมินา ส่วนใหญ่มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ผลิตได้จะเป็นสารตั้งต้นในการผลิตโลหะอลูมิเนียม ส่วนอีก 10 เปอร์เซ็นต์ จะนำไปใช้ในรูปของอลูมินาโดยตรง มีโครงสร้างผลึกแบบเฟสแอลฟา (Alpha phase) เป็นเฟสที่มีความเสถียรมากที่สุดที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากผลึกมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมีความหนาแน่นสูง อลูมินามักพบในรูปของแฉ่ง (Hydrate) คือ ผลึกของอลูมินามีการรวมตัวทางเคมีกับน้ำ เช่น หินบอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่สำคัญคือ จิบไซท์ ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) มีความแข็งแรงสูงที่สุด มีจุดหลอมเหลวสูง ($2050^\circ C$) อลูมินาเป็นวัสดุที่มีความทนไฟสูง มีความทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีด้วย อลูมินาจึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนไฟเบอร์ในเตาเผา ใช้เป็นผงขัดวัสดุทนไฟ ใช้เป็นองค์ประกอบของแก้วและเซรามิกที่ทนกรดและเบส ใช้เป็นสีและสารเพิ่มความทึบสำหรับเคลือบเครื่องปั้นดินเผาและผลิตภัณฑ์เซรามิก

2.3.3 เซอร์โคเนีย (Zirconia; ZrO_2)

มีชื่อทางเคมีว่า เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ เป็นผลึกสีขาวพบในสินแร่ธรรมชาติ Baddeleyite มีความทนไฟสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ (Thermal shock) มีความแข็งแรงสูง มีจุดหลอมเหลว $2700^\circ C$ นิยมใช้ทำอุปกรณ์ทนไฟในเตาเผา สามารถนำมาใช้พ่นแผ่นรองเตาเผา ใช้เป็นผงขัดวัสดุทนไฟ ใช้เป็นองค์ประกอบของแก้วและเซรามิกที่ทนกรดและเบส ใช้เป็นสีและสารเพิ่มความทึบสำหรับเคลือบเครื่องปั้นดินเผาและผลิตภัณฑ์เซรามิก

2.4 อิฐดินทนไฟ

อิฐดินทนไฟเป็นอิฐที่มีปริมาณซิลิกาสูง และมีปริมาณอลูมินาอยู่ไม่เกิน 47.5 เปอร์เซ็นต์ สามารถทนความร้อนได้ไม่ต่ำกว่า 1430 องศาเซลเซียส อิฐประเภทนี้จะมีสมบัติทางเคมีเป็นกรด จึงทำให้ไม่ทนต่อซิลิคา (Slag) ที่เป็นต่างที่อุณหภูมิสูง โดยปริมาณซิลิกาจะได้มาจากดินทนไฟหรือขามอทท์ ส่วนปริมาณอลูมินาจะได้มาจากแรซิลิมาไนต์ (Silimanite) ไคยาไนต์ (Kyanite) โปแทส (Potaz) ไดอะสปอร์ (Diaspore)หรือบอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งเมื่อแร่เหล่านี้เผาถึงอุณหภูมิ 1350-1450 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดผลึกมัลไลต์ (Mullite) จะทำให้อิฐนี้มีความทนทานต่อการรับน้ำหนัก ดังนั้นการเผาที่อุณหภูมิช่วงนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งของการเผาเพื่อให้เกิดผลึกมัลไลต์ ซึ่งจะสามารถใช้งานที่ใช้ความร้อนได้ถึงช่วงอุณหภูมิ 1580-1750 องศาเซลเซียส (SK26-35) ความทนไฟจะสูงขึ้นตามปริมาณอลูมินา [4,8] อิฐประเภทนี้จะเป็นอิฐที่นิยมนำมาใช้ในงานมากเกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ของการผลิตวัสดุทนไฟทั้งหมด เนื่องจากการเป็นอิฐที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก กระบวนการผลิตค่อนข้างง่าย และราคาไม่สูงมาก โดยวัตถุดิบหลักของการผลิตคือ ดินทนไฟ (Fire clays) วัตถุดิบนี้เหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป อย่างเตาเผาในโรงงานอุตสาหกรรมซีเมนต์ (Rotary kiln) สามารถนำไปใช้ได้ในช่วงกว้างทั้งเตาเผาและเตาหลอม สามารถใช้ในเตาถลุง (Blast furnace) ในโซนที่อุณหภูมิต่ำ ใช้สร้างเตาเผาขยะ เตาอบคาร์บอน เตาหลอมโลหะ เป็นต้น อิฐดินทนไฟเป็นอิฐทนไฟประเภทหนึ่งที่นิยมใช้งานมาก เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูงมาก มีอายุการใช้งานที่สูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี อิฐดินทนไฟตามมาตรฐาน ASTM C-27 สามารถแบ่งตามการทนไฟได้ 5 ประเภท [12] ได้แก่

- (1) ประเภทอิฐดินทนไฟสูงพิเศษ (Super-duty fireclay brick) เช่น ชนิด SK-34 และ K-43
- (2) ประเภทอิฐดินทนไฟสูง (High-duty fireclay brick) เช่น ชนิด SK-32 และ K-35
- (3) ประเภทอิฐดินทนไฟกึ่งซิลิกา (Semi-silica fireclay brick)
- (4) ประเภทอิฐดินทนไฟปานกลาง (Medium-duty fireclay brick) เช่น ชนิด SK-30 และ K-30
- (5) ประเภทอิฐดินทนไฟต่ำ (Low-duty fireclay brick) เช่น ชนิด K-22

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก เพราะอุตสาหกรรมเซรามิกจัดเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆ และมีฐานการผลิตในประเทศไทยมายาวนาน ทำให้มีต้นทุนการผลิตสูงทั้งทางด้านแรงงาน และค่าใช้จ่ายในส่วนของวัตถุดิบ ทำให้นักวิจัยหลายท่านมีแนวคิดในการนำวัสดุเหลือทิ้งที่หาได้ง่ายและราคาถูกมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตอิฐดินทนไฟ เช่น กาก

ตะกอน (Sludge) ก้นบุหรี่ (Cigarette butts) กากมะกอก (Olive pomace) ขี้เลื่อย (Sawdust) เส้นใยมะพร้าว (Coconut Fibre) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) เถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash) และ ตะกรันอลูมิเนียม (Aluminum dross) [13-17] เป็นต้น มาเป็นส่วนผสมหนึ่งในการผลิตอิฐดินทนไฟ เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบของซิลิกา และอลูมินาเป็นหลัก

2.5 ของเสียจากอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มในการนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับอิฐทนไฟ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในประเทศไทยมีความเจริญเพิ่มสูงมาก ทำให้มีความจำเป็นในการใช้ทรัพยากรสูงมากขึ้น การนำทรัพยากรต่างๆ มาใช้งานมักจะเกิดของเสียหรือขยะ ที่วัสดุเหลือทิ้งจากการใช้งานรอกการนำไปกำจัดทิ้ง โดยของเสียเหล่านี้มักจะไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ทำให้ขยะเหล่านี้มีปริมาณมาก สะสม และอาจเกิดปัญหาขึ้นได้ในระยะยาวได้ อาจเกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเกิดจากฝุ่น หรือมลพิษทางกลิ่น ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ รวมทั้งขยะบางประเภทจัดอยู่ในขยะมีพิษ อันตราย ทำให้ต้องมีความระมัดระวังในการกำจัด จึงต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัด การขนส่ง รวมทั้งต้องมีพื้นที่ที่จะสามารถกำจัดขยะเหล่านี้ได้ จึงทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้ประกอบการ เจ้าของโรงงาน ที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเหล่านี้ในแต่ละปีจำนวนมาก โดยในงานวิจัยนี้ได้นำของเสียที่พบในอุตสาหกรรมจำนวนมาก ซึ่งได้แก่เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมมาทำการศึกษา จึงได้สังเกตเห็นว่าขยะเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานใดได้บ้าง ด้วยองค์ประกอบทางเคมีพบว่า องค์ประกอบหลักส่วนใหญ่พบ ซิลิกา และอลูมินา ซึ่งอาจนำมาใช้ในการผลิตอิฐทนไฟได้

2.5.1 เถ้าลอยถ่านหิน

จากราคาน้ำมันของตลาดโลกที่เพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมจึงพยายามที่จะเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงทางเลือกอื่นที่มีราคาต่ำกว่า เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตให้ต่ำลง ถ่านหินจึงเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกหนึ่งที่มีความสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากมีราคาถูกและมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ แต่การเปลี่ยนมาใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง หากการกำกับดูแลไม่ดีพออาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนได้ การเลือกใช้ถ่านหินควรมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำ เพื่อลดผลกระทบจากการเกิดมลพิษทางอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

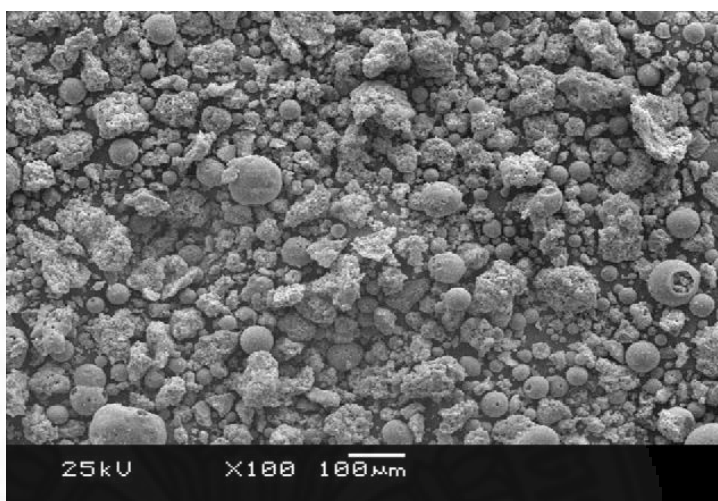
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของถ่านหิน [18]

ประเภทถ่านหิน	คาร์บอน (เปอร์เซ็นต์)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	ซัลเฟอร์ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความร้อน (บีทียูต่อปอนด์)
แอนทราไซต์	90 -98	2 -5	1	> 14000
บิทูมินัส	80 – 90	5 – 10	1	11000 – 14000
ซับบิทูมินัส	75 – 80	25 – 30	1	8300 11000
ลิกไลต์	60 – 75	50 - 70	0.5 – 3.0	< 8300

การเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการระบายสารมลพิษออกมาทางปล่องระบายของหม้อน้ำซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ยิ่งก่อให้เกิดกากของเสียที่เหลือจากการเผาไหม้ ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจำเป็นต้องมีการจัดและควบคุมมลพิษให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด และมีการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกน้อยที่สุด เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและประชาชน

ในการผลิตอิฐดินเหนียวให้มียุติภัณฑ์ที่ต่ำลงต้องใช้วัสดุที่มีราคาถูก มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักมาผสมร่วมกับดินเหนียว ในการศึกษานี้จึงนำเถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash) จากบริษัทเอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาและอลูมินา อีกทั้งมีเถ้าลอยถ่านหินปริมาณมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ จึงต้องการนำเถ้าลอยถ่านหินนี้มาใช้เป็นวัสดุในการผลิตอิฐดินเหนียว นอกจากเป็นการลดต้นทุนการผลิตอิฐดินเหนียวแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งด้วย เถ้าถ่านหินเป็นกากของเสียที่ได้มาจากการเผาถ่านหินเพื่อให้ได้เป็นพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา และอีกชนิดหนึ่งคือเถ้าลอย เป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.1 - 200 ไมโครเมตร จะลอยขึ้นเหนือเตาไปกับอากาศร้อน ซึ่งจะถูกดักจับโดยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitation) ใช้ในการแยกก๊าซร้อนและเถ้าลอยออกจากกัน เพื่อไม่ให้เถ้าลอยหลุดออกไปเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ถ่านหินส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับต้มน้ำในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โรงงานกระดาษ และโรงงานที่ต้องการไอน้ำในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น ใช้ไอน้ำในการอบไล่ความชื้นของกระดาษในโรงงานกระดาษ เป็นต้น ในแต่ละปีจะมีการเผาถ่านหินสูงถึง 15-17 ล้านตันต่อปี เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานของแต่ละโรงงาน ทำให้มีเถ้าลอยถ่านหินเหลือในปริมาณมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปการกำจัดเถ้าลอยถ่านหินจะสามารถทำได้โดยการฝังกลบ แต่การกำจัดแบบนี้ต้องเสียค่าใช้จ่าย ทำให้ต้นทุนในการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น โดยสมบัติของเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงเถ้าถ่านหินขนาดเล็กสามารถลอยตามอากาศ

ร้อนไปได้ ถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าจึงมีทรงกลมและผิวเรียบ ถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็กๆ ที่ผิวและอาจมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง ดังในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ภาพถ่ายขยายของถ่านหินจากโรงไฟฟ้า ประเทศกรีซ [19]

ถ่านหินที่ละเอียดจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ถ่านลอยถ่านหินนั้นเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่สกปรกมีลักษณะเป็นฝุ่นผงละเอียด พุ้งกระจายง่าย มีสีเทา หรือสีเทาดำ ถ้าปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดปัญหามลภาวะ จึงต้องกำจัดทิ้งให้เหมาะสมและรวดเร็ว โดยงานวิจัยของ H.B. Vuthaluru [20] ศึกษาการแก้ปัญหาถ่านหินในหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) ในงานวิจัยนี้จะแสดงวิธีการควบคุมการเกิดตะกรันและถ่านหินในโรงไฟฟ้า สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การบำบัดความชื้นจากถ่านหิน และใช้สารเติมแต่ง โดยวิธีการแรกจะนำถ่านหินไปบำบัดในสารละลายอลูมิเนียม ทำการปรับระดับของโซเดียม (Na) อลูมิเนียม (Al) และคลอรีน (Cl) ศึกษาผลการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมอย่างใกล้ชิด ศึกษาช่วงอุณหภูมิ 1000-1400 องศาเซลเซียส ในวิธีการที่สองจะเกี่ยวข้องกับการใช้ส่วนผสมของสารเติมแต่งสินแร่และสารประกอบโซเดียม ศึกษาช่วงอุณหภูมิ 1000-1400 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าสามารถช่วยลดปัญหาถ่านหินลงได้ ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยหลายงานที่พยายามนำถ่านลอยถ่านหินมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น อย่างในงานวิจัยของ Ioanna Kourti และคณะ [19] ได้ผลิตเม็ดมวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) จากถ่านลอยถ่านหิน และเศษแก้ว (Waste glass) โดยศึกษาผลของแก้วต่อการผสมในกระบวนการผลิต โดยผสมถ่านลอยถ่านหินกับเศษแก้วแล้วนำไปผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 1040-1120 องศาเซลเซียส ในเตาเผาไฟฟ้าแบบหมุน (Electric rotary

tube furnace) โดยผลการศึกษาพบว่าถ้าลอยถ่านหินที่ผสมกับเศษแก้วสามารถใช้ในกระบวนการผลิตเม็ดมวลรวมเบา โดยมีสมบัติที่เทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์ที่ขายในเชิงพาณิชย์ งานวิจัยของ E.P. Kearsley และ P.J. Wainwright [21] ได้ศึกษาการนำถ่านลอยถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา (Foam concrete) โดยใช้ถ่านลอยถ่านหินปริมาณมากมาแทนที่ซีเมนต์ การใช้ถ่านหินในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในงานคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัด และกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น [22-23] แต่ทั้งนี้การใช้ถ่านหินจะมีข้อเสียด้วยคือทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มพองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณพองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีถ่านหินผสมอยู่ และยังสามารถนำไปใช้ในคอนกรีตได้เพื่อใช้แทนมวลรวมหยาบ (หิน) จะได้เป็นคอนกรีตมวลเบา แต่ยังมีค่ากำลังรับแรงกดอัดที่สูง [24] นอกจากงานคอนกรีตแล้วยังมีการนำถ่านลอยถ่านหินมาใช้ในงานวัสดุทนไฟด้วยเช่นกัน งานวิจัยของ Anja Terzić และคณะ [25] ใช้ถ่านลอยถ่านหินในการผลิตวัสดุทนไฟประเภทคอนกรีตพ่น (Refractory shotcrete) ปกติวัสดุทนไฟประเภทนี้จะมียอดประกอบคือ ปูนซีเมนต์ที่มีลูมินาสูง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แร่บอกไซต์ (Bauxite) 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และดิน (chamotte) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้จะใช้ถ่านลอยแทนปริมาณของปูนซีเมนต์ เพื่อดูประสิทธิภาพของวัสดุทนไฟ ผลการทดลองพบว่าในตัวอย่างชิ้นงาน SCBF เป็นชิ้นงานที่มีส่วนผสมของถ่านลอยถ่านหิน มีสมบัติที่ดีที่กว่าตัวอย่างชิ้นงาน SCB ที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านลอยถ่านหิน เช่น มีความหนาแน่นรวมเพิ่มสูงขึ้น ค่าความพรุนปรากฏลดต่ำลง และมีค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนในการทดสอบวัสดุทนไฟ

Sample	Bulk density (kg/m ³)		Apparent porosity (%)		Refractoriness under load of 0.2 (MPa)		Compressive strength (MPa)		Flexural strength (MPa)	
	20°C	1400°C	20°C	1400°C	Ta(°C)	Te(°C)	20°C	1400°C	20°C	1400°C
SCB	2350	2065	10.2	28.2	1400	1500	50.4	23.6	12.7	6.1
SCBF	2398	2070	9.5	27.5	1400	1500	54.2	24.1	13.5	7.2

ในงานวิจัยของ S.B. Hassan และคณะ [26] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุทนไฟ โดยใช้ดิน (Alumino silicate) ที่พบในหมู่บ้านแกนการา (Kankara) ประเทศไนจีเรีย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ภายในเตาเผา (Furnace lining) โดยการผสมกับเถ้าลอยถ่านหิน ซึ่งพบว่าอิฐทนไฟที่ใช้เถ้าลอยถ่านหินอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผลิตได้มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันสูง และมีค่าการหดตัวเชิงเส้นต่ำ ในงานวิจัยของ J.Gonzalez Otero และคณะ [27] เป็นการศึกษาการนำเถ้าลอยถ่านหินและดิน มาใช้ในการผลิตอิฐทนไฟ ที่ใช้สารยึดเกาะเป็นโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) และใช้สารทำให้เกิดฟอง (Foaming agent) คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) รวมทั้งยังมีงานวิจัยของ Xu Lingling และคณะ [28] ได้นำเถ้าลอยถ่านหินมาใช้ในการผลิตอิฐเผา (Fired bricks) โดยนำมาใช้แทนที่ดินในอัตราส่วนปริมาณมาก การศึกษานี้ใช้เถ้าลอยถ่านหินที่ขึ้นและคุณภาพต่ำเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก

อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของเถ้าลอยถ่านหินนั้นพบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.3 จึงคาดว่าจะทำให้การทนความร้อนของอิฐดินทนไฟลดต่ำลง ในงานวิจัยนี้ได้นำวัสดุเหลือทิ้งคือ ตะกรันอลูมิเนียม (Aluminum dross) จากบริษัทบริษัทที่อปไฟว์แมนูแฟคเจอร์ จำกัด มาใช้เป็นวัตถุดิบ ซึ่งคาดว่าจะช่วยเพิ่มสมบัติการทนไฟ เนื่องจากมีองค์ประกอบของอลูมินาสูง

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

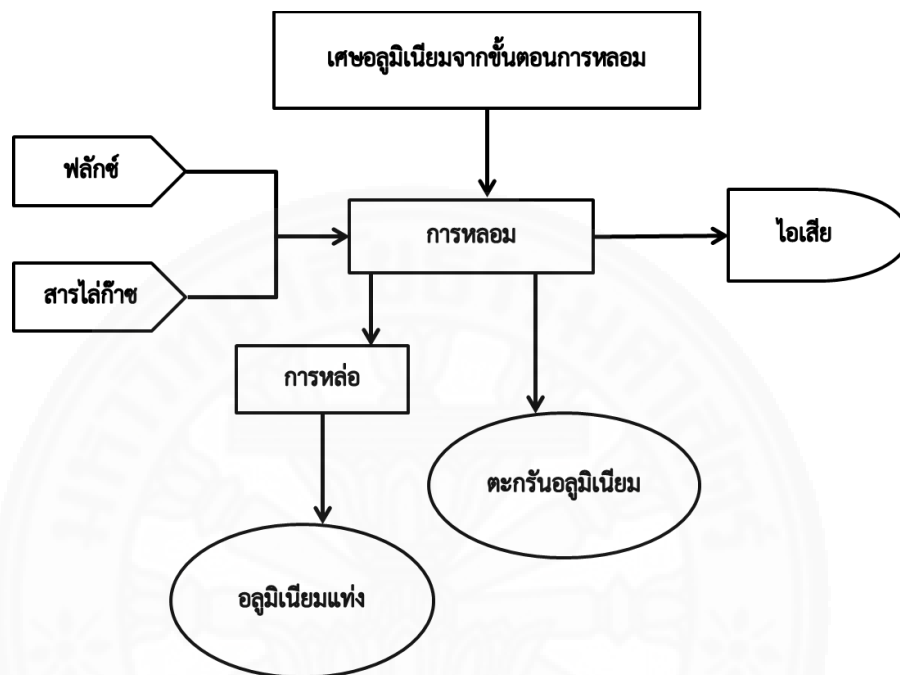
Chemical composition	SiO ₂ (wt%)	Al ₂ O ₃ (wt%)	CaO (wt%)	Fe ₂ O ₃ (wt%)	SO ₃ (wt%)	MgO (wt%)	K ₂ O (wt%)	P ₂ O ₅ (wt%)
Coal fly ash	32.6	24.4	22.4	8.56	5.35	1.95	1.34	1.21

2.5.2 ตะกรันอลูมิเนียม

เนื่องจากพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินมีปริมาณของ CaO สูง จึงได้หาวัตถุดิบอื่นๆ มาใช้ผสมร่วมกับเถ้าลอยถ่านหินเพื่อเพิ่มอัตราส่วนองค์ประกอบของอลูมินาให้สูงมากขึ้น จึงได้เล็งเห็นว่าตะกรันอลูมิเนียมเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีปริมาณอลูมินาเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สูง เป็นหนึ่งในของเสียที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด เนื่องจากเป็นขยะมีพิษ และนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อย จึงทำให้เห็นแนวทางในการเลือกของเสียประเภทนี้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด

ตะกรันอลูมิเนียม (Aluminum dross) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการหลอมแท่งอลูมิเนียม เป็นส่วนที่ไม่หลอมเหลวและลอยอยู่บนผิวของอลูมิเนียมหลอมเหลว ในส่วนนี้จะไม่

สามารถนำไปใช้งานได้จะถูกตัดออก เมื่อตะกรันอลูมิเนียมที่ถูกตัดออกมีปริมาณมากอาจสามารถนำกลับมาหลอมใหม่ (Secondary melting) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง ตะกรันที่ขนาดเล็กมากไม่คุ้มค่าต่อการนำมาหลอมใหม่จะต้องกำจัดทิ้ง แสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการหลอมเศษอลูมิเนียม

โดยงานศึกษานี้จะใช้ตะกรันอลูมิเนียมส่วนที่เหลือจากการนำกลับมาหลอมใหม่ (Secondary aluminum dross) ซึ่งพบว่าตะกรันในส่วนนี้มีปริมาณมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดมาก และส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากตะกรันอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นฝุ่นละออง ซึ่งอาจก่อให้เกิดมลพิษที่มีผลต่อระบบทางเดินหายใจได้ รวมทั้งเมื่อตะกรันถูกกับความชื้นจะเกิดปฏิกิริยาและมีกลิ่นเหม็น ฉุน เพราะเกิดก๊าซไฮโดรเจน มีเทน และก๊าซแอมโมเนีย โดยเกิดจากองค์ประกอบของตะกรันอลูมิเนียมที่มีโลหะอลูมิเนียม (Al) อลูมิเนียมคาร์ไบด์ (Al_4C_3) และอลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ทำปฏิกิริยากับน้ำ [29] การกำจัดตะกรันอลูมิเนียมจึงทำได้โดยการฝังกลบ ซึ่งการกำจัดนั้นจะต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูง เนื่องจากมีความอันตรายจึงต้องมีความรัดกุม เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังพบตะกรันอลูมิเนียมอีกปริมาณมากที่ยังไม่ได้รับการกำจัด จึงมีงานวิจัยที่หลากหลายพยายามนำตะกรันอลูมิเนียมที่ผ่านการหลอมใหม่มาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด เนื่องจากพบว่าองค์ประกอบของตะกรันอลูมิเนียมมีซิลิกา และอลูมินาอยู่ด้วย จึงสามารถมาใช้แทนวัตถุดิบในการผลิตเซรามิก งานจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีต รวมถึงงานวัสดุทนไฟได้ อย่างในงานวิจัยของ E.M.M.

