



มาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์บนสมาร์ตโฟน

โดย

นางสาวสวรรรยา บุญช่วย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์บนสมาร์ทโฟน

โดย

นางสาวสวรรรยา บุญช่วย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Smartphone-Based Surface Plasmon Resonance Refractometer

BY

MISS SAWANYA BOONCHUAY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (PHYSICS)

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2017

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวสวรรยา บุญช่วย

เรื่อง

มาตรฐานชี้ให้เห็นแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์บนสมาร์ทโฟน

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

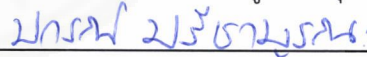
เมื่อ วันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ มนุ เพ็องฟุ้ง)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



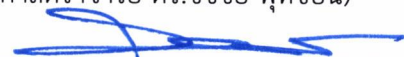
(อาจารย์ ดร.ปกรณ์ ปรีชาบุรณะ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย พุทซ้อน)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชคตระการ)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	มาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์บนสมาร์ทโฟน
ชื่อผู้เขียน	นางสาวสวรรยา บุญช่วย
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	อาจารย์ ดร.ปกรณ์ ปรีชาบุรณะ
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอมาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ใช้สมาร์ทโฟนเป็นฐาน ซึ่งมีหลักในการออกแบบโดยการจัดแสงจากหน้าจอสมาร์ทโฟนให้เป็นรูปแบบพืดเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้กล้องหน้าของสมาร์ทโฟนเป็นตัวตรวจวัด อุปกรณ์ทางแสงที่ใช้เป็นแบบรวมเลนส์และปริซึมเข้าเป็นชิ้นเดียวกันซึ่งสร้างจากอีพ็อกซีเรซิน ในการทดลองได้ทดสอบประสิทธิภาพของมาตรฐานนี้หักเหที่สร้างขึ้นด้วยการตรวจวัดสารละลายซูโครสในน้ำที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0% ถึง 20% โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลื่อนตำแหน่งของมุมเรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามค่าความเข้มข้นของสารละลายซูโครสและมีค่าความละเอียดของการวัดความหวานเท่ากับ 0.06 บริกซ์ นอกจากนี้มาตรฐานนี้หักเหที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดค่าความหวานของน้ำอัดลม น้ำผลไม้ เครื่องดื่มชูกำลังและเครื่องดื่มเกลือแร่ได้ด้วย ดังนั้นมาตรฐานนี้หักเหที่สร้างขึ้นนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องตรวจวัดในทางสุขภาพและในอุตสาหกรรมอาหารได้

คำสำคัญ: มาตรฐานนี้หักเห, คลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์, สมาร์ทโฟน, ค่าบริกซ์

Thesis Title	Smartphone-Based Surface Plasmon Resonance Refractometer
Author	Ms. Sawanya Boonchuay
Degree	Master of Science (Physics)
Department/Faculty/University	Physics Faculty of Science and Technology Thammasat University
Thesis Advisor	Mr. Pakorn Preechaburana, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

In this thesis, we demonstrate the surface Plasmon resonance (SPR) refractometer based on smartphone platforms. The principle design of this SPR refractometer is configured to use a fan-shaped beam from smartphone screen as a light source and front phone camera as a detector. The optical element used in this system is a single integrated device, fabricated by the epoxy resin. The performance of the smartphone-based SPR refractometer is evaluated by detecting the sucrose/water solutions with different concentrations ranging from 0% to 20% by weight. The results show that the shift of resonance angle increases linearly with the sucrose concentration and Brix value resolution of this SPR refractometer is 0.06 Brix. Moreover, this SPR refractometer can be used to determine to Brix value of commercial soft drink, fruit juice, energy drink and sport drink. Therefore, this confirms that the smartphone-based SPR refractometer is feasible and attractive possibility in many applications such as health and food industries monitoring.

Keywords: Refractometer, Surface Plasmon Resonance, Smartphone, Brix Value

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณา และการชี้แนะจากอาจารย์ ดร.ปกรณ์ ปรีชาบุรณะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ความรู้ คำปรึกษา ทั้งด้านวิชาการและการดำเนินงาน แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาอุปสรรคในการเรียนและการวิจัย เสมอมา ตลอดจนการสนับสนุนการนำเสนอผลงานทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ศุภลักษณ์ อ้าลอย ที่คอยให้กำลังใจรวมถึงคำแนะนำในการนำเสนอผลงานทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ทิพย์สุตา ไชยไพบูลย์วงศ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในด้านการเรียนรู้ตลอดจนความรู้และชี้แนะข้อผิดพลาดด้วยความเมตตาเสมอมา

ขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ชี้แนะข้อผิดพลาดในด้านการเรียนทั้งในอดีตและปัจจุบัน

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ที่ให้บริการเป็นอย่างดี

ขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นน้องทุกคนที่คอยให้ความบันเทิง รวมถึงรุ่นพี่ทุกท่านที่คอยให้ คำปรึกษา แนะนำ กำลังใจ มิตรภาพที่ดีเสมอมา

เหนือสิ่งอื่นใดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษาในทุกเรื่อง ตลอดจนการสนับสนุนในการเรียน

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ในรั้วเหลืองแดงนี้ ที่ให้สิ่งที่มีคุณค่าต่อการดำเนินชีวิตทั้งในอดีต ปัจจุบันและอนาคตของข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิทยาศาสตร์สืบไป

นางสาวสวรรรยา บุญช่วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(2)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
สารบัญตาราง.....	(7)
สารบัญภาพ.....	(8)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและช่วงเวลาการวิจัย.....	4
1.5 วิธีการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	5
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 มาตรฐานชี้ก่แบบพลาสติกมอนรีโซแนนซ์สำหรับของเหลวและฟิล์มบาง.....	6
2.1.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	6
2.1.2 การเตรียมสารตัวอย่างและการวัด.....	8
2.1.3 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	8
2.2 การตรวจวัดปริมาณน้ำตาลในเครื่องดื่มในเชิงพาณิชย์.....	12
2.2.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	13
2.2.2 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	13
2.3 การศึกษาคุณลักษณะของไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ด้วย เทคนิคเอสพีอาร์รีโซแนนซ์.....	17

2.3.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	18
2.3.1.1 การเตรียมไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (Virgin Coconut Oil Biodiesel: VCOB).....	18
2.3.1.2 เลเยอร์ที่ใช้ในการตรวจวัด (sensing layer).....	19
2.3.2 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	19
2.3.2.1 ลักษณะไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์	19
2.4 เทคนิคคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์บนโครงสร้างเคลื่อนที่.....	23
2.4.1 วัสดุและวิธีการทดลอง	23
2.4.1.1 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์เชิงแสง (PDMS optics).....	23
2.4.1.2 การเตรียมอีพ็อกซีเชิงแสง (Optical grade epoxy).....	23
2.4.1.3 การประกอบกันของอุปกรณ์ทางแสง (Optical coupler assembly)	24
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	26
3.1 สมการเฟรสเนลล์.....	26
3.2 หลักการของคลื่นผิวพลาสมอน.....	30
3.2.1 นิยามคลื่นผิวพลาสมอน	30
3.2.2 การกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยใช้แสง.....	30
บทที่ 4 วิธีการวิจัย.....	44
4.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทางแสง (ปริซึม).....	44
4.2 ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์	46
4.2.1 การทำงานของหน้าจอ	46
4.2.2 การทำงานของกล้องถ่ายภาพ	46
4.2.3 การเก็บข้อมูล.....	46

4.3 ค่าความไว (Sensitivity) และค่าความละเอียด (Resolution) ของมาตร ดัชนีหักเหที่สร้างขึ้น.....	47
4.3.2 หาค่าความละเอียดของเครื่องมือ.....	48
บทที่ 5 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	50
5.1 ผลการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทางแสง.....	50
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
6.1 สรุปผลการทดลอง	61
6.2 ข้อเสนอแนะ	62
รายการอ้างอิง.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	4
2.1	13
2.2	20
2.3	22
4.1	45
4.2	47
4.3	49
5.1	59
5.2	60

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบการติดตั้งอุปกรณ์ด้วยเทคนิคเครื่องสเปกโตรสโกปีสำหรับ ตรวจวัดสัญญาณเอสพีอาร์.....	6
2.2 กลไกการแทรกตัวอย่างเอสพีอาร์ มีองค์ประกอบดังนี้ (1) ปริซึม (2) ยางที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับปริซึม (3) สไลด์เซนเซอร์เอสพีอาร์ (4) โพลีเมอร์ที่ทำจาก PDMS (5) กลไกการปิด.....	7
2.3 กราฟสัญญาณเอสพีอาร์ของฟิล์มทองในอากาศและในน้ำ จุด คือข้อมูลดิบ ที่ได้จากการทดลอง เส้นทึบ คือกราฟที่ฟิตได้จากข้อมูลดิบ.....	9
2.4 (ก) กราฟเซนเซอร์แกรมของการวัดสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 5 10 25 50 และ 300 mM ตามลำดับ (ข) เอสพีอาร์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า ความเข้มข้นของสารละลายซูโครส (■) แทนข้อมูลที่ได้จากการวัด และ เส้นทึบคือการฟิตกราฟเชิงเส้นที่มีค่า $R^2 = 0.99999$	10
2.5 สัญญาณเอสพีอาร์ของสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 5 10 25 50 และ 300 mM.....	11
2.6 ค่าดัชนีหักเหของสารละลายซูโครสจากการวัดสัญญาณเอสพีอาร์ จากมาตรดัชนีหักเห Abbe และจากทฤษฎี เส้นทึบคือการฟิตกราฟเชิงเส้นที่เหมาะสมกับข้อมูลโดยมีค่า $R^2=0.99994, 0.99986$ และ 0.99959 ตามลำดับ และได้สมการจากการฟิตกราฟเชิง เส้นเป็น $y=1.33107+4.91485E-5x, y=1.33116+4.89234E-5x,$ $y=1.3331+4.57272E-5x$ ตามลำดับ.....	11
2.7 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเทคนิคเอสพีอาร์รีโซแนนซ์แบบสแกนมุม.....	12
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนแสง (Reflectance) กับมุมตกกระทบของ Coke ตามความเข้มข้นที่เลือก (selected concentration)	14
2.9 ค่ามุมรีโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง ($\Delta\theta_{spp}$) สำหรับความเข้มข้นที่แตกต่างกันของเครื่องดื่ม	14
2.10 ส่วนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเครื่องดื่มทั้ง 3 ชนิด.....	15
2.11 ส่วนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเครื่องดื่มทั้ง 3 ชนิด.....	15
2.12 การเลื่อนของมุมรีโซแนนซ์เทียบกับเวลาในการวัดเครื่องดื่ม.....	16
2.13 การติดตั้งอุปกรณ์ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง แผ่นโพลาริซเซอร์ อุปกรณ์ตัดแสง รูเข็ม (pinhole) ปริซึม อุปกรณ์สำหรับลำเลียงสาร และอุปกรณ์ตรวจวัด.....	18

2.14	สัญญาณ SPR ที่ได้จากการผสมของน้ำมันมะพร้าวและเมทานอล ความเข้มข้น โดยปริมาตรของน้ำมันมะพร้าวเปลี่ยนจาก 10 ไปยัง 90%	19
2.15	ค่าดัชนีหักเหของแสงของความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ใน ส่วนผสมไบโอดีเซล (จุด (•) ระบุข้อมูลการทดลองและเส้นทึบคือ เส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล)	20
2.16	สัญญาณเอสพีอาร์ของไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์กับค่าความยาวคลื่น (จุด (■) แทนข้อมูลจากการทดลองและเส้นทึบคือเส้นกราฟที่ฟิตแล้ว)	21
2.17	แนวโน้มการกระจายข้อมูลของไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ จากสีแดงไปยังสีฟ้า (*) แทนข้อมูลที่ ทดลองและเส้นทึบคือเส้นกราฟที่ได้จากสมการ (21).....	22
2.18	(ก) ส่วนประกอบ (ข) มาตรฐานดัชนีหักเหสำหรับพร้อมนำไปตรวจวัด สัญญาณเอสพีอาร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่	24
2.19	การวางมาตรฐานดัชนีหักเหบนหน้าจอโทรศัพท์เคลื่อนที่	25
3.1	เวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสงโพลาไรซ์เมื่อสนามไฟฟ้า ตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ	26
3.2	เวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสงโพลาไรซ์เมื่อสนามไฟฟ้า ขนานกับระนาบตกกระทบ	28
3.3	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับวัสดุไดอิเล็กตริก	30
3.4	แอมพลิจูดคลื่นสนามไฟฟ้าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล.....	32
3.5	แนวโน้มการกระจาย (dispersion) ของคลื่นผิวพลาสมอนโพลาไรตอน k_{spp} และเวกเตอร์คลื่นในสุญญากาศ k เมื่อโมเมนตัมของคลื่นผิวพลาสมอนมีค่า มากกว่าโมเมนตัมของแสงในสุญญากาศที่ความถี่เท่ากัน (ω)	38
3.6	(ก) คลื่นสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ทะลุเข้าไปยังตัวกลางโลหะและ ไดอิเล็กตริก (ข) แอมพลิจูดคลื่นสนามไฟฟ้าลดลงแบบ เอ็กซ์โพเนนเชียล.....	39
3.7	เทคนิคครีทซ์แมนน์สำหรับกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยใช้ ปริซึมเป็นตัวเชื่อมต่อทางแสง	42
3.8	การสะท้อนและหักเหของแสงที่รอยต่อระหว่างปริซึมกับอากาศ	42
3.9	ตัวอย่างสเปกตรัมของ SPR ที่แสดงจุดต่ำสุดของกราฟที่มุมสั่นพ้อง	43

4.1 การหล่อแม่แบบซิลิโคน.....	45
5.1 (ก) การออกแบบปริซึมโดยใช้โปรแกรม Raytrace (ข) ภาพสามมิติของ อุปกรณ์เชิงแสงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมสามมิติโดยให้แสงจากหน้าจอ สมาร์ตโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสงและมีกล้องหน้าของสมาร์ตโฟนเป็นตัว บันทึกสัญญาณ.....	51
5.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์ทางแสงที่ขึ้นรูปด้วยด้วยวิธีพ็อกซีใส	52
5.3 หน้าจอโทรศัพท์เคลื่อนที่ขณะใช้งานซอฟต์แวร์เครื่องมาตรฐานดัชนีหักเห (ก) ภาพลอยบนหน้าจอสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดแสงและมีหน้าต่าง สำหรับเลือกใช้งานแอปกล้องถ่ายภาพ และ (ข) การแบ่งส่วน หน้าจอให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงและส่วนแสดงผลของการวัด พร้อม กับปุ่มกดและกรอปรับการพิมพ์ข้อมูลเพื่อกำหนดค่ากล้องถ่ายภาพ	53
5.4 การติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงบนหน้าจอของสมาร์ตโฟนเพื่อการทดลองวัด สัญญาณเอสพีอาร์.....	54
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับความเข้มแสงของสัญญาณ เอสพีอาร์สำหรับการวัดสารละลายเอทานอล	55
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์กับค่าดัชนีหักเหมาตรฐาน ของสารละลายเอทานอล	56
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบของแสงกับความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์ สำหรับสารละลายซูโครส	57
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์กับค่าความหวาน ของสารละลายซูโครส	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

มาตรดัชนีหักเห คืออุปกรณ์ทางแสง (Optical device) ที่ใช้วัดค่าดัชนีหักเห (Refractive index) ของแสงโดยสามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางกายภาพของสาร มาตรดัชนีหักเห ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อใช้วัดสารแต่ละชนิด เช่น น้ำมัน สารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม รวมไปถึงวัสดุที่เป็นของแข็งทั้งชนิดโปร่งแสงและโปร่งใส ได้แก่ อัญมณีต่างๆ นอกจากนี้มาตรดัชนีหักเหสามารถใช้วัดดัชนีหักเหของของเหลวเพื่อพิจารณาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ ได้แก่ สารละลายของน้ำตาล และแอลกอฮอล์ [1]

มาตรดัชนีหักเหที่นิยมใช้ในการวิจัยในปัจจุบันคือมาตรดัชนีหักเห ABBE-2WAJ โดยมีความละเอียดประมาณ 2×10^{-4} RIU (Refractive Index Unit) [2] ทั้งนี้มาตรดัชนีหักเหดังกล่าวมีขนาดใหญ่และมีราคาสูง ด้วยเหตุนี้จึงเกิดความสนใจในการคิดค้นนวัตกรรมมาตรดัชนีหักเหบนสมาร์ตโฟนโดยอาศัยเทคนิคคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance; SPR) เพื่อให้มาตรดัชนีที่สร้างขึ้นมีความละเอียดถึงประมาณ 10^{-5} RIU และยังมีข้อดีของการใช้สมาร์ตโฟน นั่นคือความสามารถในการเชื่อมต่อสัญญาณอินเทอร์เน็ต เพื่อส่งผลการทดลองไปยังผู้เชี่ยวชาญในการประมวลผล หรือ สามารถถ่ายโอนข้อมูลผ่านสัญญาณบลูทูธ (Bluetooth) ไปยังคอมพิวเตอร์ได้อีกเช่นกัน นอกจากนี้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ ในสมาร์ตโฟน เช่น ความละเอียดในการถ่ายภาพ ตลอดจนประสิทธิภาพในการประมวลผลมีความใกล้เคียงกับคอมพิวเตอร์ขนาดพกพา และยังสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงตามความเหมาะสมของงานวิจัยที่ต้องการ ฉะนั้น นวัตกรรมมาตรดัชนีหักเหบนสมาร์ตโฟนนี้สามารถนำไปใช้เพื่อทำการทดลองภายนอกห้องปฏิบัติการได้

จากประสิทธิภาพการประมวลผลของสมาร์ตโฟนจึงมีการประยุกต์ใช้นวัตกรรมการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์การเกาะกันระหว่างโมเลกุลและตัวรับ (Receptor) ได้แก่การจับกันระหว่างโปรตีน-โปรตีน [3,4] โปรตีน-DNA [5,6] เอนไซม์-สารตั้งต้น หรือ ตัวยับยั้ง (Inhibitor) [7,8] รีเซพเตอร์-ยา [9,10] ลิพิดเมมเบรน-โปรตีน [11,12] โปรตีน-พอลิแซ็กคาไรด์ [13] เซลล์ หรือ ไวรัส-โปรตีน [14-16] โดยเทคนิคนี้จะวัดการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของฟิล์มโลหะ (เช่น ทอง เงิน หรือ ฟิล์มอลูมิเนียม) เนื่องจากการเกิดการจับกันของสารชีวโมเลกุล เช่น แอนติบอดี เอนไซม์เพปไทด์ และ ดีเอ็นเอบนผิวของฟิล์มโลหะ ในการตรวจวัดจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงมุมเอสพิอาร์ ซึ่งเป็น

ตำแหน่งที่เกิดการคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ทำให้ได้กราฟความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้มีค่าน้อยสุด โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนของมุมตกกระทบที่มุมต่างๆแล้วบันทึกความเข้มแสงสะท้อน นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซนเซอร์เอสพีอาร์ [17-19] เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับทางชีวการแพทย์ สิ่งแวดล้อม และ ภาคอุตสาหกรรมนอกจากนี้ เทคนิคเอสพีอาร์ได้รับการยอมรับในการนำมาตรวจวินิจฉัยโรค การคิดค้นยาชนิดใหม่ รวมถึงการตรวจวัดเชื้อโรคที่มาจากอาหาร (Food borne pathogen) [20] เป็นต้น

ในปัจจุบันนี้คนทั่วไปมีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวานและโรคหัวใจซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมการบริโภคหวาน ทั้งนี้เพื่อสุขภาพที่ดีสำหรับผู้ใหญ่และเด็ก องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้แนะนำการบริโภคน้ำตาลซึ่งไม่ควรเกิน 25 กรัมต่อวัน [21] ในขณะที่การบริโภคน้ำตาลในรูปแบบของเครื่องดื่มที่มีความหวาน ได้แก่ น้ำอัดลม น้ำผลไม้ เครื่องดื่มชูกำลัง และเครื่องดื่มเกลือแร่ ได้ทำให้ปริมาณการบริโภคน้ำตาลสูงเกินกว่าที่ องค์การอนามัยโลกได้แนะนำไว้ ทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคได้

จากพฤติกรรมการบริโภคน้ำตาลของคนไทยดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการสร้างสรรค์นวัตกรรมมาตรดัชนีหักเหที่อาศัยเทคนิคเอสพีอาร์ โดยออกแบบให้สามารถทำงานบนสมาร์ตโฟนได้เนื่องจากผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงประสิทธิภาพของสมาร์ตโฟนที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งความสามารถของตัวประมวลผล ความละเอียดของหน้าจอ และความละเอียดของกล้องถ่ายภาพ ความสามารถในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ยังมาพร้อมกับตัวเซนเซอร์หลายๆแบบที่พร้อมใช้งาน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้สมาร์ตโฟนเป็นมาตรดัชนีหักเหที่อาศัยเทคนิคเอสพีอาร์ที่ใช้แสงจากหน้าจอสมาร์ตโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้กล้องถ่ายภาพด้านหน้าของสมาร์ตโฟนเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาหลักการทางฟิสิกส์ของคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์

1.2.2 ออกแบบและสร้างมาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ทำงานบนสมาร์ตโฟนสำหรับตรวจวัดค่าความหวานของสารละลาย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 มาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่สามารถทำงานบนสมาร์ตโฟน

1.3.2 มาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนที่สามารถตรวจวัดค่าความหวานของสารละลายได้ในช่วง 0-15 Brix

1.3.3 มาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่มีความหมายละเอียดในการวัดค่าดัชนีหักเหในระดับ 10^{-5} RIU

1.4 ขั้นตอนและช่วงเวลาการวิจัย

ตาราง 1.1

ขั้นตอนและช่วงเวลาการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลาการดำเนินงาน										
	1-3 (ก.ค.-ก.ย.56)	4-5 (ต.ค.-ธ.ค.56)	7-9 (ม.ค.-มี.ค.57)	10-12 (เม.ย.-มิ.ย.57)	13-15 (ก.ค.-ก.ย.58)	16-18 (ต.ค.-ธ.ค.58)	19-21 (ม.ค.-มี.ค.59)	22-24 (เม.ย.-มิ.ย.59)	1-9 (ก.ค.-ต.ค.60)	10-20 (ต.ค.60-ก.พ.61)	21-10 (ก.พ - เม.ย 61)
1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัย	←										
2. ศึกษาวัสดุพลาสติกแบบเทอร์โมเซตติงแบบใสที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ภายใต้หลักการเอสพีอาร์		↔									
3. วัดดัชนีหักเหของสารที่จะนำมาทดสอบและวัสดุพลาสติกแบบเทอร์โมเซตติงแบบใส			↔								
4. ออกแบบมาตรดัชนีแบบคลื่นผิวพลาสมอนบนสมาร์ตโฟน			←						→		
5. ทำการทดลองทดสอบประสิทธิภาพของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นด้วยการวัดสารละลายเอทานอลและสารละลายซูโครส						←			→		
6. จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์					←						→
7. ไปประชุมวิชาการในหัวข้อ “Surface Plasmon Resonance Refractometer Based on Smart Phone Platform”								↔		↔	