Ewais และคณะ [30] ใช้ตะกรันอลูมิเนียมในการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูง (Calcium aluminate) โดยพบว่าตะกรันอลูมิเนียมช่วยเร่งให้โครงสร้างมีความแข็งแรงอย่างรวดเร็ว ในงานวิจัยของ Diana Bajare และคณะ [31] ได้ศึกษาการนำตะกรันอลูมิเนียมกับเศษแก้วเหลือทิ้งในการผลิตเม็ดมวลรวมเบา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งใช้ตะกรันเป็นสารเพิ่มพองผลการวิจัยพบว่าเศษแก้วสามารถลดอุณหภูมิในการเผาได้ถึง 60 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำให้สมบัติและความพรุนเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิในการเผายังมีผลต่อขนาดของรูพรุน โดยที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ในโครงสร้าง รวมทั้งงานวิจัยของ H.N. Yoshimura และคณะ [32] ได้ใช้ตะกรันอลูมิเนียมเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุทนไฟ ซึ่งพบว่าวัสดุทนไฟที่ผลิตได้สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 1450 องศาเซลเซียส ทนการกัดกร่อนของโลหะและตะกรันได้ ตะกรันอลูมิเนียมจึงมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการเป็นวัตถุดิบในงานวิจัย อีกทั้งในงานวิจัยนี้ไม่ใช้น้ำหรือความชื้นในขั้นตอนการบดผสม รวมทั้งขั้นตอนการเผาชิ้นงานอิฐดินทนไฟต้องเผาที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้ลดปัญหาในด้านกลิ่นฉุนได้ เนื่องจากก๊าซที่ทำให้เกิดกลิ่นฉุนระเหยออกหมด ในงานวิจัยของ Arup Kumar Mandal และคณะ [33] ได้นำตะกรันอลูมิเนียมมาผลิตเป็นอิฐฉนวนทนไฟโดยผสมร่วมกับเถ้าลอย 2 ประเภทได้แก่ Fly ash และ Red mud ซึ่งผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตอิฐฉนวนทนไฟที่มีสมบัติค่าความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง การนำความร้อนต่ำ เมื่อใช้ตะกรันอลูมิเนียมเพียง 7.5 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยจะกล่าวถึงการทดสอบสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของ วัสดุดิบ โดยประกอบไปด้วยการหาค่าประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค รวมถึงวิธีการขึ้นรูปของอิฐ ดินทนไฟและการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล การนำความร้อนของอิฐดินทนไฟที่ผลิต จากเถ้าลอยถ่านหิน และตะกัณอะลูมิเนียม โดยในการดำเนินการวิจัยจะเป็น 2 ส่วน ในส่วนที่ 1 จะ เป็นการผลิตอิฐดินทนไฟที่มาจากเถ้าลอยถ่านหินและดินทนไฟ และในส่วนที่ 2 จะเป็นการผลิตอิฐดินทน ไฟที่มาจากเถ้าลอยถ่านหิน ดินทนไฟ และตะกัณอะลูมิเนียม

3.1 การเตรียมวัสดุดิบ

3.1.1 ดินทนไฟ (Fire clays)

นำดินทนไฟที่ได้มาจากบริษัทสยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด จังหวัดสระบุรี มาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 หรือขนาด 150 ไมโครเมตร เพื่อเป็นการคัดขนาดวัสดุดิบ และ เป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก จากนั้นนำดินทนไฟที่ผ่านการคัดขนาดแล้วไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) วิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) และ วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเครื่อง Laser scattering particle size distribution analyzer

3.1.2 เถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash)

นำเถ้าลอยถ่านหินจากบริษัท เอสซีจี เเปเปอร์ จำกัด (มหาชน) จังหวัดราชบุรี มา ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 หรือขนาด 150 ไมโครเมตร เพื่อเป็นการคัดขนาดวัสดุดิบ และ เป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเช่นเดียวกับดินทนไฟ

3.1.3 ตะกัณอะลูมิเนียม (Aluminum dross)

นำตะกัณอะลูมิเนียมที่ได้จากบริษัท ท็อปไฟว์ แมนูแฟคเจอร์ จำกัด จังหวัด ฉะเชิงเทรา การเตรียมตะกัณอะลูมิเนียมจะแยกทำเป็น 2 วิธี ได้แก่

(1) นำตะกัณอะลูมิเนียมมาแช่น้ำ โดยมีอัตราส่วนระหว่างตะกัณอะลูมิเนียมและ น้ำเท่ากับ 1 ต่อ 10 แช่เป็นระยะเวลา 3 วัน เพื่อลดปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในตะกัณอะลูมิเนียม และ เพื่อให้องค์ประกอบทางเคมีในตะกัณมีค่าคงที่ จากนั้นนำตะกัณอะลูมิเนียมไปอบให้แห้ง แล้วทำการ

ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 หรือขนาด 150 ไมโครเมตร แล้วจึงนำตะกรันอลูมิเนียมที่ผ่านการร่อนไปศึกษาสมบัติทางการภาพและทางเคมีเช่นเดียวกับดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

(2) นำตะกรันอลูมิเนียมไปเผาแคลไซน์ (Calcine) เพื่อลดปริมาณไนโตรเจนหรือก๊าซแอมโมเนียที่มีอยู่ในตะกรันออก โดยเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเผา (Heating rate) 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุด (Soaking time) เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำตะกรันไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 หรือขนาด 150 ไมโครเมตร แล้วจึงนำตะกรันอลูมิเนียมไปศึกษาสมบัติทางการภาพและทางเคมีเช่นเดียวกับดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุดิบ

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหินด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) (ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น S4PIONEER) เป็นเทคนิคที่ใช้รังสีเอกซ์ในการหาชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ซึ่งในการหาองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุดิบแต่ละชนิดสามารถบอกถึงสมบัติของวัสดุดิบ โดยการวัดปริมาณรังสีเอกซ์เรืองแสง (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในชิ้นงาน ซึ่งอาศัยหลักการยิงรังสีจากหลอดจะเข้าไปแทนที่และปลดปล่อยพลังงานมีระดับพลังงานรังสีเอกซ์ (X-ray tube) ไปยังชิ้นงาน เพื่อทำให้อิเล็กตรอนวงโคจรชั้นใน ซึ่งอาศัยหลักการยิงรังสีจากหลอดรังสีเอกซ์ คือชั้น K , L หรือ M หลุดจากอะตอม อะตอมจะอยู่ในสภาวะเสถียร อิเล็กตรอนวงโคจรชั้นนอก ซึ่งมีระดับพลังงานที่สูงกว่า จะเข้าไปแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เรืองแสง ทำให้มีที่ว่างเกิดใหม่ อิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอก ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าจึงเข้าไปแทนที่และมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์แรงออกมาอีก ทั้งนี้การเกิดรังสีเอกซ์เรืองแสงที่ปลดปล่อยออกมาจะขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนที่ไปแทนที่กับระดับพลังงานที่ว่าง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เราสามารถระบุได้ว่าประกอบด้วยธาตุชนิดใดบ้าง จากปริมาณการปลดปล่อยพลังงานในปริมาณที่แตกต่างกัน

3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของวัสดุดิบด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนและแทรกสอดรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction spectroscopy; XRD) (บริษัท PANalytical รุ่น X' Pert PRO) จะแสดงออกมาในรูปพีคการเลี้ยวเบนและแทรกสอดรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุดิบโดยแสดงด้วยมุมเลี้ยวเบน (2θ) และความเข้ม (Intensity) โดยมุม 2θ แสดงถึงมุมที่รังสีเอกซ์ถูกทำให้เกิดการ

เลี้ยวเบนและแทรกสอดด้วยโครงสร้างแร่ในวัสดุที่มีความเฉพาะของแต่ละชนิด สำหรับความเข้มจะแสดงถึงปริมาณแร่ที่มีอยู่ในวัสดุ ในงานวิจัยจะวิเคราะห์วัสดุทั้งหมดโดยวัดมุม 2θ เท่ากับ 10 ถึง 70 องศา เครื่องจะทำการวัดมุมที่ทุก ๆ 0.02 องศา (Step size) ในทุก ๆ 2 วินาที (Step time) ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ คือ นำผงวัสดุมาบดในโกร่งให้ละเอียด จากนั้นนำมาอัดลงในที่วางสารตัวอย่าง (Sample holder) ซึ่งจะต้องให้ผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างเรียบเป็นระนาบเดียวกันก่อนนำไปวิเคราะห์ โดยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) จะทำการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างกัน โดยมีหัววัด (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint committee on powder diffraction standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่ต่างกัน จึงทำให้ทราบชนิดของสารประกอบ และสามารถวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกสารตัวอย่างได้จากหลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

3.2.3 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

ในงานวิจัยนี้ใช้การวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดแบบเลเซอร์ (บริษัท HORIBA รุ่น LA950) แสดงในภาพที่ 3.1 สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ตั้งแต่ 1-1000 μm โดยหลักการของเครื่องจะใช้เลเซอร์ในการตรวจจับขนาดอนุภาค เริ่มต้นจากการเตรียมตัวอย่างที่เป็นผงใส่เข้าไปในเซลล์ใส่ตัวอย่างของเครื่องวัดขนาดอนุภาค แล้วเปิดป้อนอากาศเพื่อให้สารตัวอย่างที่เป็นผงฟุ้งกระจาย แล้วจึงใช้เลเซอร์ยิงเข้าไปเพื่อวัดขนาดอนุภาค โดยการดูจากหักเหของเลเซอร์ การกระเจิงของแสง แล้วคำนวณเป็นขนาดอนุภาค



ภาพที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

3.3 การผลิตอิฐดินทนไฟ

3.3.1 การผลิตอิฐดินทนไฟจากเถ้าลอยถ่านหิน และดินทนไฟ

กระบวนการผลิตอิฐดินทนไฟเริ่มจากนำวัตถุดิบซึ่งได้แก่ ดินทนไฟผสมกับเถ้าลอยถ่านหิน ตามสัดส่วนในตารางที่ 3.1 บดผสมแบบแห้งด้วยเครื่อง Planetary mill เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก (ในลักษณะดิสก์) แสดงในภาพที่ 3.2 เส้นผ่านศูนย์กลาง 31.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ซึ่งใช้ความดันในการอัดขึ้นรูป 150 เมกกะปาสคาล นำชิ้นงานตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาผนึกด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเผา (Heating rate) 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุด (Soaking time) เป็นเวลา 60 นาที จะได้เป็นชิ้นงานวัสดุทนไฟประเภทอิฐดินทนไฟ โดยเป็นไปตามขั้นตอนในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

ชื่อตัวอย่างชิ้นงาน	ดินทนไฟ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	เถ้าลอยถ่านหิน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
F0	100	0
F10	90	10
F20	80	20
F30	70	30
F40	60	40
F50	50	50

3.3.2 การผลิตอิฐดินทนไฟโดยเพิ่มตะกั่วออกไซด์

เนื่องจากสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหินยังไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนด จึงได้พยายามนำวัตถุดิบอื่นซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของอิฐดินทนไฟให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งตะกั่วออกไซด์เป็นตัวเลือกหนึ่งในที่คาดว่าเหมาะสมในการนำมาผลิตอิฐดินทนไฟ เพราะมีปริมาณออกไซด์สูง และผ่านกระบวนการเผาหลอมจากการผลิตออกไซด์มาแล้วจึงอาจช่วยลดค่าการหดตัวของชิ้นงานได้ ปริมาณของตะกั่วออกไซด์ในการใช้ผลิตอิฐดินทนไฟ จะใช้ตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยการเตรียมแบ่งเป็น 2 วิธี คือ การนำตะกั่วไปแช่น้ำก่อน และการนำตะกั่วไปเผาแคลไซน์

3.3.2.1 การผลิตอิฐดินทนไฟที่มีอัตราส่วนผสมของดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วออกไซด์ที่ผ่านการแช่น้ำ

การเตรียมวัตถุดิบจะเริ่มจากการนำอัตราส่วนผสมดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหินที่มีสมบัติดีที่สุด มาคำนวณอัตราส่วนผสมร่วมกับตะกั่วออกไซด์ โดยจะใช้ปริมาณตะกั่วตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จากนั้นอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ใช้ความดันในการอัดขึ้นรูป 150 เมกกะปาสคาล นำชิ้นงานตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาผืนิกด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1200, 1250 และ 1300 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเผา (Heating rate) 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุด (Soaking time) เป็นเวลา 60 นาที โดยกระบวนการผลิตเป็นไปตามขั้นตอนในภาพที่ 3.4

3.3.2.2 การผลิตอิฐดินทนไฟที่มีอัตราส่วนผสมของดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วออกไซด์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์

การเตรียมวัตถุดิบจะเริ่มจากการนำอัตราส่วนผสมดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหินที่มีสมบัติดีที่สุด มาคำนวณอัตราส่วนผสมร่วมกับตะกั่วออกไซด์ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยจะใช้ปริมาณตะกั่วตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ใช้ความดันในการอัดขึ้นรูป 150 เมกกะปาสคาล นำชิ้นงานตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาผืนิกด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1200, 1250 และ 1300 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเผา (Heating rate) 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุด (Soaking time) เป็นเวลา 60 นาที กระบวนการผลิตอิฐดินทนไฟเป็นไปตามขั้นตอนในภาพที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกัณอลูมิเนียมที่ผ่านการแช่น้ำ

ชื่อตัวอย่าง ชิ้นงาน	ดินทนไฟ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	เถ้าลอยถ่านหิน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ตะกัณอลูมิเนียมแช่น้ำ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
C+F20+D10	70	20	10
C+F20+D20	60	20	20
C+F20+D30	50	20	30
C+F20+D40	40	20	40
C+F20+D50	30	20	50

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกัณอลูมิเนียมที่ผ่านการเผาแคลไซน์

ชื่อตัวอย่าง ชิ้นงาน	ดินทนไฟ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	เถ้าลอยถ่านหิน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ตะกัณอลูมิเนียมแคลไซน์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
C+F20+Dc10	70	20	10
C+F20+Dc20	60	20	20
C+F20+Dc30	50	20	30
C+F20+Dc40	40	20	40
C+F20+Dc50	30	20	50

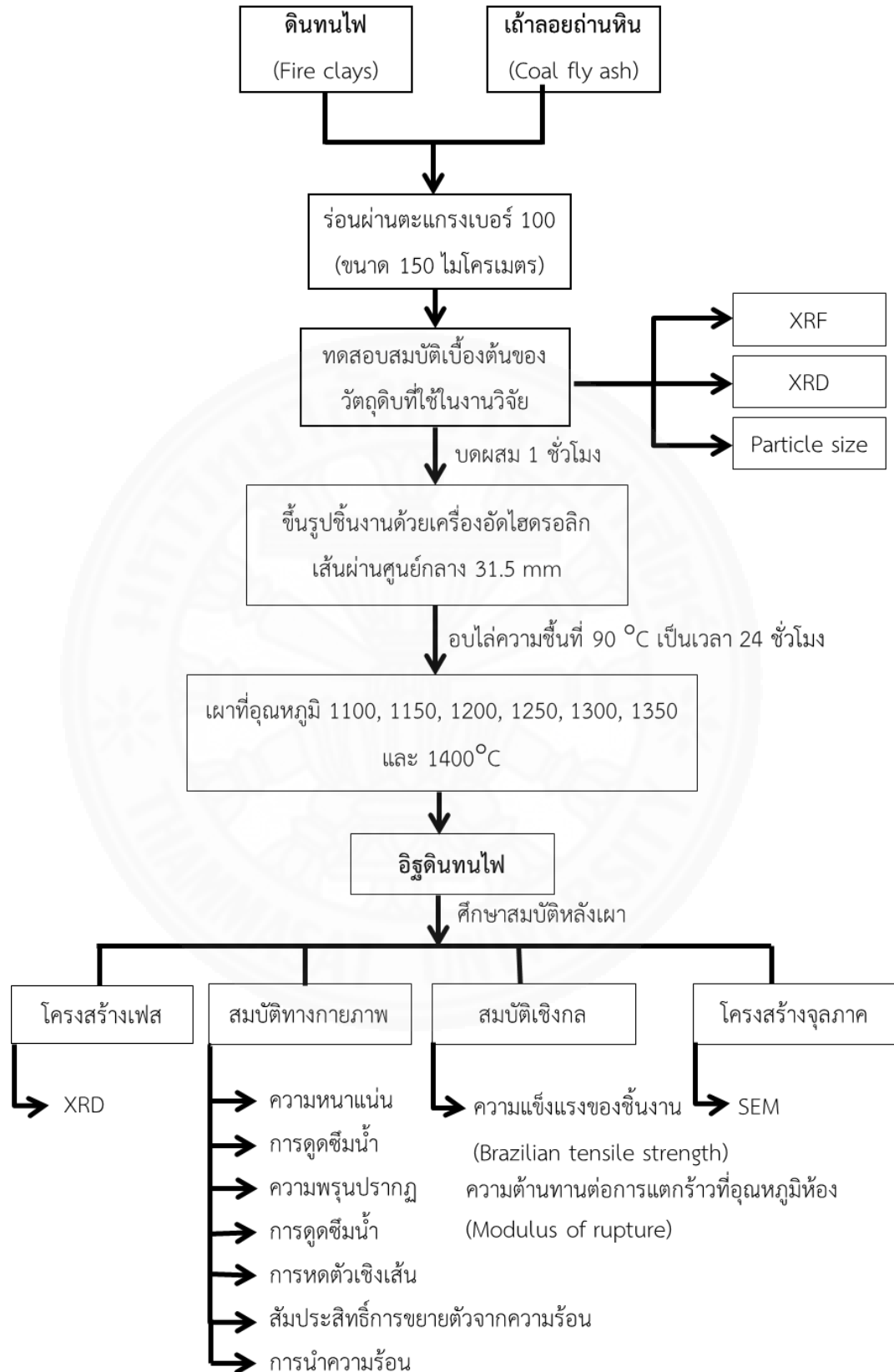
* หมายเหตุ C คือดินทนไฟ, F คือเถ้าลอยถ่านหิน, D คือตะกัณอลูมิเนียมแช่น้ำ และ Dc คือตะกัณอลูมิเนียมแคลไซน์

นอกจากนี้ยังได้นำวัสดุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมมาเป็นตัวเปรียบเทียบสมบัติอิฐดินทนไฟ โดยวัสดุดิบนั้นคือ ชามอทท์ (Chamotte) เพื่อดูความแตกต่างของการผสมของแต่ละอัตราส่วน และเป็นมาตรฐานในการปรับปรุงอิฐดินทนไฟอีกด้วย เนื่องจากในอุตสาหกรรมจะใช้ชามอทท์ในการผลิตอิฐทนไฟสูงประมาณร้อยละ 70 ของวัสดุดิบทั้งหมด ชามอทท์จะช่วยลดการหดตัวหลังอบแห้งลงทำให้ชิ้นงานมีโอกาสการแตกร้าวหลังอบแห้งลดลงเพราะชามอทท์คือดินที่เผามาแล้วครั้งหนึ่งแล้วจึงไม่มีการหดตัวอีก โดยใช้ชามอทท์ในอัตราส่วนที่ปริมาณ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับอัตราส่วนผสมของตะกัณอลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 3.4

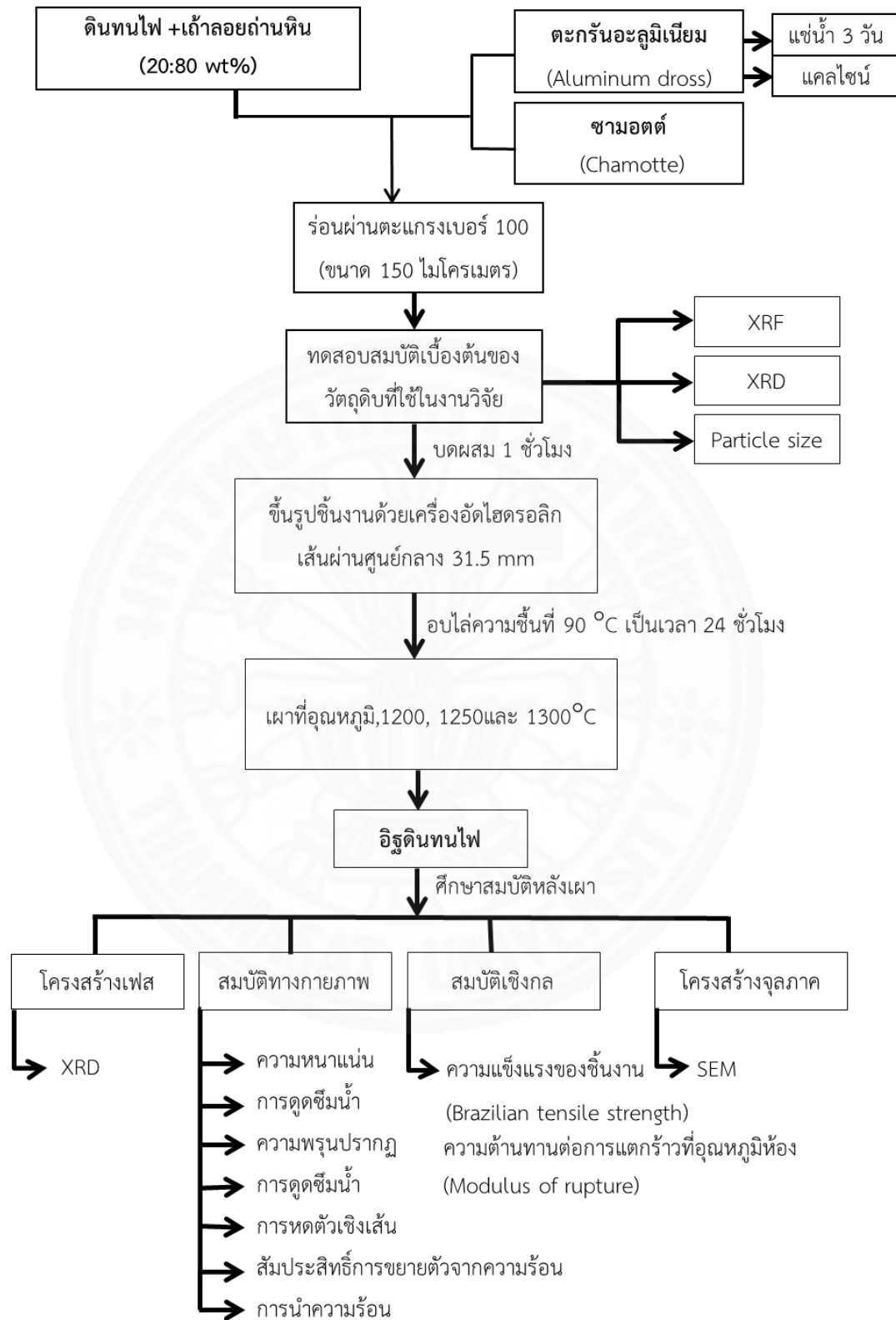
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของดินเหนียว ใ้ลยถ่านหิน และชามอทท์

ชื่อตัวอย่าง ชิ้นงาน	ดินเหนียว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ใ้ลยถ่านหิน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ชามอทท์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
C+F20+Ch10	70	20	10
C+F20+Ch20	60	20	20
C+F20+Ch30	50	20	30
C+F20+Ch40	40	20	40
C+F20+Ch50	30	20	50

* หมายเหตุ Ch คือชามอทท์



ภาพที่ 3.3 แผนภาพงานวิจัยการผลิตอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน



ภาพที่ 3.4 แผนภาพงานวิจัยการผลิตอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ แฉะลอยถ่านหิน และตระกรันอะลูมิเนียม

3.4 การทดสอบสมบัติของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ

เมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างอิฐดินทนไฟแล้ว จากนั้นทำการศึกษาสมบัติของอิฐดินทนไฟ โดยการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้น ศึกษาสมบัติทางกายภาพซึ่งได้แก่ ทดสอบค่าความหนาแน่น (Bulk density) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) การดูดซึมน้ำ (Water absorption) ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity) และค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทดสอบแรงกดแบบบราซิลเลียน (Brazilian test) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบในแต่ละอัตราส่วนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง และทำการหาค่าเฉลี่ย และทดสอบสมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) โดยทำการวัดซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วจึงหาค่าเฉลี่ย และค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient, COE) รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ (SEM)

3.4.1 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟหลังเผา

นำอิฐดินทนไฟหลังเผามาบดให้ละเอียดจนมีลักษณะคล้ายผงแป้ง จากนั้นนำมาอัดลงในตัววางสารตัวอย่าง (Sample holder) ซึ่งจะต้องให้ผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างเรียบเป็นระนาบเดียวกันก่อนนำไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาชนิดของสารประกอบและโครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นในอิฐดินทนไฟ ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) โดยทำการวัดมุมที่ 2θ เท่ากับ 10 ถึง 70 องศา เครื่องทำการวัดที่ทุก ๆ 0.02 องศา (Step size) ในทุก ๆ 2 วินาที (Step time)

3.4.2 การวัดค่าความหนาแน่นชิ้นงานอิฐดินทนไฟ และร้อยละการดูดซึมน้ำ

ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของชิ้นงานสามารถหาได้จากหลักการแทนที่ด้วยน้ำหรือ อาร์คิมิดีส (Archimedes method) [35] โดยเริ่มจากชั่งน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากเผาเสร็จเป็นน้ำหนักแห้ง (W_D) จากนั้นนำชิ้นงานไปต้มนจนกว่าฟองอากาศในชิ้นงานจะออกจนหมด แล้วแช่ชิ้นงานไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำเข้าไปแทนที่รูพรุนเปิดในชิ้นงานทั้งหมด จนชิ้นงานเกิดความอิ่มตัว จึงนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักอิ่มตัวในน้ำ (W_{SS}) แล้วซับที่ผิวชิ้นงานให้แห้งแล้วจึงชั่งน้ำหนักอิ่มตัวในอากาศ (W_S) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนาแน่น ร้อยละการดูดซึมน้ำ และความพรุนปรากฏตามสมการ (1, 2 และ 3) ตามลำดับ

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = W_D / (W_S - W_{SS}) \quad (1)$$

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = [(W_S - W_D) / W_D] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{ร้อยละความพรุนปรากฏ} = [(W_S - W_D) / (W_S - W_{SS})] \times 100 \quad (3)$$

3.4.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)

การหดตัวของวัสดุขี้ผึ้งมีความสำคัญมาก เนื่องจากหากมีการหดตัวมากจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดการแตกร้าวหรือโกงงอได้ง่าย [35] การคำนวณสามารถหาได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป (ก่อนเผาผนึก) และหลังจากเผาผนึกแล้วนำมาเข้าสู่ตรรกการคำนวณในสมการ (4)

$$\text{ร้อยละการหดตัวเชิงเส้น} = [(D_i - D_f) / D_i] \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนเผาผนึก

D_f = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังเผาผนึก

3.4.4 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของอิฐดินเหนียว

การทดสอบความแข็งแรงโดยใช้เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) บริษัท Tinius Olsen รุ่น H50KS สามารถทดสอบได้หลายรูปแบบทั้งแรงกด (Compressive test) แรงดึง (Tensile test) แรงบิด (Torsion test) แรงดัด (Bending test) และแรงเฉือน (Shear test) ในการทดสอบนี้จะเลือกใช้การทดสอบด้วยแรงกดอัด เพื่อคำนวณหาค่าความเค้นดึง หลักการในการทดสอบจะเป็นแบบบราซิลเลียน (Brazilian) โดยการเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบทำได้โดยวางชิ้นงานตั้งขึ้นในแนวรัศมีดังภาพที่ 3.5 การทดสอบแบบนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile test) โดยการให้แรงกดกับตัวอย่างอิฐดินเหนียวบาง (แผ่นดิสก์) เพื่อให้ชิ้นงานแตกออกคล้ายกับถูกแรงดึงในทิศทางตั้งฉาก เมื่อทดสอบการกดชิ้นงานเรียบร้อยแล้วให้นำค่าที่ได้จากเครื่องมาคำนวณในสมการ (5)

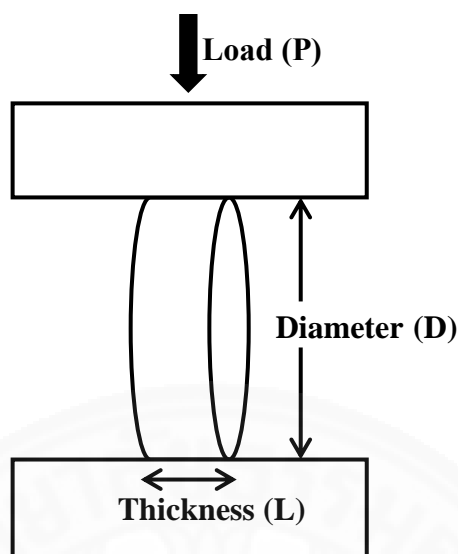
$$\sigma = 2P / \pi DT \quad (5)$$

เมื่อ σ = ความแข็งแรงของชิ้นงาน (Brazilian tensile strength) (MPa)

P = แรงกด (N)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานรูปแบบดิสก์

T = ความหนาของชิ้นงานรูปแบบดิสก์



ภาพที่ 3.5 ลักษณะการทดสอบชิ้นงาน Brazilian tensile strength

3.4.5 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ (Modulus of rupture)

การทดสอบความต้านทานต่อการแตกร้าวโดยใช้เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) บริษัท Tinius Olsen รุ่น H50KS ในทดสอบนี้จะเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และใช้วิธีกดชิ้นงานด้วยแรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (center-point loading) ดังแสดงในภาพที่ 3.6 จากนั้นเมื่อเครื่องทดสอบชิ้นงานเรียบร้อยแล้วก็นำค่าที่ได้จากเครื่องมาทำการคำนวณด้วยสมการ

$$R = 3PL / 2bd^2 \quad (6)$$

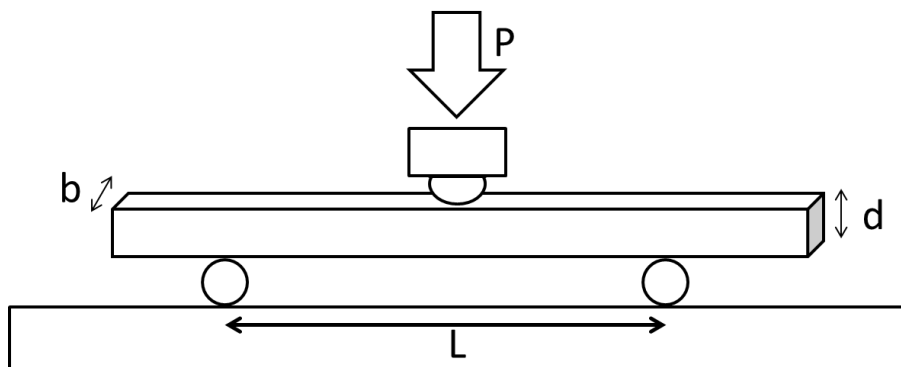
เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ (kg/cm^2)

P คือ แรงกด (N)

L คือ ระยะของคานที่กำหนดไว้ (mm)

b คือ ความกว้างของชิ้นงาน (mm)

d คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)



ภาพที่ 3.6 ลักษณะการทดสอบชิ้นงานความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้อง

3.4.6 การนำความร้อน (Thermal conductivity)

การนำความร้อนของชิ้นงานอิฐดินทนไฟสามารถทดสอบได้ด้วยเครื่อง Thermal Constant Analyzer (Hot Disk TCA) แสดงในภาพที่ 3.7 โดยการเตรียมชิ้นงานจะใช้ชิ้นงานตัวอย่างสองชิ้นวางประกบกันอย่างสนิท ตัวอย่างชิ้นงานแต่ละชิ้นจะต้องมีความสูงไม่ต่ำกว่า 1 เซนติเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนของเครื่องมือที่ให้กับชิ้นงานแผ่ออกมาภายนอกชิ้นงาน ลักษณะการทดสอบสามารถดูได้จากภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์การนำความร้อน Thermal Constant Analyzer



ภาพที่ 3.8 ลักษณะการเตรียมและวางตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการนำความร้อน

3.4.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient, COE)

การวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dilatometer บริษัท NETZSCH รุ่น DIL 402 PC โดยหลักการทำงานวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนคือ ค่าความแตกต่างของความบางหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปทุก 1 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวหรือปริมาตรเริ่มต้น การเตรียมตัวอย่างสามารถเตรียมได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแท่งสี่เหลี่ยมโดยจะมีขนาดประมาณ 4×4×25 มิลลิเมตร และรูปแบบทรงกระบอกจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร โดยตัดด้านหัวและด้านท้ายให้ขนานกัน โดยสามารถทดสอบได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 30-1200 องศาเซลเซียส ใช้อัตราความร้อน 5 องศาเซลวินต่อนาที

3.4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอิฐดินเหนียว

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท HITACHI รุ่น S-3400N โดยหลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับ

ให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการนำเถ้าลอยถ่านหินมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับดินทนไฟในการผลิตวัสดุทนไฟ โดยเริ่มจากวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบทั้งหมด จากนั้นจึงนำเถ้าลอยถ่านหินผสมกับดินทนไฟตามอัตราส่วนที่ได้กำหนด จากนั้นจึงนำไปเผาเพื่อให้ได้เป็นวัสดุทนไฟ โดยวิเคราะห์สมบัติทั้งทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และเชิงความร้อน เพื่อให้ได้สัดส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสม ในทำนองเดียวกันกับการนำตะกรันอลูมิเนียมมาเป็นวัตถุดิบร่วมเพิ่มเติม ก็ต้องทำการศึกษาสมบัติของวัตถุดิบก่อน และศึกษาสมบัติที่ได้เมื่อนำไปขึ้นรูปเพื่อให้เป็นวัสดุทนไฟประเภทอิฐดินทนไฟ โดยรายละเอียดผลการศึกษาวิเคราะห์มีดังนี้

4.1 การศึกษาสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

4.1.1 สมบัติของดินทนไฟ

4.1.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินทนไฟ

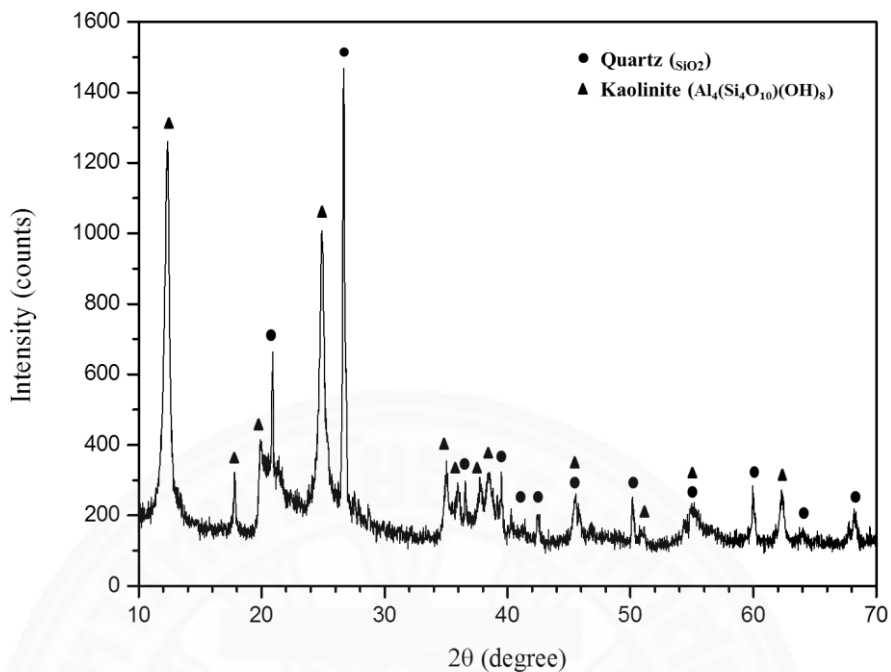
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีที่พบในดินทนไฟจะประกอบด้วย ซิลิกา 55.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อลูมินา 37.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ 4.12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพบองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นออกไซด์อื่นๆ อีกประมาณ 3.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวจากเทคนิค XRF

องค์ประกอบทางเคมี	ดินเหนียว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
SiO ₂	55.1
Al ₂ O ₃	37.4
Fe ₂ O ₃	4.12
K ₂ O	1.79
TiO ₂	0.828
MgO	0.234
CaO	0.117
SO ₃	0.0924
P ₂ O ₅	0.0717
Na ₂ O	0.0473

4.1.1.2 โครงสร้างเฟสของดินเหนียว

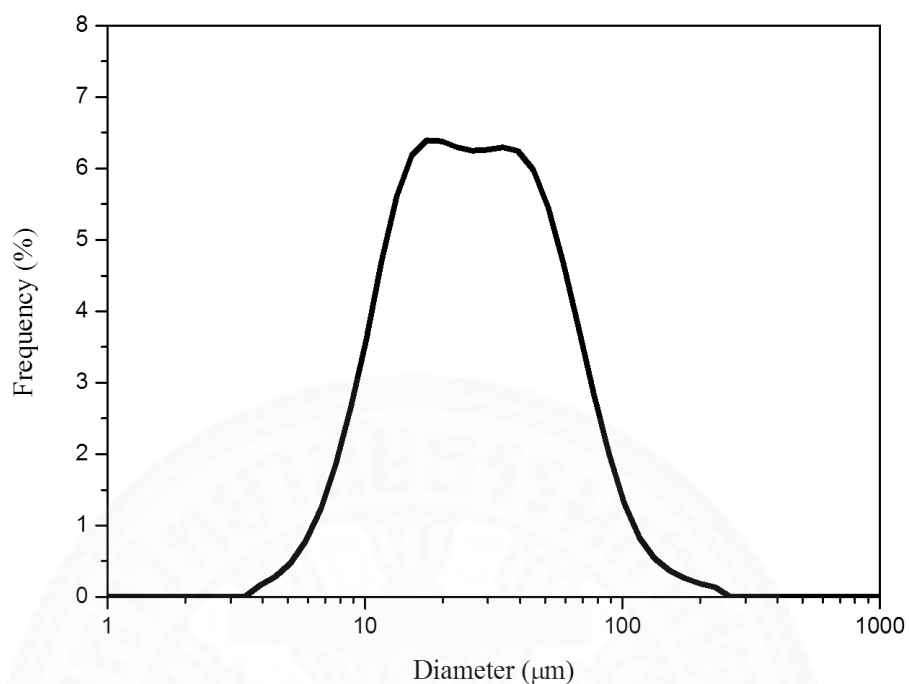
จากการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิค XRD พบว่าดินเหนียวมีโครงสร้างเฟสของซิลิกา (SiO₂) ที่อยู่ในรูปแบบของควอตซ์ (Quartz) และพบโครงสร้างเฟสของกาอลินไนท์ (Kaolinite) มีสูตรโครงสร้างเป็น Al₄(Si₄O₁₀)(OH)₈ ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างเฟสของดินเหนียว

4.1.1.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเหนียว

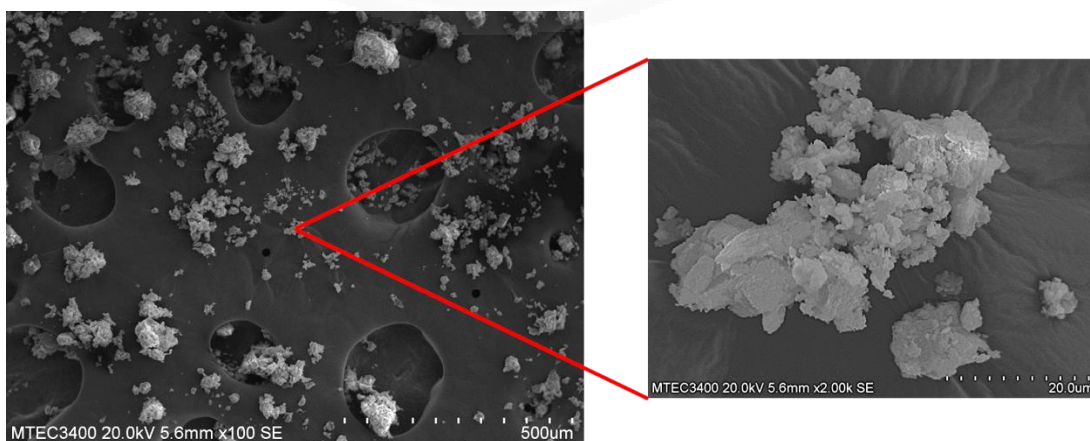
จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของดินเหนียว หลังการร่อนผ่าน ตะแกรงเบอร์ 100 (150 μ m) แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดขนาดแบบเลเซอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าดินเหนียวมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 32.27 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.2 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเหนียว

4.1.1.4 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียว

จากภาพที่ 4.3 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่าลักษณะของอนุภาคดินเหนียวมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน มีรูปร่างไม่แน่นอน เกิดจากการรวมกันของเฟสหลายเฟสที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และจะสามารถเห็นลักษณะที่ชัดเจนขึ้นเมื่อทำการขยายภาพที่กำลังสูงขึ้น



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียว

4.1.2 สมบัติของแก้วลอยถ่านหิน

4.1.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยถ่านหิน

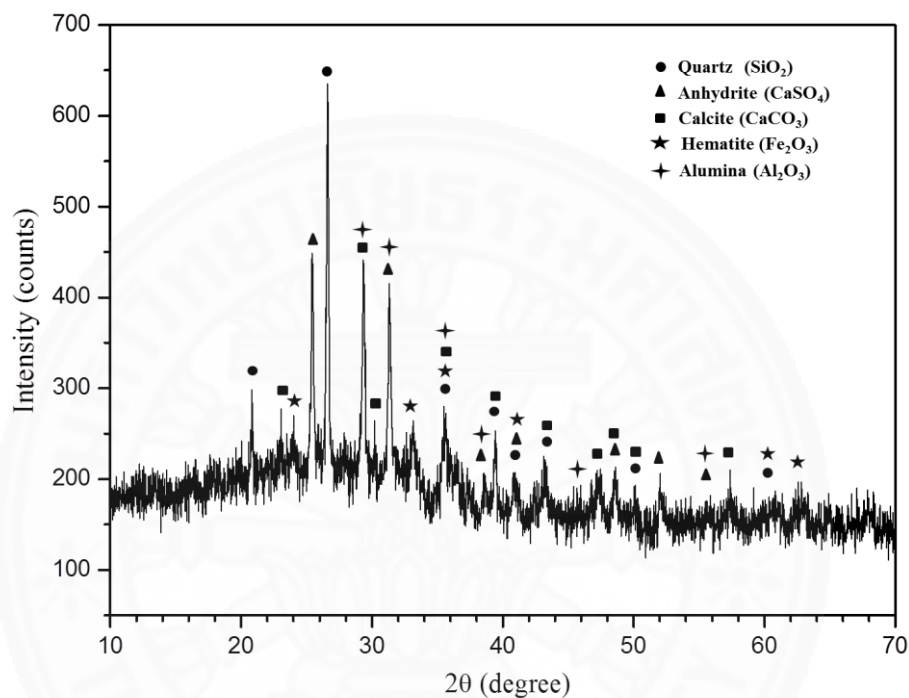
ในแก้วลอยถ่านหินจะพบองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกา 32.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบอลูมินา 24.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งเป็นฟลักซ์ (Flux) ในปริมาณมากถึง 22.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอาจมีผลต่อการทนต่อความร้อนที่อาจลดต่ำลง มีปริมาณเหล็กออกไซด์ 8.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₃) 5.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเป็นสารประกอบออกไซด์อื่นๆ ประมาณ 9.66 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมี	แก้วลอยถ่านหิน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
SiO ₂	32.6
Al ₂ O ₃	24.4
CaO	22.4
Fe ₂ O ₃	8.59
SO ₃	5.35
MgO	1.95
K ₂ O	1.34
P ₂ O ₅	1.21
TiO ₂	0.80
Cl	0.325

4.1.2.2 โครงสร้างเฟสของเถ้าลอยถ่านหิน

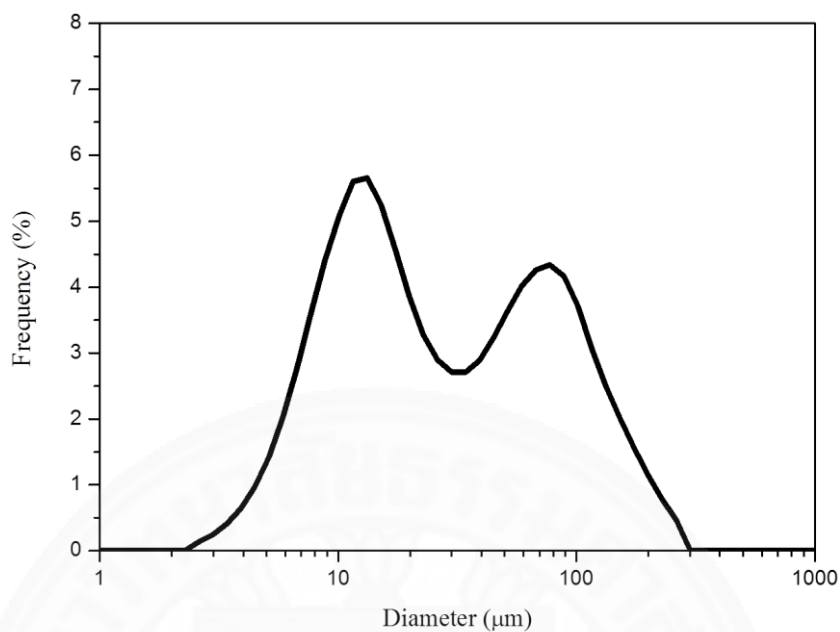
โครงสร้างที่พบในเถ้าลอยถ่านหินได้แก่ ซิลิกาที่อยู่ในรูปแบบควอตซ์ (SiO_2) เป็นโครงสร้างเฟสหลัก รองลงมาเป็นเฟสของอลูมินา (Al_2O_3) แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) มีสูตรโครงสร้างเป็น CaSO_4 พบแคลไซต์ (Calcite) สูตรโครงสร้างเป็น CaCO_3 เฮมาไทต์ (Hematite) สูตรโครงสร้างเป็น Fe_2O_3 และพบโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) แสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 โครงสร้างเฟสของเถ้าลอยถ่านหิน

4.1.2.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

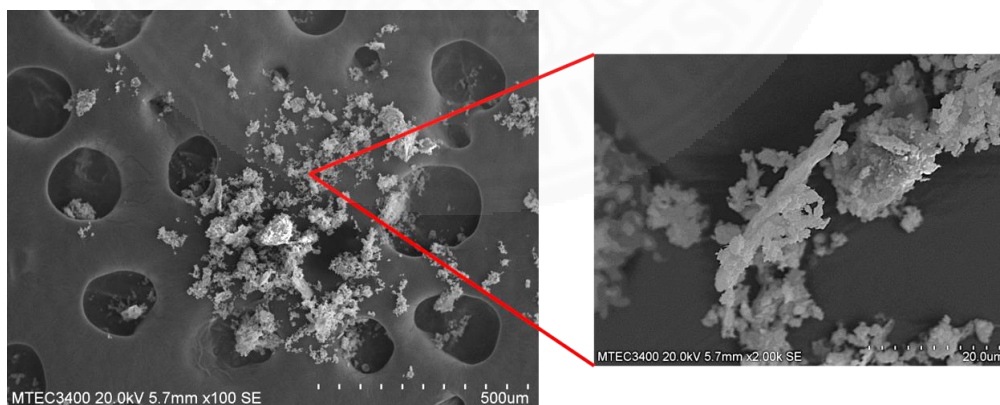
ขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินหลังการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 พบว่ามีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าดินเหนียวโดยมีขนาดเฉลี่ย 44.03 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ที่พบโครงสร้างเฟสที่มีหลากหลายเฟสที่พบอยู่ในเถ้าลอยถ่านหินแล้วเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของแก้วลอยถ่านหิน

4.1.2.4 โครงสร้างจุลภาคของแก้วลอยถ่านหิน

ลักษณะของอนุภาคแก้วลอยถ่านหินจะมีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) มีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของแก้วลอยถ่านหิน

4.1.3 สมบัติของตะกักรันอลูมิเนียม

4.1.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของตะกักรันอลูมิเนียม

จากตารางที่ 4.3 องค์ประกอบหลักทางเคมีที่พบในตะกักรันอลูมิเนียม ได้แก่ อลูมินาที่มีปริมาณสูงถึง 72.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งคาดว่าปริมาณอลูมินาสูงนี้จะสามารถช่วยให้ผลิตอิฐดินทนไฟที่ทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ มีซิลิกา 9.26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) 6.34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แมกนีเซียมออกไซด์ 3.73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คลอรีน (Cl) 3.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเป็นสารประกอบออกไซด์อื่นๆ ประมาณ 5.36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เนื่องจากตะกักรันอลูมิเนียมมีกลิ่นเหม็น ฉุน ของแอมโมเนีย จึงได้หาวิธีลดกลิ่นในตะกักรัน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำ 2 วิธีนั่นคือ แขน้ำ และการเผาแคลไซน์ การแช่น้ำนี้ได้ทำการแช่ตั้งแต่ 1-10 วัน โดยนำน้ำที่ผ่านการแช่ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP (Inductively coupled plasma) เพื่อวัดปริมาณของธาตุที่พบในน้ำ โดยพบว่าเมื่อแช่ตะกักรันอลูมิเนียมในน้ำ 3 วันขึ้นไป ปริมาณธาตุหรือองค์ประกอบภายในน้ำที่แช่ตะกักรันมีค่าคงที่ ซึ่งบอกได้ว่าตะกักรันที่แช่ในน้ำมีการอิมิตัวทำให้ไม่มีปริมาณธาตุหลุดออกมาจากตัวตะกักรันอีก

โดยองค์ประกอบทางเคมีที่พบในตะกักรันอลูมิเนียมที่ผ่านการแช่น้ำ 3 วัน ได้แก่ อลูมินาที่มีปริมาณสูงขึ้นกว่าตะกักรันอลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดเลย (ตะกักรันแห้ง) มีปริมาณ 82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซิลิกามีปริมาณลดลงอยู่ที่ 6.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบแมกนีเซียมออกไซด์ 3.07 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบปริมาณโซเดียมออกไซด์ลดลงอยู่ที่ 1.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสารประกอบออกไซด์อื่นๆ อีกประมาณ 5.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบทางเคมีของตะกักรันอลูมิเนียมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบอลูมินาที่ 73.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซิลิกา 8.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แมกนีเซียมออกไซด์ 5.22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบปริมาณโซเดียมออกไซด์ลดลงอยู่ที่ 3.17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คลอรีน 3.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสารประกอบออกไซด์อื่นๆ อีกประมาณ 6.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพราะโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ได้ละลายออกไป

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกั่วอลูมิเนียม

องค์ประกอบทางเคมี	ตะกั่วอลูมิเนียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
Al ₂ O ₃	72.3	82	73.2
SiO ₂	9.26	6.38	8.33
Na ₂ O	6.34	1.33	3.17
MgO	3.73	3.07	5.22
Cl	3.01	1.22	3.15
SO ₃	1.82	0.361	0.536
Fe ₂ O ₃	1.06	1.25	1.38
CaO	0.801	1.22	1.43
K ₂ O	0.95	0.863	1.54
TiO ₂	0.19	0.232	0.245

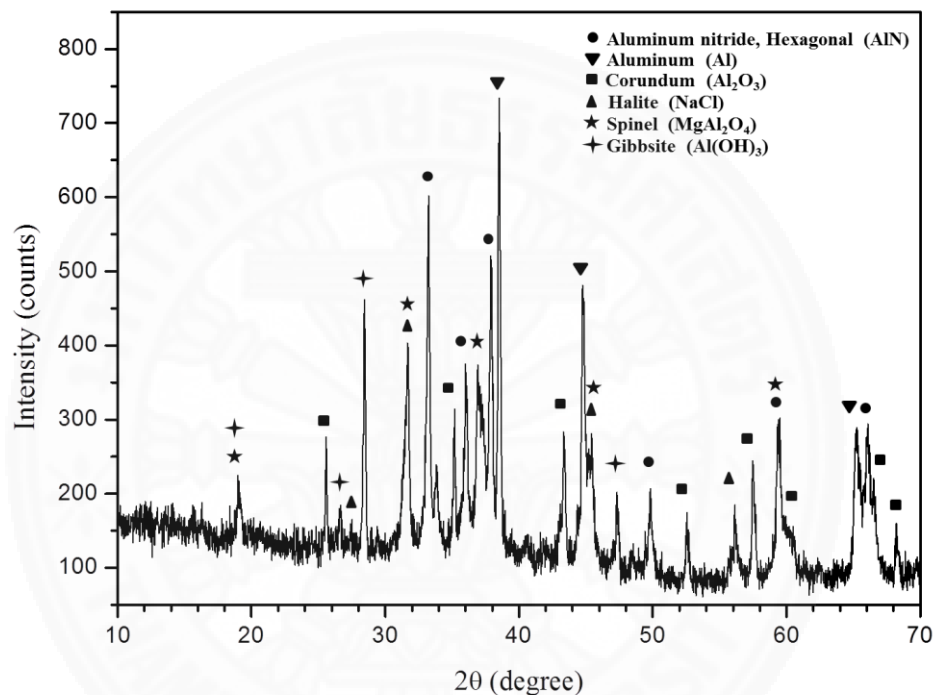
4.1.3.2 โครงสร้างเฟสของตะกั่วอลูมิเนียม

โครงสร้างเฟสของตะกั่วอลูมิเนียมที่ยังไม่ได้แช่น้ำเพื่อลดการเกิดกลิ่น (ตะกั่วอลูมิเนียมแห้ง) พบโครงสร้างเฟสของอลูมิเนียม (Aluminium, Al) อลูมิเนียมไนไตรต์ (Aluminium nitride, AlN) โดยมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) สปิเนล (Spinel) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของแมกนีเซียมและอลูมิเนียม โดยมีสูตรโครงสร้างคือ MgAl₂O₄ พบโครงสร้างเฟสกิบไซต์ (Gibbsite) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide) มีสูตรโครงสร้างคือ Al(OH)₃ ซึ่งเป็นรูปแบบที่เสถียรที่สุดของอลูมิเนียมในสภาวะปกติ พบเฮไลต์ (Halite) มีสูตรโครงสร้างเป็น NaCl และพบโครงสร้างเฟสของ อลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปแบบของคอร์ันดัม (Corundum) สูตรโครงสร้างคือ Al₂O₃ แสดงในภาพที่ 4.7

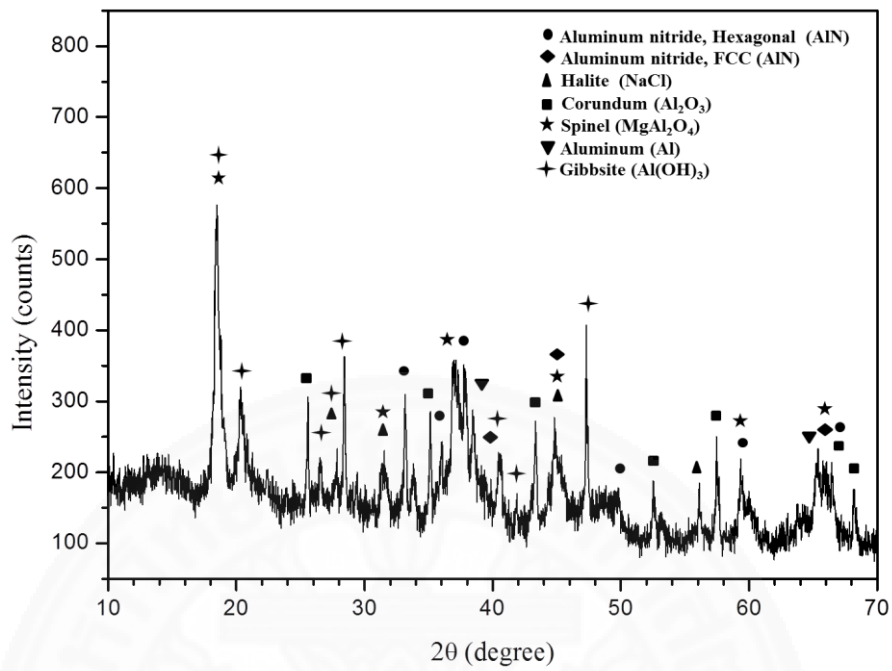
ในภาพที่ 4.8 จะแสดงภาพโครงสร้างเฟสของตะกั่วอลูมิเนียมที่ผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 3 วัน ก่อนที่จะนำไปอบให้แห้งและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ซึ่งจะพบโครงสร้างเฟสของสปิเนลและกิบไซต์ที่มีความเข้มฟิสิก (Intensity) เพิ่มขึ้น และโครงสร้างเฟสที่เป็นอลูมิเนียมมีความเข้มฟิสิกต่ำลง เมื่อเทียบกับฟิสิกของตะกั่วอลูมิเนียมแห้ง ในภาพที่ 4.7 ซึ่งอาจเป็นเพราะเฟสอลูมิเนียมมีการจับตัวใหม่กับสารประกอบอื่นๆ ทำให้เกิดเป็นเฟสใหม่ และยังพบโครงสร้างเฟสของอลูมิเนียมไนไตรต์ (Aluminium nitride) โดยมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

(Hexagonal) และ แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (Face centered cubic; FCC) โครงสร้างเฟสของเฮไลต์ และโครงสร้างเฟสของ อลูมินา ที่อยู่ในรูปแบบของคอร์ันดัม

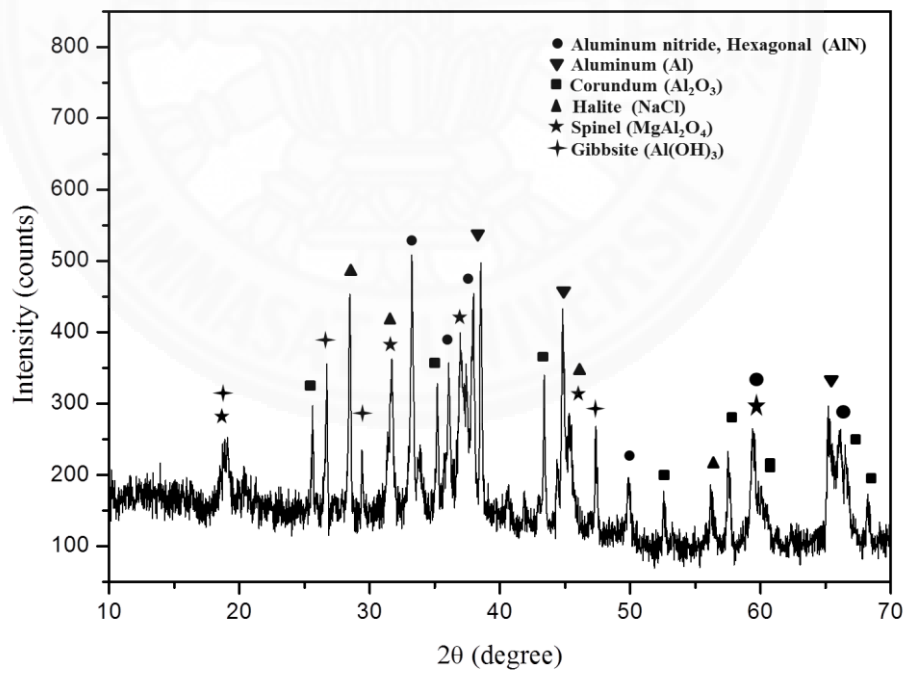
เมื่อนำตะกอนอลูมิเนียมไปผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างเฟสสปีเนลและจิบไซต์มีปริมาณลดลง โดยที่โครงสร้างเฟสที่เป็นอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณอลูมิเนียมที่พบก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับโครงสร้างเฟสของตะกอนอลูมิเนียมที่แช่น้ำ แสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างเฟสของตะกอนอลูมิเนียม



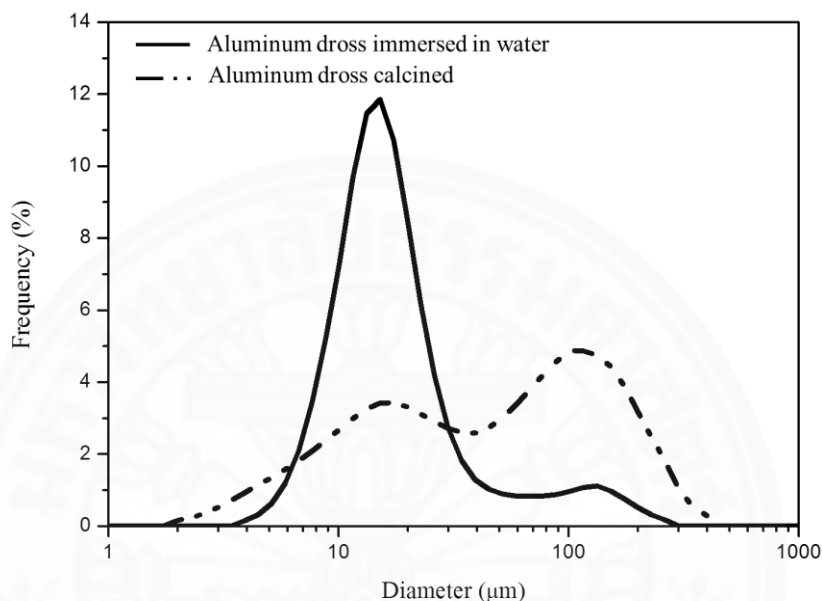
ภาพที่ 4.8 โครงสร้างเฟสของตะกอนอลูมิเนียมหลังแช่น้ำเป็นเวลา 3 วัน



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างเฟสของตะกอนอลูมิเนียมหลังคลื่นที่อุณหภูมิจึง 550 องศาเซลเซียส

4.1.3.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของตะกรันอลูมิเนียม

ตะกรันอลูมิเนียมที่ผ่านการแช่น้ำพบว่ามีความยาวของอนุภาคเล็กมากเฉลี่ย 24.56 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับตะกรันที่เผาแคลไซน์ที่มีความยาวอนุภาคเฉลี่ย 70.90 ไมโครเมตร แสดงในภาพที่ 4.10