1.5 วิธีการวิจัย

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีคลื่นผิวพลาสมอนและเทคนิคในการกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์จากตำราและบทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบอุปกรณ์ทางแสง (ปริซึม) ที่ทำหน้าที่เป็นมาตรฐานหักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ด้วยโปรแกรมออกแบบทางแสงสองมิติ เพื่อให้ได้ช่วงมุมตกกระทบที่เกิดมุมเอสพิอาร์แล้วจึงออกแบบปริซึมด้วยโปรแกรมออกแบบสามมิติ เพื่อนำไปพิมพ์ขึ้นรูปตามรูปทรงที่ได้ออกแบบไว้

1.5.3 งานวิจัยนี้จะวัดดัชนีหักเหของเอทานอลในน้ำเทียบกับค่าดัชนีหักเหมาตรฐานที่วัดได้จากมาตรฐานหักเห ABBE-2WAJ แล้วจึงหาความไวในการเกิดสัญญาณคลื่นผิวพลาสมอนจากความชันของกราฟระหว่างค่าดัชนีหักเหมาตรฐานและความเข้มสัญญาณเอสพิอาร์ที่ได้จากภาพสัญญาณดังกล่าว จากนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าความละเอียดของเครื่องมือต่อไป

1.5.4 ทดสอบประสิทธิภาพของมาตรฐานหักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนที่สร้างขึ้นด้วยการวัดค่าความหวนของสารละลายซูโครสและเครื่องตี

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.6.1 ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทางฟิสิกส์ของคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์

1.6.2 องค์ความรู้ในการพัฒนามาตรฐานหักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ทำงานบนสมาร์ทโฟน

บทที่ 2

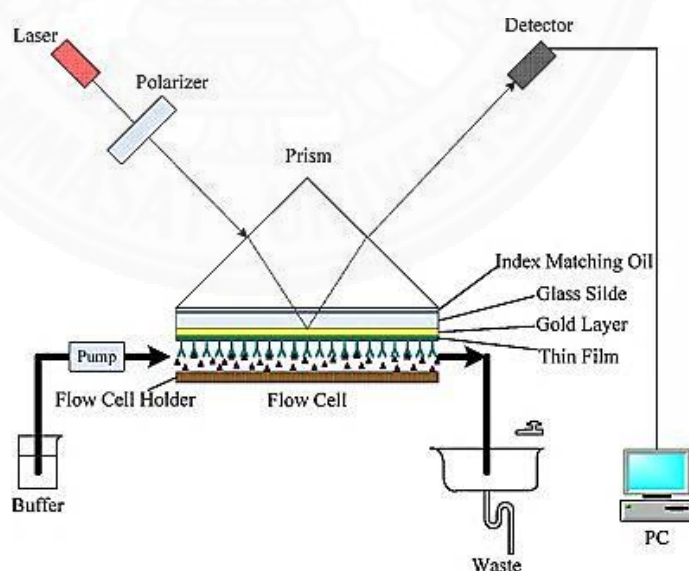
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตราดัดชนีหักเหแบบพลาสมอนรีโซแนนซ์สำหรับของเหลวและฟิล์มบาง

ปี ค.ศ. 2010 Huamin Liang [22] ได้ตรวจวัดค่าดัชนีหักเหของของเหลวและฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคเอสพีอาร์ภายใต้หลักการของเคร์สทซ์แมนน์ (Kretschmann's technique) ของเหลวที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณเอสพีอาร์ ได้แก่ ซูโครสที่มีความเข้มข้นต่างกัน การตรวจวัดค่าดัชนีหักเหของของเหลวดังกล่าวพิจารณาจากกราฟสัญญาณเอสพีอาร์ในช่วงมุมระหว่าง 40° - 78° โดยมีการทดลองดังนี้

2.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

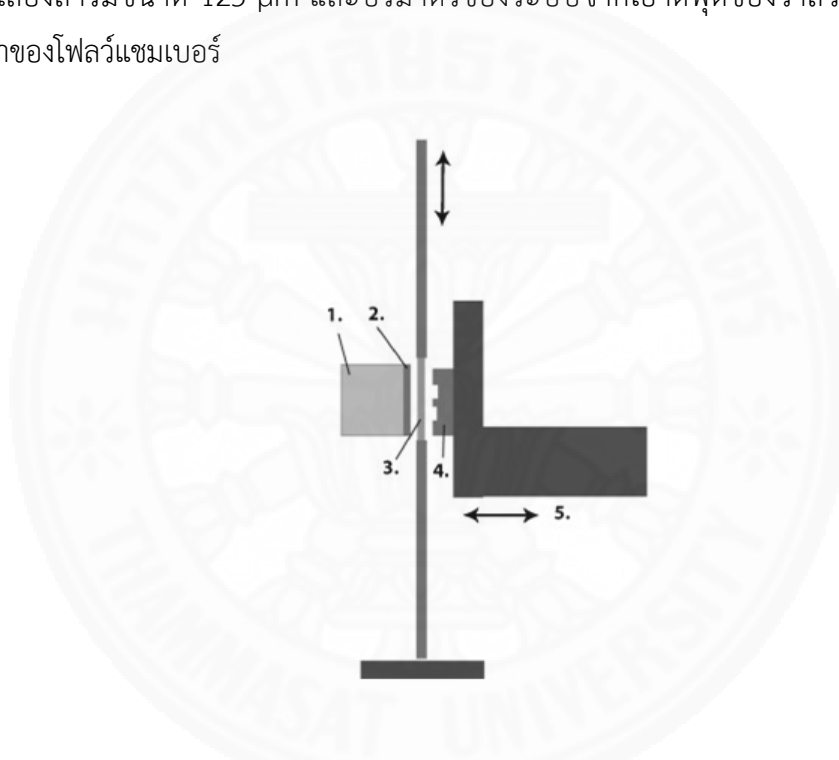
หลักการตรวจวัดสัญญาณ: อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณเอสพีอาร์คือ KSV SPR 200 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง ปริซึม อุปกรณ์ตรวจวัด และซอฟต์แวร์วิเคราะห์สัญญาณ นอกจากนี้ยังมีปั๊มสำหรับนำส่งของเหลวเข้าสู่โพลเวอร์เซลล์ที่ติดตั้งภายใต้หลักการเคร์สทซ์แมนน์



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบการติดตั้งอุปกรณ์ด้วยหลักการเคร์สทซ์แมนน์สำหรับตรวจวัดสัญญาณเอสพีอาร์ [22]

กระจกสไลด์ถูกเคลือบด้วยวิธีการสปัตเตอร์ฟิล์มบางทองหนา 50 nm บนชั้นของฟิล์มบางโครเมียมหนา 2 nm ซึ่งเลเยอร์นี้มีโพลีเซลล์ติดอยู่บนปริซึม โพลีเซลล์ดังกล่าวถูกเคลือบด้วย ยางเทอร์มอพลาสติกที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับปริซึม แสงของเลเซอร์เป็นแสงชนิดโพลาไรซ์ (P-polarized) โดยใช้แผ่นโพลาไรเซอร์ก่อนที่แสงเคลื่อนที่เข้าไปยังปริซึม ดังภาพที่ 2.1

โพลีเซลล์ได้จากการหล่อแบบด้วยยางโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) เนื่องจากง่ายต่อการเตรียมโพลีเซลล์ที่ปริมาตรต่างกัน นอกจากนี้ยางโพลีไดเมทิลไซลอกเซนมีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยาและมีความเป็นฉนวน โพลีเซลล์ในบทความวิจัยนี้มีความลึก 80 μm ส่วนท่อลำเลียงสารมีขนาด 125 μm และปริมาตรของระบบจากเอาต์พุตของวาล์ว 12 พอร์ต ไปยังทางเข้าของโพลีแคมเบอร์



ภาพที่ 2.2 กลไกการแทรกตัวอย่างเอสพิอาร์ มีองค์ประกอบดังนี้ (1) ปริซึม (2) ยางที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับปริซึม (3) สไลด์เซนเซอร์เอสพิอาร์ (4) โพลีเซลล์ทำจาก PDMS (5) กลไกการปิด [22]

ชิปเซนเซอร์ทอง ตัวยึดชิปที่สามารถถอดออกได้ โพลีเซลล์ และปริซึมเป็นอิสระกัน จากภาพที่ 2.2 กระจกสไลด์ (Schott D 263, 20 nm x 12 nm x 0.5 nm) ถูกเคลือบด้วยฟิล์มทองหนา 50 nm บนชั้นโครเมียมหนา 2 nm

2.1.2 การเตรียมสารตัวอย่างและการวัด

สารเคมี: ซูโครส (Catalog No. 84099)

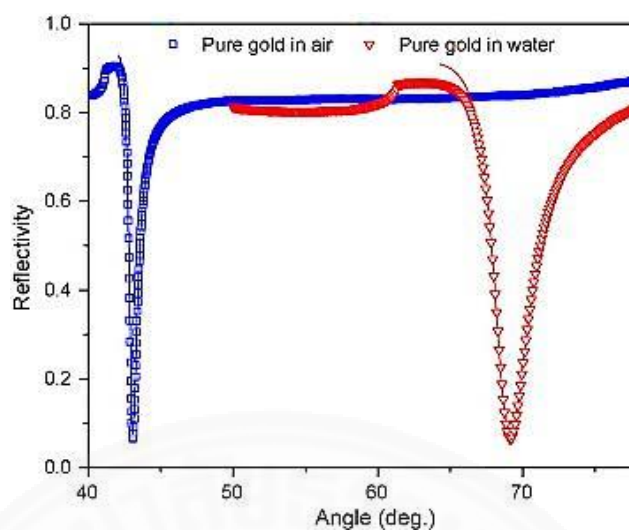
การทำความสะอาดพื้นผิวทองด้วยแอมโมเนีย สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารละลายประกอบด้วยแอมโมเนีย (NH_4OH) 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% และ น้ำ Milli-Q (1:1:5) สารละลายถูกให้ความร้อนจนเดือด ($80-90^\circ$) แล้วแช่กระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มทองลงในสารละลายดังกล่าวเป็นเวลา 10 นาที จึงนำไปล้างด้วยน้ำ Milli-Q จากนั้นเป่าด้วยเครื่องเป่า

ความเข้มข้นของซูโครสในน้ำมีความเข้มข้นต่างๆ ที่ 5, 10, 25, 50 และ 300 mM ได้นำไปวัดสัญญาณเอสพัวร์ในโหมดของการสแกนมุมมีค่าตั้งแต่ 2% ลงไปตามลำดับ

2.1.3 ผลการทดลองและอภิปรายผล

การสแกนมุมของกระจกสไลด์เคลือบด้วยฟิล์มทองในอากาศและน้ำ

กราฟเอสพัวร์ของกระจกสไลด์เคลือบฟิล์มทองบริสุทธิ์แสดงดังภาพที่ 2.3 โดยพีคที่แตกต่างกันของมุมเรโซแนนซ์ระหว่างสัญญาณเอสพัวร์ของอากาศและน้ำ เนื่องจากช่วงมุมสแกนของอุปกรณ์มีค่า ($40-78^\circ$) ทำให้สามารถตรวจวัดสัญญาณเอสพัวร์ของแก๊สและของเหลวรวมไปถึงสารตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทั้งแห้งและเปียก พารามิเตอร์ของฟิล์มบางทองได้จากกราฟการวัดสัญญาณเอสพัวร์แล้วพิตกราฟด้วยโปรแกรม Winspall พารามิเตอร์ทองคำซึ่งในกรณีนี้หมายถึงความหนาของฟิล์มบางทองรวมถึงความหนาของชั้นโครเมียมด้วย ค่าดัชนีหักเห (n) และสัมประสิทธิ์การดูดซับ (κ) พารามิเตอร์จากการพิตกราฟของการทดลองวัดสัญญาณเอสพัวร์ของชั้นฟิล์มทองในอากาศมีค่าเท่ากับ 53.21 nm 0.2034 และ 3.8152 ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์ได้จากการพิตกราฟของการทดลองวัดสัญญาณเอสพัวร์ของชั้นฟิล์มทองในน้ำมีค่าเท่ากับ 54.37 nm 0.1972 และ 3.8107 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้จากการวัดสัญญาณดังกล่าวทั้งในน้ำและอากาศมีความใกล้เคียงกัน

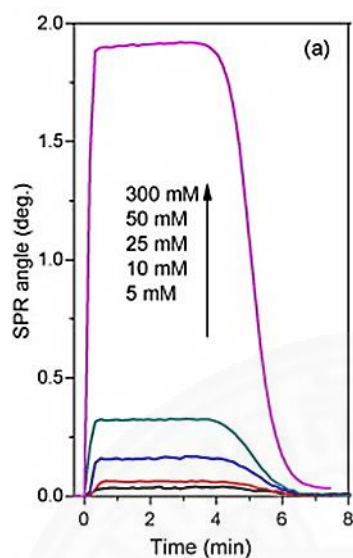


ภาพที่ 2.3 กราฟสัญญาณเอสพาร์ของฟิล์มทองในอากาศและในน้ำ จุด คือข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง เส้นทึบ คือกราฟที่ฟิตได้จากข้อมูลดิบ [22]

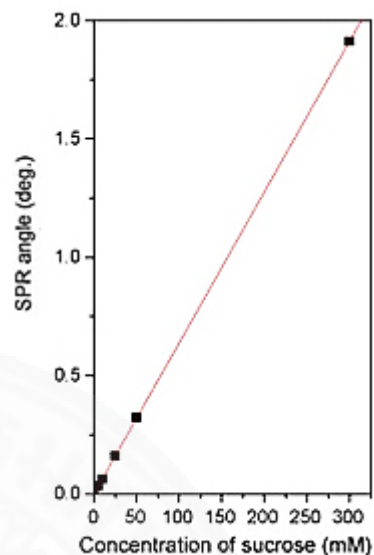
สารละลายซูโครส

สารละลายซูโครสที่ความเข้มข้นต่างกันถูกนำไปวัดสัญญาณเอสพาร์ในโหมดการสแกนมุมที่อัตราการไหลเท่ากับ $50 \mu\text{L}/\text{min}$ ในโหมดการสแกนมุมกราฟที่ได้จากการวัดสัญญาณสำหรับการวัดสารละลายซูโครส จากภาพที่ 2.4 (ก) แสดงกราฟเซนเซอร์แกรม (Sensorgram) ที่วัดการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเอสพาร์เทียบกับเวลาของสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 5 10 25 50 และ 300 mM จะเห็นว่ามุมเอสพาร์จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของสารละลายซูโครสและแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นมีค่า $R^2=0.99999$ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ข)

(ก)

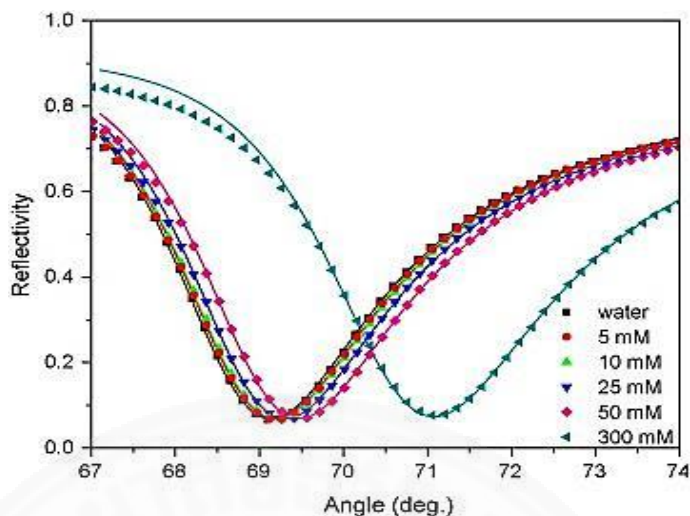


(ข)



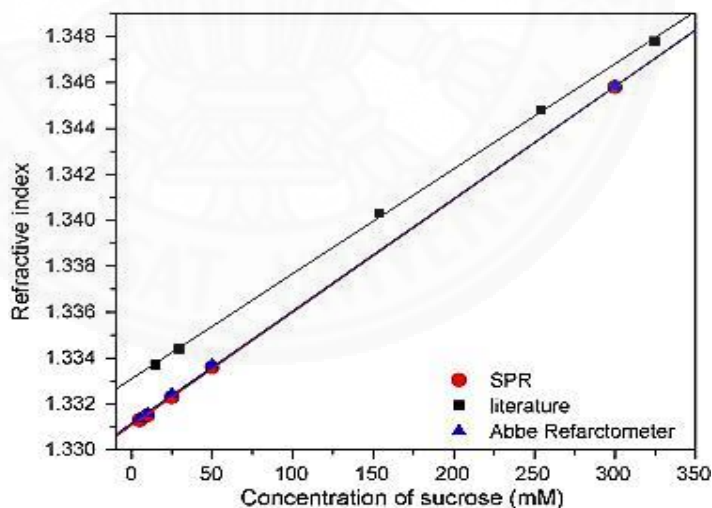
ภาพที่ 2.4 (ก) กราฟเซนเซอร์แกรมของการวัดสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 5 10 25 50 และ 300 mM ตามลำดับ (ข) เอสพีอาร์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นของสารละลายซูโครส (■) แทนข้อมูลที่ได้จากการวัด และเส้นทึบคือการฟิตกราฟเชิงเส้นที่มีค่า $R^2 = 0.99999$ [22]

ค่ามุมเอสพีอาร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่าดัชนีหักเหของสารละลายซูโครสที่อยู่บนฟิล์มบางทองเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ค่ามุมเอสพีอาร์ที่มีค่าน้อยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซูโครสมีค่าน้อยๆ



ภาพที่ 2.5 สัญญาณเอสพาร์ของสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 5 10 25 50 และ 300 mM [22]

ภาพที่ 2.5 แสดงสัญญาณเอสพาร์ของการวัดสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 0 5 10 25 50 และ 300 mM ตามลำดับ เส้นทึบในกราฟได้จากการฟิตกราฟด้วยโปรแกรม Winspall 3.01 ค่าดัชนีหักเหของน้ำที่ได้จากการฟิตกราฟมีค่าเท่ากับ 1.33096



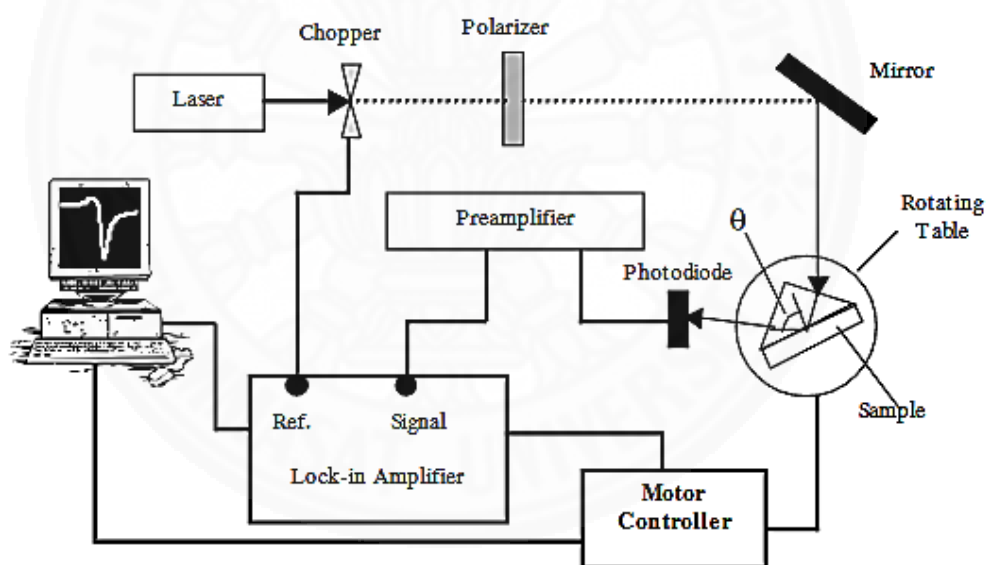
ภาพที่ 2.6 ค่าดัชนีหักเหของสารละลายซูโครสจากการวัดสัญญาณเอสพาร์ จากมาตรฐานดัชนีหักเห Abbe และจากทฤษฎี เส้นทึบคือการฟิตกราฟเชิงเส้นที่เหมาะสมกับข้อมูลโดยมีค่า $R^2=0.99994$, 0.99986 และ 0.99959 ตามลำดับ และได้สมการจากการฟิตกราฟเชิงเส้นเป็น

$y = 1.33107+4.91485E-5x$, $y = 1.33116+4.89234E-5x$, $y=1.3331+4.57272E-5x$ ตามลำดับ [22]

ภาพที่ 2.6 แสดงผลการวัดค่าดัชนีหักเหของสารละลายซูโครสเพื่อเปรียบเทียบผลการวัดจากระบบเอสพียาร์ มาตรดัชนีหักเหและจากค่าตามทฤษฎี ในงานวิจัยนี้วัดค่าดัชนีหักเหของสารละลายซูโครสด้วยมาตรดัชนีหักเห Abbe โดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 633 nm ที่อุณหภูมิ 25°C จากการทดลองพบว่าค่าดัชนีหักเหที่วัดด้วยมาตรดัชนีหักเห (ABBE-2WAJ) มีค่าใกล้เคียงค่าดัชนีหักเหที่วัดได้จากการตรวจวัดสัญญาณเอสพียาร์

2.2 การตรวจวัดปริมาณน้ำตาลในเครื่องดื่มในเชิงพาณิชย์

ปี ค.ศ. 2007 Yusmawati [23] ได้ตรวจวัดปริมาณน้ำตาลในเครื่องดื่ม ได้แก่ Coke 100 plus และ F&N Orange โดยใช้เทคนิคเอสพียาร์รีโซแนนซ์ด้วยการใช้แสง He-Ne เลเซอร์ (632.8 nm, 5 mW) เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจวัดดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเทคนิคเอสพียาร์รีโซแนนซ์แบบสแกนมุม [23]

2.2.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากภาพที่ 2.7 การติดตั้งอุปกรณ์ประกอบด้วยเลเซอร์ He-Ne มอเตอร์สเต็ปเปอร์โดยมีค่าความละเอียด 0.001 องศา (Newport MM3000) ตัวลดทอนแสง แผ่นโพลาริซเซอร์ และเครื่องตัดแสง (Optical chopper รุ่น SR 540) ลำแสงสะท้อนถูกตรวจวัดโดยโฟโตไดโอดและถูกประมวลผลโดยเครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (Lock-in-amplifier รุ่น SR 530) เครื่องดื่มเชิงพาณิชย์ตัวอย่างที่นำมาวัดปริมาณน้ำตาลด้วยมาตรดัชนีหักเหในงานวิจัยนี้ได้แก่ 100 plus Coke F&N Orange ตามตารางต่อไปนี้