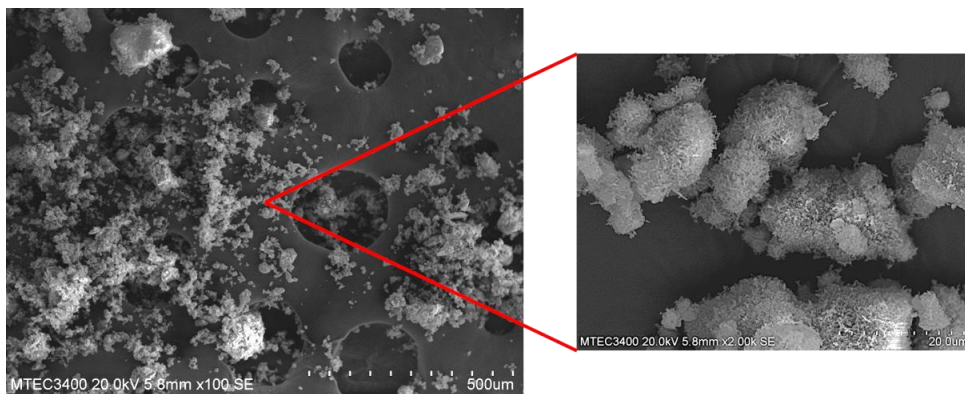


ภาพที่ 4.10 ขนาดและการกระจายตัวอนุภาคของตะกรันอลูมิเนียมที่ผ่านการแช่น้ำ 3 วัน และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

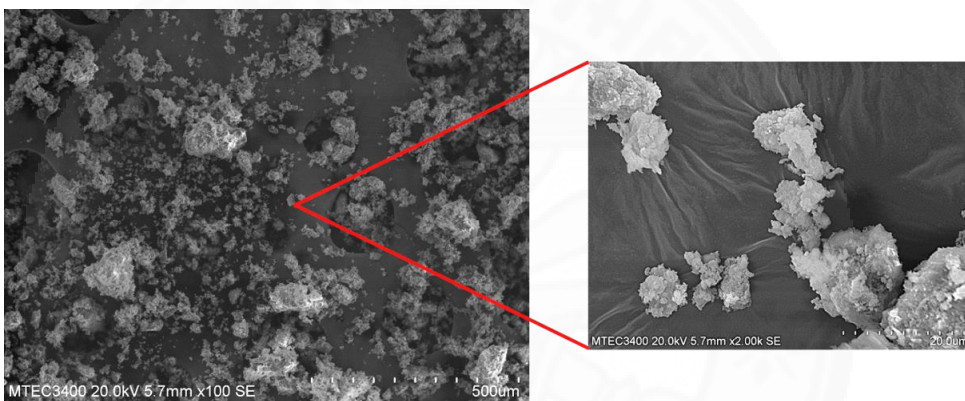
4.1.3.4 โครงสร้างจุลภาคของตะกรันอลูมิเนียม

อนุภาคของตะกรันอลูมิเนียมที่แช่น้ำมีละเอียดและมีขนาดเล็กมาก ทำให้เกิดการจับกันเป็นกลุ่มก้อน หลากหลายขนาด มีรูปร่างไม่แน่นอน ดังภาพที่ 4.11

โครงสร้างจุลภาคของตะกรันอลูมิเนียมแคลไซน์ จะมีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของตะกั่วอลูมิเนียมเหนียว



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของตะกั่วอลูมิเนียมเคลือบ

4.1.4 สมบัติของดิน خامอทท์

4.1.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ خامอทท์

เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบองค์ประกอบทางเคมีของ خامอทท์ ได้แก่ อลูมินา 45.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซิลิกา 44.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน พบไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ 2.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบแคลเซียมออกไซด์ที่เป็นฟลักซ์ปริมาณน้อยมากเพียง 1.65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยังพบสารประกอบออกไซด์อื่นๆ อีกประมาณ 1.99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 4.4

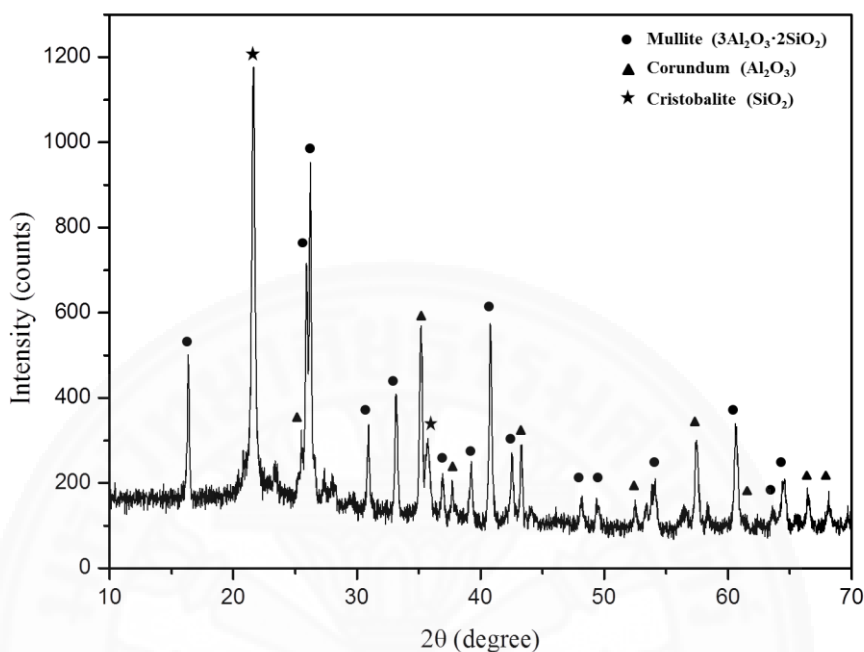
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของดิน خامอทท์ด้วยเทคนิค XRF

องค์ประกอบทางเคมี	خامอทท์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
Al_2O_3	45.9
SiO_2	44.7
TiO_2	2.93
Fe_2O_3	2.83
CaO	1.65
K_2O	0.587
P_2O_5	0.413
ZrO_2	0.15
SO_3	0.144
MgO	0.143
Na_2O	0.105

4.1.4.2 โครงสร้างเฟสของ خامอทท์

เนื่องจาก خامอทท์เกิดจากการนำดินไปผ่านกระบวนการเผามาก่อน จึงทำให้ خامอทท์มีหลายเฟสโครงสร้าง โครงสร้างหลักที่พบใน خامอทท์ ได้แก่ มัลไลท์ (Mullite) มีสูตรโครงสร้างเป็น $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ คอร์รันดัม (Corundum) และคริสโตแบไลต์ (Cristobolite) ดังภาพที่ 4.13 โดยพบว่าฟิสิกส์ที่ปรากฏส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของอลูมินาซึ่งจะมีความสามารถในการทนความร้อนได้สูง ส่วนขนาดของอนุภาคที่ใช้โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้ خامอทท์ที่มีขนาด

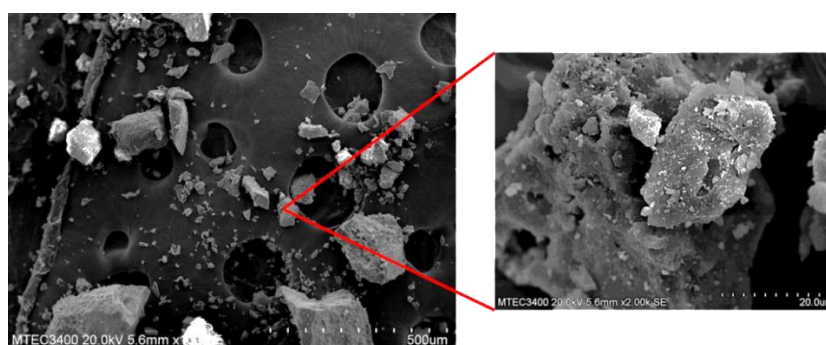
หลากหลาย ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้ซามอทท์ที่มีขนาดเพียง 3-4 มิลลิเมตร เพื่อสะดวกต่อการทำการวิจัยที่มีการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างเฟสของดินซามอทท์ (Chamotte)

4.1.4.3 โครงสร้างจุลภาคของดินซามอทท์

เนื่องจากอนุภาคที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาด 3-4 มิลลิเมตร จึงทำให้ซามอทท์มีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าวัสดุดิบตัวอื่น จากภาพที่ 4.14 พบว่ามีหลายเฟสในวัสดุดิบ โดยมีการเกาะกันเป็นก้อน เมื่อทำการขยายภาพพบว่าจะมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ จะเกาะอยู่กับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า เล็กพบรูพรุนที่ก้อนของอนุภาคด้วย



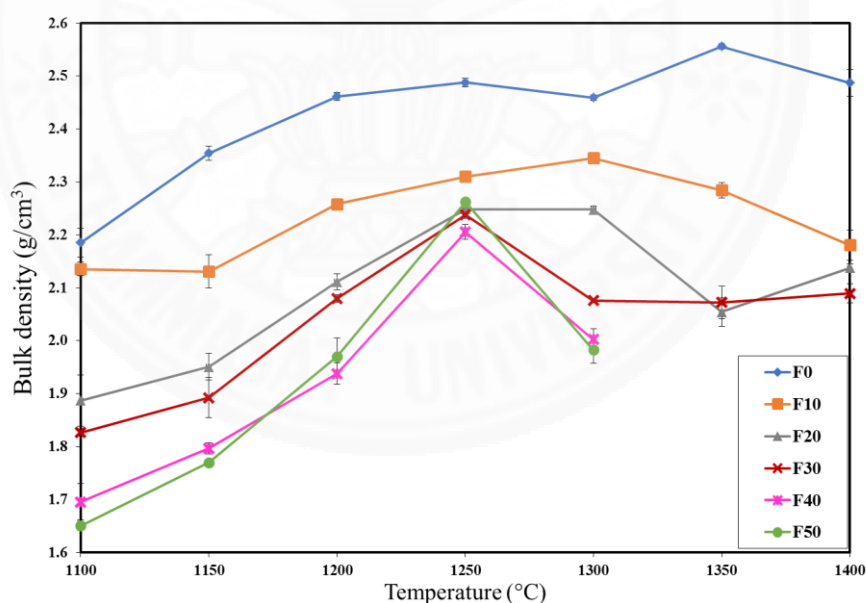
ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของดินซามอทท์

4.2 อิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

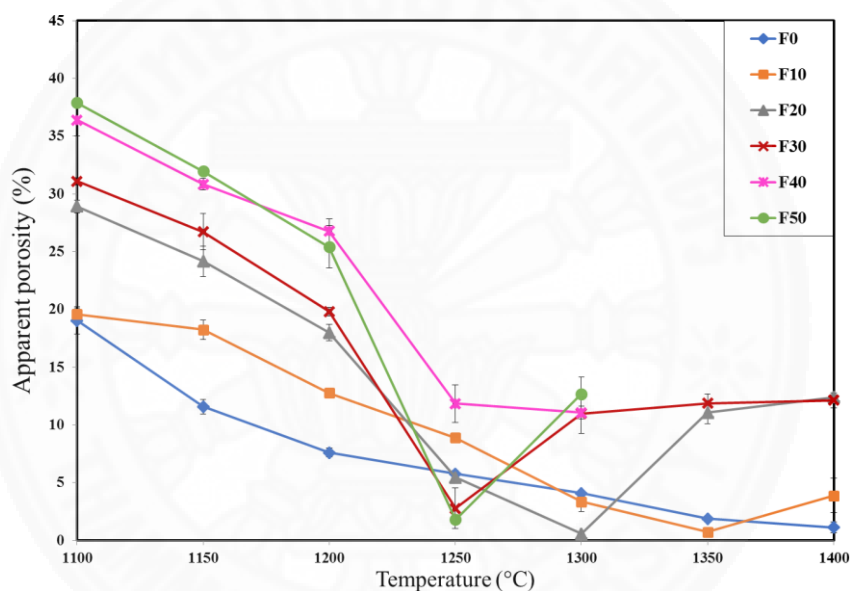
จากภาพที่ 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยถ่านหินในอิฐดินทนไฟ ทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของอิฐมีค่าลดลง แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานของอิฐดินทนไฟที่ไม่มีเถ้าลอยถ่านหินพบว่ามีค่าความหนาแน่นรวมสูงกว่าในทุกๆ อุณหภูมิ โดยค่าความหนาแน่นของอิฐที่ไม่มีเถ้าลอยถ่านหิน (F0) อยู่ที่ประมาณ 2.2-2.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนความหนาแน่นรวมของชิ้นงานอื่นจะมีค่าต่ำกว่า 2.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในทุกตัวอย่างชิ้นงาน (F10-F50) เมื่อเติมปริมาณเถ้าลอยถ่านหินสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเผาสูงกว่า 1300 องศาเซลเซียส (F40-F50) เผาที่ 1350-1400 องศาเซลเซียส จะทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมตัวเสียรูปทรง (Deform) จึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานได้



ภาพที่ 4.15 ความหนาแน่นรวมของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1.2 ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)

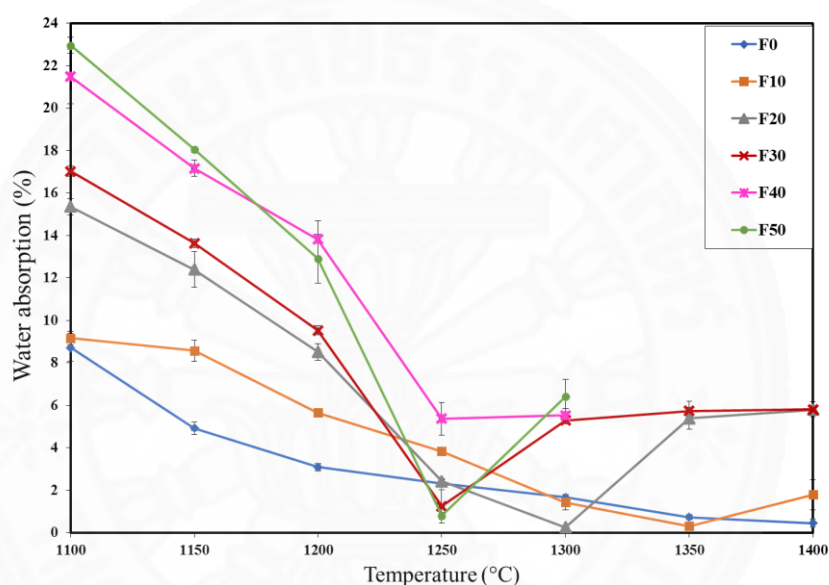
ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่อมีการเติมเถ้าลอยถ่านหิน 0-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F0-F20) และเผาถึงช่วงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อเติมเถ้าลอยถ่านหินสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความพรุนของชิ้นงานจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อเผาถึงช่วงอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส และจะสังเกตว่าถ้ามีปริมาณเถ้าลอยถ่านหินเพิ่มสูงขึ้นและเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีความพรุนชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น รูปพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจมีแนวโน้มทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมตัวได้ ดังนั้นในตัวอย่างชิ้นงาน F40-F50 เเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300 องศาเซลเซียสจะทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอม ดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 ความพรุนปรากฏของอิฐดินเหนียวจากดินเหนียวและเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1.3 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

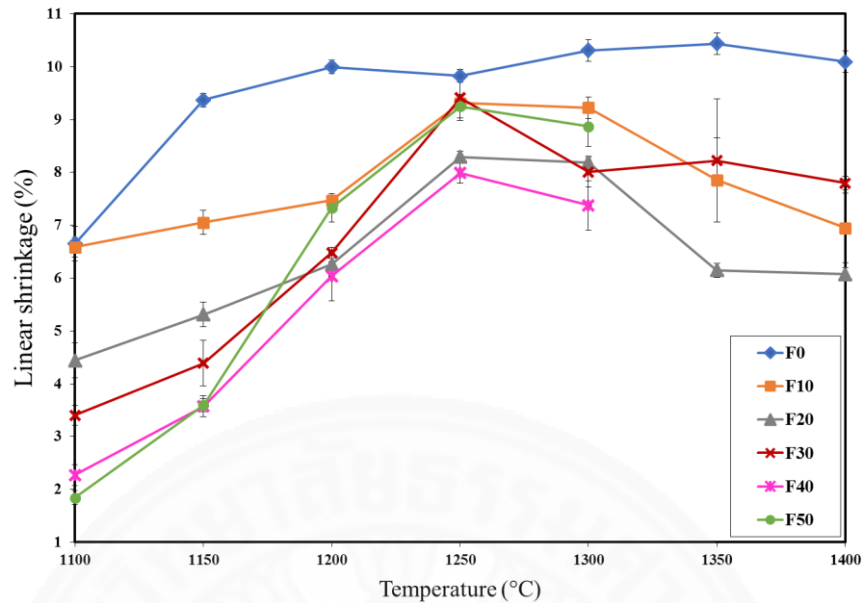
แนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดต่ำลง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะค่าความพรุนตัวของชิ้นงาน เมื่อมีการเติมเถ้าลอยถ่านหิน 0-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F0-F20) และเผาถึงช่วงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อเติมเถ้าลอยถ่านหินสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F30-F50) พบว่าค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อเผาถึงช่วงอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เมื่อค่าความพรุนของตัวอย่างต่ำจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำไปด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีความหนาแน่นสูงขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 การดูดซึมน้ำของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1.4 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)

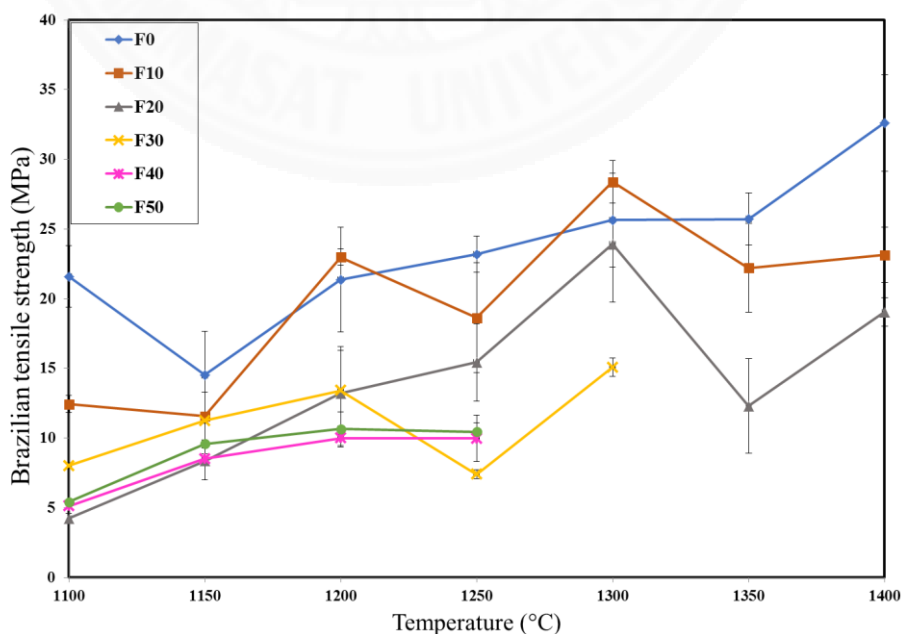
การเติมเถ้าลอยถ่านหินเข้าในอิฐดินทนไฟสามารถช่วยลดค่าการหดตัวเชิงเส้นของตัวอย่างชิ้นงานได้ แสดงในภาพที่ 4.18 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมเถ้าลอยถ่านหินที่มีค่าสูงถึง 10.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการเติมเถ้าลอยถ่านหินเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การหดตัวมีค่าต่ำลงอยู่ประมาณ 9.5 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าเมื่อเผาสูงกว่าอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าการหดตัวของชิ้นงานมีค่าคงที่ และลดต่ำลง ซึ่งสามารถบอกได้ว่าในช่วงอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม (Sintering temperature) ต่อการเผาอิฐดินทนไฟของชิ้นงานนี้



ภาพที่ 4.18 การหดตัวเชิงเส้นของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ และเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1.5 ความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ (Brazilian test)

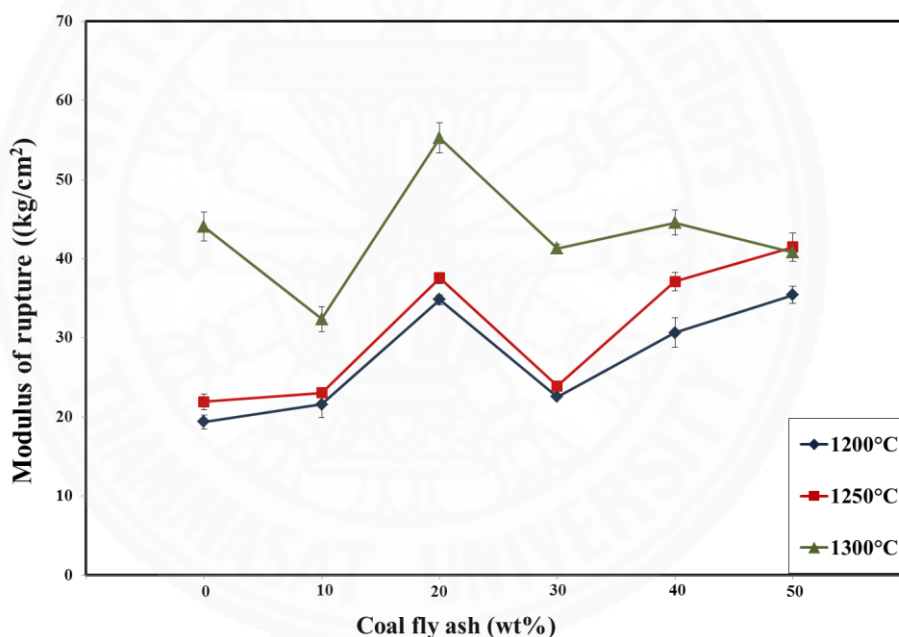
จากการคำนวณค่าความแข็งแรงพบว่าชิ้นงานที่ไม่เติมเถ้าลอยถ่านหิน มีความแข็งแรงสูงที่สุด เมื่อเติมเถ้าลอยถ่านหินสูงขึ้นพบว่าค่าความแข็งแรงมีค่าต่ำลง เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1250 องศาเซลเซียสชิ้นงานจะมีค่าความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากชิ้นงานมีความพรุนตัวสูง สำหรับชิ้นงานที่มีปริมาณเถ้าลอยสูง (F40-F50) เผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300 องศาเซลเซียสจะไม่สามารถวัดค่าความแข็งแรงได้ เนื่องจากชิ้นงานไม่สมบูรณ์ เกิดการหลอมตัว แสดงในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 ความแข็งแรงของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1.6 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิต้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ (Modulus of rupture, MOR)

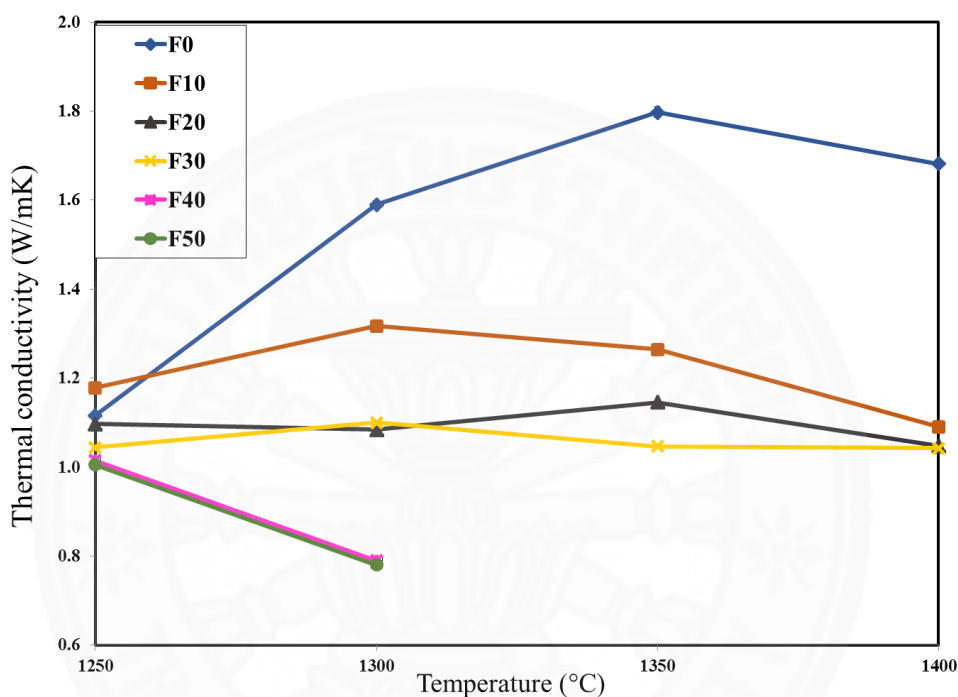
จากภาพที่ 4.20 แสดงค่าความต้านทานต่อการแตกร้าวของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน โดยพบว่าการเติมเถ้าลอยถ่านหินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานให้มีความแข็งแรงและทนต่อการแตกร้าวได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผลิตจากดินทนไฟ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติมเถ้าลอยถ่านหินเพิ่มสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานสามารถทนต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิต้องได้สูงสุดเนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินเป็นวัสดุดิบที่ได้ผ่านกระบวนการเผามาแล้วทำให้จุดหลอมเหลวสูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นของชิ้นงานสูง มีความพรุนต่ำ และทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูง



ภาพที่ 4.20 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิต้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1.7 การนำความร้อน (Thermal conductivity)

ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่เผาช่วงอุณหภูมิ 1250-1400 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.21 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินค่าการนำความร้อนของชิ้นงานมีค่าต่ำลง เนื่องจากชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยถ่านหินมีความพรุนตัวสูงกว่าอิฐที่ไม่มีเถ้าลอยถ่านหิน (F0)

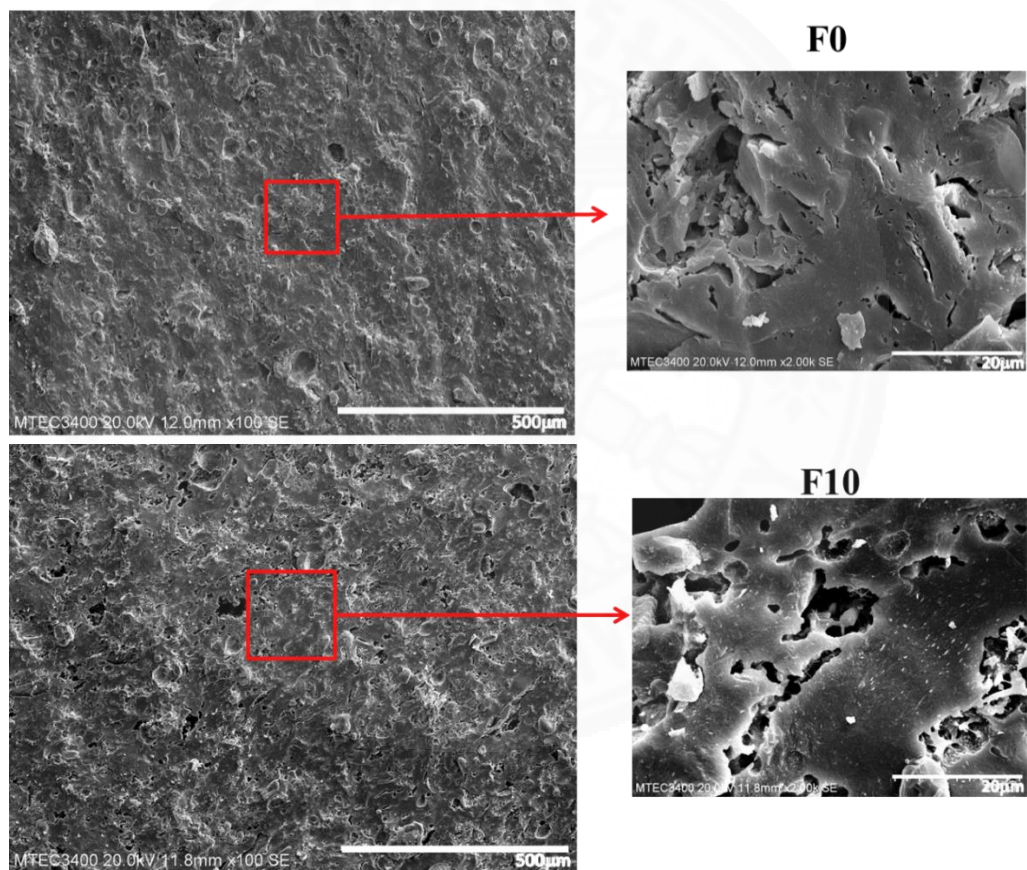


ภาพที่ 4.21 ค่าการนำความร้อนของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1.8 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ

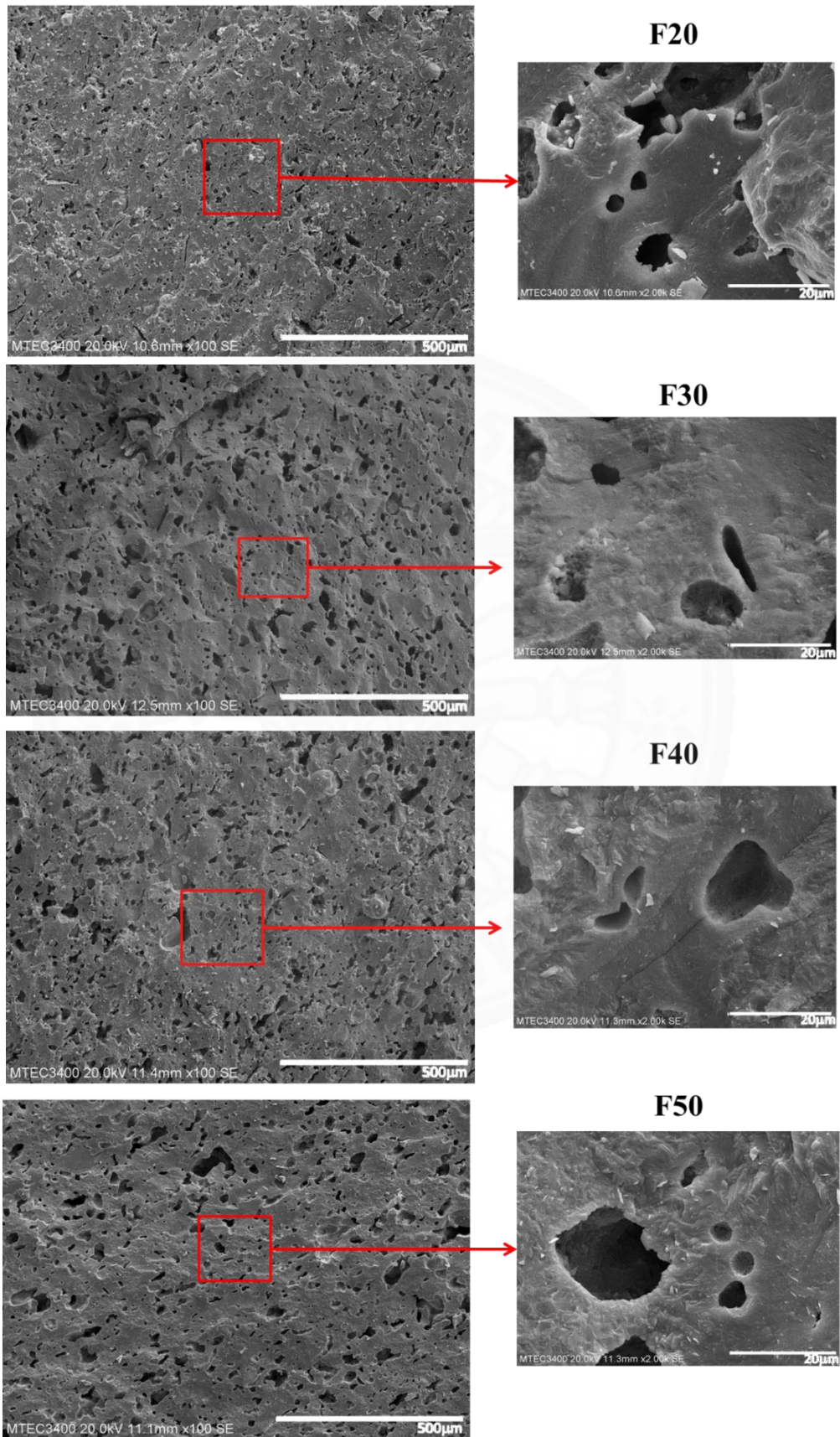
เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน เผาที่ช่วงอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมจึงได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟทุกตัวอย่างชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นงานมีโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous structure) เนื่องจากพบว่าภายในชิ้นงานไม่ได้เกิดการหลอมรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด ชิ้นงานที่ไม่มีเถ้าลอยถ่านหินเป็นส่วนผสม (F0) พบรูพรุนขนาดเล็กมากและมีการกระจายตัวของรูพรุนดี เนื้อของชิ้นงานมีความแน่น ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน ตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยถ่านหิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F10) จะพบรูพรุนขนาดเล็กเช่นกันแต่จะพบรอยแตก (Cracks) ขนาดเล็กขึ้นภายในชิ้นงาน แต่การกระจายของรูพรุนไม่สม่ำเสมอ จะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินมากขึ้น (F20-F50)

รูปพรุนที่พบจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้ชิ้นงานภายในชิ้นงานมีช่องว่างเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานจึงลดต่ำลง และทำให้มีความแข็งแรงลดต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่ายิ่งชิ้นงานมีความพรุนเพิ่มสูงขึ้นจะยิ่งทำให้ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานลดต่ำลง ซึ่งเป็นข้อดีของการเติมเถ้าลอยถ่านหินลงในชิ้นงานอิฐดินทนไฟ เมื่อสังเกตภายในรูปพรุนของชิ้นงานที่ผสมเถ้าลอยถ่านหินที่กำลังขยายสูง 2000x จะพบผลึกที่มีลักษณะเป็นแท่ง คล้ายเข็ม มีการสอดประสานกันจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลึกคล้ายกับผลึกของมัลไลต์ ผลึกของมัลไลต์มีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี มีการนำความร้อนต่ำ มีการขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีความแข็งแรงสูง [36] ซึ่งจะช่วยให้ชิ้นงานอิฐดินทนไฟมีสมบัติที่ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน
เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส (F0-F50)

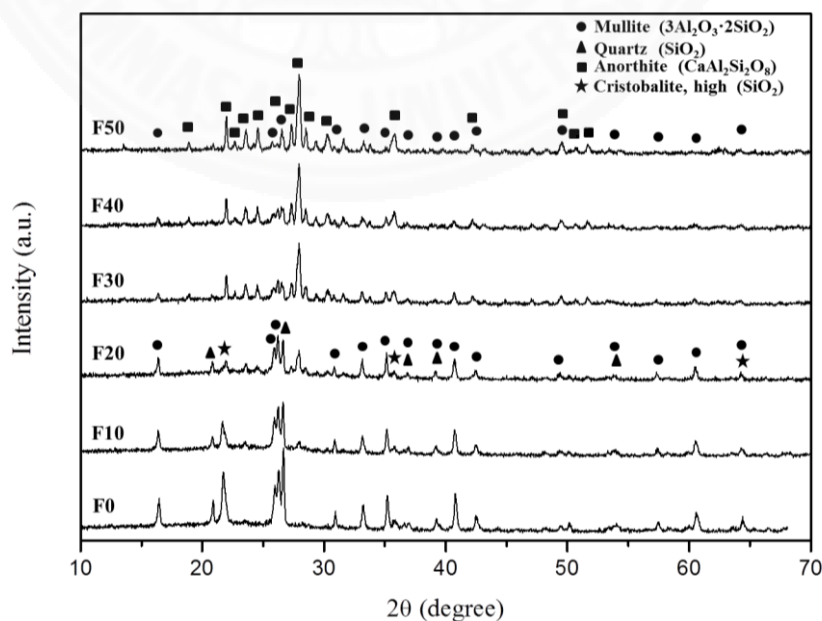
ต่อหน้า 58 →



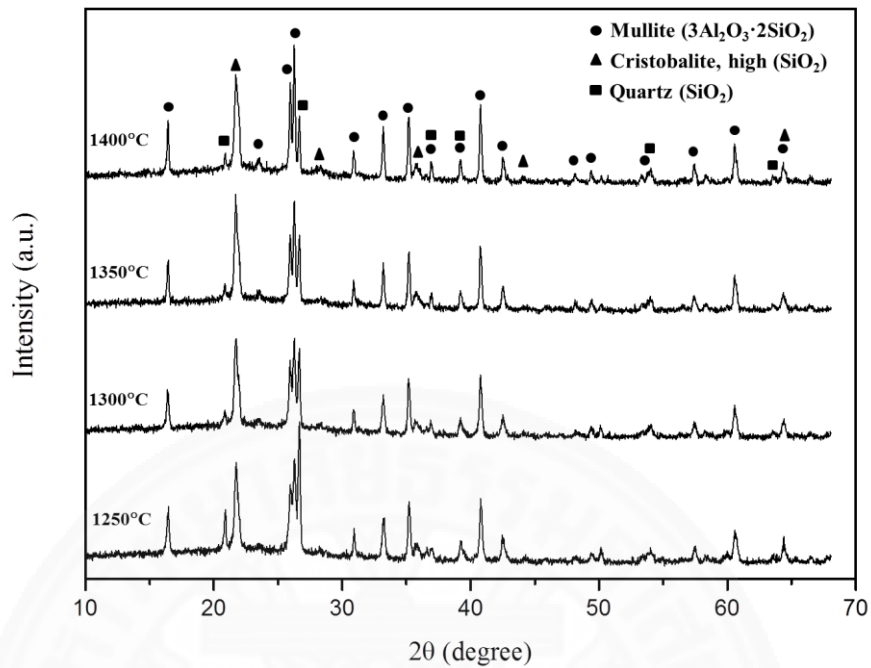
ภาพที่ 4.22(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟและเถ้าลอยถ่านหิน
เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส (F0-F50)

4.2.1.9 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟ

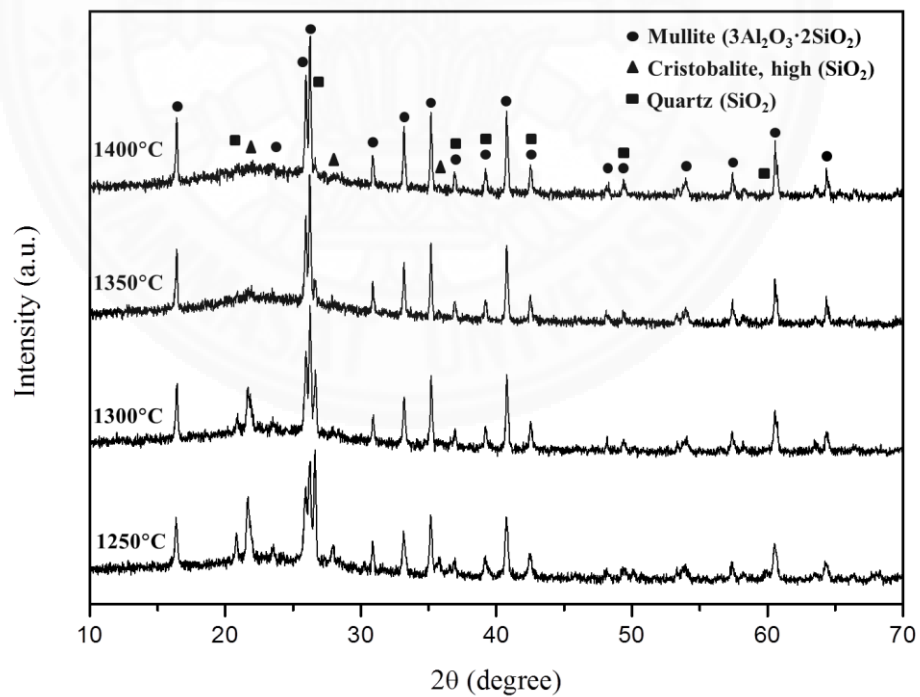
จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้จาก SEM พบว่าอนุภาคของชิ้นงานไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยหลายเฟสองค์ประกอบที่เกิดขึ้นหลังจากผสมกันของตัววัตถุดิบ (F0-F50) และการเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1250 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีเฟสของมัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ควอตซ์ (Quartz, SiO_2) อะนอร์ไทท์ (Anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) และคริสโตแบไลต์ (Cristobalite) โดยตัวอย่างชิ้นงานที่ผสมแก้วลอยถ่านหินเพิ่มสูงขึ้น จะมีความเข้มฟีก (Intensity) ของเฟสมัลไลต์ลดต่ำลง ในขณะที่ความเข้มฟีกของเฟสอะนอร์ไทท์จะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีที่พบในแก้วลอยถ่านหินมีปริมาณ CaO สูงมากขึ้น เฟสของควอตซ์ และคริสโตแบไลต์จะค่อยๆ ลดลงและหายไปจนหมดเมื่อมีแก้วลอยถ่านหินผสมสูงเกิน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F30-F50) เเผาถึงอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เฟสของอะนอร์ไทท์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จะทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดและปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานลดต่ำลง เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้วัตถุดิบหลอมได้เร็วขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลงก็ทำให้เกิดการเคลือบปิดบริเวณผิวของวัสดุทำให้ฟองอากาศภายในไม่สามารถออกมาได้ จึงทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะช่วยให้ค่าการนำความร้อนลดต่ำลง [37-38] แสดงในภาพที่ 4.23 แต่เมื่อศึกษาโครงสร้างเฟสของชิ้นงานในแต่ละอัตราส่วนพบว่า เมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นของชิ้นงานที่ผสมแก้วลอยถ่านหินตั้งแต่ 0-20 เปอร์เซ็นต์ (F0-F20) พบว่าเฟสของมัลไลต์จะสูงมากยิ่งขึ้น ในขณะที่เฟสของอะนอร์ไทท์จะเกิดขึ้นเมื่อมีแก้วลอยถ่านหินผสมอยู่ตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป และมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.24-4.29



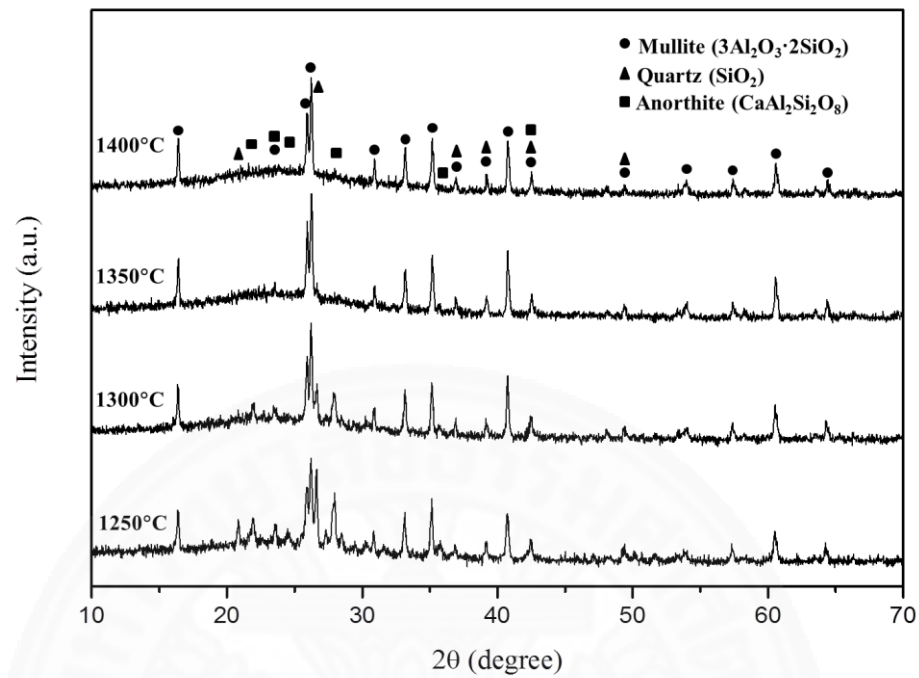
ภาพที่ 4.23 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส



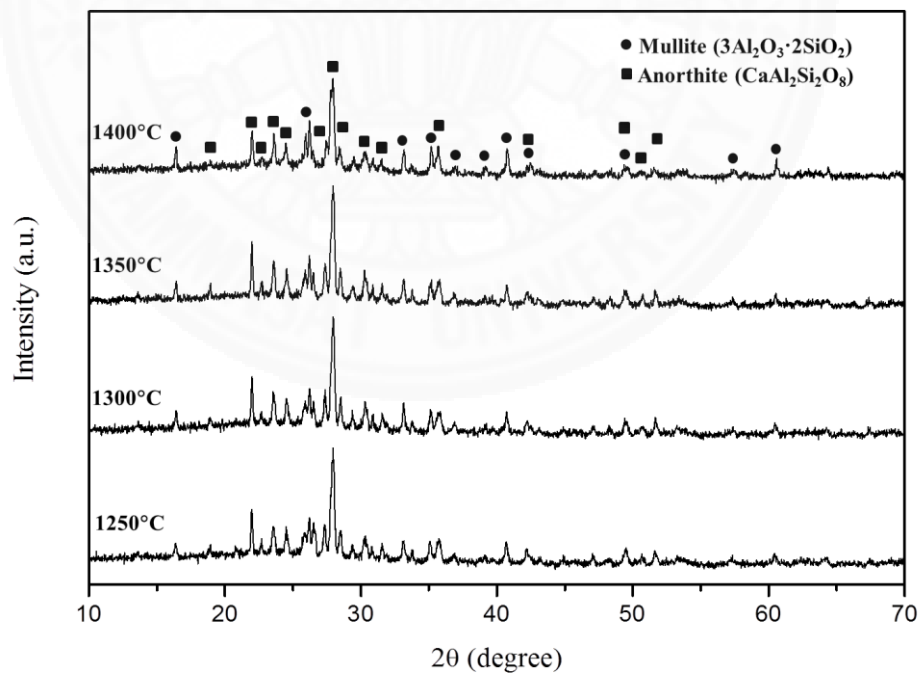
ภาพที่ 4.24 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่ไม่เติมแก้วลอยถ่านหินผสม (F0)



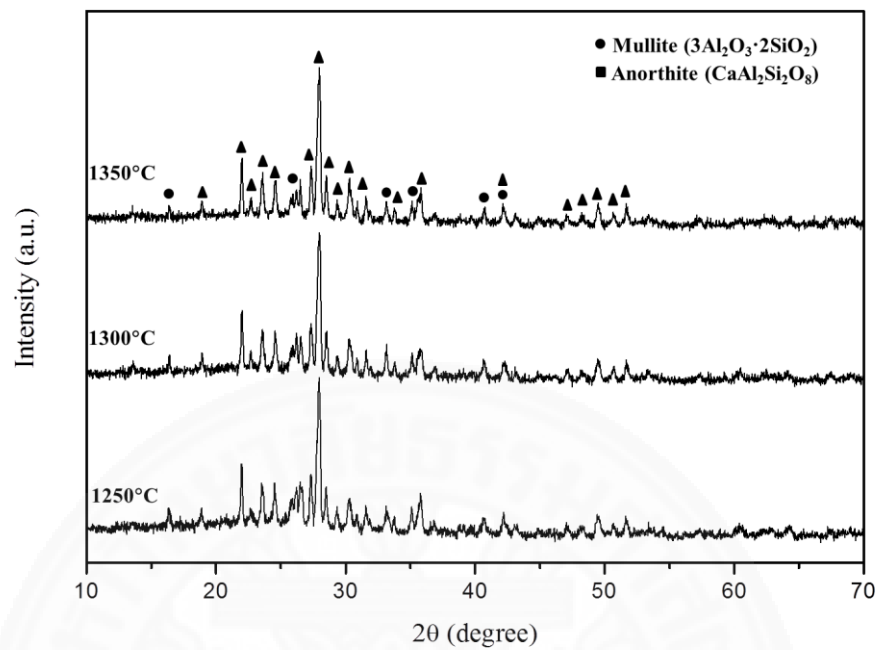
ภาพที่ 4.25 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีแก้วลอยถ่านหินผสม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F10)



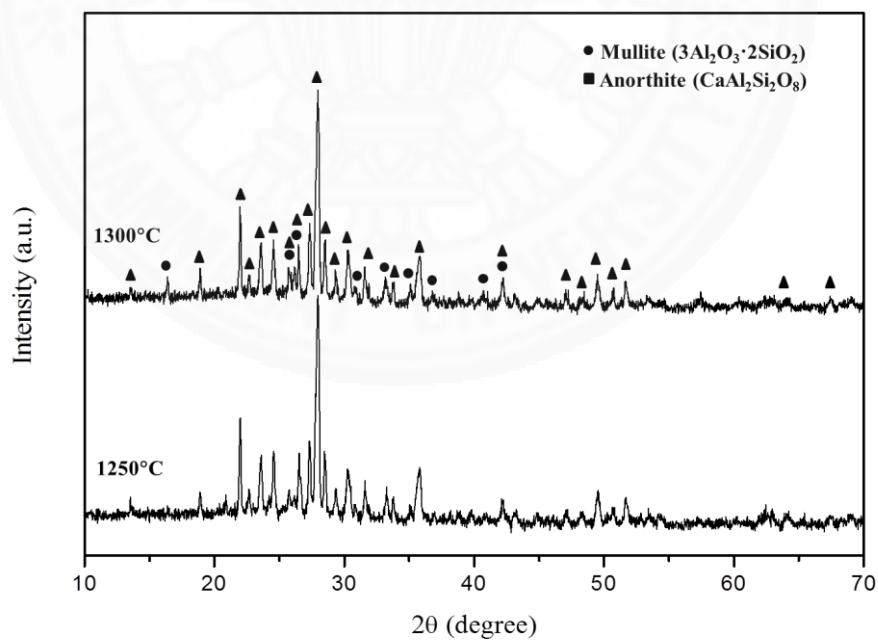
ภาพที่ 4.26 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีเถ้าลอยถ่านหินผสม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F20)



ภาพที่ 4.27 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีเถ้าลอยถ่านหินผสม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F30)



ภาพที่ 4.28 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีเถ้าลอยถ่านหินผสม 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F40)



ภาพที่ 4.29 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีเถ้าลอยถ่านหินผสม 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F50)

4.2.1.10 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient, COE)

จากตารางที่ 4.5 เป็นตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบจะใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 30-1200 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของชิ้นงานที่ไม่ผสมแก้วลอยถ่าน (F0) มีค่าการขยายตัวสูงที่สุด แต่เมื่อผสมแก้วลอยถ่านหินในชิ้นงานพบว่าการขยายตัวลดต่ำลงเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส เมื่อทดสอบกับชิ้นงานที่ผสมแก้วลอยถ่านหินปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F20) ค่าการขยายตัวจากความร้อนมีค่าลดต่ำ อยู่ที่ 5.28 เมื่อผสมปริมาณแก้วลอยถ่านหินสูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F40) ค่าการขยายตัวจากความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยรวมพบว่าค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยตัวอย่างที่มีความหนาแน่นสูง มีความแข็งแรงสูง ความพรุนต่ำ และมีพันธะที่แข็งแรงจะมีค่าการขยายตัวจากความร้อนต่ำ และจะทำให้มีจุดหลอมเหลวที่สูง

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน

ตัวอย่าง	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ณ อุณหภูมิ 30-1200°C (1/K, $\times 10^{-6}$)
F0	5.35
F20	5.28
F40	5.83

ซึ่งจากการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าตัวอย่างอิฐดินทนไฟที่ผสมแก้วลอยถ่านหิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F20) เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่มีการเผาที่สูงที่สุดของชิ้นงาน มีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ รวมทั้งมีค่าการหดตัวเชิงเส้นต่ำ การนำความร้อนต่ำ มีค่าความพรุนปรากฏต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของอิฐดินทนไฟที่ไม่ผสมแก้วลอยถ่านหิน (F0) และอิฐดินทนไฟที่ผสมแก้วลอยถ่านหินที่อัตราส่วนอื่นๆพบว่า เป็นอิฐดินทนไฟที่มีสมบัติที่ดีที่สุดของการทดสอบที่ผ่านมา แต่เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM-SK30 พบว่ายังไม่ผ่านมาตรฐาน อีกทั้งเมื่อศึกษาการนำไปใช้งานจริง หรือการผลิตในงานอุตสาหกรรมพบว่ายังไม่เหมาะสม สมบัติของอิฐดินทนไฟตามมาตรฐานASTM-SK30 แสดงในตารางที่ 4.6 โดยชิ้นงานที่ผลิตได้มีค่าการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานสูงมาก ไม่สามารถนำไปใช้งานจริงที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้ จึงได้เลือกนำตะกรัน

อลูมิเนียมมาใช้เป็นวัตถุดิบเพิ่ม เพื่อศึกษาการผลิตอิฐดินทนไฟ ในการปรับปรุงสมบัติให้ดียิ่งขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้เทียบเท่ากับชิ้นงานในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 4.6 สมบัติของอิฐดินทนไฟตามมาตรฐาน ASTM-SK30

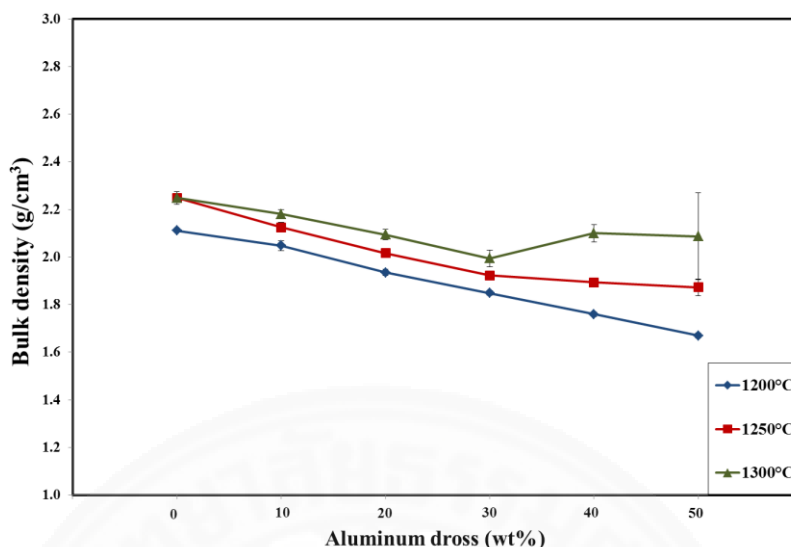
คุณสมบัติ	ASTM- SK30
ความหนาแน่นรวม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.2
ความพรุนปรากฏ (เปอร์เซ็นต์)	19-20
ความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง (เมกะปาสคาล)	27.5
ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้อง (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	45

4.3 อิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ ถ้ำลอยถ่านหิน และตะกัณอลูมิเนียม

4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ ถ้ำลอยถ่านหิน และตะกัณอลูมิเนียมแช่น้ำ

4.3.1.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

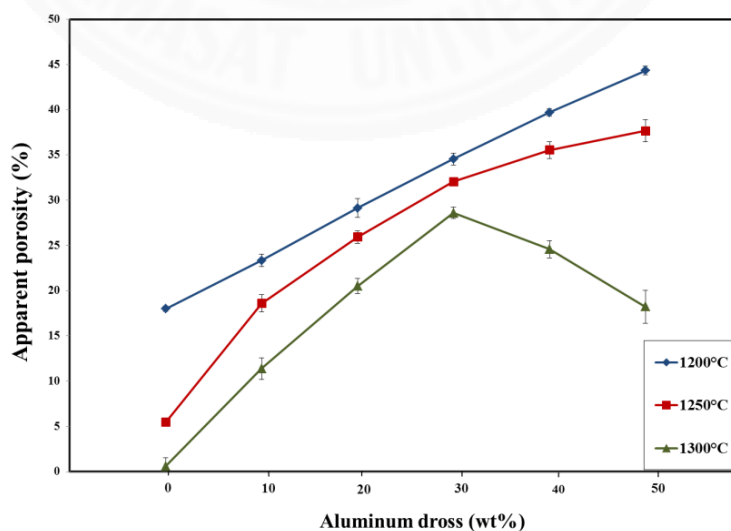
จากภาพที่ 4.30 ค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ เผาที่อุณหภูมิ 1200-1300 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตะกัณอลูมิเนียมแช่น้ำในส่วนผสม ค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานจะมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ไม่ผสมตะกัณอลูมิเนียมที่มีค่าสูงสุดที่ 2.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 1300 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างที่ผสมตะกัณอลูมิเนียมแช่น้ำสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความหนาแน่นสูงมากขึ้นถึง 2.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นเมื่อผสมตะกัณอลูมิเนียมไม่เกิดการเสียรูปทรง (ไม่หลอม) เมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.30 ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ

4.3.1.2 ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)

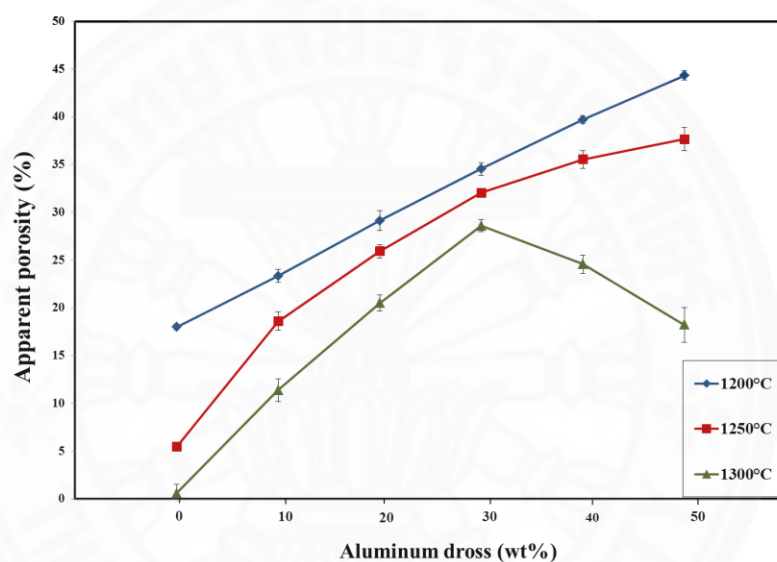
ความพรุนของชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมตะกรันอลูมิเนียมเพิ่มสูงขึ้น และความพรุนจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1300 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐดินทนไฟที่ไม่เติมตะกรันแช่น้ำพบว่าชิ้นงานที่มีตะกรันอลูมิเนียมมีค่าความพรุนที่สูงกว่าจึงมีผลทำให้ความหนาแน่นในชิ้นงานมีค่าต่ำนั่นเอง เช่นเดียวกับตัวอย่างที่เติมตะกรันอลูมิเนียม 40-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เผาถึงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสจะมีค่าความพรุนในชิ้นงานลดต่ำลงจึงทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.31 ความพรุนปรากฏของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ

4.3.1.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)

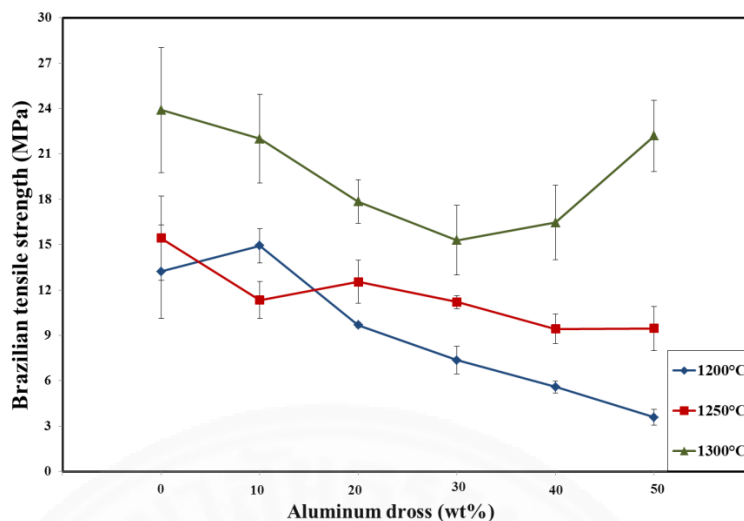
การเติมตะกั่วอะลูมิเนียมในส่วนของผสมอิฐดินทนไฟสามารถลดการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาได้อย่างดี เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีในตะกั่วอะลูมิเนียมมีปริมาณของอะลูมินาสูงและมีปริมาณของฟลักซ์ต่ำมาก (CaO) จึงทำให้จุดหลอมเหลวของอิฐดินทนไฟสูงมากยิ่งขึ้น ค่าการหดตัวของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผสมตะกั่วอะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดต่ำลง และมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ผสมตะกั่วอะลูมิเนียม โดยค่าการหดตัวเชิงเส้นต่ำสุดของชิ้นงานที่ผสมตะกั่วอะลูมิเนียมอยู่ที่ 3.30 เปอร์เซ็นต์ เป็นชิ้นงานที่เติมตะกั่วอะลูมิเนียม 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นชิ้นงานก็จะมีค่าการหดตัวเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.32 การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอะลูมิเนียมแช่น้ำ

4.3.1.4 ความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ (Brazilian test)

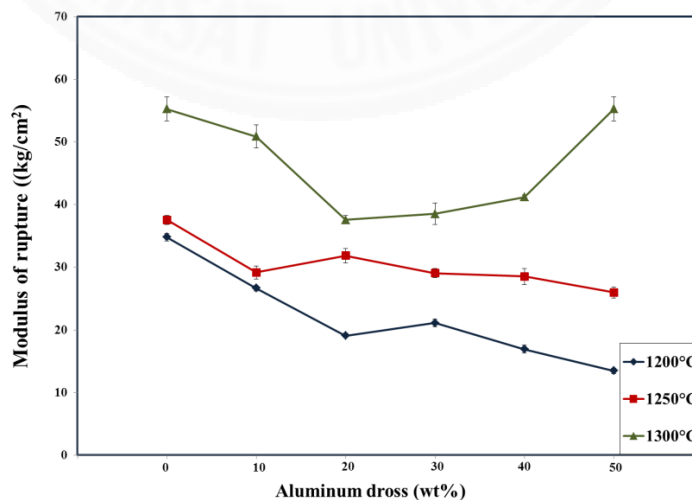
จากการคำนวณค่าความแข็งแรงในรูปแบบบราซิลเลียนพบว่า ตัวอย่างอิฐดินทนไฟที่ไม่ผสมตะกั่วอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงสูงที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมแช่น้ำสูงขึ้นความแข็งแรงของชิ้นงานก็จะมีค่าต่ำลง แต่จะพบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก็จะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นสูง และมีความพรุนในชิ้นงานต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.33



ภาพที่ 4.33 ความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ

4.3.1.5 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ (Modulus of rupture, MOR)

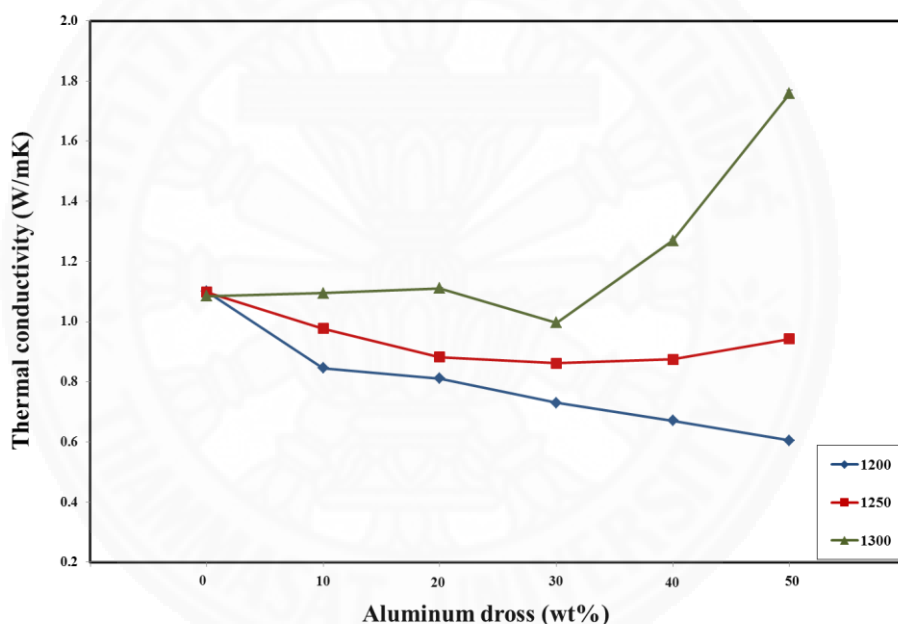
จากภาพที่ 4.34 พบว่าชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการแตกร้าวลดลงเมื่อมีปริมาณของตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณของตะกรันที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ชิ้นงานมีรูพรุนเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ส่งผลต่อความแข็งแรงในชิ้นงาน เมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นพบว่าชิ้นงานสามารถทนต่อการแตกร้าวได้สูงขึ้น จะสังเกตว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสมของตะกรันอลูมิเนียม 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เผาที่ 1300 องศาเซลเซียส มีความต้านทานต่อการแตกร้าวที่สูงมากเนื่องจากมีความหนาแน่นรวมสูง และรูพรุนต่ำ



ภาพที่ 4.34 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3.1.6 การนำความร้อน (Thermal conductivity)

ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่แสดงในภาพที่ 4.35 พบว่าเมื่อผสมตะกั่วอลูมิเนียมในตัวอย่าง ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานมีค่าต่ำลง ยกเว้นในตัวอย่างที่มีตะกั่วอลูมิเนียมผสมอยู่ 30-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะค่าการนำความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเผาถึงช่วงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสเนื่องจากมีค่าความหนาแน่นในชิ้นงานสูง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อผสมตะกั่วอลูมิเนียมตั้งแต่ 10-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเผาถึงช่วงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส จะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ผสมตะกั่วอลูมิเนียม โดยค่าการนำความร้อนของชิ้นงานที่ไม่ผสมตะกั่วอลูมิเนียมจะอยู่ที่ 1.1 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ส่วนชิ้นงานที่ผสมตะกั่วอลูมิเนียมจะเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน

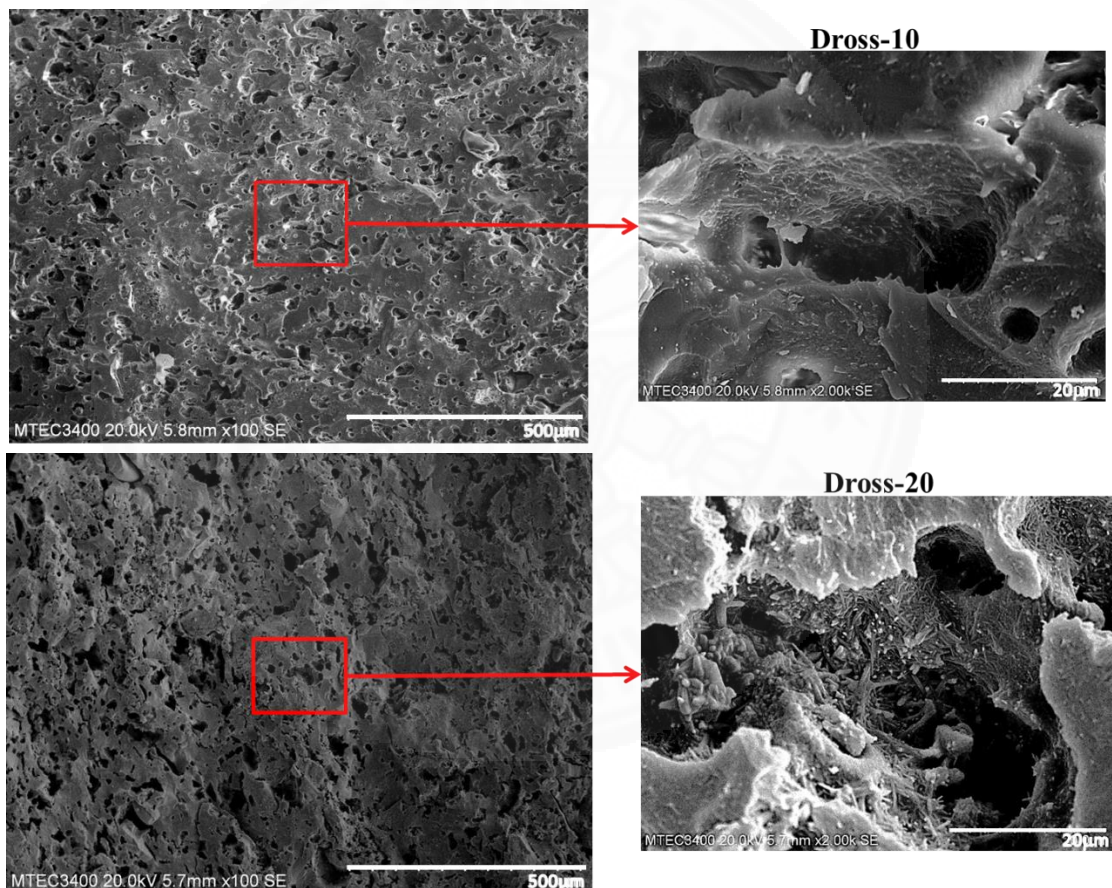


ภาพที่ 4.35 ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำ

4.3.1.7 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ

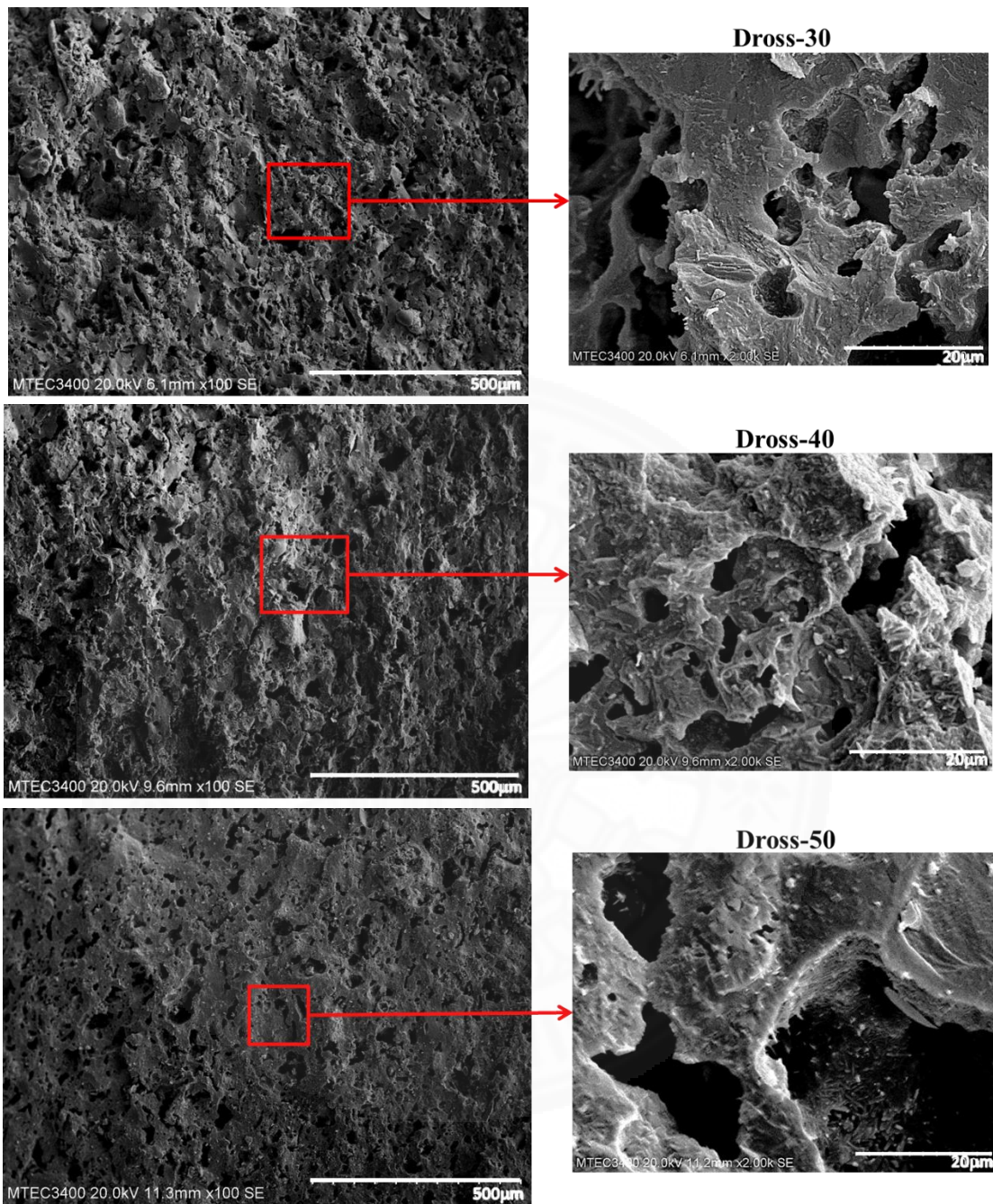
เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียม เผาที่ช่วงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิการเผาที่สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานอิฐดินทนไฟไม่เกิดการเสียหายรวมทั้งมีสมบัติที่คาดว่าจะปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM-SK30 จึงได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟทุกตัวอย่างชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานมีโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อมีปริมาณตะกั่ว

อลูมิเนียมในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นขนาดของรูพรุนก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยชิ้นงานที่ผสมตะกั่ว อลูมิเนียม 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบรูพรุนขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของรูพรุนดี เนื้อของชิ้นงานมีความแน่น แต่เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้รูพรุนใหญ่ขึ้น ทำให้มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานต่ำลง แต่เมื่อมีปริมาณตะกั่วอลูมิเนียม 40-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าชิ้นงานมีค่าการหดตัวของชิ้นงานสูงมาก จึงทำให้ชิ้นงานมีเนื้อที่แน่นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าสูง เมื่อทำการขยายภาพโครงสร้างจุลภาคที่ 2000x ดังแสดงในภาพที่ 4.36 พบว่าเกิดผลึกแท่งคล้ายเข็ม (ผลึกมัลไลต์) ในทุกตัวอย่างชิ้นงานจึงทำให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าสูงใกล้เคียงกับตัวอย่างอิฐดินเหนียวที่ไม่ผสมตะกั่วอลูมิเนียม (F20)



ภาพที่ 4.36 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินเหนียวจากดินเหนียว เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำ เเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส (10-50เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

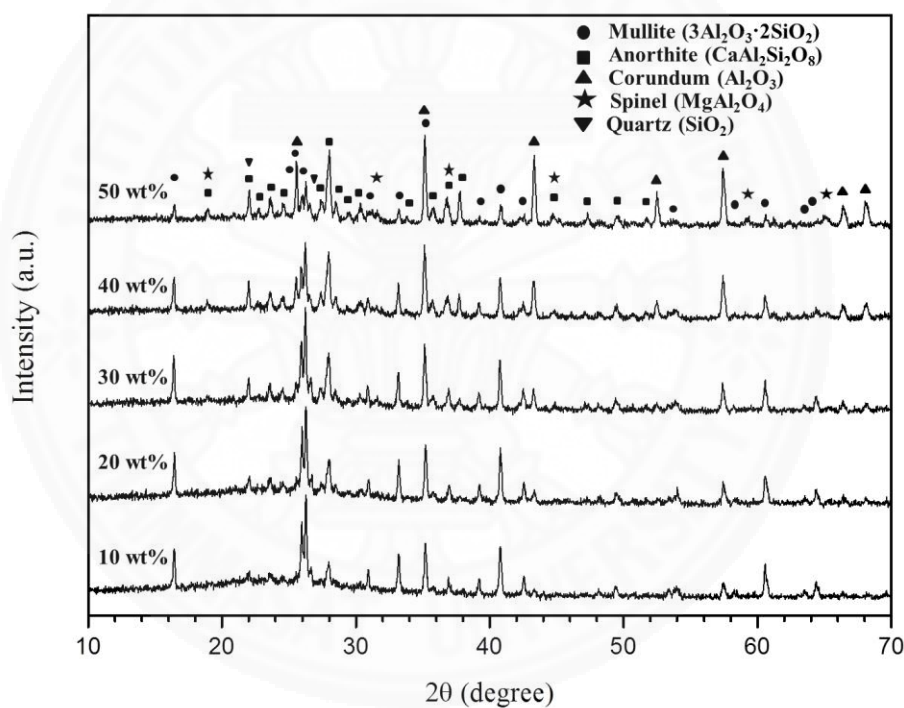
ต่อหน้า 70 →



ภาพที่ 4.36(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ แก้วลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ เเผที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส (10-50เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

4.3.1.8 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟ

จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้ SEM พบว่าอนุภาคของชิ้นงานไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยหลายเฟสองค์ประกอบที่เกิดขึ้นหลังจากผสมกันของตัววัตถุดิบดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำ เเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิค XRD พบว่าในตัวอย่างชิ้นงานมีเฟสของมัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) อะนอร์ไทท์ (Anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) คอรัันดัม (Corundum, Al_2O_3) สปิเนล (Spinel, MgAl_2O_4) และควอตซ์ โดยพบว่าเมื่อมีตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำเพิ่มมากขึ้นเฟสของมัลไลต์จะมีปริมาณต่ำลง แต่ในทำนองเดียวกันกับพบว่ามีเฟสของอะนอร์ไทท์ เฟสของคอรัันดัม และสปิเนลเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.37

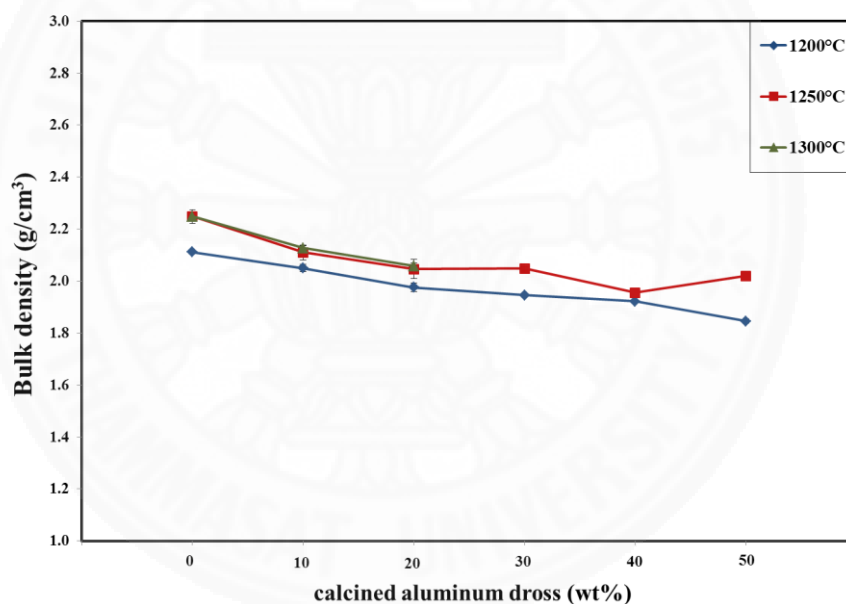


ภาพที่ 4.37 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและตะกั่วอลูมิเนียมแช่น้ำ เเผาที่ 1300 องศาเซลเซียส

4.3.2 การศึกษาสมบัติของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

4.3.2.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

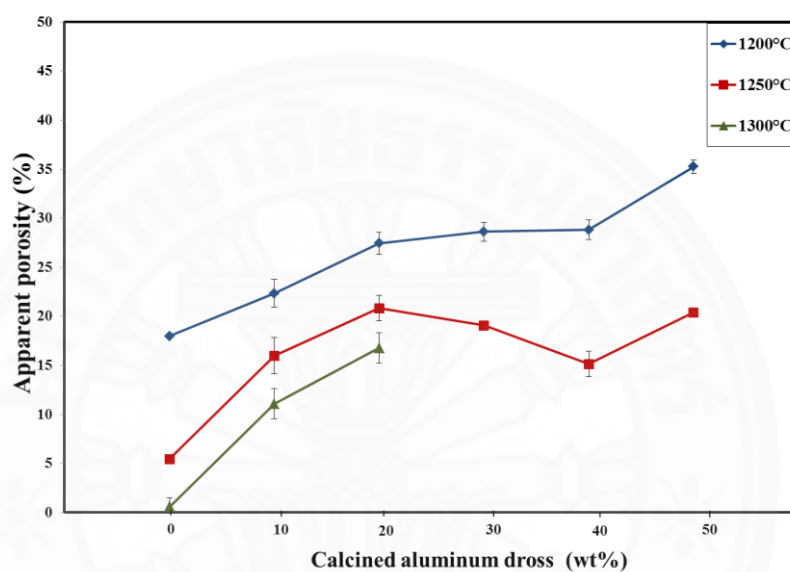
จากการคำนวณค่าความหนาแน่นรวมพบว่าตัวอย่างชิ้นงานที่ไม่ผสม ตะกรันอลูมิเนียมแคลไซน์ (F20) มีค่าความหนาแน่นรวมสูงที่สุด ในตัวอย่างที่ผสมตะกรันอลูมิเนียม แคลไซน์เพิ่มสูงขึ้นค่าความหนาแน่นรวมจะลดต่ำลง และเมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความหนาแน่น รวมของชิ้นงานก็มีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามตัวอย่างชิ้นงานที่มีปริมาณตะกรันอลูมิเนียมแคลไซน์สูง กว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เผาที่ 1300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปทรง (หลอม) ไม่ สามารถนำมาคำนวณสมบัติทางกายภาพได้ เนื่องจากปริมาณโซเดียมซึ่งเป็นฟลักซ์ในวัตถุดิบปริมาณ มาก จึงส่งผลให้จุดหลอมเหลวของชิ้นงานต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 4.38



ภาพที่ 4.38 ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมแคลไซน์

4.3.2.2 ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)

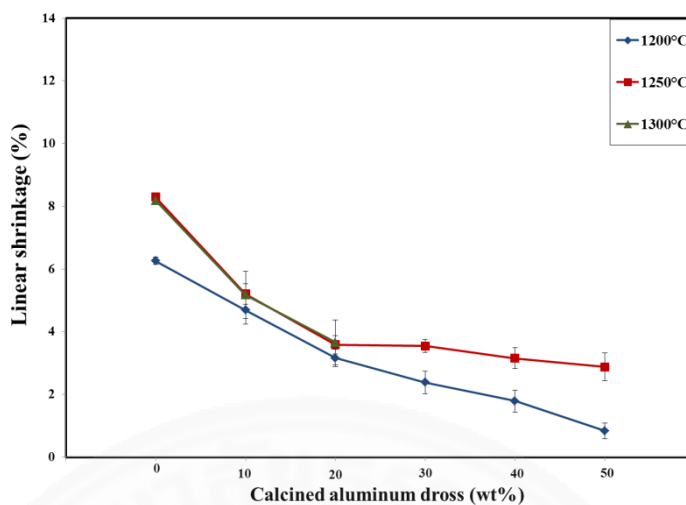
จากภาพที่ 4.39 แสดงความพรุนปรากฏของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผสมตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์ ชิ้นงานมีความพรุนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1300 องศาเซลเซียส ค่าความพรุนจะมีค่าลดต่ำลงซึ่งเป็นไปตามความหนาแน่นของชิ้นงานที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามความพรุนของชิ้นงานที่ผสมตะกรันอลูมิเนียมก็มีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผสมตะกรันอลูมิเนียม



ภาพที่ 4.39 ความพรุนปรากฏของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์

4.3.2.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)

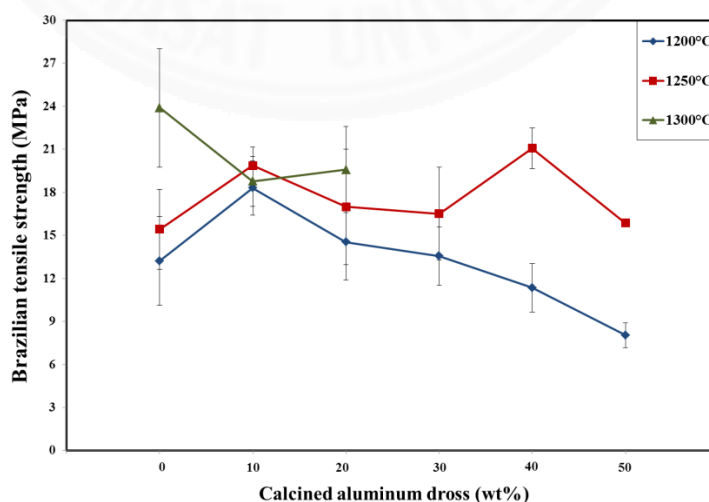
การเติมตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์ในส่วนผสมอิฐดินทนไฟสามารถลดการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาได้ดี ดังแสดงในภาพที่ 4.40 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตะกรันอลูมิเนียมในส่วนผสมช่วยลดค่าการหดตัวหลังเผาได้สูงสุดถึง 0.84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสมตะกรันถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นพบว่าชิ้นงานมีการหดตัวเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อชิ้นงานมีการหดตัวสูงจะแสดงให้เห็นถึงชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงนั่นเอง



ภาพที่ 4.40 การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์

4.3.2.4 ความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ (Brazilian test)

จากภาพที่ 4.41 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์ โดยพบว่าเมื่อเติมตะกั่วอลูมิเนียมเพิ่มสูงขึ้น ความแข็งแรงของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ไม่ผสมตะกั่วอลูมิเนียม (F20) พบว่าชิ้นงานที่ผสมตะกั่วอลูมิเนียมตั้งแต่ 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผสมตะกั่วอลูมิเนียม ในช่วงอุณหภูมิ 1200-1300 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพที่กล่าวมาคือ เมื่อชิ้นงานที่มีความพรุนต่ำจะมีค่าความหนาแน่นสูง ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นด้วย

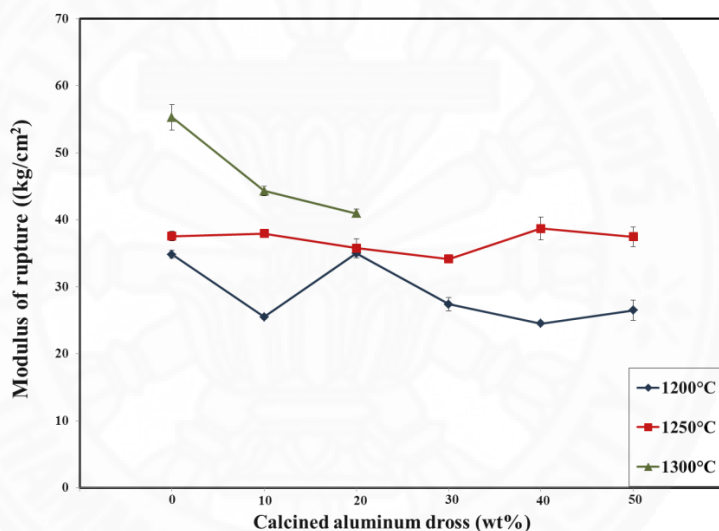


ภาพที่ 4.41 ความแข็งแรงของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์

4.3.2.5 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟ

(Modulus of rupture, MOR)