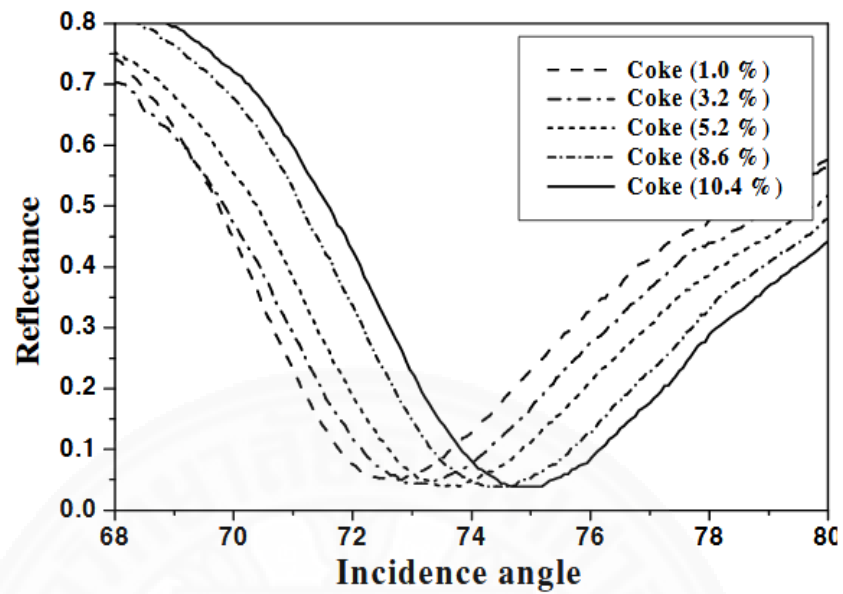
ตารางที่ 2.1

ความเข้มข้นของน้ำตาลในเครื่องดื่มเชิงพาณิชย์ที่วัดด้วยมาตรดัชนีหักเห [23]

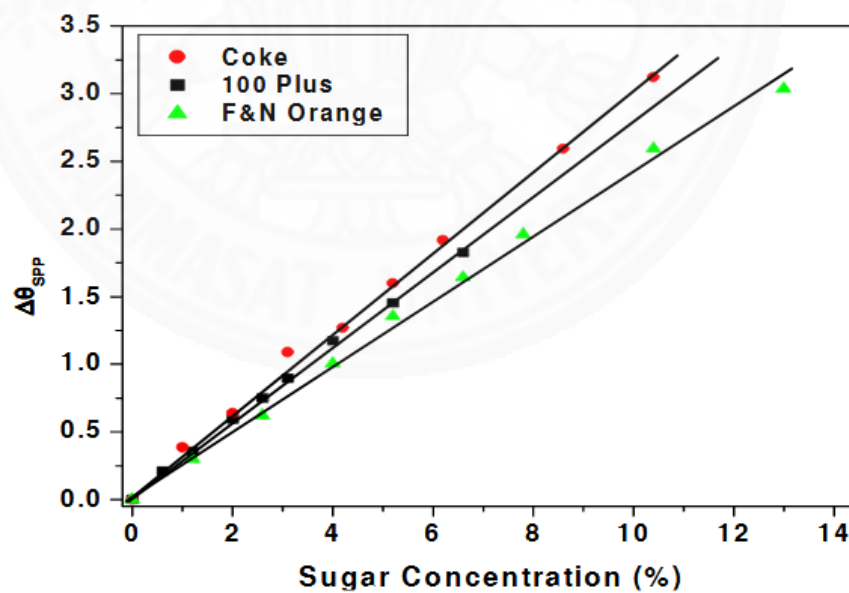
Diluted Carbonated Soft Drink Solutions (V/V)	Sugar concentration (%) measured by refractometer		
	“100 Plus”	“Coke”	“F&N Orange”
10%	0.6	1.0	1.2
20%	1.2	2.0	2.6
30%	2.0	3.2	4.0
40%	2.6	4.2	5.2
50%	3.2	5.2	6.6
60%	4.0	6.2	7.8
80%	5.2	8.6	10.4
100%	6.6	10.4	13.0

2.2.2 ผลการทดลองและอภิปรายผล

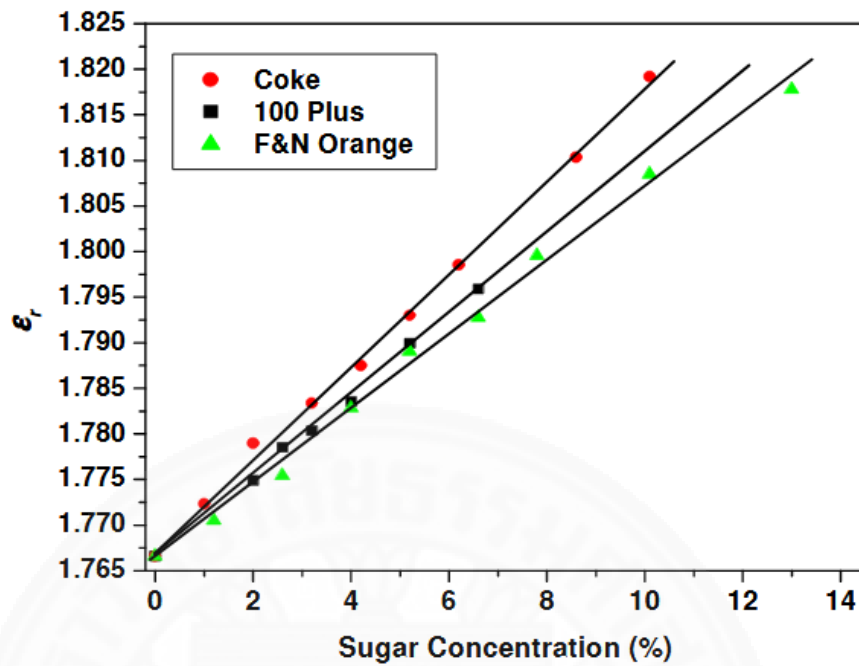
ตามหลักการเอสพีอาร์ มุมรีโซแนนซ์ (Resonance angle, θ_{SPR}) มีความไวต่อค่าดัชนีหักเหของตัวกลางบนฟิล์มทอง เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นจึงมีผลทำให้มุมเรโซแนนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตาม จากภาพที่ 2.8 แสดงเส้นโค้งการสะท้อน (Reflectance curves) ของ Coke ที่มีมุมเรโซแนนซ์เท่ากับ 73.413 องศา 73.795 องศา 74.112 องศา 74.620 องศา และ 75.188 องศา สำหรับความเข้มข้นของน้ำตาลที่ 1.0% 3.2% 5.2% 8.2% และ 10.4% ตามลำดับ



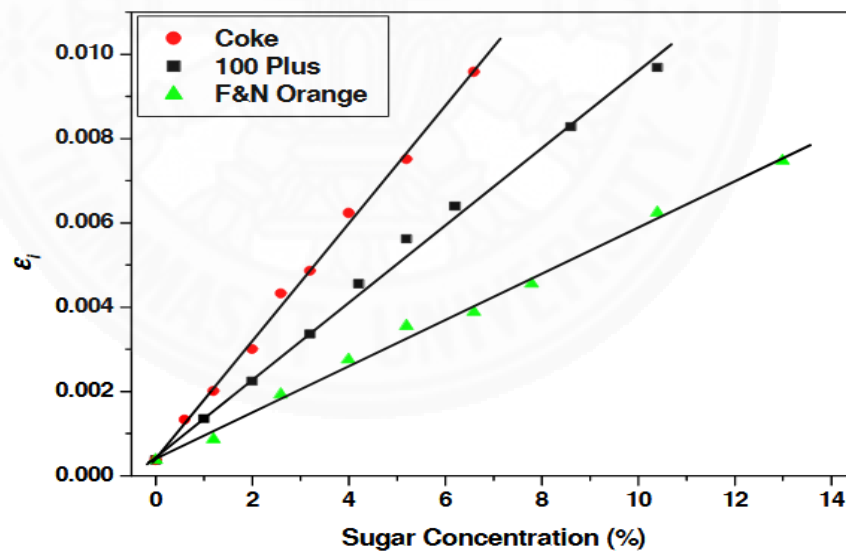
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนแสง (Reflectance) กับมุมตกกระทบของ Coke ตามความเข้มข้นที่เลือก [23]



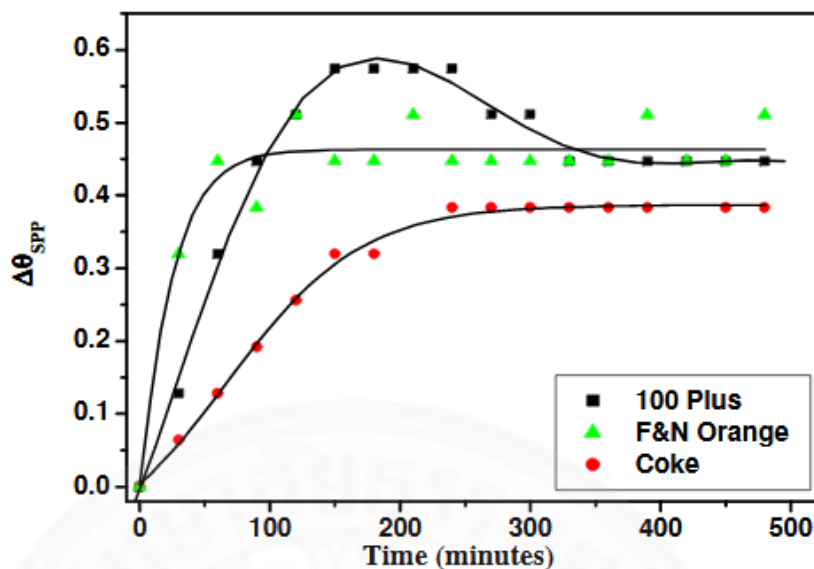
ภาพที่ 2.9 ค่ามุมรีโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง ($\Delta\theta_{SPP}$) สำหรับความเข้มข้นที่แตกต่างกันของเครื่องดื่ม [23]



ภาพที่ 2.10 ส่วนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเครื่องดื่มทั้ง 3 ชนิด [23]



ภาพที่ 2.11 ส่วนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเครื่องดื่มทั้ง 3 ชนิด [23]



ภาพที่ 2.12 การเลื่อนของมุมเรโซแนนซ์เทียบกับเวลาในการวัดเครื่องตีพิมพ์ [23]

จากภาพที่ 2.9 พบว่าการเลื่อนของมุมเรโซแนนซ์ (Resonant angle) ของ Coke มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับ 100 Plus และ F&N Orange ที่ความเข้มข้นน้ำตาลเท่ากับ 4% และมีค่าการเลื่อนของมุมเรโซแนนซ์ของเครื่องตีพิมพ์ดังกล่าวอยู่ที่ 1.217 องศา 1.216 องศา และ 1.153 องศา ตามลำดับ ความชันของกราฟเส้นตรงคือค่าความไวของเซนเซอร์ที่ค่าเท่ากับ 0.295 องศา 0.275 องศา และ 0.239 องศา ต่อความเข้มข้นของน้ำตาลของ Coke 100 Plus และ F&N Orange ตามลำดับ

ค่าปริมาณน้ำตาลต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (Limit of detection) ของ Coke 100 Plus และ F&N Orange มีค่าเท่ากับ 0.01 0.03 และ 0.05 (%) ตามลำดับ และจากการพิกกราฟของข้อมูลที่ทดลองได้โดยอาศัยสมการเฟรสเนล (Fresnel's equation) จะได้ค่าของส่วนจริง (ϵ_r) และส่วนจินตภาพ (ϵ_i) ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทั้ง 3 ชนิด

จากภาพที่ 2.10 และ 2.11 พบว่าค่าของส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความเข้มข้นของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยได้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเรโซแนนซ์เทียบกับเวลาเพื่อศึกษาพฤติกรรมจลศาสตร์ของการจัดเรียงโมเลกุลบนผิวโลหะในขณะที่ทดลองโดยมีผลการทดลองภาพที่ 2.12

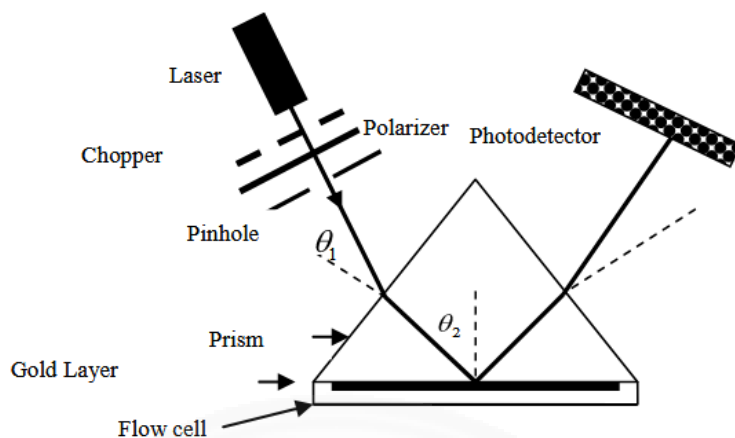
จากกราฟที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมสะท้อนของเครื่องตีพิมพ์ทั้ง 3 ชนิด ที่บริเวณรอยต่อระหว่างทองกับสารละลายตัวอย่างได้แก่ 100 Plus Coke และ F&N Orange ที่มีค่าความเข้มข้นน้ำตาลอยู่ที่ 1.2% 2.0% และ 2.6% ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นทั้ง 3 ค่านี้ได้จากการ

เจือจางเครื่องต้ม 3 ชนิดที่มีปริมาตร 20 ml ในน้ำกลั่น 100 ml พบว่าการเลื่อนของมุมเรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลถึงความอิ่มตัว ซึ่งค่าความอิ่มตัวนี้ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย จากกราฟที่ 2.18 พบว่า F&N Orange ตอบสนองเร็วกว่าเมื่อเทียบกับ 100 Plus และ Coke ก่อนจะถึงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเรโซแนนซ์เริ่มคงที่ (Plateau region) ในขณะที่ Coke ใช้เวลา 240 นาที ถึงบริเวณที่ราบ 100 Plus ใช้เวลา 90 นาที ในขณะที่แนวโน้มเส้นกราฟของ 100 Plus เพิ่มขึ้นจาก $t = 0$ ถึง $t = 180$ นาที และเริ่มลดลงหลังจากนาทีที่ 180 ที่ $t=330$ นาที เส้นกราฟมีแนวโน้มคงที่ แนวโน้มของกราฟขึ้นกับกระบวนการจัดเรียงโมเลกุลบนผิวทองในขณะทดลอง รวมถึงการเพิ่มขึ้นของมุมเรโซแนนซ์ที่ขึ้นกับจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนผิวโลหะ ดังนั้นกระบวนการเกาะกันของโมเลกุลมีผลทำให้ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ติดกับผิวโลหะเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ความแตกต่างของการตอบสนองอาจขึ้นกับความแตกต่างตามโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลในเครื่องต้มแต่ละชนิด

จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำตาลในเครื่องต้มทั้ง 3 ชนิดด้วยเทคนิคการสั่นพ้องคลื่นผิวพลาสมอนภายใต้วิธีการของแคร์ทส์มานน์ ได้ค่าความไวของการตรวจวัดเป็น 0.295° 0.275° 0.239° ต่อความเข้มข้นของน้ำตาลของ Coke 100 Plus และ F&N Orange ตามลำดับ ส่วนค่าความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลน้อยสุดในการตรวจวัดของเซนเซอร์นี้มีค่าประมาณ 0.01 0.03 และ 0.05 สำหรับ Coke 100 Plus และ F&N Orange ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การเลื่อนของมุมสั่นพ้อง ($\Delta\theta_{SPP}$) เพิ่มขึ้นกับเวลา เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโมเลกุลที่เคลือบบนผิวโลหะมีผลทำให้มุมดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น โดยเทคนิคนี้สามารถนำไปตรวจวัดปริมาณน้ำตาลในเครื่องต้มเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 การศึกษาคุณลักษณะของไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ด้วยเทคนิคเอสพีอาร์เรโซแนนซ์

ในปี ค.ศ. 2011 Sadrolhosseini [24] ได้มีการนำเทคนิคเอสพีอาร์เรโซแนนซ์มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (virgin coconut oil biodiesel) ที่ได้จากการผสมของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์และเมทานอล โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 การติดตั้งอุปกรณ์ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง แผ่นโพลาไรเซอร์ อุปกรณ์ตัดแสง รูเข็ม (Pinhole) ปริซึม อุปกรณ์สำหรับลำเลียงสาร และอุปกรณ์ตรวจวัด [24]

จากภาพที่ 2.13 การติดตั้งอุปกรณ์ประกอบด้วยขั้นตอนการหมุน ปริซึมที่มีค่าดัชนีหักเหสูง (SF52 FocTek) อุปกรณ์ตรวจจับแสงซิลิกอน (Silicon photodetector) แผ่นโพลาไรเซอร์ อุปกรณ์ตัดแสง (SR540 Stanford Research system) เครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (Lock-in-amplifier) และแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 632.8 594.1 543.5 และ 405 nm ส่วนแท่นหมุน (Rotation state) และการตรวจวัดแสงถูกควบคุมด้วยโปรแกรมที่เขียนโดย Matlab ในการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวแท่นหมุนเชื่อมต่อกับมอเตอร์สเต็ปเปอร์ (Stepper motor) ที่มีความละเอียดของมุมเท่ากับ 0.016 องศา ปริซึมถูกปรับครั้งแรกเป็นจุดเริ่มต้นก่อนถูกหมุนไปที่ 25 องศา โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.016 องศา โดยแต่ละขั้นตอนนั้น การหมุนจะหยุดชั่วคราวเพื่อให้ความเข้มแสงสามารถถูกตรวจวัดโดยอุปกรณ์ตรวจจับแสงซิลิกอนที่ต่อกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณล็อกอิน

2.3.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.3.1.1 การเตรียมไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (Virgin Coconut Oil

Biodiesel: VCOB)

ในการทดลองนี้ได้ผสมน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์กับเมทานอลโดยใช้วิธีเอสเทอร์ฟิเคชันที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (alkali-catalyzed transesterification method) อัตราส่วนของเมทานอลกับน้ำมันเป็น 0.9 ต่อ 0.12 v/v และเปอร์เซ็นต์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็น 1.1% w/v ของน้ำมันที่อุณหภูมิเฉลี่ย 60°C อัตราส่วนปริมาณที่เหมาะสมของ

เมทานอลกับน้ำมันมะพร้าวคือ 0.4 v/v ให้เป็นสารตัวอย่าง A อัตราส่วนปริมาณของเมทานอลกับน้ำมันมะพร้าวสำหรับสารตัวอย่าง C B และ D คือ 0.67 0.38 และ 0.12 v/v ตามลำดับ

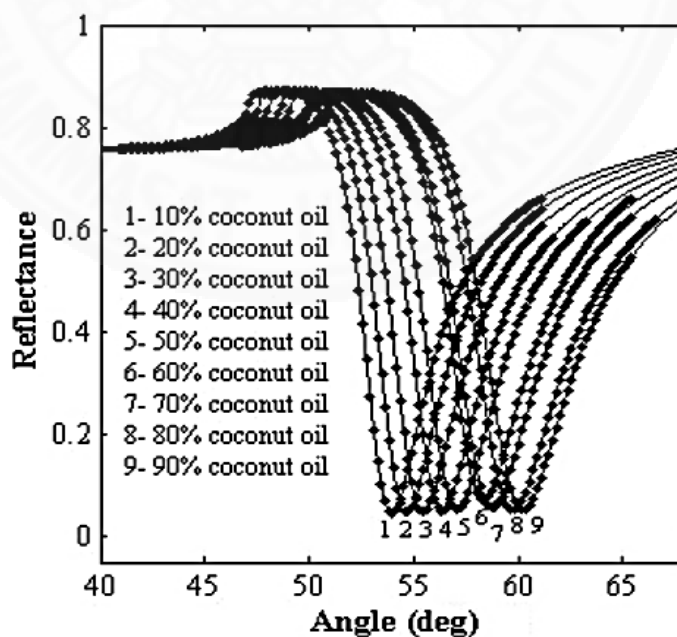
2.3.1.2 เลเยอร์ที่ใช้ในการตรวจวัด (sensing layer)

พอลิไพโรลโคโตซาน (Ppy-CHI) ถูกเคลือบลงบนฟิล์มโลหะทองด้วยวิธีการเคลือบทางไฟฟ้าเคมี โดยมีอุปกรณ์ควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์คือ โพลเทนซियोสแตท (Model: PS 605, USA) ได้ถูกใช้เพื่อเคลือบไพโรลโคโตซานทางไฟฟ้าเคมีและใช้ศักย์บวกของขั้วไฟฟ้าที่ใช้งานมีค่า 1.1 V ต่อกับขั้วไฟฟ้าคาโลเมลสำเร็จรูป (Saturated calomel electrode) พอลิเมอร์ถูกเตรียมในสารละลายที่มีไพโรลเข้มข้น 0.3 M ผสมกับ *p*-toluene sulfonate เข้มข้น 0.1 M และ 0.7% w/v โคโตซานในกรดอะซิติกที่อุณหภูมิห้อง

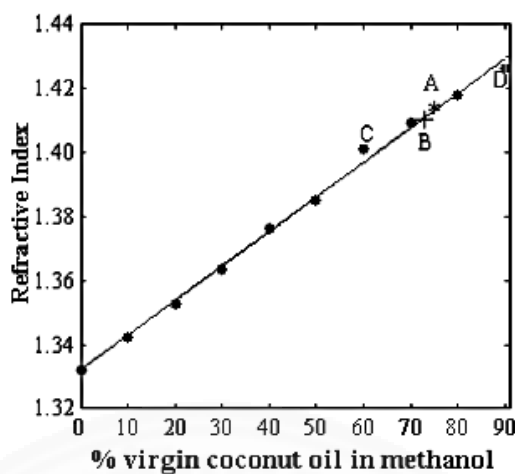
2.3.2 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

2.3.2.1 ลักษณะไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์

ภาพที่ 2.14 แสดงสัญญาณ SPR ของสารละลายน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์กับเมทานอล การทดลองนี้ใช้แสงฮีเลียม-นีออน (632.8 nm) ที่อุณหภูมิห้อง เส้นทึบคือแนวโน้มข้อมูลที่ได้จากการพิตรกราฟของสมการเฟรสเนล เมื่อความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นในช่วงของ 10-90% มุมเรโซแนนซ์จะเพิ่มขึ้นจาก 53.985 องศา ถึง 60.24 องศา ในขณะที่ค่าดัชนีหักเหเพิ่มขึ้นจาก 1.3426 ถึง 1.4246 ตามตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.14 สัญญาณ SPR ที่ได้จากการผสมของน้ำมันมะพร้าวและเมทานอล ความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำมันมะพร้าวเปลี่ยนจาก 10 ไปยัง 90% [24]



ภาพที่ 2.15 ค่าดัชนีหักเหของความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ในส่วนผสมไบโอดีเซล (จุด (•) ระบุข้อมูลการทดลองและเส้นทึบคือเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล) [24]

ตารางที่ 2.2

มุมล้นพ้องและค่าดัชนีหักเหของส่วนผสมของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์และเมทานอล [24]

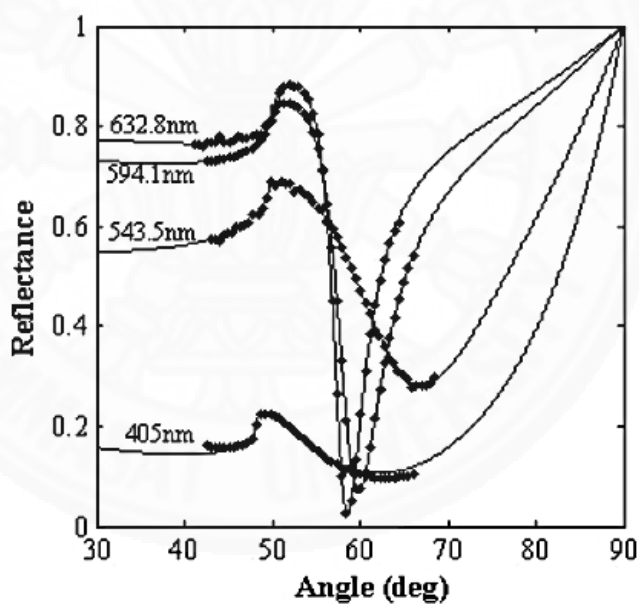
Percentage of virgin coconut oil %	Volume ratio (methanol to oil) v/v	Resonance Angle ($\theta_p \pm 0.016$)°	Refractive index $\Delta n = \pm 0.0001$
10	9	53.985	1.3426
20	4	54.705	1.3528
30	2.4	55.470	1.3635
40	1.5	56.415	1.3763
50	1	57.090	1.3852
60	0.67	58.335	1.4013
70	0.43	58.950	1.4090
80	0.25	59.715	1.4183
90	0.12	60.240	1.4246

ภาพที่ 2.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ที่ได้จากข้อมูลในตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของน้ำมันมีลักษณะเป็นเส้นตรง เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของไบโอดีเซลอีเทอร์มีค่ามากกว่าเมทานอลแต่น้อยกว่าค่าดัชนีหักเหของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ ค่าดัชนีหักเหและความเข้มข้นของส่วนผสม (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลกับน้ำมัน) ที่จุด A มีค่าเท่ากับ 1.4122 และ 0.362 v/v

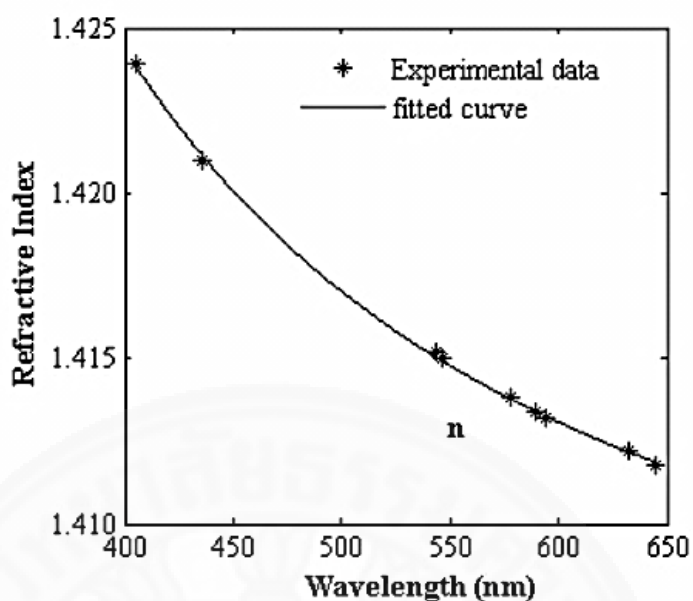
ตามลำดับ อัตราส่วนโดยปริมาตรมาตรฐาน (จุด B) คือ 0.4 v/v และค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.405 ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นเท่ากับ 0.038 แต่หมุนเลื่อนไป 0.556 องศา เนื่องจากอัตราส่วนของเมทานอลกับน้ำมันของตัวอย่าง A มีความเหมาะสมที่สุด ภาพที่ 2.16 และภาพที่ 2.17 แสดงสัญญาณ SPR สำหรับความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกันและกราฟแนวโน้มการกระจาย (Dispersion curve) ของตัวอย่าง A โดยค่าคงที่จากการทดลองได้จากสมการ Augustin Louis Cauchy ดังสมการ

$$n^2 = 1 + \frac{b_1 \lambda^2}{\lambda^2 - c_1} + \frac{b_2 \lambda^2}{\lambda^2 - c_2} \quad (2.1)$$

ค่าดัชนีหักเหลดลงจาก 1.4239 ไปยัง 1.4118 เมื่อความยาวคลื่นของแสงเพิ่มขึ้นจาก 405.0 nm ตามตารางที่ 2.3



ภาพที่ 2.16 สัญญาณเอสพีอาร์ของไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์กับค่าความยาวคลื่น (จุด (■) แทนข้อมูลจากการทดลองและเส้นทึบคือเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล) [24]



ภาพที่ 2.17 แนวโน้มการกระจายข้อมูลของไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ จากสีแดงไปยังสีฟ้า (*) แทนข้อมูลที่ทดลองและเส้นทึบคือเส้นกราฟที่ได้จากสมการ (2.1) [24]

ตารางที่ 2.3

ค่าดัชนีหักเหของไบโอดีเซล (ตัวอย่าง A) ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ [24]

Wavelength (nm)	Refractive index
644.8	1.4118
632.8	1.4122
594.1	1.4132
589.3	1.4134
578.2	1.4138
546.0	1.4150
543.5	1.4152
435.8	1.4210
405.0	1.4239
Constants	$b_1 = 70.32, b_2 = -69.35,$ $c_1 = 78.6, c_2 = -55.91$

2.4 เทคนิคคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่

ในปี ค.ศ 2012 Preechaburana [1] ได้คิดค้นนวัตกรรมคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ในการตรวจวัดทางเคมีบนโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นหนึ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภาคภัณฑ์ (Consumer Electronic Device; CED) ที่นิยมใช้ทั่วโลก นอกจากนี้ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันมีกล้องถ่ายภาพความคมชัดและความละเอียดของภาพสูง และมีอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ตลอดจนการประมวลผลโดยรวมมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับคอมพิวเตอร์แบบพกพา ด้วยเหตุนี้จึงมีการวิจัยในการประยุกต์ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ เพื่อเข้าถึงผู้บริโภคทั่วโลกได้สะดวกและง่ายขึ้น

อุปกรณ์เอสพีอาร์ดังกล่าวนี้ถูกสร้างขึ้นจากวัสดุโพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethyl siloxane, PDMS) Dow Corning Sylgard 184 และอีพ็อกซีทางแสง (Optical grade epoxy) EPO-TEK® 301-1 ดังภาพที่ 2.18

2.4.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

2.4.1.1 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์เชิงแสง (PDMS optics)

การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์ทางแสงได้จากการผสมระหว่างเบสซิลิโคนกับตัวเร่งแข็งในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที ในถ้วยพลาสติก แล้วจึงนำไปวางในโถดูดความชื้นที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกจากซิลิโคนดังกล่าวเป็นเวลา 45 นาที จากนั้นทำไปเทลงในแม่แบบที่ประกอบขึ้นจากกระจกสไลด์และท่อพลาสติกเพื่อทำแบบเลนส์ทรงกระบอกแกมราบและเลนส์ทรงกระบอก (ดังภาพที่ 2.18(1) และ 2.18(3)) ตามลำดับ และปริซึมที่มีมุม 60° ตามภาพที่ 2.18(4) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 2 ชม. แล้วจึงแกะออกจากแบบ

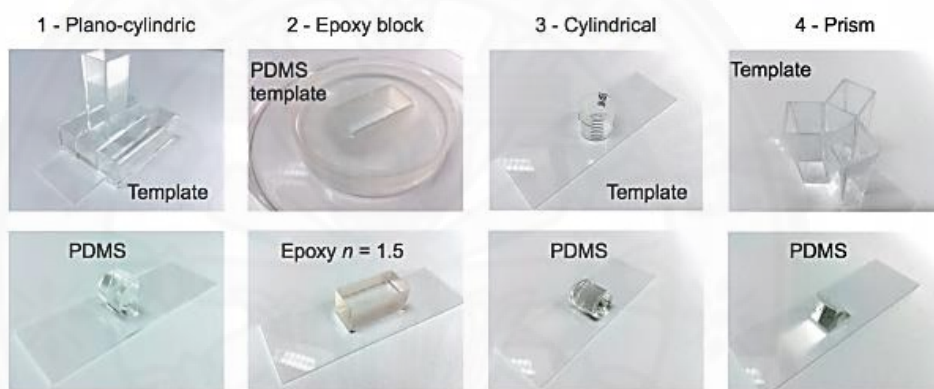
2.4.1.2 การเตรียมอีพ็อกซีเชิงแสง (Optical grade epoxy)

อีพ็อกซีที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าวเป็นชนิด EPO-TEK® รุ่น 301-1 โดยใช้อัตราส่วนจากส่วนประกอบ A ปริมาณ 4 g ส่วนประกอบ B 1 g กวนให้เข้ากันในแก้วพลาสติกเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปดูดอากาศออกจากเนื้ออีพ็อกซีในโถดูดความชื้นที่ต่อกับปั๊มชนิดโรตารีเป็นเวลา 45 นาที จึงเทในแม่แบบ PDMS ดังภาพที่ 2.18(2) และเพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงความร้อนที่มากเกินไประหว่างการเซตตัวปล่อยให้อีพ็อกซีแข็งตัวทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (23°C) เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นจึงสามารถแกะออกจากแม่แบบ PDMS ได้

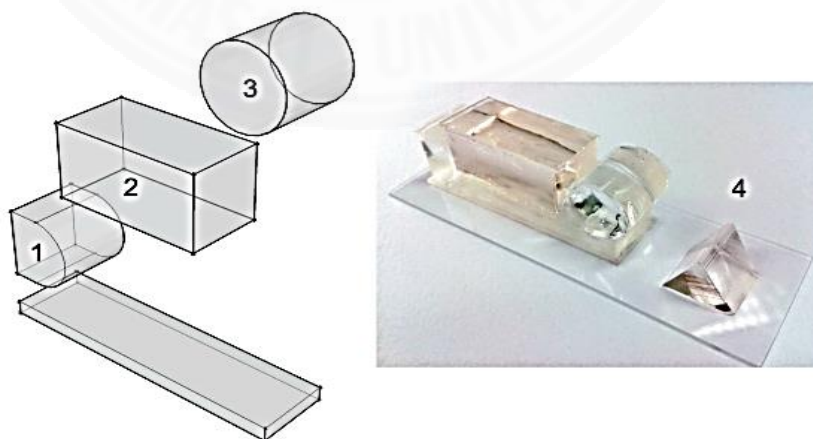
2.4.1.3 การประกอบกันของอุปกรณ์ทางแสง (Optical coupler assembly)

จากภาพ 2.18(ข) แสดงภาพ 3 มิติการประกอบกันของอุปกรณ์ทางแสง โดยเลนส์ทรงกระบอกแกมราบจะถูกติดกับกระจกสไลด์ ($14 \times 25 \text{ mm}^2$) เป็นอันดับแรก แล้วตามด้วยอุปกรณ์อีพ็อกซีและเลนส์ทรงกระบอก PDMS จากภาพที่ 2.18(ก) ส่วนปริซึมที่มีมุม 60° จะถูกแยกไปติดบนก้นหน้าจอของ iPod touch โดยอุปกรณ์เอสพืออาร์ที่พร้อมนำไปทดสอบแสดงดังภาพที่ 2.18 ในส่วนของอีพ็อกซีเป็นส่วนที่มีกระจกสไลด์เคลือบทองหนา 45 nm ติดอยู่ด้านบนเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการหยดสารเพื่อตรวจวัดสัญญาณเอสพืออาร์

(ก)

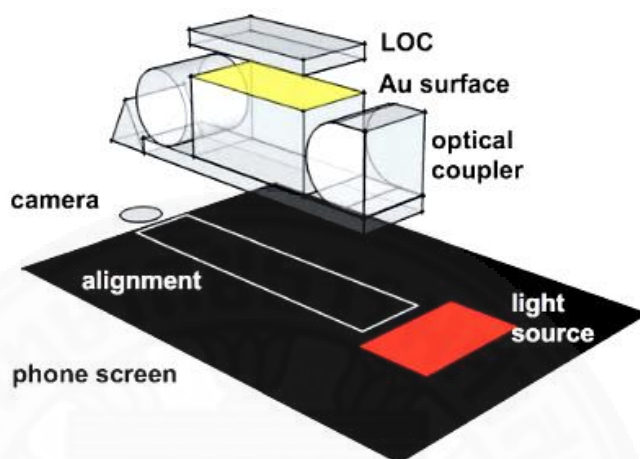


(ข)



ภาพที่ 2.18 (ก) ส่วนประกอบ (ข) มาตรฐานนี้หักเหสำหรับพร้อมนำไปตรวจวัดสัญญาณเอสพืออาร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ [1]

จากภาพ 2.18 ส่วนประกอบชิ้นที่ 1 3 และ 4 นั้นสร้างจากวัสดุ PDMS แต่ในส่วนของชิ้นที่ 2 นั้นสร้างมาจากอีพ็อกซี ($n=1.5$) จากนั้นนำชิ้นส่วนต่างๆมาประกอบบนแผ่นฐานรองด้วยการติดกาวแล้วนำไปวางบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การวางมาตรฐานดัชนีหักเหบนหน้าจอสื่อโทรศัพท์เคลื่อนที่ [1]

ผู้วิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ SPR ดังกล่าวด้วยสารละลายเอทานอลในน้ำกลั่น ปรากฏว่าความละเอียดและความไวในการตรวจวัดของอุปกรณ์เอสพัวร์ ดังกล่าวคือ 2.14×10^{-6} RIU และ 11×10^{-3} RIU/ $^{\circ}$ ตามลำดับ และเป้าหมายการทดสอบประสิทธิภาพนี้คือ ผู้วิจัยต้องการนำไปตรวจวัด $\beta 2$ microglobulin เพื่อตรวจวัดความเสี่ยงในการเป็นมะเร็งตับ โดยใช้ชิพชนิด CM5 (Biacore Sensor Chip CM5) โดยชิพชนิดนี้จะถูกเคลือบด้วยสารรีเซพเตอร์เพื่อจับกับโมเลกุลที่ต้องการวัดโดยไม่จำเป็นต้องแยกสารก่อนทำการตรวจวัด

จากงานวิจัยดังกล่าวผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการพัฒนามาตรดัชนีหักเหที่ใช้เทคนิคเอสพัวร์ ซึ่งจะทำได้มาตรดัชนีหักเหที่มีความละเอียดดีกว่ามาตรดัชนีหักเหทั่วไป และให้สามารถออกแบบใช้งานบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ โดยผู้วิจัยจะออกแบบตัวอุปกรณ์ทางแสงใหม่ให้มารวมกันเป็นชิ้นเดียวกันและใช้วัสดุที่หาง่ายและราคาถูก เพื่อความสะดวกในการตรวจวัดบนสมาร์ทโฟน และข้อดีของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นนี้คือ สามารถพกพา และทำการทดลองภายนอกห้องปฏิบัติการได้ อีกทั้งมีต้นทุนต่ำกว่ามาตรดัชนีหักเหทั่วไป โดยมาตรดัชนีหักเหในงานวิจัยฉบับนี้สามารถนำไปวัดความเข้มข้นของสารละลาย ได้แก่ น้ำตาล และ แอลกอฮอล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

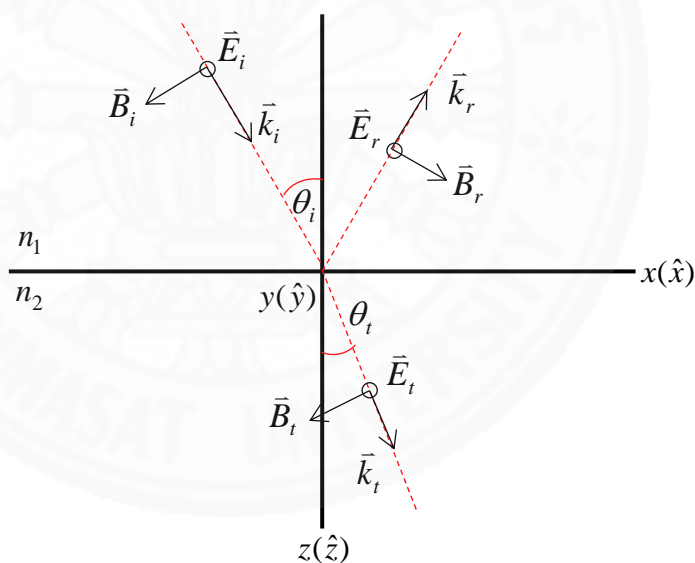
บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 สมการเฟรสเนลล์

คลื่นแสงตกกระทบบรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกัน โดยการเคลื่อนที่ของคลื่นจะพิจารณาได้จากแอมพลิจูด เฟส และการโพลาไรซ์โดยอาศัยสมการเฟรสเนลล์ เป็นสมการที่ถูกค้นพบด้วย Augustin-Jean Fresnel ในปี ค.ศ. 1823 เมื่อพิจารณาสมการเฟรสเนลล์โดยอาศัยสมการแมกซ์เวลล์ในการอธิบายพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเริ่มจากกฎของสเนลล์และความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง ใน 2 กรณี [25] ดังนี้

กรณี 1 สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ



ภาพที่ 3.1 เวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสงโพลาไรซ์เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ

จากภาพที่ 3.1 เขียนสมการสนามไฟฟ้ารวมได้เป็น

$$\vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E}_t \quad (3.1)$$

เมื่อ \vec{E}_r คือ แอมพลิจูดของคลื่นสะท้อน
 \vec{E}_i คือ แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ
 \vec{E}_t คือ แอมพลิจูดของคลื่นส่งผ่าน

จากเงื่อนไขค่าขอบ $\frac{B_i}{\mu_1} = \frac{B_t}{\mu_2}$

$$-\frac{\vec{B}_i}{\mu_1} \cos \theta_i + \frac{\vec{B}_r}{\mu_1} \cos \theta_r = -\frac{\vec{B}_t}{\mu_2} \cos \theta_t \Rightarrow \frac{\vec{B}_i}{\mu_1} \cos \theta_i - \frac{\vec{B}_r}{\mu_1} \cos \theta_r = \frac{\vec{B}_t}{\mu_2} \cos \theta_t \quad (3.2)$$

เมื่อ r_s คือ สัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนในกรณีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ
 t_s คือ สัมประสิทธิ์คลื่นส่งผ่านในกรณีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ
 \vec{E}_r คือ แอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนในเทอมสนามไฟฟ้า
 \vec{E}_i คือ แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบในเทอมสนามไฟฟ้า
 \vec{E}_t คือ แอมพลิจูดของคลื่นส่งผ่านในเทอมสนามไฟฟ้า
 n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหตัวกลาง 1
 n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหตัวกลาง 2
 μ_1 คือ สภาพยอมให้ซึมได้ของสนามแม่เหล็กในตัวกลางที่ 1
 μ_2 คือ สภาพยอมให้ซึมได้ของสนามแม่เหล็กในตัวกลางที่ 2
 θ_i คือ มุมตกกระทบ
 θ_r คือ มุมหักเห

เมื่อ $\vec{B} = \frac{n}{c} \vec{E}$

$$\frac{n_1 \vec{E}_i}{\mu_1} \cos \theta_i - \frac{n_1 \vec{E}_r}{\mu_1} \cos \theta_r = \frac{n_2 \vec{E}_t}{\mu_2} \cos \theta_t \quad (3.3)$$

แทนสมการ (3.1) ในสมการ (3.3) จะได้

$$\frac{n_1 \vec{E}_i}{\mu_1} \cos \theta_i - \frac{n_1 \vec{E}_r}{\mu_1} \cos \theta_r = \frac{n_2}{\mu_2} (\vec{E}_i + \vec{E}_r) \cos \theta_t \quad (3.4)$$

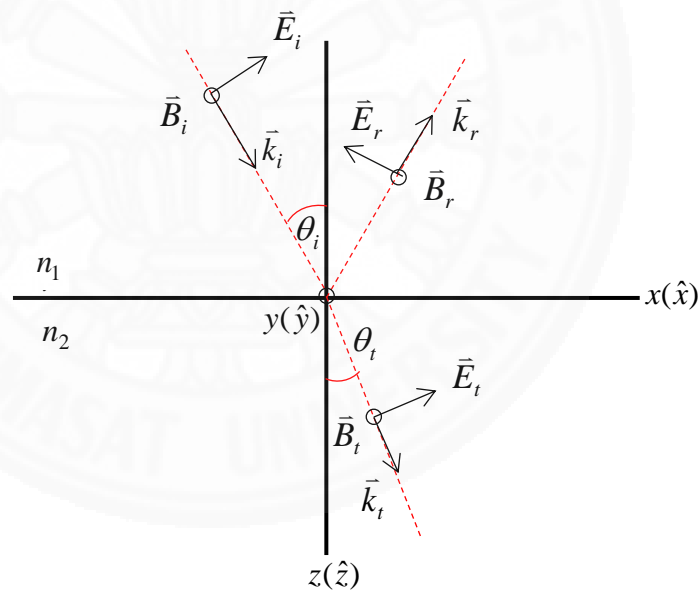
$$\vec{E}_i \left(\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta_i - \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta_t \right) = \vec{E}_r \left(\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta_r + \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta_t \right) \quad (3.5)$$

ซึ่งสามารถเขียนสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนในกรณีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (r_s) และสัมประสิทธิ์คลื่นส่งผ่านกรณีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (t_s) ได้ดังนี้

$$r_s = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (3.6)$$

$$t_s = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (3.7)$$

กรณี 2 สนามไฟฟ้าขนานกับระนาบตกกระทบ



ภาพที่ 3.2 เวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสงโพลาไรซ์เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับระนาบตกกระทบ