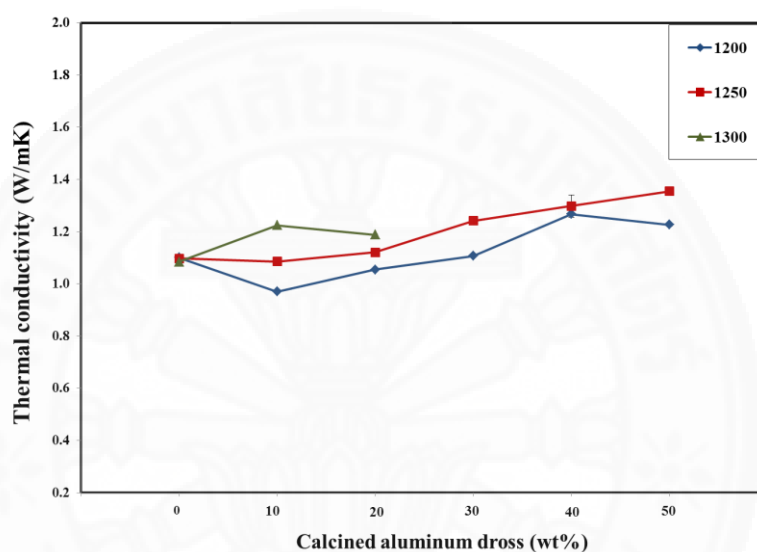
ชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผสมตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์มีค่าความต้านทานต่อการแตกร้าวใกล้เคียงกับอิฐดินทนไฟที่ไม่เติมตะกั่วอลูมิเนียม แต่จะพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ไม่ผสมตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์จะมีความทนต่อการแตกร้าวที่สูงที่สุด และในตัวอย่างชิ้นงานที่ผสมตะกั่วอลูมิเนียมตั้งแต่ 30-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ไม่สามารถทดสอบชิ้นงานได้เนื่องจากชิ้นงานเกิดการหลอมตัว ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบของวัตถุดิบจากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.9 ที่มีสารประกอบโซเดียมและแคลเซียมซึ่งเป็นฟลักซ์ในปริมาณมากนั้นคือ ทำให้จุดหลอมเหลวของชิ้นงานต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 4.42



ภาพที่ 4.42 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3.2.6 การนำความร้อน (Thermal conductivity)

ชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผสมตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์มีค่าการนำความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณตะกรันเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าการนำความร้อนก็จะสูงขึ้นด้วย เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงและมีความพรุนตัวต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผสมตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์พบว่ามีการนำความร้อนใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าชิ้นงานที่ผสมตะกรันจะมีค่าสูงกว่าแต่ก็สูงกว่าเพียงเล็กน้อย จึงทำให้สมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟที่ผสมตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์มีสมบัติที่ดีกว่านั่นเอง ดังแสดงในภาพที่ 3.43

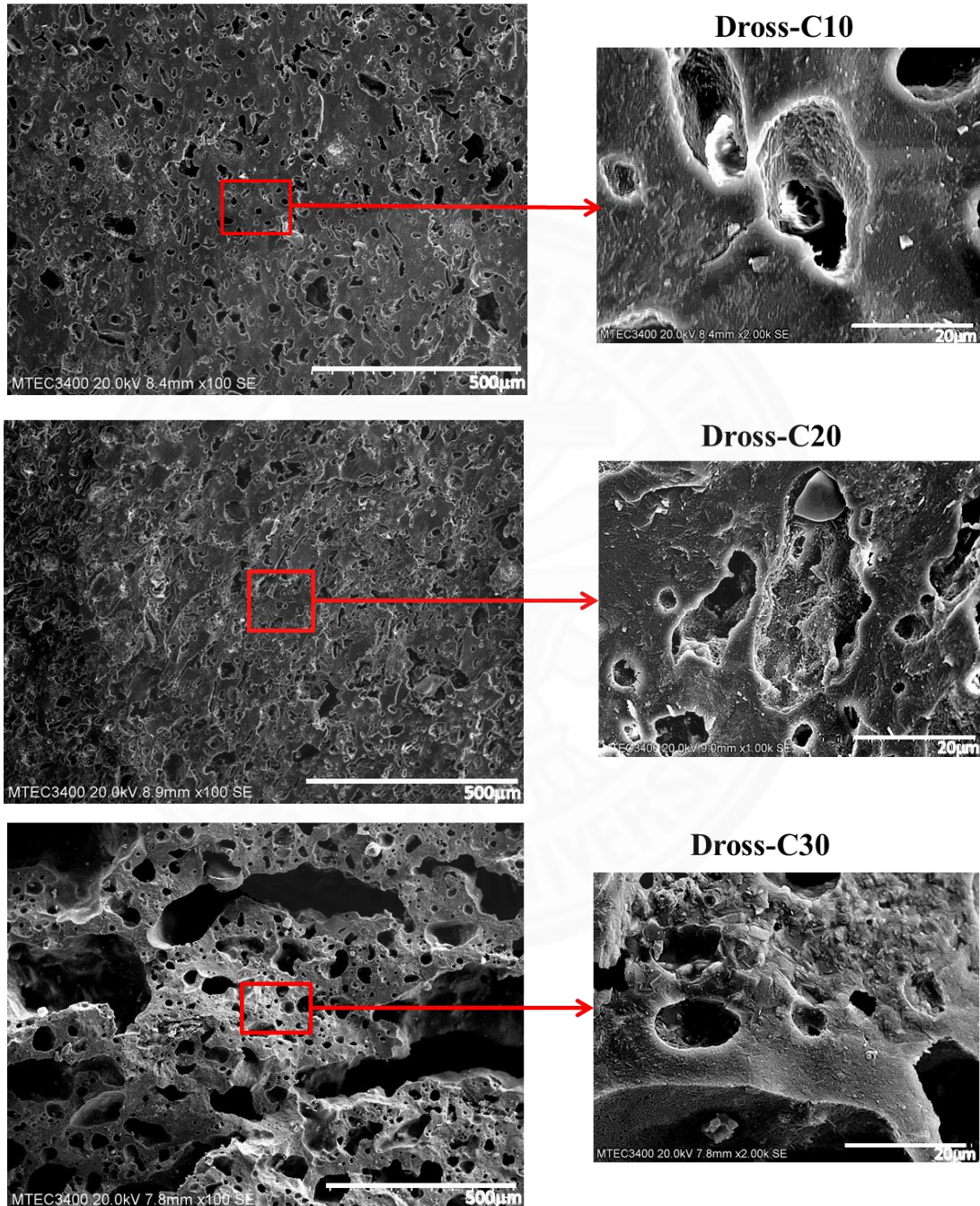


ภาพที่ 3.43 การนำความร้อนของชิ้นงานอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์

4.3.1.7 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ

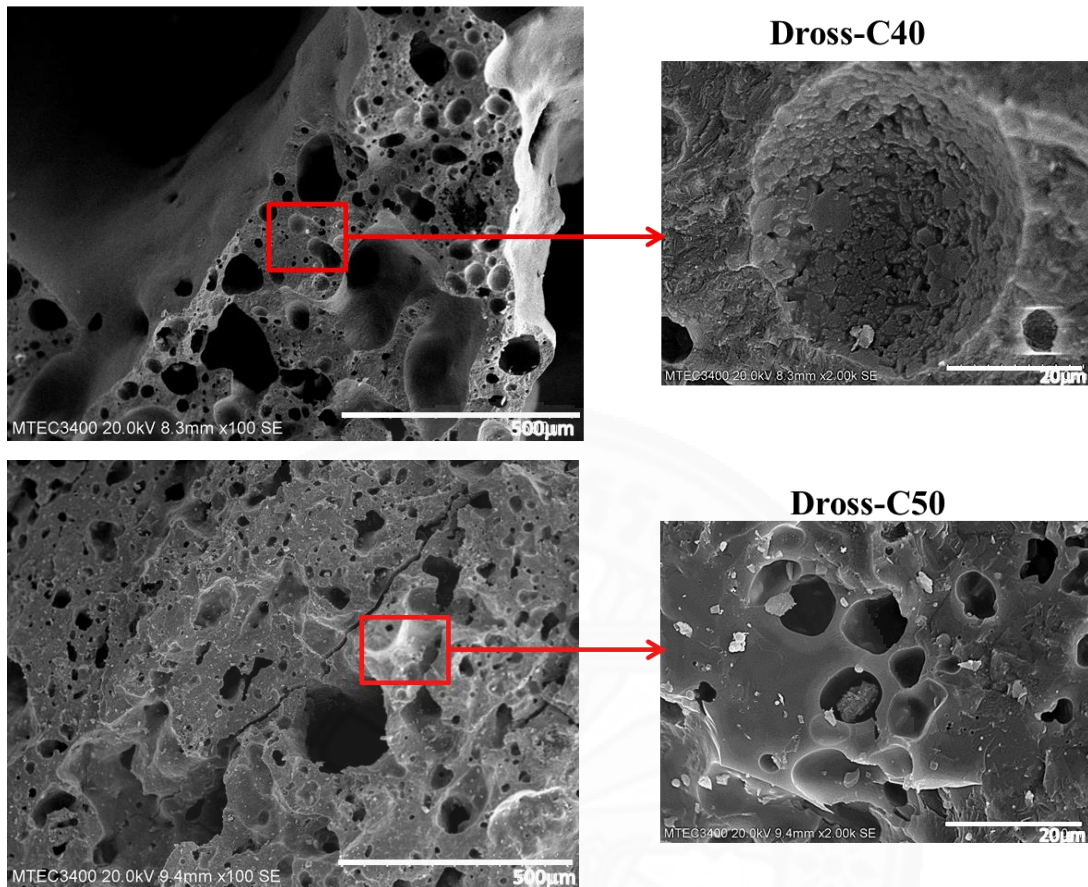
จากสมบัติทางกายภาพที่กล่าวมาพบว่าอิฐดินทนไฟที่เผาในช่วงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสมีสมบัติที่ดี เช่น มีความหนาแน่นสูง มีความพรุนต่ำ การหดตัวเชิงเส้นต่ำ รวมทั้งมีความแข็งแรงสูง จึงได้เลือกตัวอย่างชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ 1300 องศาเซลเซียส มาทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ถึงแม้ว่าตัวอย่างที่มีตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์ 30-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะไม่ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ แต่เพื่อความชัดเจนและความถูกต้อง จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3.44 โดยโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่มีตะกรันอลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็กปะปนกัน มีการกระจายตัวของรูพรุนดี ส่วนตัวอย่างที่ผสมตะกรันอลูมิเนียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ารูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ยังมีการกระจายตัวของรูพรุนดี เมื่อทำการขยายภาพที่ 2000x พบว่าภายในรูพรุนจะประกอบไปด้วยผลึกที่มีลักษณะเป็นแท่งเข็มสอดประสานกันไปมาซึ่งมีลักษณะคล้ายผลึกของมัลไลต์

ส่วนในชิ้นงานที่ผสมตะกั่วอลูมิเนียม 30-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะพบรูพรุนขนาดใหญ่ มีรอยแตกเกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานและพบว่าเกิดพื้นผิวเรียบของเนื้อสารจากการหลอมเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงานเป็นเฟสของแก้ว (Glassy phase) ทำให้ชิ้นงานมีจุดหลอมเหลวต่ำลง



ภาพที่ 4.44 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ ถ้าวลอยถ่านหิน และตะกั่วอลูมิเนียมแคลไซต์ เเผาที่ 1300 องศาเซลเซียส (10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

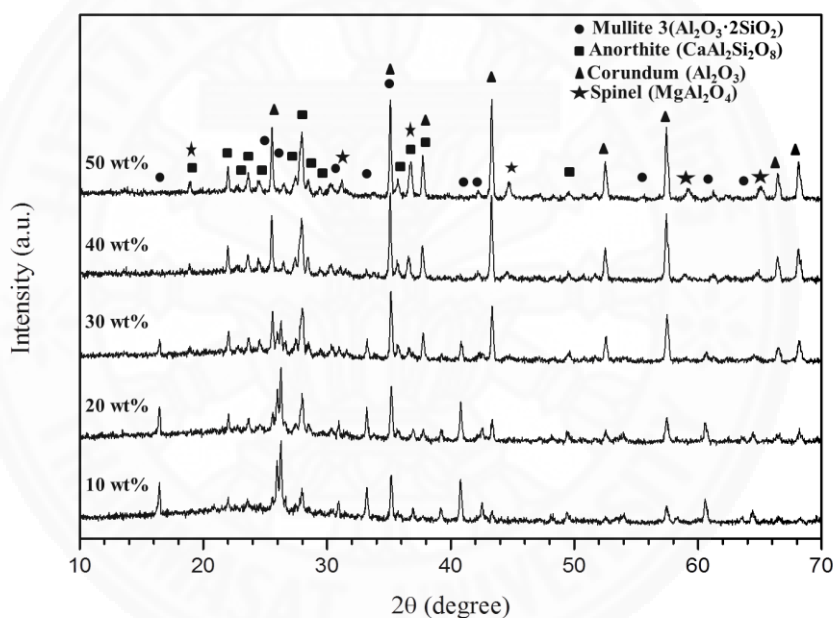
ต่อหน้า 78 →



ภาพที่ 4.44(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ ถ้ำลอยถ่านหิน และตะกอนอลูมิเนียมแคลไซต์ เเผาที่ 1300 องศาเซลเซียส (10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

4.3.2.8 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟ

จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จาก SEM พบว่าอนุภาคของชิ้นงานไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิค XRD พบว่าในตัวอย่างชิ้นงานประกอบไปด้วยเฟสของมัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) อะนอร์ไทท์ (Anorthite, $\text{CaAl}_2\text{OSi}_2\text{O}_8$) คอร์รันดัม (Corundum, Al_2O_3) และสปิเนล (Spinel, MgAl_2O_4) โดยพบว่าเมื่อมีตะกั่วอะลูมิเนียมแคลไซต์เพิ่มมากขึ้นเฟสของมัลไลต์จะมีปริมาณต่ำลง แต่ในทำนองเดียวกันกับพบว่ามีเฟสของอะนอร์ไทท์ และเฟสของคอร์รันดัมเพิ่มสูงขึ้น และยังพบเฟสของสปิเนลมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อสังเกตจากภาพ SEM พบว่ามีผลึกเป็นแท่งเข็มซึ่งสอดคล้องกับเฟสที่เกิดขึ้นคือมัลไลต์ เนื่องจากผลึกของมัลไลต์มีลักษณะเป็นแท่งเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 4.45

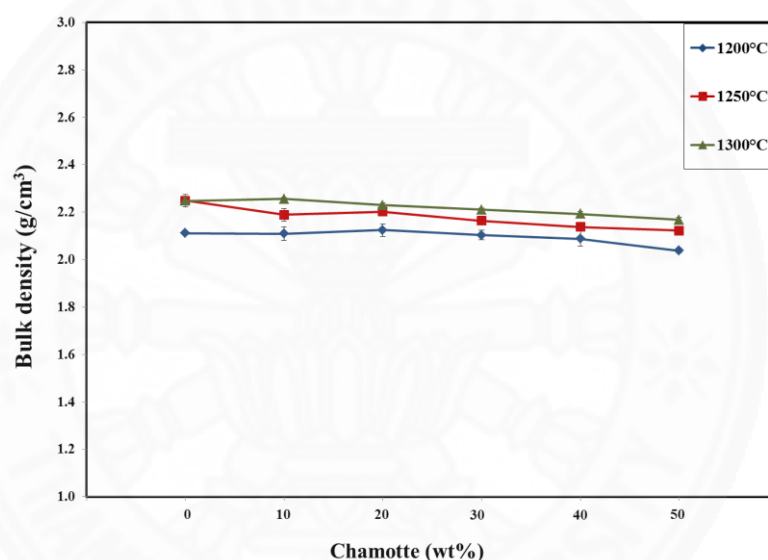


ภาพที่ 4.45 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ ถ้าวลอยถ่านหิน และตะกั่วอะลูมิเนียมแคลไซต์ เพาที่ 1300 องศาเซลเซียส

4.4 อิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และชามอทท์

4.4.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

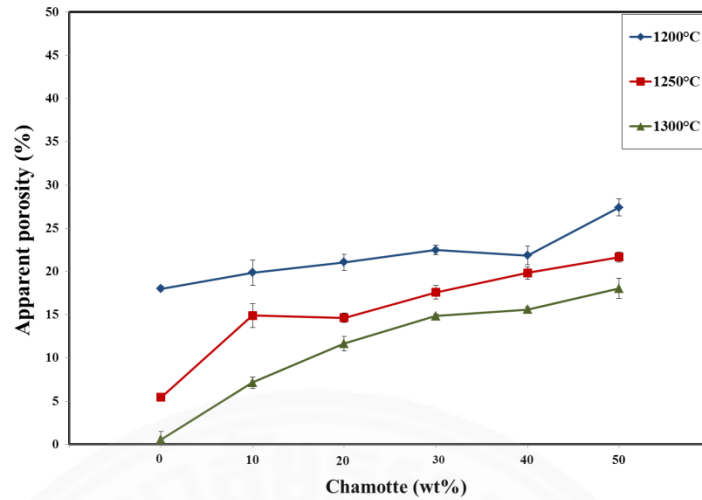
จากภาพที่ 4.46 แสดงความหนาแน่นรวมของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหิน และชามอทท์ ซึ่งพบว่าเมื่อเติมชามอทท์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นรวมเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย และมีความหนาแน่นรวมเทียบเท่ากับอิฐดินทนไฟที่ไม่เติมชามอทท์ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าดินชามอทท์ที่เติมเพิ่มช่วยปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานให้เนื้อมีความแน่นมากยิ่งขึ้น เนื่องจากดินชามอทท์เป็นดินที่ผ่านการเผามาแล้วทำให้ชิ้นงานไม่เกิดการหลอม และมีรูพรุนในชิ้นงานต่ำนั่นเอง และเมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะยิ่งทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.46 ความหนาแน่นรวมของอิฐดินทนไฟที่ผสมและดินชามอทท์ ตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4.2 ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)

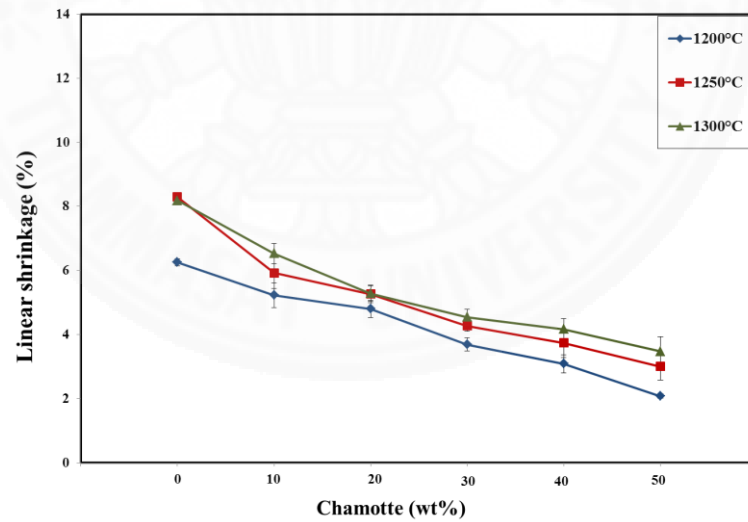
เมื่อเติมชามอทท์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานมีความพรุนเพิ่มสูงขึ้น สามารถสังเกตได้จากค่าความหนาแน่นที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย สามารถเกิดได้จากขนาดของชามอทท์ที่มีขนาดต่างจากวัสดุอื่น ๆ ทำให้เมื่ออัดขึ้นรูปและเผาอาจเกิดช่องว่างภายในชิ้นงานมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความพรุนลดต่ำลงเนื่องการหลอมตัวที่เนื้อวัสดุบีบทั้งหมดที่ผสม ดังแสดงในภาพที่ 4.47



ภาพที่ 4.47 ความพรุนปรากฏของอิฐดินทนไฟที่ผสมชามอทตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)

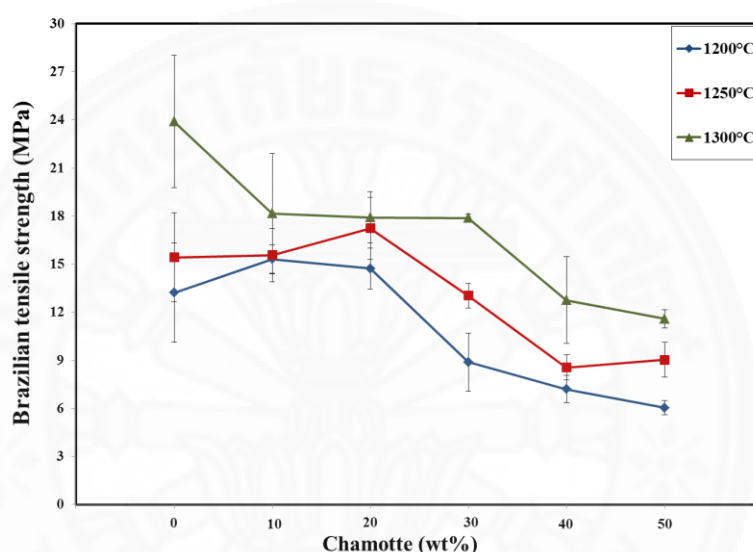
เนื่องจากชามอทเป็นดินที่ผ่านการเผามาแล้วทำให้ไม่เกิดการหดตัวอีกเมื่อนำมาผสมกับวัตถุดิบอื่นในการผลิตอิฐดินทนไฟ ทำให้เมื่อเติมชามอทในชิ้นงานอิฐดินทนไฟปริมาณมากยิ่งขึ้นจะทำให้ชิ้นงานมีค่าการหดตัวเชิงเส้น ลดต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 4.48



ภาพที่ 4.48 การหดตัวเชิงเส้นของอิฐดินทนไฟที่ผสมชามอทตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4.4 ความแข็งแรง (Brazilian test)

จากภาพที่ 4.49 แสดงค่าความแข็งแรงของอิฐดินทนไฟที่ผสมขามอทท์ พบว่า ชีงงานอิฐดินทนไฟที่ผสมขามอทท์เพิ่มมากขึ้นจะมีค่าความแข็งแรงลดต่ำลง เนื่องจากรูพรุนที่พบใน ชีงงานมีปริมาณมากยิ่งขึ้นทำให้ชีงงานมีความเปราะ แตกหักง่าย โดยเฉพาะที่ชีงงานผสมขามอทท์ 30-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความแข็งแรงที่ต่ำลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับชีงงานที่ไม่ผสม ขามอทท์พบว่า ชีงงานอิฐดินทนไฟที่ไม่ส่วนผสมของขามอทท์ที่ความแข็งแรงที่สูงกว่า เมื่อเผาถึง อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส

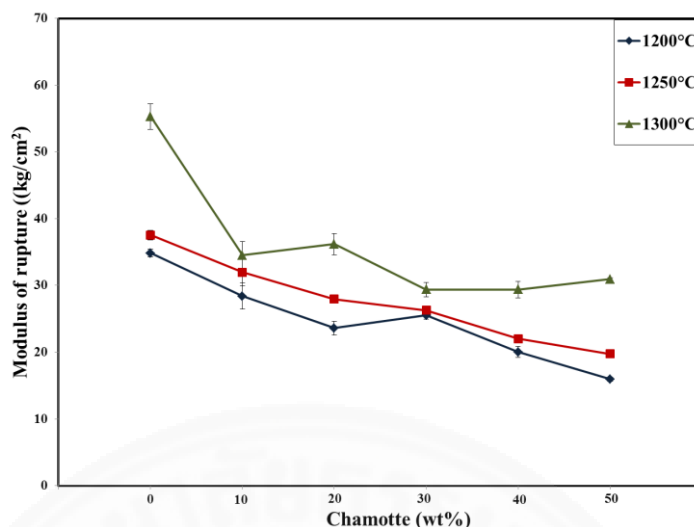


ภาพที่ 4.49 ความแข็งแรงของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของขามอทท์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4.5 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชีงงานอิฐดินทนไฟ

(Modulus of rupture, MOR)

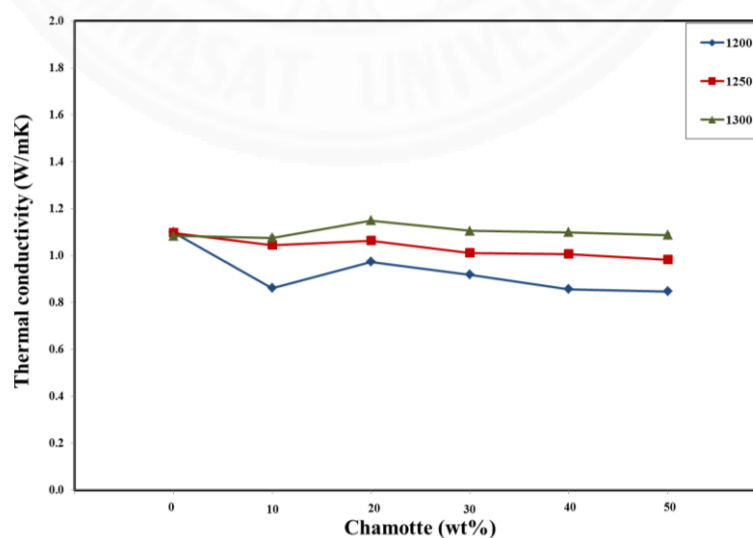
จากภาพที่ 4.50 แสดงความต้านทานต่อการแตกร้าวของชีงงานอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟ ถ้ำลอยถ่านหิน และขามอทท์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200-1300 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเติมขามอทท์เพิ่มสูงขึ้นความต้านทานต่อการแตกร้าวมีแนวโน้มลดต่ำลง ซึ่งเป็นไปตามผลของค่าความแข็งแรงของชีงงานที่ได้ทำการวิเคราะห์ ชีงงานมีรูพรุนปริมาณมากขึ้นและขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้ชีงงานที่ผลิตได้มีความแข็งแรงที่ลดต่ำลง



ภาพที่ 4.50 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของชามอทท์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4.6 การนำความร้อน (Thermal conductivity)

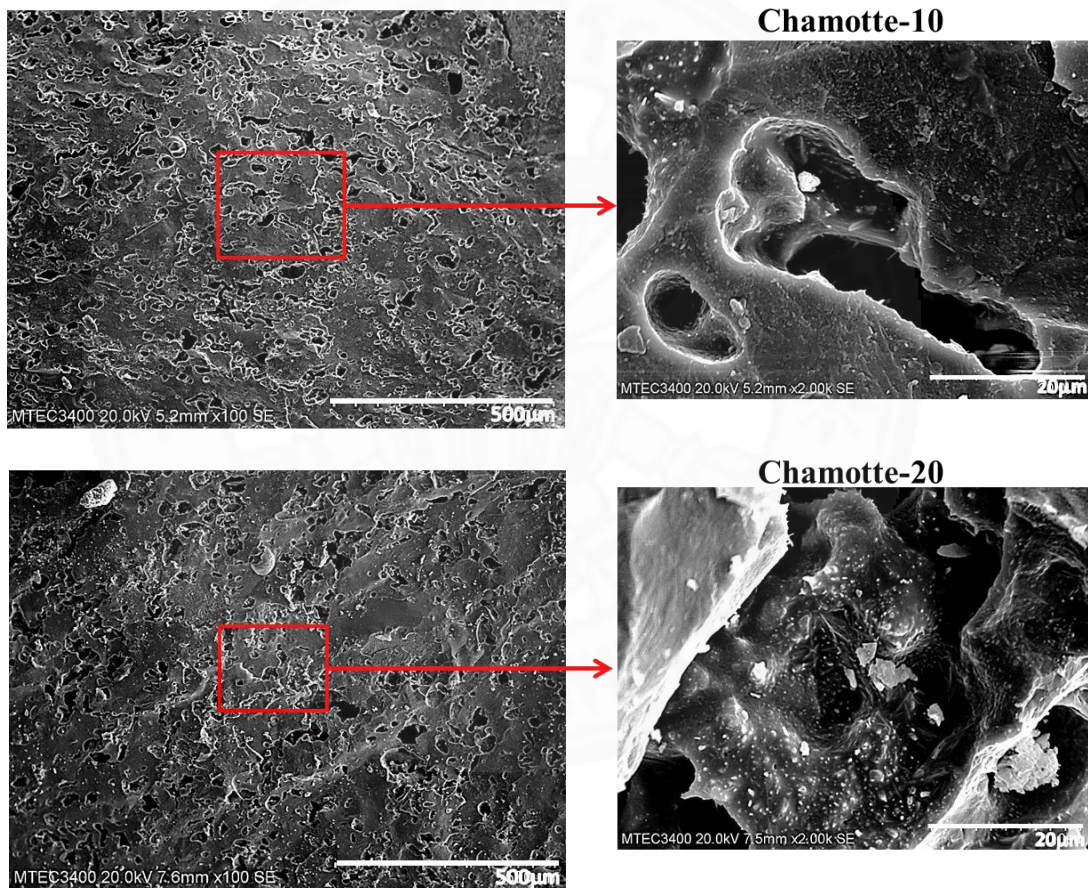
เนื่องจากชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูง จึงทำให้มีค่าการนำความร้อนที่สูงใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณชามอทท์ในส่วนผสม และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผสมชามอทท์ พบว่ามีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกัน แต่สมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟที่ผสมชามอทท์จะดีกว่าเนื่องจากการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผลิตได้มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมชามอทท์ เมื่อนำไปใช้งานอิฐที่ผลิตได้จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อใช้งานแบบไม่รองรับน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.51