จากภาพที่ 3.2 เขียนสนามแม่เหล็กได้เป็น

$$\vec{B}_i + \vec{B}_r = \vec{B}_t \quad (3.8)$$

$$\text{เมื่อ } \vec{B} = \frac{n}{c} \vec{E}$$

$$\vec{E}_i \cos \theta_i - \vec{E}_r \cos \theta_r = E_t \cos \theta_t \quad (3.9)$$

$$\frac{n_1}{c} \vec{E}_i + \frac{n_1}{c} \vec{E}_r = \frac{n_2}{c} \vec{E}_t \Rightarrow \vec{E}_t = \frac{n_1}{n_2} (\vec{E}_i + \vec{E}_r) \quad (3.10)$$

แทนสมการ (3.10) ในสมการ (3.9) จะได้

$$\vec{E}_i \cos \theta_i - \vec{E}_r \cos \theta_r = \frac{n_1}{n_2} (\vec{E}_i + \vec{E}_r) \cos \theta_t \quad (3.11)$$

$$n_2 \vec{E}_i \cos \theta_i - n_2 \vec{E}_r \cos \theta_r = n_1 (\vec{E}_i + \vec{E}_r) \cos \theta_t \quad (3.12)$$

$$\vec{E}_i (n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t) = \vec{E}_r (n_2 \cos \theta_r + n_1 \cos \theta_t) \quad (3.13)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนในกรณีสนามไฟฟ้าขนานกับระนาบตกกระทบเป็น

$$r_p = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_r + n_1 \cos \theta_t} \quad (3.14)$$

และจากสมการที่ (3.10) จะได้

$$\vec{E}_r = \frac{n_2}{n_1} \vec{E}_t - \vec{E}_i \quad (3.15)$$

แทนสมการที่ (3.15) ในสมการ (3.9) จะได้

$$\vec{E}_i \cos \theta_i - \left(\frac{n_2}{n_1} \vec{E}_t - \vec{E}_i \right) \cos \theta_r = \vec{E}_t \cos \theta_t \quad (3.16)$$

$$n_1 \vec{E}_i \cos \theta_i - (n_2 \vec{E}_t - n_1 \vec{E}_i) \cos \theta_r = n_1 \vec{E}_t \cos \theta_t \quad (3.17)$$

$$n_1 \vec{E}_i \cos \theta_i - n_2 \vec{E}_t \cos \theta_r + n_1 \vec{E}_i \cos \theta_r = n_1 \vec{E}_t \cos \theta_t \quad (3.18)$$

$$2n_1 \vec{E}_i \cos \theta_i = n_1 \vec{E}_t \cos \theta_t + n_2 \vec{E}_t \cos \theta_r \quad (3.19)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์คลื่นส่งผ่านในกรณีสนามไฟฟ้าขนานกับระนาบตกกระทบเป็น

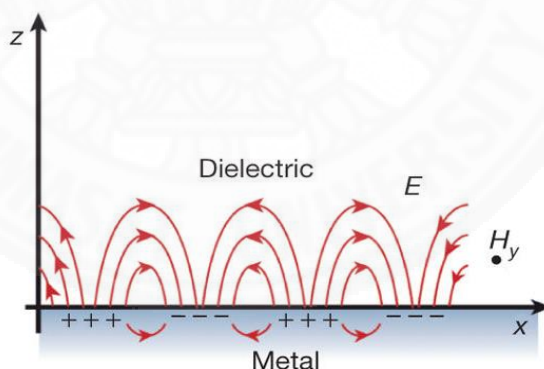
$$t_p = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_i} \quad (3.20)$$

3.2 หลักการของคลื่นผิวพลาสมอน

3.2.1 นิยามคลื่นผิวพลาสมอน

คลื่นผิวพลาสมอน (Surface Plasmon; SP) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ตามรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและโลหะตัวนำ โดยที่แอมพลิจูดของคลื่นลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในทิศตั้งฉากกับรอยต่อ คลื่นผิวพลาสมอนเกิดขึ้นจากการสั่นสะสมของอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวโลหะ ส่วนการสั่นพ้องคลื่นผิวพลาสมอน (Surface Plasmon Resonance; SPR) เกิดจากการสั่นพ้องของคลื่นผิวพลาสมอนตามรอยต่อของไดอิเล็กตริกกับโลหะกับแสงที่ใช้กระตุ้นโดยเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างแสงและอิเล็กตรอนอิสระในโลหะภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม [26] โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2.2 การกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยใช้แสง



ภาพที่ 3.3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับวัสดุไดอิเล็กตริก [27]

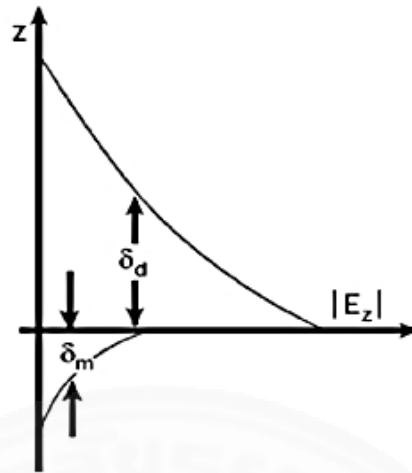
เมื่อคลื่นแสงที่มีสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวขนาน (Parallel polarized light หรือ P-polarized light) กับระนาบตกกระทบ (Plane of incidence) ตกกระทบบนรอยต่อและสะท้อนกลับด้วยมุมเท่ากับมุมสั่นพ้องของคลื่นผิวพลาสมอน (Resonance angle of surface plasmon) จากนั้นคลื่นแสงจะถูกดูดกลืนพลังงานโดยอิเล็กตรอนอิสระในโลหะจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการสั่นของประจุในผิวโลหะที่รอยต่อระหว่างโลหะและไดอิเล็กตริก และสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของแสง

กระตุ้นทำให้เกิดกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นมากจะประพุดิตัวเป็นลบในทางตรงกันข้ามกลุ่มที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยกว่าจะประพุดิตัวเป็นบวกจากความต่างศักย์นี้จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับไดอิเล็กตริกซึ่งก็คือ คลื่นผิวพลาสมอนดังภาพที่ 3.3 โดยที่แอมพลิจูดของคลื่นลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ตามแนวแกน x เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานโฟตอนไปยังการสั่นของอิเล็กตรอนในโลหะ

โดยทั่วไปค่าดัชนีหักเหของไดอิเล็กตริกมีค่ามากกว่าของโลหะที่ความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็น เช่น ทองมีค่าดัชนีหักเห $n_m = 0.608$ ที่ความยาวคลื่น 516.6 nm และ $n_m = 0.306$ ที่ความยาวคลื่น 563.6 nm เนื่องจาก $n_d > n_m$ สำหรับความยาวคลื่นดังกล่าวค่ามากที่สุดของ θ_t คือ 90° และมุมมีค่าจำกัดในกรณีนี้เรียกลมุมตกกระทบว่า มุมวิกฤติ ดังสมการต่อไปนี้

$$\sin \theta_c = \frac{n_m}{n_d} \quad (3.21)$$

เมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤติ คลื่นตกกระทบจะมีโมเมนตัมตามผิวระนาบมากกว่าโมเมนตัมของคลื่นที่เคลื่อนที่ในโลหะ ถ้าคลื่นสนามไฟฟ้าตามแนวขนานตกกระทบบนรอยต่อ การสั่นของสนามไฟฟ้าจะเป็นสาเหตุให้ประจุบนผิวที่รอยต่อระหว่างโลหะและไดอิเล็กตริกเกิดการสั่นสะสม แม้ว่าจะเกิดการสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อแต่ยังมีการสั่นของประจุซึ่งทำให้เกิดสนามอีวานเนสเซนส์ (Evanescent field) ซึ่งค่าแอมพลิจูดมีค่าลดลงในทิศตั้งฉากกับระนาบรอยต่อ ดังภาพที่ 3.4 ที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤติ ระยะการลดลงของสนามอีวานเนสเซนส์ในแนวแกน z เป็นอนันต์ในขณะที่มุมตกกระทบเพิ่มขึ้น ระยะจะมีค่าลดลงจนประมาณเท่ากับค่าความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นสนามอีวานเนสเซนส์ที่มุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤติจะใช้เป็นตัวช่วยในการเชื่อมต่อทางแสง (Coupling radiation) เพื่อให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอน



ภาพที่ 3.4 แอมพลิจูดคลื่นสนามไฟฟ้าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล [27]

จากภาพที่ 3.2 ค่า E_x มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงที่รอยต่อ เนื่องจากอยู่ในแนวขนานกับรอยต่อแต่สำหรับ E_z ซึ่งตั้งฉากกับรอยต่อจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนเนื่องจาก $D_z = \epsilon_d \epsilon_0 E_{zd} = \epsilon_m \epsilon_0 E_{zm}$ และความไม่ต่อเนื่องของสนามไฟฟ้าในแนวแกน z เป็นผลทำให้การโพลาไรเซชันมีการเปลี่ยนแปลงที่รอยต่อ จากการพิจารณาเหตุผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าตามขวาง (S-polarization) ไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุที่รอยต่อได้ แต่สนามไฟฟ้าแนวขนาน (P-polarization) ทำให้ประจุโพลาไรเซชันเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา (Time-dependent polarization charges) ที่รอยต่อได้ ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าแนวตั้งฉากเท่านั้น เนื่องจากต้องการสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับรอยต่อเพื่อการสร้างประจุที่ผิว [27]

พิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อระนาบ $x-y$ ได้สมการของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของไดอิเล็กตริกและโลหะ [27] ดังนี้

ในกรณี $z > 0$

$$\vec{E}_d = (\vec{E}_{d_x}, 0, \vec{E}_{d_z}) e^{(-k_{d_z} z)} e^{i(k_x x - \omega t)} \quad (3.22)$$

$$\vec{H}_d = (0, \vec{H}_{d_y}, 0) e^{(-k_{d_z} z)} e^{i(k_x x - \omega t)} \quad (3.23)$$

ในกรณี $z < 0$

$$\vec{E}_m = (\vec{E}_{m_x}, 0, \vec{E}_{m_z}) e^{(k_{m_z} z)} e^{[i(k_x x - \omega t)]} \quad (3.24)$$

$$\vec{H}_m = (0, \vec{H}_{m_y}, 0) e^{(k_{m_z} z)} e^{[i(k_x x - \omega t)]} \quad (3.25)$$

แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแทนด้วยสัญลักษณ์ \vec{E} และ \vec{H} ตามลำดับ ความถี่เชิงมุม ω เวกเตอร์คลื่น \vec{k} โดยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอธิบายได้ด้วยสมการแมกซ์เวลล์พิจารณาสมการ (10) ในรูปของสมการแมกซ์เวลล์ $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ จะได้

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \left(\hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot (E_x \hat{x} + E_z \hat{z}) \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_{d_x}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{E}_{d_z}}{\partial z} = 0 \quad (3.27)$$

แทนค่า $\frac{\partial \vec{E}_d}{\partial x} = (\vec{E}_{d_x}) e^{-ik_{d_z} z + (k_x x - \omega t)} (ik_x)$

และ $\frac{\partial \vec{E}_d}{\partial z} = (\vec{E}_{d_z}) e^{-ik_{d_z} z + (k_x x - \omega t)} (-k_{d_z})$ ลงในสมการที่ (3.26) จะได้

$$(\vec{E}_{d_x}) e^{-ik_{d_z} z + (k_x x - \omega t)} (ik_x) + e^{-ik_{d_z} z + (k_x x - \omega t)} (-k_{d_z}) (\vec{E}_{d_z}) = 0 \quad (3.28)$$

$$\vec{E}_{d_z}(k_{d_z}) = \vec{E}_{d_x}(ik_x) \quad (3.29)$$

$$\vec{E}_{d_z} = i \frac{k_x}{k_{d_z}} \vec{E}_{d_x} \quad (3.30)$$

ในการทำงานเดียวกันแทนสมการ (3.23) ในสมการแมกซ์เวลล์ $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ โดยแทนค่า

$$\frac{\partial \vec{E}_m}{\partial x} = (\vec{E}_{m_x}) e^{ik_{m_z} z + (k_x x - \omega t)} (ik_x) \quad (3.31)$$

และ
$$\frac{\partial \bar{E}_m}{\partial z} = (\bar{E}_{m_z}) e^{|ik_{m_z}z+(k_x x - \omega t)|} k_{m_z} \quad (3.32)$$

แทนลงในสมการ (3.26) จะได้

$$(\bar{E}_{m_x}) e^{|ik_{m_z}z+(k_x x - \omega t)|} (ik_x) + e^{|ik_{m_z}z+(k_x x - \omega t)|} k_{m_z} (\bar{E}_{m_z}) = 0 \quad (3.33)$$

$$\bar{E}_{m_z} (k_{m_z}) = -\bar{E}_{m_x} (ik_x) \quad (3.34)$$

$$\bar{E}_{m_z} = -i \frac{k_x}{k_{m_z}} \bar{E}_{m_x} \quad (3.35)$$

เมื่อต้องการความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะแทนค่าสมการ (3.22) และสมการ

(3.23) ในสมการแมกซ์เวลล์ $\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}$ จะได้

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \bar{E}_{d_x} & \bar{E}_{d_z} \end{vmatrix} = -\bar{E}_{d_z} e^{|-ik_{d_z}z+(k_x x - \omega t)|} (ik_x) + \bar{E}_{d_x} e^{|-ik_{d_z}z+(k_x x - \omega t)|} (-k_{d_z}) \quad (3.36)$$

และ
$$-\frac{1}{c} \left(\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right) = -\frac{1}{c} \frac{\partial \bar{H}_d}{\partial t} = -\frac{1}{c} \bar{H}_{d_y} e^{|-ik_{d_z}z+(k_x x - \omega t)|} (-i\omega) \quad (3.37)$$

$$= \frac{1}{c} \bar{H}_{d_y} e^{|-ik_{d_z}z+(k_x x - \omega t)|} i\omega \quad (3.38)$$

$$= ik \bar{H}_{d_y} e^{|-ik_{d_z}z+(k_x x - \omega t)|} ; k = \frac{\omega}{c} \quad (3.39)$$

เมื่อให้สมการ (3.36) เท่ากับสมการ (3.39) จะได้

$$-E_{d_z} ik_x - k_{d_z} E_{d_x} = ik H_{d_y} \quad (3.40)$$

ในทำนองเดียวกันแทนสมการ (3.24) และสมการ (3.25) ในสมการแมกซ์เวลล์ $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$

จะได้

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \vec{E}_{m_x} & \vec{E}_{m_z} \end{vmatrix} = -\vec{E}_{m_z} e^{ik_{m_z} z + (k_x x - \omega t)} (ik_x) + \vec{E}_{m_x} e^{ik_{m_z} z + (k_x x - \omega t)} (ik_{m_x}) \quad (3.41)$$

$$\text{และ} \quad -\frac{1}{c} \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}_m}{\partial t} = -\frac{1}{c} \vec{H}_{m_y} e^{ik_{m_z} z + (k_x x - \omega t)} (-i\omega) \quad (3.42)$$

$$= \frac{1}{c} \vec{H}_{m_y} e^{ik_{m_z} z + (k_x x - \omega t)} i\omega \quad (3.43)$$

$$= ik \vec{H}_{m_y} e^{ik_{m_z} z + (k_x x - \omega t)} \quad ; \quad k = \frac{\omega}{c} \quad (3.44)$$

เมื่อให้สมการ (3.41) เท่ากับสมการ (3.44) จะได้

$$E_{m_x} k_{m_z} - ik_x E_{m_z} = ik H_{m_y} \quad (3.45)$$

เมื่อต้องการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริก สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยแทนสมการ (3.30) ในสมการ (3.40) จะได้

$$-k_{d_z} E_{d_x} - ik_x \frac{E_{d_x}}{k_{d_z}} = ik H_{d_y} \quad (3.46)$$

$$-k_{d_z} E_{d_x} + \frac{k_x^2}{k_{d_z}} E_{d_x} = ik H_{d_y} \quad (3.47)$$

เมื่อคูณด้วย k_{d_z} ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$-k_{d_z} E_{d_x} + k_x^2 E_{d_x} = ik H_{d_y} k_{d_z} \quad (3.48)$$

และแทนค่า $k_{d_z}^2 = k_x^2 - k^2 \varepsilon_d$ ลงในสมการ (3.48) จะได้

$$(-k_x^2 + \varepsilon_d k^2 + k_x^2) E_{d_x} = ik H_{d_y} k_{d_z} \quad (3.49)$$

$$\varepsilon_d k E_{d_x} = ik_{d_z} H_{d_y} \quad (3.50)$$

ในทำนองเดียวกันแทนสมการ (3.35) ในสมการ (3.45) จะได้

$$k_{m_z} E_{m_x} - ik_x \left(\frac{-ik_x}{k_{m_z}} \right) E_{m_x} = ik H_{m_y} \quad (3.51)$$

$$\left(k_{m_z} - \frac{k_x^2}{k_{m_z}} \right) E_{m_x} = ik H_{m_y} \quad (3.52)$$

คูณด้วย k_{m_z} ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$(k_{m_z}^2 - k_x^2) E_{m_x} = ik k_{m_z} H_{m_y} \quad (3.53)$$

และแทนค่า $k_{m_z}^2 = k_x^2 - k^2 \varepsilon_m$ ลงในสมการ (3.53) จะได้

$$(k_x^2 - \varepsilon_m k^2 - k_x^2) E_{m_x} = ik k_{m_z} H_{m_y} \quad (3.54)$$

$$k \varepsilon_m E_{m_x} = -ik_{m_z} H_{m_y} \quad (3.55)$$

เมื่อพิจารณาที่รอยต่อระหว่างสองตัวกลางระหว่าง ($z = 0$) ค่า $H_{d_y} = H_{m_y}$ และ $E_{d_x} = E_{m_x}$ และให้สมการ (3.50) เท่ากับสมการ (3.55) จะได้

$$\frac{k_{d_z}}{k_{m_z}} = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_m} \quad (3.56)$$

แทนค่า $k_{d_z}^2 = k_x^2 - k^2 \varepsilon_d$ และ $k_{m_z}^2 = k_x^2 - k^2 \varepsilon_m$ ลงในสมการ (3.56) จะได้

$$\frac{(k_x^2 - k^2 \varepsilon_d)^{1/2}}{(k_x^2 - \varepsilon_m k^2)^{1/2}} = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_m} \quad (3.57)$$

$$\frac{(k_x^2 - \varepsilon_d k^2)}{(k_x^2 - \varepsilon_m k^2)} = \frac{\varepsilon_d^2}{\varepsilon_m^2} \quad (3.58)$$

$$k_x^2 (\varepsilon_m^2 - \varepsilon_d^2) = k^2 \left[\varepsilon_d \varepsilon_m^2 - \varepsilon_m \varepsilon_d^2 \right] \quad (3.59)$$

$$k_x^2 = k^2 \left(\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m^2 - \varepsilon_m \varepsilon_d^2}{\varepsilon_m^2 - \varepsilon_d^2} \right) \quad (3.60)$$

$$= k^2 \left[\varepsilon_m \frac{(\varepsilon_d \varepsilon_m)}{\varepsilon_m^2 - \varepsilon_d^2} - \varepsilon_d \frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m^2 - \varepsilon_d^2} \right] \quad (3.61)$$

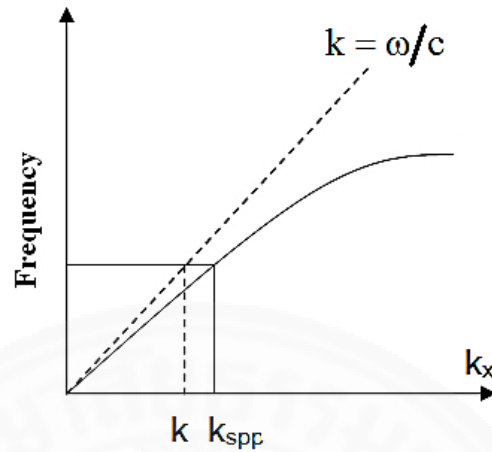
$$= k^2 \varepsilon_d \varepsilon_m \left[\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m^2 - \varepsilon_d^2} \right] \quad (3.62)$$

$$k_x^2 = k^2 \varepsilon_d \varepsilon_m \left[\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{(\varepsilon_m - \varepsilon_d)(\varepsilon_m + \varepsilon_d)} \right] \quad (3.63)$$

$$k_x = k \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m}} \quad (3.64)$$

ในกรณีค่าเวกเตอร์คลื่นของคลื่นผิวพลาสมอนโพลาไรตอน (k_{spp}) มีค่าเท่ากับ k_x จึงได้ความสัมพันธ์การกระจายสำหรับคลื่นผิวพลาสมอนเป็น

$$k_{spp} = k_x = k \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m}} \quad (3.65)$$

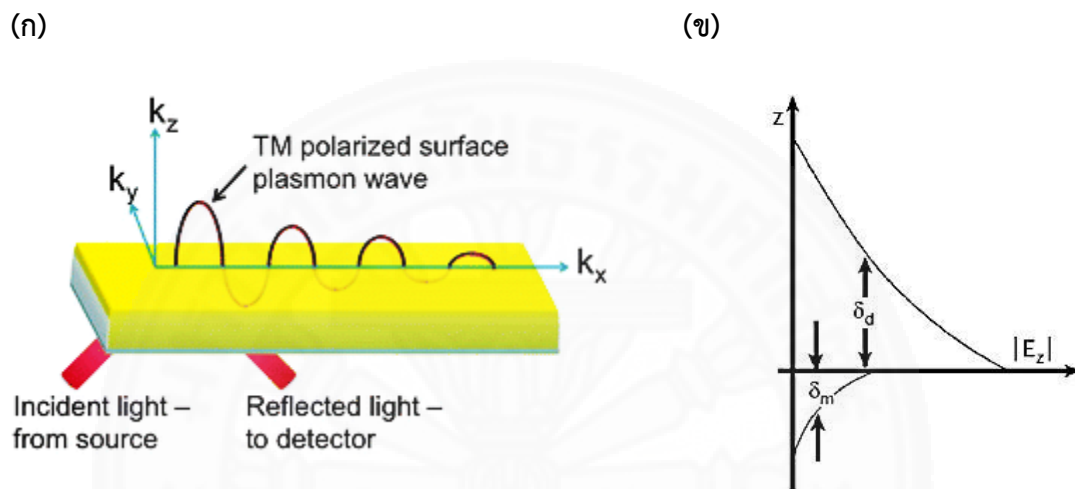


ภาพที่ 3.5 แนวโน้มการกระจาย (dispersion) ของคลื่นผิวพลาสมอนโพลาไรตอน k_{spp} และเวกเตอร์คลื่นในสุญญากาศ k เมื่อโมเมนตัมของคลื่นผิวพลาสมอนมีค่ามากกว่าโมเมนตัมของแสงในสุญญากาศที่ความถี่เท่ากัน (ω) [27]