ภาพที่ 4.51 ค่าการนำความร้อนของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของชามอทท์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

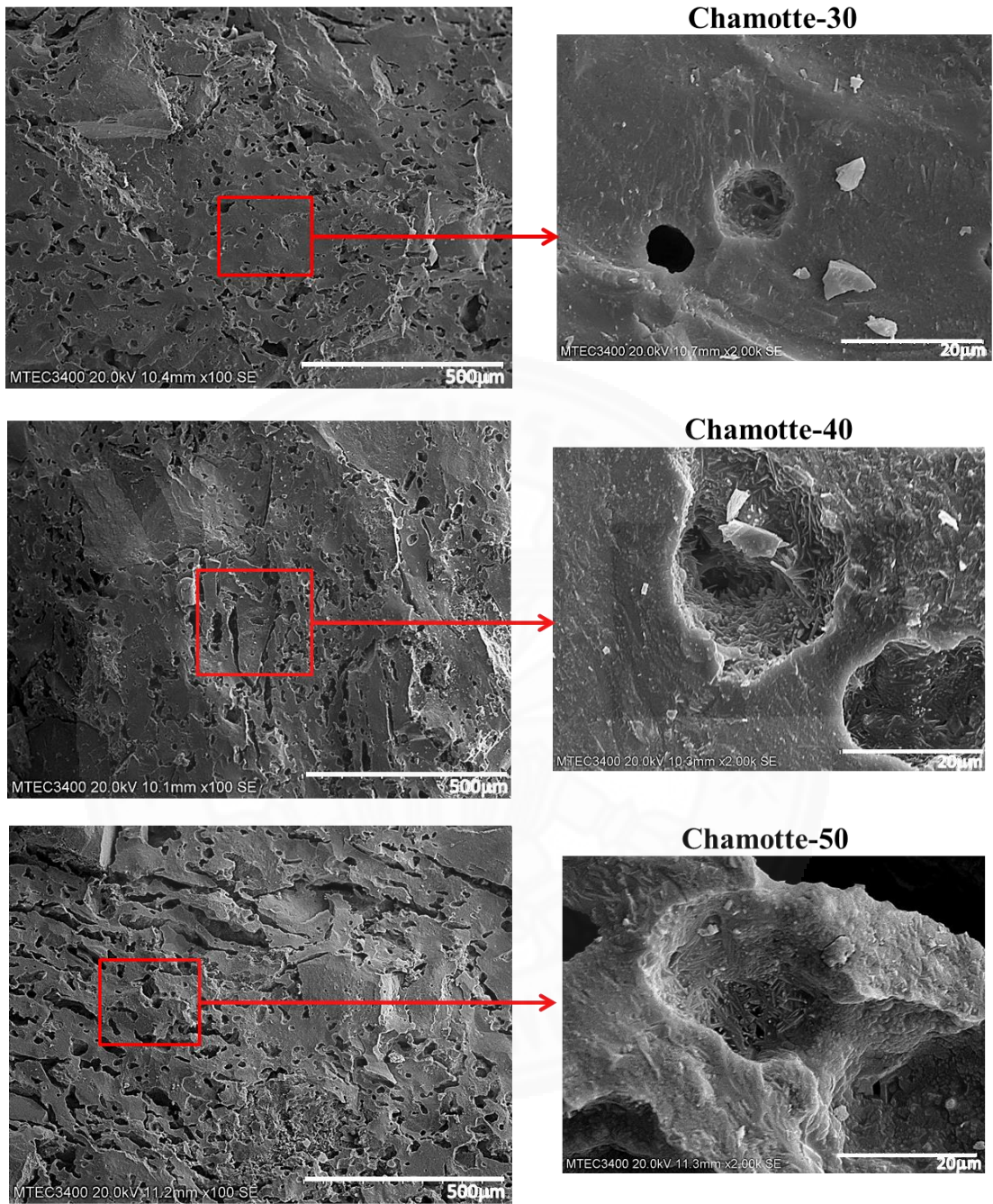
4.4.7 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟ

จากภาพที่ 4.52 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟที่ผสมซามอทท์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณของซามอทท์ในส่วนผสมรูปพรุนที่เพิ่มมากขึ้น และมีขนาดใหญ่ยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความพรุนของชิ้นงานในภาพที่ 4.44 มีการกระจายตัวของรูพรุนไม่ดี ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีค่าต่ำลง เมื่อสังเกตที่ชิ้นงานหลังเผาพบว่าเห็นส่วนประกอบของซามอทท์ที่ไม่เกิดการหลอมรวมตัวกับวัสดุอื่นอย่างชัดเจน และเมื่อขยายภาพ SEM พบว่าภายในรูพรุนจะเกิดผลึกที่มีลักษณะเป็นแท่งเข็มปริมาณ โดยเฉพาะในชิ้นงานที่มีผสมของซามอทท์ในปริมาณมาก



ภาพที่ 4.52 โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของซามอทท์เผาที่ 1300 องศาเซลเซียส (10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

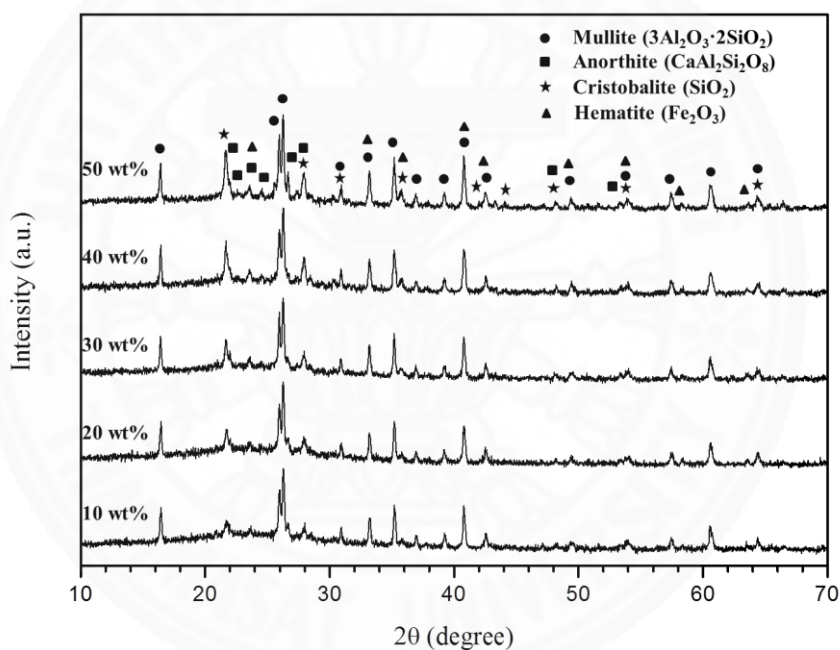
ต่อหน้า 85 →



ภาพที่ 4.52(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของชามอทท์
เผาที่ 1300 องศาเซลเซียส (10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

4.4.8 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟ

จากโครงสร้างจุลภาคพบว่าชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผสมขามอทท์ประกอบไปด้วยหลายเฟส เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบเฟสของมัลไลต์ อะนอร์ไทท์ คริสโตแบไลต์ และเฮมาไทต์ ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณของขามอทท์ในชิ้นงานมากขึ้นเฟสของมัลไลต์มีปริมาณสูงขึ้นเล็กน้อย ส่วนเฟสของอะนอร์ไทท์นั้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน เฟสของอะนอร์ไทท์ที่สูงมากจะส่งผลต่อการทนความร้อนรวมทั้งค่าความแข็งแรงเนื่องจากเฟสนี้จะมีสูตรโครงสร้างที่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่เป็นฟลักซ์ มีจุดหลอมเหลวต่ำ และพบว่ามีเฟสของคริสโตแบไลต์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีผลต่อความพรุนในชิ้นงานรวมทั้งอาจส่งผลให้เกิดเฟสของแก้ว (Glassy phase) ขึ้นได้ในชิ้นงานเมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.53

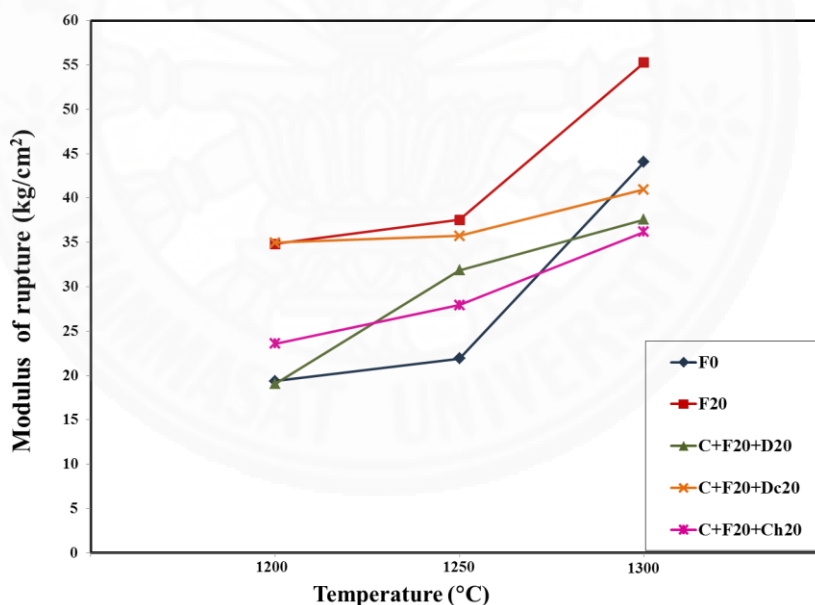


ภาพที่ 4.53 โครงสร้างเฟสของอิฐดินทนไฟที่มีส่วนผสมของขามอทท์ 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
เผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส

4.5 สมบัติของอิฐดินทนไฟที่ผลิตได้ทั้งหมด

4.5.1 ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผลิตได้ทั้งหมด (Modulus of rupture, MOR)

จากภาพที่ 4.54 แสดงค่าการเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานอิฐดินทนไฟที่ผลิตขึ้น โดยพบชิ้นงานที่มีส่วนผสมของดินทนไฟผสมกับเถ้าลอยถ่านหิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความทนต่อการแตกร้าวได้สูงที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานที่มีส่วนผสมของตะกักรันอลูมิเนียมแคลไซต์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่ผสมตะกักรันอลูมิเนียมแช่น้ำ ชิ้นงานที่ผสมซามอท์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชิ้นงานที่ผลิตจากดินทนไฟ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นพบว่ายิ่งทำให้ชิ้นงานทนต่อการแตกร้าวได้สูงยิ่งขึ้น เนื่องจากชิ้นงานที่ผลิตได้นั้นมีความหนาแน่นสูง มีความแข็งแรงสูง มีค่าการหดตัวต่ำ และจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีการผสมวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมีค่าความต้านทานต่อการแตกร้าวได้สูง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผลิตจากดินทนไฟ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นวัตถุดิบไฟสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพ และปรับปรุงคุณสมบัติให้กับอิฐดินทนไฟได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.54 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานอิฐดินทนไฟเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200-1300 องศาเซลเซียส

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอย่าง แก้วลอย ถ่านหิน และตะกรันอลูมิเนียม มาผลิตเป็นวัสดุทนไฟประเภทอิฐดินทนไฟได้ โดยการผลิตอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟผสมแก้วลอยถ่านหิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (F20) เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส มีสมบัติทางกายภาพที่ดีเช่น มีค่าการหดตัวเชิงเส้นต่ำลงอยู่ที่ 8.29 เปอร์เซ็นต์ ค่าการนำความร้อนต่ำลงที่ 1.097 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน แต่เนื่องจากสมบัติโดยรวมทั้งหมดยังไม่ผ่านมาตรฐาน ASTM รวมทั้งมีค่าการหดตัวของชิ้นงานที่สูงมากไม่สามารถนำไปใช้งานได้ในเชิงอุตสาหกรรม และเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยถ่านหินมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งเป็นฟลักซ์ทำให้ชิ้นงานมีจุดหลอมเหลวต่ำลง จึงทำให้เลือกวัตถุดิบอื่นที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีอลูมินาสูงเพื่อให้ชิ้นงานมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น จึงได้สังเกตเห็นว่าตะกรันอลูมิเนียมเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีปริมาณอลูมินาสูงเป็นองค์ประกอบหลัก จึงได้นำตะกรันอลูมิเนียมมาเป็นส่วนผสมเพิ่มเติม โดยแบ่งเป็นตะกรันอลูมิเนียมแห้งน้ำ และตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์

พบว่าอิฐดินทนไฟที่ผสมตะกรันอลูมิเนียมแห้งน้ำ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเผาที่ 1300 องศาเซลเซียส มีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับอิฐดินทนไฟที่ไม่ผสมตะกรันอลูมิเนียม แต่สมบัติที่ดียิ่งขึ้นคือมีค่าการหดตัวลดต่ำลงอยู่ที่ 6.39 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอิฐดินทนไฟที่ผสมตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์มีสมบัติทางกายภาพที่ดียิ่งขึ้นในด้านช่วยลดการหดตัวเชิงเส้นเมื่อเทียบกับอิฐดินทนไฟที่ไม่ผสมตะกรันอลูมิเนียม (F20) นั่นคือ มีค่าการหดตัวเชิงเส้นต่ำลงถึง 3.66 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรงสูงถึง 19.59 เมกกะปาสคาล และมีค่าการนำความร้อนอยู่ที่ 1.187 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ากันเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเติมตะกรันอลูมิเนียมเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานมีค่าจุดหลอมเหลวต่ำลงเนื่องจากในองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันอลูมิเนียมแคลไซต์มีปริมาณของโซเดียมซึ่งเป็นฟลักซ์ในปริมาณมากเมื่อผสมกับแก้วลอยถ่านหินที่มีปริมาณของแคลเซียมสูงจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ

ส่วนการเติมขามอทท์ในอิฐดินทนไฟที่ผลิตขึ้นนั้นเป็นการเปรียบเทียบว่าในเชิงพาณิชย์จะมีการใช้ขามอทท์ในปริมาณมากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ในการช่วยลดค่าการหดตัวของอิฐดินทนไฟที่ผลิตขึ้น ซึ่งผลจากการผลิตอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ แก้วลอยถ่านหินและขามอทท์ พบว่าสามารถช่วยลดการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานได้อย่างดี ทั้งเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงชิ้นงานไม่เกิดการหลอม การเติมขามอทท์ช่วยให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานไม่ต่ำลง และยังมีความแข็งแรงสูง สามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนไฟที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้ง

สมบัติของอิฐดินทนไฟ	ASTM-SK30	C (100wt%)	F20	C+F20+D20	C+F20+Dc20	C+F20+Ch20
ความหนาแน่น (g/cm^3)	2.2	2.46	2.25	2.09	2.06	2.23
ความพรุนปรากฏ (%)	19-20	4.08	0.58	2.63	16.76	11.67
การหดตัวเชิงเส้น (%)	N/A	10.31	8.19	6.39	3.66	5.29
ความแข็งแรง (MPa)	CCS=27.5	22.76	21.10	17.85	19.59	17.91
การนำความร้อน (W/mK)	N/A	1.59	1.08	1.11	1.19	1.15
MOR (kg/cm^2)	45	42.98	55.28	37.57	40.95	27.93
COE ($1/\text{K}, \times 10^{-6}$)	N/A	5.35	5.28	5.97	5.96	5.59

* หมายเหตุ C คือ ดินทนไฟ, F คือ เถ้าลอยถ่านหิน, D คือ ตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำ, Dc คือ ตะกรันอลูมิเนียมแคลไซน์, Ch คือ ซามอทท์ และ N/A คือ ไม่ปรากฏค่า

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สามารถนำถ้ำลอยถ่านหินและดินทนนไฟมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐดินทนนไฟได้ โดยถ้ำลอยถ่านหินสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนนไฟได้ เช่น ช่วยให้ค่าการหดตัวเชิงเส้น ค่าการนำความร้อนลดต่ำลง และมีค่าความทนต่อการแตกร้าวของชิ้นงานสูงขึ้น

5.1.2 การเติมตะกั่วอนุไมเนียมเป็นวัตถุดิบเพิ่มในอิฐดินทนนไฟสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของอิฐดินทนนไฟได้ดียิ่งขึ้น เช่น ค่าการหดตัวเชิงเส้นมีค่าต่ำลงถึง 3.66 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมตะกั่วอนุไมเนียมแคลไซต์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.1.3 สามารถนำขามอทท์จากอุตสาหกรรมมาใช้เพียง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการผลิตอิฐดินทนนไฟจากดินทนนไฟ ถ้ำลอยถ่านหิน และขามอทท์ โดยมีสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่ดี คือ มีความหนาแน่นสูงถึง 2.23 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการหดตัวเชิงเส้นต่ำ มีความแข็งแรง 17.91 เมกะปาสคาล

5.1.4 โครงสร้างเฟสหลักของอิฐดินทนนไฟที่ผลิตได้จะประกอบไปด้วย มัลไลต์ อะนอร์ไทท์ คอรัันดัม สเปนเนล ควอตซ์ และคริสโตแบไลต์

5.1.5 ตัวอย่างชิ้นงานอิฐดินทนนไฟที่มีสมบัติดีสุดคือตัวอย่างที่มีปริมาณถ้ำลอยถ่านหิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เเผาที่ 1300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมทำให้ชิ้นงานเกิดการสุกตัวดี แล้วส่งผลให้สมบัติของชิ้นงานดีขึ้น มีความหนาแน่น 2.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความแข็งแรง 21.1 เมกะปาสคาล มีค่าความพรุนปรากฏและค่าการหดตัวเชิงเส้นเท่ากับ 0.58 และ 8.19 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าการหดตัวของอิฐดินทนนไฟที่ผลิตได้มีค่าสูง

5.1.6 ตัวอย่างชิ้นงานที่มีการเติมตะกั่วอนุไมเนียมแล้วมีสมบัติดีที่สุดคือ ตัวอย่างที่ผสมตะกั่วอนุไมเนียมแคลไซต์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความหนาแน่น 2.06 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความแข็งแรง 19.59 เมกะปาสคาล มีค่าความพรุนปรากฏเท่ากับ 16.7 เปอร์เซ็นต์ และค่าการหดตัวเชิงเส้นลดต่ำลงอยู่ที่ 3.66 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามสมบัติของอิฐดินทนนไฟที่ผลิตได้ก็ยังไม่ผ่านมาตรฐาน ASTM-SK30

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สำหรับงานวิจัยต่อยอด ควรผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเท่าของจริงตามมาตรฐาน ASTM-SK30 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตอิฐดินทนไฟในเชิงพาณิชย์ต่อไป

5.2.2 จากผลการวิจัยในการผลิตอิฐดินทนไฟจากดินทนไฟ เถ้าลอยถ่านหินและตะกรันอลูมิเนียมแช่น้ำซึ่งมีสมบัติที่ดี และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานไม่เกิดการหลอมมีแนวโน้มที่อิฐดินทนไฟนี้จะสามารถทนความร้อนได้สูงขึ้น จึงน่าจะนำไปศึกษาวิจัยเพิ่มเติมที่อุณหภูมิสูงขึ้น



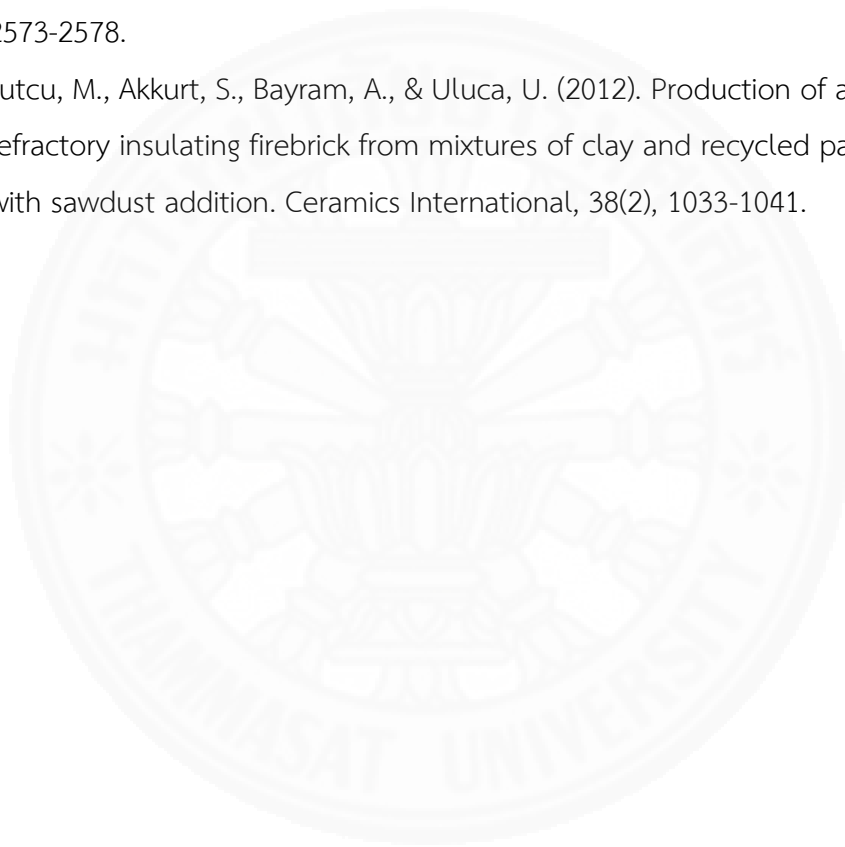
รายการอ้างอิง

- [1] Yasuaki Shinohara, 1998, Refractories Handbook, Japan, pp. 2, 159-160.
- [2] เชษฐ เยี่ยมจิตกุล. ม.ป.ป. อิฐทนไฟไฟร์เคลย์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. หน้า 9-10.
- [3] Clancy, T.A. and Benson, D.J., 1989, Ceramic Engineering and Science Process ding, pp. 210-218.
- [4] Parmelee, C.W. 1975, Ceramic Glazes, 3rd ed, Massachusettes, CBI Publishing, pp.175-177.
- [5] ปราโมทย์ พูนนายม, ไพบุลย์ แยมเนียน และกิตติพงษ์ กิมพวงค์. การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอยอลูมิเนียมเป็นส่วนผสมในอิฐทนไฟ. มหาวิทยาลัยราชชมงคลธัญบุรี. 2555. หน้า 13-14
- [6] Zoglmeyr, G., Romei, D. and Brescia, F., 1991, Update Dolomite brick for Secondary Steel Metallurgy Interceram, pp. 92-94.
- [7] ปรีดา พิมขาวขำ. 2539. วัสดุทนไฟ. วารสารเซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 4 หน้า 29.
- [8] ลัดดา ลาภจตุรภูช. 2542. วัสดุทนไฟ. กองวิชาการและวางแผน กรมทรัพยากรธรณี: รายงานวิชาการ ฉบับที่ กผ1/2542.
- [9] Djangang, C.N., Elimbi, A., Melo, U.C., Lecomte, G.L., Nkoumbou, C., Soro, J., Bonnet, J.P., Blanchart, P., Njopwouo, D., (2008). Sintering of clay-chamotte ceramic composites for refractory bricks, *Ceramics International*, 34, 1207-1213.
- [10] วรพงษ์ เทียมสอน. 2555. หนังสือเซรามิกเพื่อการก่อสร้างและเซรามิกเพื่องานเทคนิค. โอเดียนสโตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- [11] Jiazhi Li. Influence of Qin bricks and Han tile in history. *J Build Mater*, Vol. 1(1) (1998) 26–9.
- [12] American Society for testing and Material, 2005, ASTM Designation C 27-98: General Product, Chemical Specialties, and End Use Products, Annual book of ASTM Standards, Vol.15.01, pp.15-16
- [13] Aeslina Binti Abdul Kadir, Ahmad Shayuti Bin Abdul Rahim. (2014). An overview of sludge utilization into fired clay brick. *Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 8, 567-571.

- [14] Noor Amira Sarani and Aeslina Abd Kadir. (2013). Thermal Conductivity Of Fired Clay Bricks Incorporated With Cigarette Butts, *Advanced Materials Research*, 690-693, 919-924.
- [15] Aeslina Abdul Kadir, Siti Noorhajar Mohd Zulkifly, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah and Noor Amira Sarani. (2016). The Utilization of Coconut Fibre into Fired Clay Brick, *Key Engineering Materials*, 673, 213-222.
- [16] Eliche-Quesada, D., & Leite-Costa, J. (2016). Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste Management*, 48, 323-333.
- [17] P. Muñoz Velasco, Autonomous University of Chile, Chile, M.P. Morales Ortiz, M.A. Mendivil Giró, L. Muñoz Velasco, (2014). Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials*, 63, 97–107.
- [18] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ถ่านหินเปื้อนเชื้อเพลิง พ.ศ. 2553. หน้า 2-1 – 2-2, 4-1 - 4.9, 4-32.
- [19] Ioanna Kourti, Christopher R. Cheeseman. (2010). Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from lignite coal fly ash and recycled glass. *Resources, Conservation and Recycling*. 54, 769–775.
- [20] H.B. Vuthaluru, Remediation of ash problems in pulverised coal-fired boilers, *Fuel*, 1999, 78, 1789–1803.
- [21] Kearsleya E.P., Wainwright P.J. (2001). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and concrete research*, 31, 105 ± 112.
- [22] Sinsiri, T., Kroehong, W., Jaturapitakkul, C. Chindapasirt, P. (2012). Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on the compressive strength of blended cement paste, *material and Design*, 42, 424-433.
- [23] R. Somna, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and P. Rattanachu. (2012). Effect of the water to binder ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 16-22.

- [24] ศิริรัตน์ รัตนจันทร์. (2543). การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัสดุเพื่อผสมทาคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาจากดินที่อยู่ในท้องถิ่น. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [25] Anja Terzić, Ljubiša Andrić, Vojislav Mitić. (2014). Mechanically activated coal ash refractory bauxite shotcrete microfiller: Thermal interactions mechanism investigation, *Ceramics International*, 40, 12055-12065.
- [26] S.B. Hassan, V.S. Aigbodion. (2014). Effect coal ash on some refractory properties of alumino-silicate (Kankara) clay for furnace lining, *Egyptian Journal of basic and applied sciences*, 1, 107-114.
- [27] J. Gonzalez Otero, F. Blanco, M. P. Garcia and J. Ayala. (2004). Manufacture of refractory insulating bricks using fly ash and clay, *British Ceramic Transactions*, 103, 181-186.
- [28] Xu Lingling, Guo Wei, Wang Tao, Yang Nanru. (2005), Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio, *Construction and Building Materials*, 19, 243–247.
- [29] T. Hashishin, Y. Koderu, T. Yamamoto, M. Ohyanagi, Z.A. Munir. (2004). Synthesis of $(Mg,Si)Al_2O_4$ spinel from aluminum dross, *J. Am. Ceram. Soc.*, 87(3), 496-499.
- [30] Ewais, E. M. M., Khalil, N. M., Amin, M. S., Ahmed, Y. M. Z., & Barakat, M. A. (2009). Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement. *Ceramics International*, 35(8), 3381-3388.
- [31] D. Bajare, A. Korjamins, J. Kazjonovs.(2011). Application of aluminium dross and glass waste for production of expanded clay aggregate. 3rd International Conference Civil engineering`11 Proceedings. Building materials. p.27-31.
- [32] Yoshimura, H. N., Abreu, A. P., Molisani, A. L., de Camargo, A. C., Portela, J. C. S., & Narita, N. E. (2008). Evaluation of aluminum dross waste as raw material for refractories. *Ceramics International*, 34(3), 581-591.
- [33] Arup Kumar Mandal, H. R. V., O.P. Sinha. (2017). Utilization of aluminum plant's waste for production of insulation bricks. *Journal of Cleaner Production*, 162, 949-957.
- [34] สวลี เสนาพิทักษ์. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร.

- [35] American Society for testing and Material, (2005), ASTM Designation C20-00, C326: General Product, Chemical Specialties, and End Use Products, Annual book of ASTM Standards, (15.01): 6-9.
- [36] Schneider, H., Schreuer, J., & Hildmann, B. (2008). Structure and properties of mullite—A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(2), 329-344.
- [37] Han, Y., Li, C., Bian, C., Li, S., & Wang, C.-A. (2013). Porous anorthite ceramics with ultra-low thermal conductivity. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(13), 2573-2578.
- [38] Sutcu, M., Akkurt, S., Bayram, A., & Uluca, U. (2012). Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition. *Ceramics International*, 38(2), 1033-1041.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาววิญญาภัทร์ สุขเข
วันเดือนปีเกิด	27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2536
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2559: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ตำแหน่ง	นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ
ทุนการศึกษา	พ.ศ. 2561: ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561

ผลงานทางวิชาการ

- Sukkae R, Suebthawilkul S, Cherdhirunkorn B. (2017). Utilization of coal fly ash as a raw material for refractory production, Journal of Metals, Materials and Minerals, 27(2), 48-55.