จากสมการ (3.65) พบว่าเส้นกราฟของคลื่นผิวพลาสมอนไม่ตัดกับเส้นกราฟของแสงในสุญญากาศเนื่องจากโมเมนตัมของคลื่นผิวพลาสมอนโพลาไรตอนมีค่ามากกว่าแสงในสุญญากาศที่ความถี่เดียวกันเสมอ ดังภาพที่ 3.5 ดังนั้นจะพบว่าไม่สามารถใช้คลื่นแสงไปตกกระทบที่ผิวโลหะโดยตรงเพื่อกระตุ้นคลื่นผิวพลาสมอนได้ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการเชื่อมต่อทางแสง (Optical coupling mechanism) โดยอาศัยปริซึมที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อ (Coupler) จึงจะสามารถเพิ่มค่าโมเมนตัมของแสงในตัวกลางให้เท่ากับโมเมนตัมของคลื่นผิวพลาสมอนได้

3.2.3 ความลึกในการซึม (penetration depth)

การกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนโพลาไรตอนนั้นเกี่ยวเนื่องกับคลื่นอิวานเนสเซนต์ที่สามารถซึมเข้าไยยังเนื้อวัสดุของไดอิเล็กตริกและโลหะโดยแอมพลิจูดของคลื่นจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในทิศตั้งฉากกับรอยต่อดังภาพ 3.6 [28] ดังนี้



ภาพที่ 3.6 (ก) คลื่นสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ทะลุเข้าไปยังตัวกลางโลหะและไดอิเล็กตริก [29]

(ข) แอมพลิจูดคลื่นสนามไฟฟ้าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล [27]

กรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ซึมเข้าไยยังวัสดุไดอิเล็กตริก (δ_d)

$$(\delta_d = 1/k_{d_z}) \quad (3.66)$$

จากสมการ $k_{d_z}^2 = k_x^2 - k^2 \varepsilon_d$ และ สมการ (3.65) แทนลงในสมการ (3.66) จะได้

$$\delta_d^2 = 1/k_{d_z}^2 \quad (3.67)$$

$$= \frac{1}{k_x^2 - \varepsilon_d k^2} \quad (3.68)$$

$$= \frac{1}{k^2 \left(\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m} \right) - \varepsilon_d k^2} \quad (3.69)$$

$$= \frac{1}{k^2 \left(\frac{\varepsilon_d + \varepsilon_m}{\varepsilon_d \varepsilon_m - (\varepsilon_d^2 + \varepsilon_d \varepsilon_m)} \right)} \quad (3.70)$$

$$\delta_d = \frac{1}{k} \left| \frac{\varepsilon_d + \varepsilon_m}{-\varepsilon_d^2} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (3.71)$$

ตัวอย่างการคำนวณระยะการซึมของสนามไฟฟ้าในอากาศโดยให้มีความยาวคลื่นแสงตกกระทบเท่ากับ 633 nm เพื่อไปกระตุ้นบนฟิล์มทองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\varepsilon_m = -10.575 + 1.2765i$ [30] จะได้ระยะความลึกที่สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ลงไปยังไดอิเล็กตริกที่อากาศ (δ_{air}) เท่ากับ 312 nm ดังแสดงการคำนวณต่อไปนี้

จากสมการ (3.71)

$$\begin{aligned} \delta_{air} &= \frac{633}{2\pi} \left| \frac{1.00013824 - 10.575}{-(1.00013824)^2} \right|^{\frac{1}{2}} \\ &= 312 \text{ nm} \end{aligned}$$

เช่นเดียวกับกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ทะลุเข้าไปยังโลหะ (δ_m)

$$\delta_m^2 = 1/k_m^2 \quad (3.72)$$

$$= \frac{1}{k_x^2 - \epsilon_m k^2} \quad (3.73)$$

$$= \frac{1}{k^2 \left(\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \right) - \epsilon_m k^2} \quad (3.74)$$

$$= \frac{1}{k^2 \left(\frac{\epsilon_d + \epsilon_m}{\epsilon_d \epsilon_m - (\epsilon_m^2 + \epsilon_d \epsilon_m)} \right)} \quad (3.75)$$

$$\delta_m = \frac{1}{k} \left| \frac{\epsilon_d + \epsilon_m}{-\epsilon_m^2} \right|^{1/2} \quad (3.76)$$

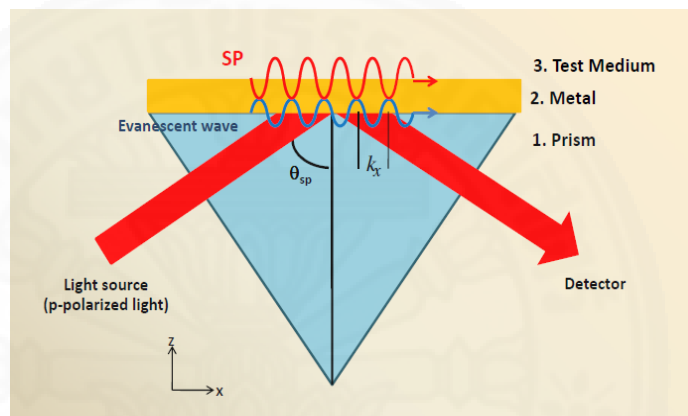
ตัวอย่างการคำนวณระยะการซึมของสนามไฟฟ้าในฟิล์มทองโดยให้มีความยาวคลื่นแสงตกกระทบเท่ากับ 633 nm เพื่อไปกระตุ้นบนฟิล์มทองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของโลหะ $\epsilon_m = -10.575 + 1.2765i$ [30] จะได้ระยะความลึกที่สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ลงไปยังโลหะฟิล์มทองเท่ากับ 30 nm ดังแสดงการคำนวณต่อไปนี้

จากสมการ (3.76)

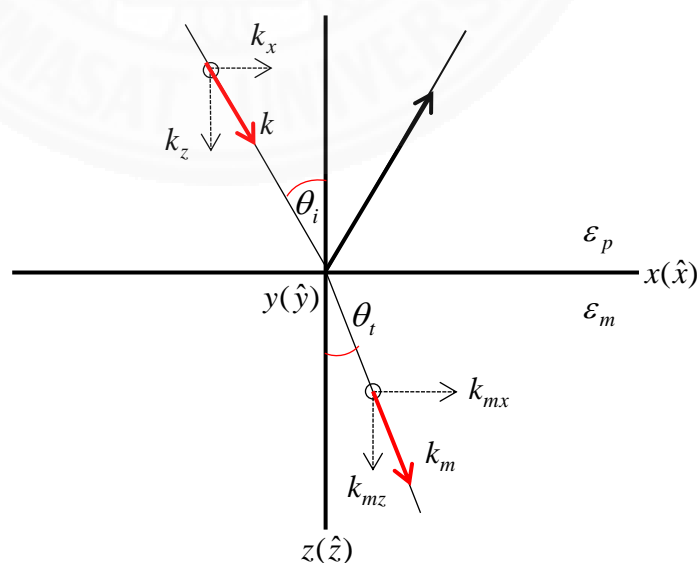
$$\begin{aligned} \delta_{metal} &= \frac{633}{2\pi} \left| \frac{1.00013824 - 10.575}{-(10.575)^2} \right|^{1/2} \\ &= 30\text{nm} \end{aligned}$$

3.3 เทคนิคเครืทส์แมนน์ (Kretschmann technique)

เครืทส์แมนน์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยใช้ปริซึม ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ที่ฐานของปริซึมจะเคลือบด้วยฟิล์มโลหะที่มีความหนาประมาณ 50 nm และจะให้ฟิล์มโลหะสัมผัสกับตัวกลางที่จะใช้ตรวจวัดโดยที่ค่าดัชนีหักเหของสารต้องมีค่ามากกว่าค่าดัชนีหักเหของปริซึม โลหะที่นิยมใช้จะเป็นทองเนื่องจากมีความเสถียรและไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการตรวจวัดด้วย



ภาพที่ 3.7 เทคนิคเครืทส์แมนน์สำหรับกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยใช้ปริซึมเป็นตัวเชื่อมทางแสง k_m



ภาพที่ 3.8 การสะท้อนและหักเหของแสงที่รอยต่อระหว่างปริซึมกับอากาศ

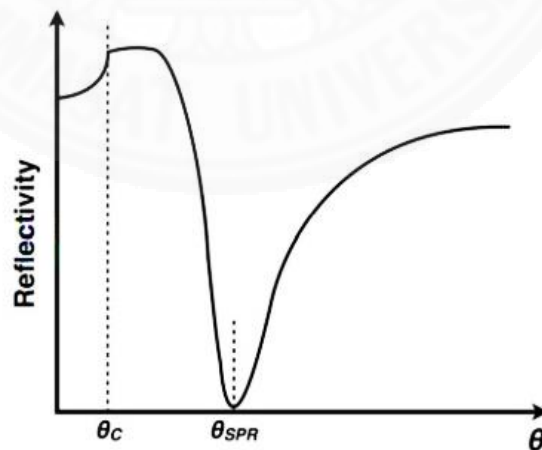
จากภาพที่ 3.8 สนามไฟฟ้าแนวขนานเคลื่อนที่ผ่านด้านหนึ่งของปริซึมที่มุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤตที่รอยต่อระหว่างปริซึมกับไดอิเล็กตริก การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection) จะสร้างคลื่นอิวานเนสเซนส์ซึ่งอยู่ในองค์ประกอบบนระนาบเวกเตอร์คลื่น ดังแสดงโดยสมการต่อไปนี้ [26]

$$k_p = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_p} \sin \theta_i \quad (3.77)$$

เมื่อ ϵ_p คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของปริซึม และถ้าเวกเตอร์คลื่นของคลื่นอิวานเนสเซนส์เท่ากับเวกเตอร์คลื่นในการเคลื่อนที่ของคลื่นผิวพลาสมอนที่มุมตกกระทบค่าหนึ่ง เรียกว่า มุมเอสพาร์ ทำให้เกิดการกระตุ้นของคลื่นผิวพลาสมอนด้วยเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_p} \sin \theta_{SPR} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (3.78)$$

ถ้าแสงสะท้อนถูกวัดเป็นฟังก์ชันของมุมตกกระทบ ดังนั้นที่มีความเข้มแสงต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่มุม θ_{SPR} ในการเกิดคลื่นผิวพลาสมอน ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างสเปกตรัมของ SPR ที่แสดงจุดต่ำสุดของกราฟที่มุมสั้นพ้อง [26]

บทที่ 4

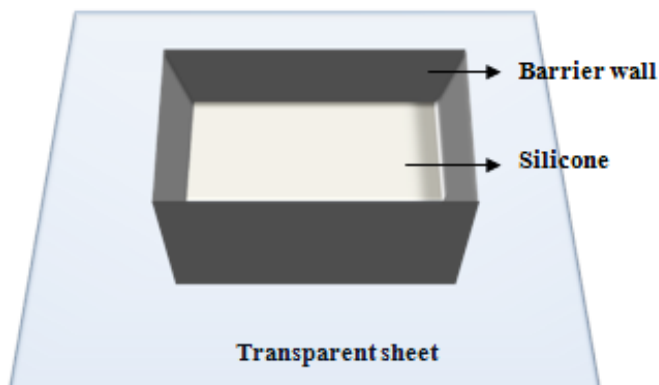
วิธีการวิจัย

4.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทางแสง (ปริซึม)

การออกแบบมาตรฐานนี้หักเหจะคำนึงถึงช่วงมุมตกกระทบของแสงผ่านปริซึมมายังกล้องหน้าสมาร์ตโฟนโดยใช้โปรแกรม Raytrace โดยตัวโปรแกรมจะคำนวณทิศทางหักเหของแสงตามกฎของสเนลล์ กำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงในโปรแกรมมีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 630 nm และค่าดัชนีหักเหของตัวปริซึมมีค่าเท่ากับ 1.517 ซึ่งทราบค่าจากการวัดดัชนีหักเหของอีพ็อกซีใสด้วยมาตรฐาน (Abbe-2WAJ) ในการกำหนดช่วงมุมของแสงตกกระทบจะสอดคล้องกับค่าดัชนีหักเหของสารที่นำมาตรวจวัดตั้งนั้นจึงต้องออกแบบอุปกรณ์บางส่วนให้มีลักษณะโค้งที่แตกต่างกันซึ่งเป้าหมายการออกแบบลักษณะเลนส์ดังกล่าวเพื่อให้แสงตกกระทบมีลักษณะคล้ายพัด (Fan-shaped) โดยช่วงมุมตกกระทบนี้ครอบคลุมเงื่อนไขในการกระตุ้นให้เกิด คลื่นผิวพลาสมอนที่รอยต่อระหว่างปริซึมและตัวกลางที่เป็นของเหลวได้ เมื่อได้รูปแบบของปริซึมที่ต้องการแล้วจึงวัดความหนาของแผ่นกระจกสไลด์ที่จำลองในโปรแกรมออกแบบสองมิติออกมาในหน่วยพิกลเซลและเทียบกับความหนาในหน่วยมิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อนำขนาดในแต่ละส่วนของ มาตรฐานหักเหที่ออกแบบได้ไปสร้างปริซึมโดยผู้วิจัยจะผนวกอุปกรณ์ทางแสงทุกตัวให้เป็นชิ้นเดียวกันโดยให้มีระยะห่างและขนาดถูกต้องตามค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Raytrace

เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ทุกตัวจากโปรแกรม Raytrace ผู้วิจัยจึงได้ทำตัวแม่แบบสำหรับการหล่อเรซินเพื่อทำปริซึมจากวัสดุที่เป็นอีพ็อกซีแบบใส โดยผู้วิจัยได้ออกแบบตัวแม่แบบโดยใช้โปรแกรม Autodesk Inventor Professional 2014 ซึ่งเป็นโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ ตามขนาดและรูปร่างตามค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม Raytrace จากนั้นจึงพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Flashforge Creator X) ด้วยเส้นพลาสติก Acrylonitrile-Butadiene Styrene (ABS) โดยมีการตั้งค่าสำหรับการพิมพ์ตามตารางที่ 4.1 จึงได้ทำการหล่อแบบด้วยซิลิโคนเพื่อให้ได้แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปด้วยอีพ็อกซีใส

การทำแม่แบบซิลิโคน (ซิลิโคน F585) จะใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางซิลิโคนกับตัวเร่งแข็งอยู่ที่ 100 g ต่อ 2 g ผสมและกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที แล้วเทลงบนแม่แบบดังภาพที่ 4.1 จากนั้นทิ้งให้ยางซิลิโคนเซตตัวเป็นเวลา 24 ชม. ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25°C จนได้แม่แบบซิลิโคนที่พร้อมใช้ในการหล่ออีพ็อกซีใส



ภาพที่ 4.1 การหล่อแม่แบบซิลิโคน

ตารางที่ 4.1

การตั้งค่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

พารามิเตอร์ของเครื่องพิมพ์	ค่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้
Extruder Temperature	235°C
Heated bed Temperature	110°C
Primary layer height	0.15 mm
Interior fill percentage	15%

ขั้นตอนการเตรียมฮีฟ็อกซีไสเริ่มจากการผสมตัวเรซินกับตัวทำแข็งในสัดส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก แล้วกวนให้ส่วนผสมทั้งสองส่วนเข้าเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งในขณะการกวน จะเกิดฟองอากาศ ดังนั้นภายหลังการกวนจึงต้องดูดฟองอากาศออกเป็นเวลา 20 นาทีด้วย ปัมสุญญากาศที่ต่อกับโถดูดความชื้น (Desiccator) จากนั้นจึงเทฮีฟ็อกซีลงในแม่แบบซิลิโคน แล้วทิ้งไว้ให้แข็งตัวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก็จะได้ปริซึมที่มีความใสที่พร้อมใช้ในการทดลองต่อไป

4.2 ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

แอนดรอยด์เป็นระบบปฏิบัติการแบบเปิดสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต จากข้อมูลของกูเกิ้ล (Google) ระบุว่าขณะนี้มียุโรปกรณ์ที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์อยู่หลายร้อยล้านเครื่องทั่วโลกในกว่า 190 ประเทศ จากความนิยมดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดจะใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์มาใช้สำหรับงานวิจัยในโครงการนี้ จึงต้องมีการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องมือมาตรดัดชนีหักเหให้สามารถทำงานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ได้

ซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของหน้าจอและกล้องหน้าของโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 การทำงานของหน้าจอ

1. ออกแบบแผนผังของหน้าจอ โดยแบ่งเป็นส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเครื่องมาตรดัดชนีหักเห และส่วนแสดงผลของการวัด
2. สร้างปุ่มกดและกรอบรับการพิมพ์ข้อมูล เพื่อป้อนอินพุตจำนวนภาพที่ต้องการถ่ายและระยะเวลาในการถ่ายภาพแบบต่อเนื่อง

4.2.2 การทำงานของกล้องถ่ายภาพ

1. ควบคุมกล้องให้ถ่ายภาพตามจำนวนและระยะเวลาในการถ่ายภาพ ตามที่กำหนดไว้จากค่าอินพุตที่หน้าจอ
2. ควบคุมค่าความไวของกล้อง (ISO) และสมดุลแสงสีขาว (White balance) ค่าที่ใช้วัดปริมาณแสง (Exposure value) เพื่อให้ได้ภาพที่มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด

4.2.3 การเก็บข้อมูล

หลังจากถ่ายภาพแล้วให้ทำการเก็บภาพไว้ในโฟลเดอร์ที่ผู้ใช้ต้องการ เพื่อความสะดวกของผู้ใช้ในการเข้าถึงข้อมูล เมื่อต้องการถ่ายโอนข้อมูลเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์ผลการทดลองภายหลัง

4.3 ค่าความไว (Sensitivity) และค่าความละเอียด (Resolution) ของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้น

4.3.1 หาค่าความไวของเครื่องมือ

(1) เตรียมสารละลายเอทานอลในน้ำกลั่นให้มีค่าความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 6 ค่า โดยมีค่าสัดส่วนโดยมวลของเอทานอลต่อน้ำเท่ากับ 0% 10% 20% 30% 40% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งทราบค่าดัชนีหักเหจากการวัดด้วยมาตรดัชนีหักเหมาตรฐาน (Standard refractometer Abbe-2WAJ) โดยได้แสดงค่าดัชนีหักเหในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2

ค่าดัชนีหักเหของสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นโดยมวลตั้งแต่ 0-50% ซึ่งวัดด้วยมาตรดัชนีหักเหมาตรฐาน (Abbe-2WAJ) ที่อุณหภูมิ 26.3°

ความเข้มข้นแอลกอฮอล์ (w/w%)	ดัชนีหักเห (n)
0	1.3333
10	1.3415
20	1.3489
30	1.3540
40	1.3585
50	1.3616

(2) นำสารละลายแอลกอฮอล์ตามตารางที่ 4.2 ไปตรวจวัดสัญญาณเอสพาร์บนสมาร์ตโฟนเพื่อหาความเข้มของแสงตกกระทบที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ ในการตรวจวัดสัญญาณเอสพาร์บนนั้นทำได้โดยการหยดสารละลายแอลกอฮอล์ประมาณ 1-2 หยดบนฟิล์มทองที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ที่วางอยู่บนปริซึมโดยใช้น้ำมันที่มีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.5 เป็นตัวเชื่อมเพื่อไม่ให้มีฟองอากาศ จากนั้นจึงวิเคราะห์สัญญาณเอสพาร์บนที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องหน้าของสมาร์ตโฟนโดยใช้โปรแกรม ImageJ

(3) วิเคราะห์หาค่าความไวของมาตรดัชนีหักเหจากผลการทดลองในข้อที่ 2 โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์กับค่าดัชนีหักเหของสารละลายเอทานอลตามตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ค่าความไวของมาตรดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับค่าความชันของกราฟที่ได้จากการทดลอง

4.3.2 หาค่าความละเอียดของเครื่องมือ

ในการหาค่าความละเอียดของมาตรวัดดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นได้วิเคราะห์จากระดับความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์ต่ำสุดจากภาพถ่ายสัญญาณเอสพีอาร์แล้วจึงคำนวณหาค่าความละเอียดโดยอาศัยค่าความไวของเครื่องมือดังสมการ

$$\text{ค่าความละเอียด (RIU)} = \frac{1}{\text{ค่าความไว (Int/RIU)}} \times \frac{\text{ระดับสัญญาณต่ำสุด (Int)}}{100} \times \text{RGB (Red)}$$

4.4 การทดสอบมาตรดัชนีหักเหด้วยการวัดสารละลายซูโครส

ทดสอบมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นด้วยการวัดสารละลายซูโครสโดยมีวิธีการทดลองเช่นเดียวกับการวัดสารละลายเอทานอล ทั้งนี้มีค่าความเข้มข้นของสารละลายซูโครสตั้งแต่ 0% 2% 4% 6% 8% 10% 12% 14% 16% 18% และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งทราบค่าดัชนีหักเหและค่าความหวาน (Brix value) จากการวัดด้วยมาตรดัชนีหักเหมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3

ค่าดัชนีหักเหและค่าความหวานของสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 0-20% ซึ่งวัดด้วยมาตรดัชนีหักเหมาตรฐาน (Abbe-2WAJ) ที่อุณหภูมิ 26.3°

ความเข้มข้นสารละลายซูโครส (w/w%)	ดัชนีหักเห	ค่าความหวาน (%Brix)
0	1.3355	1.75
2	1.3380	3.50
4	1.3400	4.95
6	1.3435	7.00
8	1.3440	7.50
10	1.3455	8.50
12	1.3480	10.25
14	1.3500	11.50
16	1.3520	12.50
18	1.3540	14.00
20	1.3560	15.25

4.5 วิธีการทดสอบมาตรดัชนีหักเหด้วยการวัดความหวานของเครื่องตี

เครื่องตีที่นำมาตรวจวัดด้วยมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นมี 4 ชนิด ได้แก่ น้ำอัดลม (สไปรท์) น้ำผลไม้ (ทับทิม) เครื่องตีชูกำลัง (M150) และเครื่องตีเกลือแร่ (สปอนเซอร์) โดยจะนำเครื่องตีเหล่านี้ไปวัดค่าดัชนีหักเหมาตรฐานและค่าความหวาน (%Brix) ด้วยมาตรดัชนีหักเหมาตรฐาน (Abbe-2WAJ) แล้วจึงวัดความหวานของเครื่องตีเหล่านี้ด้วยมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้น โดยจะนำค่าความหวานที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความหวานที่วัดได้จากเครื่องมาตรฐาน

บทที่ 5

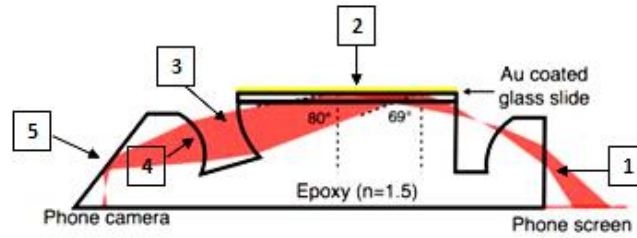
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ผลการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทางแสง

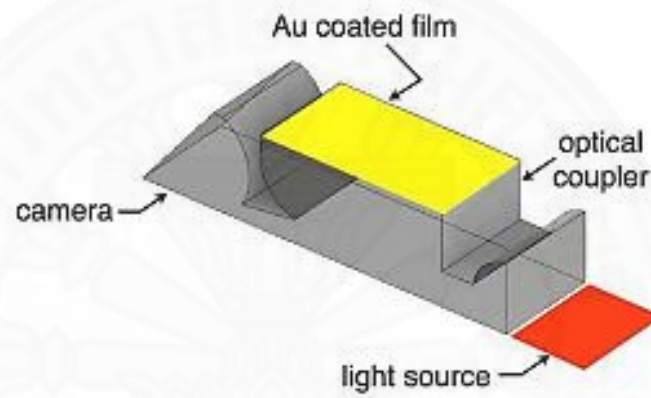
ผู้วิจัยได้จำลองการทำงานของตัวปริซึมด้วยโปรแกรมออกแบบสองมิติ (Raytrace) โดยตัวโปรแกรมจะคำนวณทิศทางหักเหของแสงตามกฎของสแนลล์ ผู้วิจัยได้กำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงในโปรแกรมมีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 630 nm และให้ค่าดัชนีหักเหของตัวปริซึมมีค่าเท่ากับ 1.517 ซึ่งทราบค่าจากการวัดค่าดัชนีหักเหของอีพ็อกซีใสด้วยมาตรดัชนีหักเหมาตรฐาน (Abbe-2WAJ) ดังภาพที่ 5.1 (ก) แล้วจึงสร้างเลนส์ (1) ที่มีขนาดและรัศมีความโค้งแตกต่างกันจนทำให้ลำแสงจากหน้าจอสมาาร์ทโฟนให้เป็นลำแสงรูปพัด (Fan-shaped) โดยมีช่วงมุมตกกระทบของแสงที่ผิวของฟิล์มบางทอง (ตำแหน่ง (2)) ตั้งแต่ 69° - 80° ซึ่งช่วงค่ามุมนี้ครอบคลุมช่วงมุมตกกระทบที่สามารถกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่รอยต่อระหว่างปริซึมและตัวกลางที่เป็นของเหลวได้ซึ่งมีค่าประมาณ 73° แสงสะท้อนจากฟิล์มทองจะถูกโฟกัสด้วยเลนส์ (3) และเลนส์ (4) และหักเหเข้าสู่กล้องหน้าของสมาร์ตโฟนด้วยผิวปริซึม (5) ที่เอียงทำมุมประมาณ 55° กับเส้นแนวตั้งฉาก

เมื่อทราบขนาด รูปทรงและสัดส่วนของปริซึมจากโปรแกรม Raytrace แล้วจึงได้ออกแบบตัวต้นแบบโดยใช้โปรแกรมออกแบบสามมิติ ดังแสดงในภาพที่ 5.1(ข) แล้วพิมพ์ตัวต้นแบบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ด้วยเส้นพลาสติก ABS ตามการตั้งค่าเครื่องพิมพ์ตามข้อมูลในตารางที่ 4.1 จะได้ปริซึมสำหรับมาตรดัชนีหักเหที่รวมเลนส์หลายชิ้นและปริซึมเป็นชิ้นเดียวกันได้ดังภาพที่ 5.2 ทำให้สะดวกต่อการใช้งานมากกว่าการประกอบเลนส์แต่ละชิ้นเข้าด้วยกันดังงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1] และสามารถผลิตซ้ำในปริมาณมากได้ง่าย มีรูปแบบที่ซับซ้อนโดยคุณภาพของอุปกรณ์คงเดิมแตกต่างจากวิธีการหล่อแบบที่ละชิ้น แล้วจึงนำมาติดกาบบนฐานดังภาพที่ 2.24 ซึ่งตำแหน่งของเลนส์แต่ละชิ้นอาจแตกต่างกันได้ ทำให้คุณภาพของอุปกรณ์ทางแสงที่ได้แตกต่างกัน

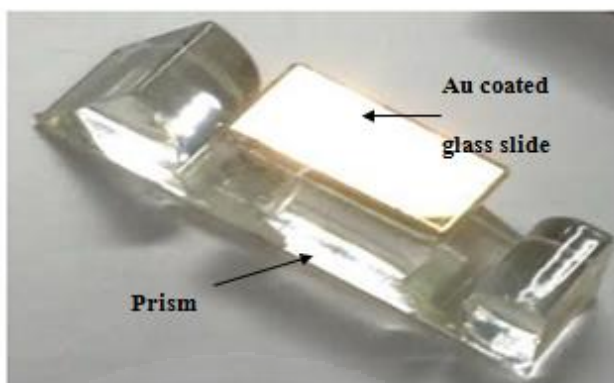
(ก)



(ข)



ภาพที่ 5.1 (ก) การออกแบบปริซึมโดยใช้โปรแกรม Raytrace (ข) ภาพสามมิติของอุปกรณ์เชิงแสงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมสามมิติโดยให้แสงจากหน้าจอสมาาร์ทโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และมีกล้องหน้าของสมาร์ทโฟนเป็นตัวบันทึกสัญญาณ

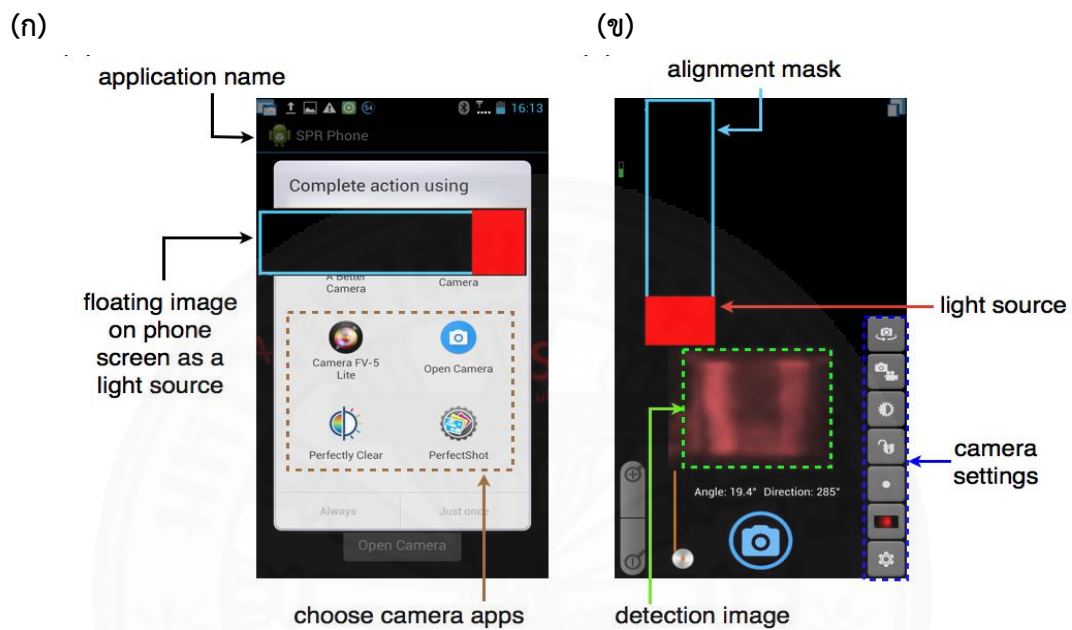


ภาพที่ 5.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์ทางแสงที่ขึ้นรูปด้วยอีพ็อกซีใส

5.2 ผลการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องมือวัดดัชนีหักเหแบบภาพให้สามารถทำงานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ได้ โดยซอฟต์แวร์จะควบคุมการทำงานของหน้าจอกและกล้องหน้าของโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยมีรายละเอียด คือ ออกแบบการทำงานของหน้าจอกให้แผงผังของหน้าจอก แบ่งเป็นส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเครื่องมือวัดดัชนีหักเห ซึ่งมีลักษณะเป็นภาพลอย (Floating image) บนหน้าจอกของโทรศัพท์เคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 5.3(ก) โดยในภาพลอยมีส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมสีแดงขนาด $85 \times 115 \text{ pixel}^2$ ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้กับเครื่องมือวัดดัชนีหักเหที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 630 nm ซึ่งวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Avantes-ULS3648) และมีเส้นขอบสีฟ้าสำหรับการกำหนดขอบเขตการวางปริซึมลงบนหน้าจอก (Alignment mask) ดังแสดงในรูปที่ 5.3(ข) ทั้งนี้ยังได้แบ่งส่วนของหน้าจอกโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับส่วนแสดงผลของการวัด (Detection image) และได้สร้างปุ่มกดและกรอรับการพิมพ์ข้อมูลเพื่อป้อนอินพุตจำนวนภาพที่ต้องการถ่ายและเวลาในการถ่ายภาพ ส่วนการทำงานของกล้องถ่ายภาพสามารถควบคุมกล้องให้ถ่ายภาพตามจำนวนและเวลาในการถ่ายภาพตามที่กำหนดไว้จากค่าอินพุตที่หน้าจอก ควบคุมค่าความไวของกล้อง (ISO) ค่าสมดุลแสงขาว (White balance) และค่าการเปิดรับแสง (Exposure value) เพื่อให้ได้ภาพที่มีความเปรียบต่างสูงและ มีสัญญาณรบกวนน้อย และยังสามารถเก็บข้อมูลหลังจากถ่ายภาพเสร็จแล้วไว้ในโฟลเดอร์ที่ผู้ใช้ต้องการ เพื่อความสะดวกของผู้ใช้ในการเข้าถึงข้อมูลและการถ่ายโอนข้อมูลเหล่านี้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองภายหลัง

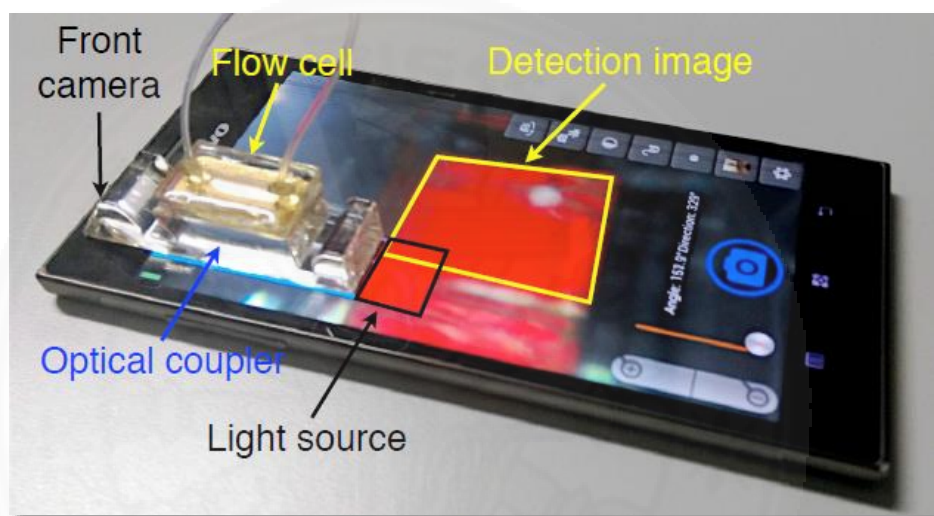
ทั้งนี้ในขณะที่ทำการทดลองตัวซอฟต์แวร์ต้องสามารถล็อคค่าแสง (Exposure lock) ให้เท่ากันตลอดการทดลอง เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณเอสพีอาร์ในแต่ละภาพถ่ายได้อย่างถูกต้อง จากรูปที่ 5.3(ข) สามารถกดปุ่มรูปกุญแจเพื่อทำการล็อคค่าแสงได้



ภาพที่ 5.3 หน้าจอโทรศัพท์เคลื่อนที่ขณะใช้งานซอฟต์แวร์เครื่องมาตรฐานนี้หักเห (ก) ภาพลอยบนหน้าจอสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดแสงและมีหน้าต่างสำหรับเลือกใช้งานแอปกล้องถ่ายภาพ และ (ข) การแบ่งส่วนหน้าจอให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงและส่วนแสดงผลของการวัด พร้อมกับปุ่มกดและกรอบรับการพิมพ์ข้อมูลเพื่อตั้งค่ากล้องถ่ายภาพ

5.3 ผลการหาค่าความไวและความละเอียดของมาตรดัชนีหักเห

ในการทดลองหาค่าความไวและความละเอียดของมาตรดัชนีหักเหได้นำปริซึมที่สร้างได้วางไว้บนตำแหน่งบนหน้าจอที่ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงและกล้องหน้าของสมาร์ตโฟนตราสินค้า Lenovo รุ่น K900 ดังภาพที่ 4.5 หยดสารละลายลงบนฟิล์มทองจนครบทุกความเข้มข้น จากนั้นกดปุ่มถ่ายภาพเพื่อบันทึกผลการทดลองและนำมาวิเคราะห์สัญญาณเอสพีอาร์ด้วยโปรแกรม ImageJ ต่อไป

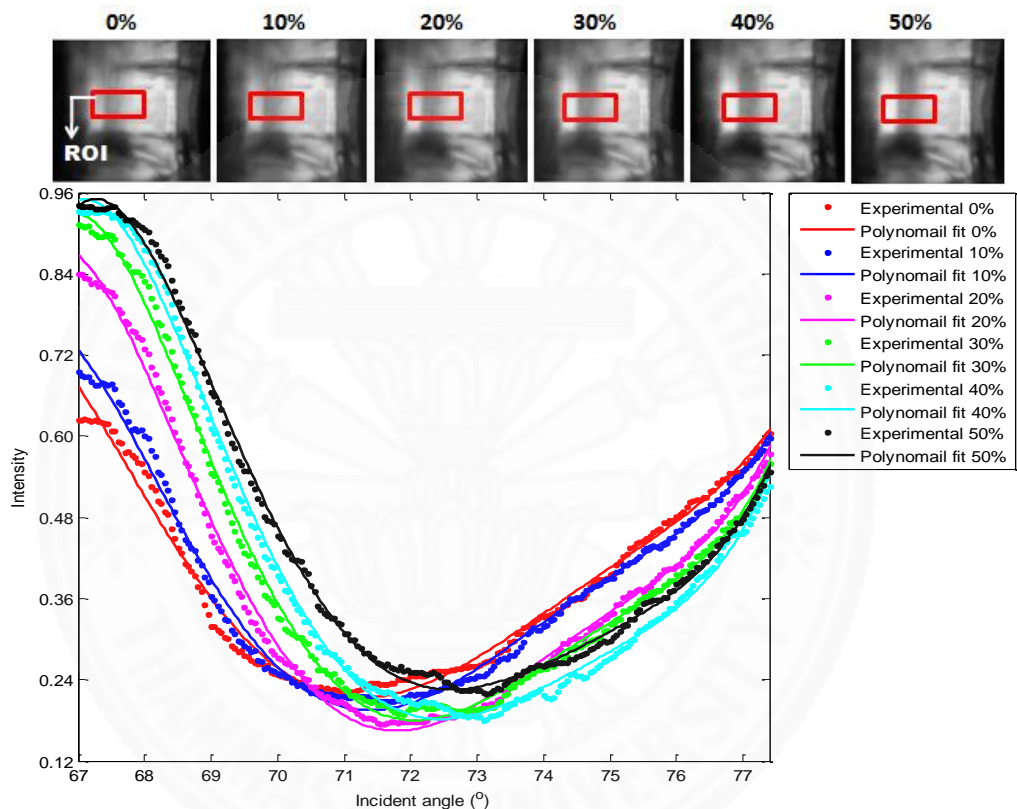


ภาพที่ 5.4 การติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงบนหน้าจอของสมาร์ตโฟนเพื่อการทดลองวัดสัญญาณเอสพีอาร์

5.3.1 ผลการหาค่าความไวของมาตรดัชนีหักเห

ตำแหน่งมุมเรโซแนนซ์ของสัญญาณเอสพีอาร์คือ ตำแหน่งที่ค่าความเข้มของแสงที่สะท้อนออกจากฟิล์มทองที่มีค่าต่ำสุด และเป็นตำแหน่งที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของสารละลายที่อยู่บนผิวของฟิล์มทอง ภาพที่ 5.5 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณเอสพีอาร์ที่ได้จากการวิเคราะห์จากภาพถ่ายด้วยสมาร์ตโฟน เมื่อใช้มาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นวัดค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของสารละลายเอทานอลในน้ำที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0% ถึง 50% โดยน้ำหนัก จุดที่ปรากฏในเส้นกราฟคือค่าความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์ที่หาจากความเข้มเฉลี่ยของสัญญาณภายใต้บริเวณ ROI ที่แต่ละตำแหน่งพิกเซลที่ได้จากภาพถ่าย เส้นทึบในภาพคือ การพิตกราฟจากผลการทดลองโดยใช้สมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้น

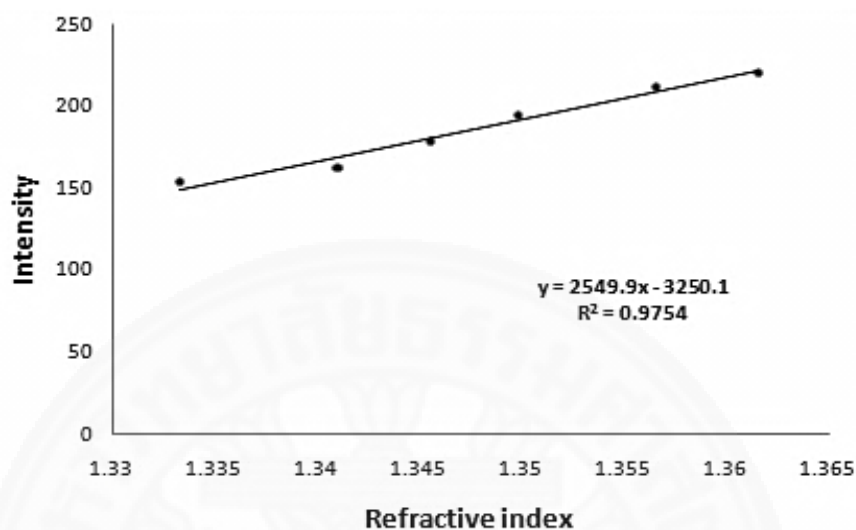
ของเอทานอลเพิ่มขึ้นตำแหน่งมุมเรโซแนนซ์ของสัญญาณเอสพีอาร์เลื่อนไปยังค่ามุมที่มากขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลาย เพิ่มขึ้นด้วยทำให้ค่าเวกเตอร์คลื่นของคลื่นผิวพลาสมอน (k_{spp}) ขึ้นตามสมการที่ (3.65) ดังนั้นมุมตกกระทบ จึงต้องมีค่าสูงขึ้นเพื่อทำให้ k_p ตามสมการที่ (3.78) มีค่าสูงขึ้นจนเท่ากับ k_{spp} ถึงจะทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์กับคลื่นแสงที่ตกกระทบได้อีก



ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับความเข้มแสงของสัญญาณเอสพีอาร์สำหรับการวัดสารละลายเอทานอล

จากข้อมูลค่าดัชนีหักเหของสารละลายเอทานอลในตารางที่ 4.2 ทำให้สามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์กับค่าดัชนีหักเหของสารละลายเอทานอลดังแสดงกราฟที่ 5.6 พบว่าเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นมีค่าสมการเป็น $y = 2549.9x + 3250.1$ เมื่อ y แทนค่าความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์ และ x แทนค่าดัชนีหักเหของสารละลายเอทานอลในหน่วย RIU สมการเส้นตรงนี้ได้ใช้เป็นสมการเทียบมาตรฐาน

(Standard calibration equation) ในการใช้เป็นมาตรฐานที่สร้างขึ้น โดยที่ค่าความชันของกราฟ คือ ค่าความไวของมาตรฐานที่สร้างขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 2549.9 int/RIU



ภาพที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณเอสพัวร์กับค่าดัชนีหักเหมาตรฐานของสารละลาย เอทานอล

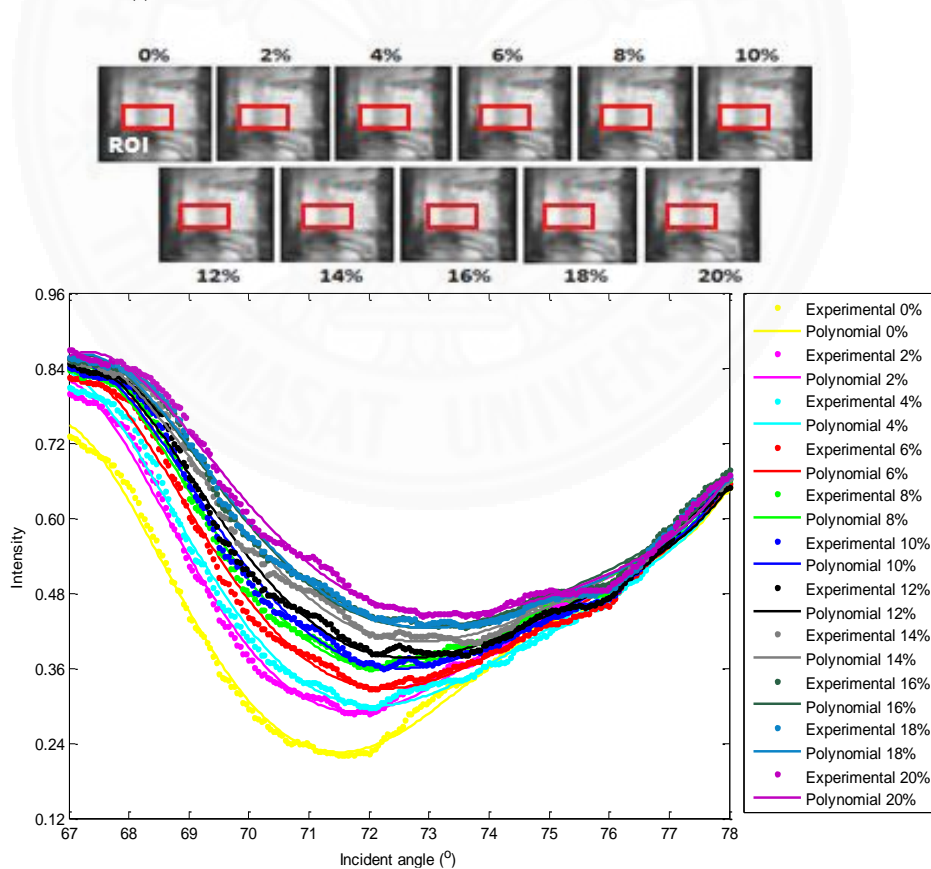
5.3.2 ผลการหาค่าความละเอียดของมาตรฐานหักเห

ค่าความละเอียดของมาตรฐานหักเหคำนวณได้จากการวัดระดับความเข้มของสัญญาณ เอสพัวร์ต่ำสุดที่มากกว่าระดับสัญญาณรบกวน (Noise level) ซึ่งจากการทดลองวัดระดับความเข้มต่ำสุดของสัญญาณเอสพัวร์ที่ได้จากระดับความเข้มจากภาพถ่ายในแถบค่าของสีแดง (Red channel) มีค่าเท่ากับ 0.07% ของความเข้มสัญญาณสูงสุด (มีค่าเท่ากับ 255) ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความละเอียดของมาตรฐานหักเหที่สร้างขึ้นจากการคำนวณโดยใช้ค่าความไวของมาตรฐานหักเหให้ได้ค่าความละเอียดของมาตรฐานหักเหเป็น $\frac{1}{2549.9} \times \frac{0.07}{100} \times 255 = 7 \times 10^{-5}$ RIU

5.4 ผลการเปรียบเทียบมาตรฐานดัชนีหักเหกับสารละลายซูโครส

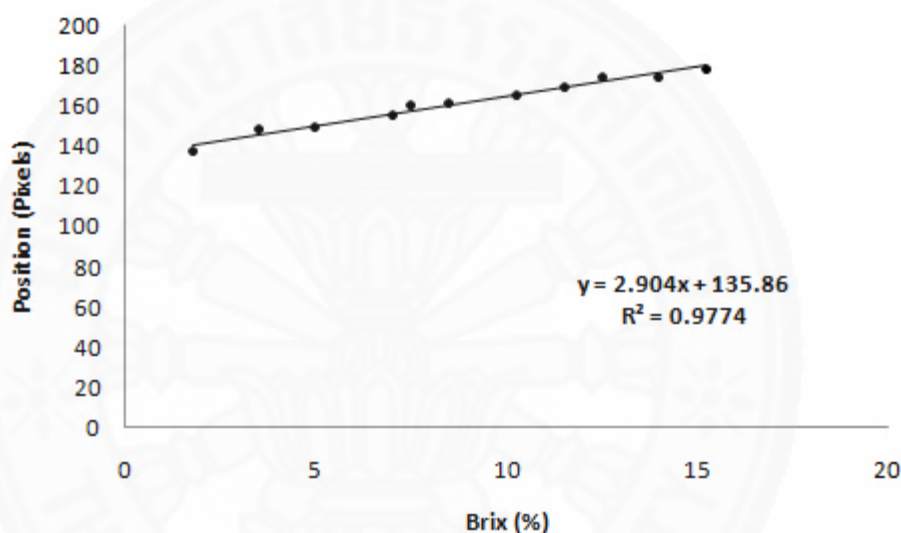
5.4.1 ผลการหาค่าความไวของมาตรฐานดัชนีหักเห

ภาพที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณเอสพัวร์ที่ได้จากการวิเคราะห์จากภาพถ่ายด้วยสมาร์ทโฟน เมื่อใช้มาตรฐานดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นวัดค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของสารละลายซูโครสในน้ำที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0% ถึง 20% โดยจุดที่ปรากฏในเส้นกราฟคือค่าความเข้มข้นของสัญญาณเอสพัวร์ที่หาจากความเข้มเฉลี่ยของสัญญาณภายในบริเวณ ROI ที่แต่ละตำแหน่งพิกเซลที่ได้จากภาพถ่าย เส้นทึบในภาพคือ การพิตกราฟจากผลการทดลองโดยใช้สมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซูโครสเพิ่มขึ้นตำแหน่งมุมเรโซแนนซ์ของสัญญาณเอสพัวร์เลื่อนไปยังค่ามุมที่มากขึ้นด้วย เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายเพิ่มขึ้นด้วยทำให้ค่าเวกเตอร์คลื่นของคลื่นผิวพลาสมอน (k_{sp}) ขึ้นตามสมการที่ (3.56) ดังนั้นมุมตกกระทบจึงต้องมีค่าสูงขึ้นเพื่อให้ k_p ตามสมการที่ (3.77) มีค่าสูงขึ้นจนเท่ากับ k_{sp} ถึงจะทำให้เกิดการสั่นพ้องของคลื่นผิวพลาสมอนกับคลื่นแสงที่ตกกระทบได้



ภาพที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบของแสงกับความเข้มของสัญญาณเอสพัวร์สำหรับสารละลายซูโครส

จากข้อมูลค่าความหวานในหน่วยบริกซ์ของสารละลายซูโครสในตารางที่ 4.3 ทำให้สามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสัญญาณเอสพีอาร์กับค่าดัชนีหักมาตรฐานดังกล่าวในภาพที่ 5.8 พบว่าเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นมีค่าสมการเป็น $y = 2.904x + 135.86$ เมื่อ y แทนค่าความเข้มข้นของสัญญาณเอสพีอาร์ และ x แทนค่าความหวานของสารละลายซูโครสในหน่วยบริกซ์ สมการเส้นตรงนี้ได้ใช้เป็นสมการเทียบมาตรฐาน ในการใช้มาตรดัชนีที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องวัดความหวาน โดยที่ค่าความชันของกราฟคือ ค่าความไวของมาตรดัชนีหักเชิงซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.904 Int/Brix



ภาพที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสัญญาณเอสพีอาร์กับค่าความหวานของสารละลายซูโครส

5.4.2 ผลการหาค่าความละเอียดของมาตรดัชนีหักเห

ค่าความละเอียดของมาตรดัชนีหักเหคำนวณได้จากการวัดระดับความเข้มข้นของสัญญาณ เอสพีอาร์ต่ำสุดที่มากกว่าระดับสัญญาณรบกวน ซึ่งจากการทดลองวัดระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสัญญาณเอสพีอาร์ที่หาได้จากระดับความเข้มข้นจากภาพถ่ายในแถบค่าของสีแดงมีค่าเท่ากับ 0.07% ของความเข้มข้นสัญญาณสูงสุด (มีค่าเท่ากับ 255) ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความละเอียดของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นจากการคำนวณโดยใช้ค่าความไว ทำให้ได้ค่าความละเอียดของ

$$\text{มาตรดัชนีหักเหเป็น } \frac{1}{2.904} \times \frac{0.07}{100} \times 255 = 0.06 \text{ Brix}$$

5.5 ผลการทดสอบมาตรฐานดัชนีหักเหด้วยการวัดค่าความหวานของเครื่องดื่ม

เมื่อนำมาตรฐานดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นไปทดสอบการวัดค่าความหวานของเครื่องดื่ม ได้แก่ น้ำอัดลม (สไปรท์) น้ำผลไม้ (น้ำทับทิม น้ำฝรั่งบรรจุกล่องตรา Tipco) เครื่องดื่มชูกำลัง (M150) และ เครื่องดื่มเกลือแร่ (สปอนเซอร์) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

ผลการวัดค่าความหวานของเครื่องดื่ม

เครื่องดื่ม	ค่าความเข้มข้น สัญญาณ เอสพีอาร์	มาตรฐานดัชนีหักเห ที่สร้างขึ้น (%Brix)	มาตรฐานดัชนีหักเห มาตรฐาน (%Brix)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน (%)
M-150	191.59	19.19	19.20	0.05
น้ำทับทิม	174.77	13.40	13.59	1.40
น้ำฝรั่ง	177.00	14.16	13.50	4.90
SPONSOR	176.64	14.04	14.20	1.12
Sprite	179.08	14.88	15.30	2.72

จากตารางที่ 5.1 พบว่าผลการวัดค่าความหวานจากมาตรฐานดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นมีความผิดพลาดจากมาตรฐานดัชนีหักเหมาตรฐาน (Abbe-2WAJ) ไม่เกิน 5% โดยน้ำฝรั่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเนื่องจากในน้ำฝรั่งมีเนื้อผลไม้ที่อยู่จึงทำให้เนื้อผลไม้สามารถติดบนแผ่นโลหะทองซึ่งเป็นชั้นเซนเซอร์ตรวจวัดสัญญาณเอสพีอาร์ ส่วนเครื่องดื่มชูกำลัง (M150) นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเนื่องจากลักษณะของสารละลายมีความใสมากที่สุด เมื่อเทียบกับน้ำอัดลม น้ำผลไม้ เครื่องดื่มเกลือแร่ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรฐานดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นกับเครื่องมาตรฐาน พบว่ามาตรฐานดัชนีที่สร้างขึ้นมีค่าความละเอียดของการวัดค่าความหวานในหน่วย บริกซ์ (0.06 บริกซ์) ซึ่งใกล้เคียงกับมาตรฐานดัชนีหักเหแบบตั้งโต๊ะ (2WAJ) และดีกว่าเครื่องวัดความหวานแบบพกพา (Opti-Brix54) ซึ่งยืนยันได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีคุณภาพในระดับเดียวกับเครื่องมือมาตรฐาน แต่มาตรฐานดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นมีราคาถูกกว่า ขนาดเล็กกว่า น้ำหนักน้อยกว่า ดังแสดงในตารางที่ 5.2 จึงมีความเหมาะสมในเรื่องของการเป็นเครื่องมือวัดค่าความหวานแบบพกพาสำหรับนำไปใช้วัดค่าความหวาน และแอลกอฮอล์นอกห้องปฏิบัติการได้

ตารางที่ 5.2

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นกับเครื่องที่มีขายเชิงพาณิชย์

	มาตรดัชนีหักเห มาตรฐานแบบตั้งโต๊ะ (Abbe-2WAJ)	มาตรดัชนีหักเห มาตรฐานแบบพกพา (Opti-Brix54)	มาตรดัชนีหักเห ที่สร้างขึ้น
ค่าความไว	-	-	2549.9 int/RIU 2.904 int/Brix
ค่าความละเอียด	1×10^{-4} RIU 0.05 Brix	0.1 Brix	7×10^{-5} RIU 0.06 Brix
ช่วงการวัด	1.3000-1.5300 0-95 Brix	0-54 Brix	1.3333-1.3616 0-15 Brix
ราคา (ไม่รวมสมาร์ตโฟน)	30,000 บาท	12,000 บาท	300 บาท
ขนาด (mm)	140x100x345	120x55x35	85x85x35
น้ำหนัก	4 kg	0.1 kg	0.2 kg

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างมาตรดัชนีหักเหขนาดพกพา ที่สามารถประยุกต์ใช้บนสมาร์ตโฟนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ โดยอาศัยเทคนิคเอสพัวร์ ข้อดีของการประยุกต์ใช้มาตรดัชนีหักเหบนสมาร์ตโฟนนั้นทำให้ผู้ทดลองสามารถควบคุมการทำงานของหน้าจอที่ทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งกำเนิดแสงและการแสดงผล อีกทั้งยังสามารถควบคุมการทำงานของกล้องถ่ายภาพได้อีกด้วย ในการตรวจวัดสัญญาณเอสพัวร์ผู้วิจัยจะใช้วิธีการหยดสารละลายลงบนแผ่นเซนเซอร์เนื่องจากคำนึงถึงการใช้งานจริงในการตรวจวัดสารละลาย ผลการวิจัยเมื่อทำการทดสอบมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นโดยการวัดสารละลายเอทานอลในน้ำที่มีความเข้มข้นโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-50% พบว่าความเข้มของสัญญาณเอสพัวร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารละลาย เอทานอล และได้ความสัมพันธ์ของค่าความเข้มของสัญญาณเอสพัวร์กับค่าดัชนีหักเหของสารละลายเอทานอลเป็นกราฟเส้นตรง สมการเส้นตรงนี้สามารถใช้คำนวณหาค่าความไวและค่าความละเอียดของของมาตรดัชนีที่สร้างขึ้นมีค่า 2549.9 Int/RIU และ 7×10^{-5} RIU ตามลำดับ ในกรณีทดสอบเทียบวัดความหวานของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นโดยการวัดสารละลายซูโครสในน้ำที่มีความเข้มข้นโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-20% พบว่าค่าความไวและค่าความละเอียดของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นมีค่า 2.904 Int/Brix และ 0.06 Brix ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับเครื่องมาตรฐาน และได้ทดสอบประสิทธิภาพด้วยการวัดปริมาณซูโครสในเครื่องดื่มเชิงพาณิชย์ ได้แก่ เครื่องดื่มชูกำลัง (M150) เครื่องดื่มเกลือแร่ (สปอนเซอร์) น้ำอัดลม (สไปรท์) น้ำผลไม้ (น้ำทับทิมและน้ำฝรั่งบรรจุกล่องตรา Tipco) พบว่ามีค่าความผิดพลาดจากเครื่องมาตรฐานไม่เกิน 5% ซึ่งสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

6.1.1 ได้มาตรดัชนีหักเหที่สามารถทำงานบนสมาร์ตโฟนระบบแอนดรอยด์ได้โดยมีค่าความไวและความละเอียดของมาตรดัชนีหักเหกรณีวัดความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลได้เท่ากับ 2549.9 Int/RIU และ 7×10^{-5} RIU ตามลำดับ และมีช่วงการวัดค่าดัชนีหักเหเป็น 1.3333-1.3616

6.1.2 ได้มาตรดัชนีหักเหบนสมาร์ตโฟนที่สามารถวัดความหวานได้โดยมีค่าความไวของเครื่องมือเท่ากับ 2.904 Int/Brix ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.06 บริกซ์และมีช่วงการวัดค่าความหวานเป็น 0-15 บริกซ์ [31]

6.1.3 ได้มาตรฐานนี้หักเหบนสมาร์โฟนที่สามารถนำไปวัดเครื่องตีเมเชิงพาณิชย์ได้จริง ได้แก่ เครื่องตีเมชูกำลัง (M150) เครื่องตีเมเกลือแร่ (สปอนเซอร์) น้ำอัดลม (สไปรท์) น้ำผลไม้ (น้ำทับทิมและน้ำฝรั่งบรรจุกล่องตรา Tipco) โดยมีค่าความคาดเคลื่อนเทียบกับเครื่องมาตรฐานไม่เกิน 5%

มาตรฐานนี้หักเหที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีค่าความละเอียดใกล้เคียงกับเครื่องมาตรฐาน และดีกว่าเครื่องวัดความหวานแบบพกพา แต่มีราคาต้นทุนถูกกว่ามาก และมีขนาดเล็กเหมาะกับการพกพาสามารถนำไปใช้นอกห้องปฏิบัติการได้ ดังนั้นผลการวิจัยนี้จึงมีประโยชน์ต่อยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศในแง่ของการสร้างนวัตกรรมของมาตรฐานนี้หักเหที่สามารถทำงานบนสมาร์โฟนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้าน ได้แก่ การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องตีเม ตลอดจนผลผลิตทางการเกษตร

นวัตกรรมดังกล่าวจะส่งผลให้ประชากรมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นกล่าวคือ มาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนนี้สามารถตรวจวัดปริมาณน้ำตาล ความเค็ม แอลกอฮอล์ จึงมีผลดีต่อกลุ่มคนที่จำเป็นต้องควบคุมระดับน้ำตาล หรือความเค็ม ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดโรคแทรกซ้อนต่างๆไว้ก่อน เนื่องจากการเกิดโรคส่วนใหญ่มักเกิดจากพฤติกรรมบริโภคเป็นสาเหตุหลัก ตลอดจนความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งต่างๆ มาตรฐานนี้หักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนสามารถวิเคราะห์การวินิจฉัยโรคในเบื้องต้นได้ด้วยตนเองในลักษณะเดียวกับอุปกรณ์ตรวจการตั้งครรภ์เบื้องต้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เชื่อว่าสามารถเป็นประโยชน์เพื่อนำไปต่อยอดในการคิดค้นนวัตกรรมมาตรฐานนี้หักเหขนาดพกพาในอนาคตได้ แต่ต้องมีการพัฒนาแอปพลิเคชันให้สามารถประมวลผลและแสดงผลการวัดได้ทันทีเมื่อหยุดสารละลาย

รายการอ้างอิง

บทความวารสาร

1. Pakorn P, Gonzalez MC, Suska A, Filippin D. *Surface plasmon resonance chemical sensing on cell phones*. 2012
2. <http://www.segarasia.com/images/product/pdf/40476071Refractometer%20ABBE%202WAJ.pdf>
3. Kim M, Park K, Jeong E-J, Shin Y-B, Chung BH. Surface plasmon resonance imaging analysis of protein–protein interactions using on-chip-expressed capture protein. *Analytical Biochemistry*. 2006;351:298-304.
4. Madeira AA, Vikeved EA, Nilsson AA, et al. Identification of protein-protein interactions by surface plasmon resonance followed by mass spectrometry. *Current protocols in protein science*. 2011.
5. Gamsjaeger R, Kariawasam R, Bang LH, et al. Semiquantitative and quantitative analysis of protein–DNA interactions using steady-state measurements in surface plasmon resonance competition experiments. *Analytical Biochemistry*. 2013;440:178-185.
6. Teh HF, Peh WYX, Su X, Thomsen JS. Characterization of protein–DNA interactions using surface plasmon resonance spectroscopy with various assay schemes. *Biochemistry*. 2007;46(8):2127-2135.
7. Fong C-C, Lai W-P, Leung Y-C, Lo SCL, Wong M-S, Yang M. Study of substrate–enzyme interaction between immobilized pyridoxamine and recombinant porcine pyridoxal kinase using surface plasmon resonance biosensor. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)/Protein Structure and Molecular Enzymology*. 2002;1596:95-107.
8. Geitmann M, Danielson UH. Studies of substrate-induced conformational changes in human cytomegalovirus protease using optical biosensor technology. *Analytical Biochemistry*. 2004;332:203-214.
9. Salamon Z, Cowell S, Hruby V, Tollin G. Plasmon Resonance Studies of Agonist/Antagonist Binding to the Human delta-Opioid Receptor Provide New

- Structural Insights into the Three-State Model from Receptor-Ligand Interactions. 2000.
10. Rich RL, Hoth LR, Geoghegan KF, et al. Kinetic Analysis of Estrogen Receptor/Ligand Interactions. National Academy of Sciences; 2002:8562.
 11. Baron OL, Pauron D. Protein-lipid Interaction Analysis by Surface Plasmon Resonance (SPR). *Bio-Protocol* 18 (4), 1-8 (2014). 2014.
 12. Erb E-M, Chen X, Allen S, et al. Regular Article: Characterization of the Surfaces Generated by Liposome Binding to the Modified Dextran Matrix of a Surface Plasmon Resonance Sensor Chip. *Analytical Biochemistry*. 2000;280:29-35.
 13. Beccati D, Halkes KM, Batema GD, et al. SPR Studies of Carbohydrate-Protein Interactions: Signal Enhancement of Low-Molecular-Mass Analytes by Organoplatinum(II)-Labeling. *Chembiochem*. 2005(7).
 14. Zhang H, Yang L, Zhou B, et al. Investigation of biological cell-protein interactions using SPR sensor through laser scanning confocal imaging-surface plasmon resonance system. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014;121:381-386.
 15. Beseničar M, Maček P, Lakey JH, Anderluh G. Review: Surface plasmon resonance in protein-membrane interactions. *Chemistry and Physics of Lipids*. 2006;141:169-178.
 16. Miyoshi H, Suehiro N, Tomoo K, et al. Binding analyses for the interaction between plant virus genome-linked protein (VPg) and plant translational initiation factors. *Biochimie*. 2006;88:329-340.
 17. Buijs J, Franklin GC. SPR-MS in functional proteomics. *Briefings in Functional Genomics & Proteomics*. 2005;4(1):39-47.
 18. Grasso G, D'Agata R, Rizzarelli E, et al. Activity of anchored human matrix metalloproteinase-1 catalytic domain on Au (111) surfaces monitored by ESI-MS. *Journal Of Mass Spectrometry: JMS*. 2005;40(12):1565-1571.
 19. Nedelkov D, Nelson RW. Analysis of native proteins from biological fluids by biomolecular interaction analysis mass spectrometry (BIA/MS): exploring the

- limit of detection, identification of non-specific binding and detection of multi-protein complexes. *Biosensors and Bioelectronics*. 2001;16:1071-1078.
20. Cooper MA. Label-free screening of bio-molecular interactions. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*. 2003;377(5):834-842.
 21. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2015/sugar-guideline/en/>
 22. LIANG, H; et al. Surface plasmon resonance instrument as a refractometer for liquids and ultrathin films. *Sensors & Actuators: B. Chemical*. 149, 212-220, Jan. 1, 2010. ISSN: 0925-4005.
 23. Yusmawati WYW, Chuah HP, Mahmood MYW. Optical properties and sugar content determination of commercial carbonated drinks using surface plasmon resonance. *American Journal of Applied Sciences*. 2007(1):1.
 24. Sadrolhosseini A, Moxsin MM, Yunus WMM, Talib ZA. Surface Plasmon Resonance Characterization of Virgin Coconut Oil Biodiesel: Detection of Iron Corrosion Using Polypyrrole Chitosan Sensing Layer (S & M 0881). *SENSORS AND MATERIALS*. 2012;24(5):221-32.
 25. Trussell A. *Encyclopedia of Optical Engineering*. 2004.
 26. Pakorn P. *Optical devices and methods for distributed lab-on-a-chip analyses: Linköping, Sweden : Department of Physics, Chemistry and Biology (IFM), Linköping University, 2013.; 2013.*
 27. Junxi Z, Lide Z, Wei X. Surface plasmon polaritons: physics and applications. *Journal of Physics: D Applied Physics*. 2012 ; 45(11):113001-19.
 28. Griffiths DJ. *Introduction to electrodynamics: Harlow : Pearson Education Limited, c2014.4th ed.; 2014.*
 29. Couture M, Zhao SS, Masson J-F. Modern surface plasmon resonance for bioanalytics and biophysics. *Physical Chemistry Chemical Physics (PCCP)*. 2013;15(27):11190.
 30. <https://refractiveindex.info>
 31. Amirjani A, Fatmehsari DH. Colorimetric detection of ammonia using smartphones based on localized surface plasmon resonance of silver nanoparticles. *Talanta*. 2018;176(Supplement C):242-6.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสวรรรยา บุญช่วย
วันเดือนปีเกิด	10 กรกฎาคม พ.ศ. 2533
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2555: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

Sawanya Boonchuay, and Pakorn Preechaburana. *Smartphone-Based Surface Plasmon Resonance Refractometer*. Proceeding of The 3rd Japan-Thailand Joint Symposium on Advanced Nanomaterials and Devices for Electronics and Photonics (JT-AND 2018) 21-24 January 2018, Chulalongkorn University, Thailand. 2018. 15-17.

สวรรรยา บุญช่วย, ศุภลักษณ์ อ่ำลอย และปกรณ์ ปรีชาบุรณะ, “มาตราดัชนีหักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ใช้สมาร์ทโฟนเป็นฐาน”, วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ฉบับพิเศษจากงานประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 28 ประจำปี 2561. (ได้รับการตอบรับเพื่อตีพิมพ์แล้ว)