

มาตรดัชนึหักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ใช้สมาร์ทโฟนเป็นฐาน

Surface Plasmon Resonance Refractometer Based on Smartphone Platforms

สวรรณยา บุญช่วย¹ ศุภลักษณ์ อำลอย² และปกรณ์ ปรีชาบุรณะ^{3*}

Sawanya Boonchuay¹, Supaluck Amloy² and Pakorn Preechaburana^{3*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอมาตรดัชนึหักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ใช้สมาร์ทโฟนเป็นฐาน ซึ่งมีหลักในการออกแบบโดยการจัดแสงจากหน้าจอสมาร์ทโฟนให้มีลักษณะคล้ายพัดเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้กล้องหน้าของสมาร์ทโฟนเป็นตัวตรวจวัด อุปกรณ์ทางแสงซึ่งสร้างจากอีพ็อกซีเรซินเป็นแบบรวมเลนส์และปริซึมเข้าเป็นชิ้นเดียวกัน ในการทดลองได้ทดสอบประสิทธิภาพของมาตรดัชนึหักเหที่สร้างขึ้นด้วยการตรวจวัดสารละลายซูโครสในน้ำ ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 % ถึง 20 % โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลื่อนตำแหน่งของมุมเรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามค่าความเข้มข้นของสารละลายซูโครส โดยมีค่าความไวเท่ากับ 2.094 Int/Brix และค่าความละเอียดของการวัดความหวานเท่ากับ 0.06 Brix นอกจากนี้มาตรดัชนึหักเหที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดค่าความหวานของน้ำอัดลม น้ำผลไม้ เครื่องดื่มชูกำลังและเครื่องดื่มเกลือแร่ได้ด้วย โดยมีค่าความผิดพลาดจากเครื่องมือมาตรฐานไม่เกิน 3 %

คำสำคัญ: มาตรดัชนึหักเห คลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ สมาร์ทโฟน ค่าบริกซ์

Abstract

In this research, we demonstrate the surface plasmon resonance (SPR) refractometer based on smartphone platforms. The principle design of this SPR refractometer was 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 was 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. The sensitivity and Brix value resolution of this SPR refractometer are 2.094 Int/Brix and 0.06 Brix, respectively. Moreover, this SPR refractometer could be used to determine the Brix value of commercial soft drink, fruit juices, energy drink and sports drink with the maximum error less than 3 % from standard refractometer.

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

¹ นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12121

² อ.ดร., สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

³ อ.ดร., สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12121

¹ Graduate Student, Master Degree, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathumthani, 12121

² Lecturer, Dr., Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

³ Lecturer, Dr., Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathumthani, 12121

* Corresponding author: Tel.: 02-5644440 ext. 2500. E-mail address: ppakorn@tu.ac.th

บทนำ

มาตรดัชนีหักเห (Refractometer) เป็นอุปกรณ์เชิงแสงที่สามารถวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index) ของสารตัวอย่างได้ โดยเป็นเครื่องมือที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอาหารเพื่อตรวจสอบความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่างและวัดค่าความเข้มข้นของสารละลาย ได้แก่ น้ำ อะซิโตน เฮกเซน และเครื่องดื่มได้ [1] และสามารถตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในผลไม้สำหรับผลิตผลทางการเกษตรได้ด้วย [2] นอกจากนี้ยังสามารถใช้มาตรดัชนีหักเหกับตัวอย่างทางชีวภาพโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของของเหลว ได้แก่ ปริมาณกลูโคสในเลือด ซึ่งสามารถบ่งชี้การเป็นโรคเบาหวานได้ [3]

เทคนิคคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าเอสพียอร์ (Surface Plasmon Resonance, SPR) เป็นเทคนิคเชิงแสงที่มีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของสารที่ผิวของเซนเซอร์ โดยสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงในระดับ 10^{-6} ของค่าหน่วยดัชนีหักเห (Refractive Index Unit; RIU) และที่สำคัญเอสพียอร์เป็นเทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องใช้โมเลกุลฉลาก (Label-Free) [4] ช่วยในการตรวจวัดเหมือนกับเทคนิคเอลิซา (ELISA) หรือ ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ทำให้สามารถลดขั้นตอนและความยุ่งยากในการตรวจวัดลงได้ ด้วยเหตุนี้เทคนิคเอสพียอร์จึงเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยหลายๆ ด้าน ตัวอย่างเช่น การตรวจสอบคุณภาพและปริมาณสารเคมีในอุตสาหกรรมอาหารและในผลิตภัณฑ์การเกษตร การตรวจวิเคราะห์สารชีวเคมีหรือตรวจหาเชื้อโรคในทางการแพทย์ [5] เป็นต้น นอกจากนี้เทคนิคเอสพียอร์ยังได้ใช้สำหรับการวัดค่าดัชนีหักเหในของเหลวด้วย [6]

จากการศึกษาเครื่องเอสพียอร์ทั้งในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเครื่องมือที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ พบว่าเครื่องมือส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเครื่องขนาดใหญ่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ [7-8] ซึ่งเป็นเครื่องเอสพียอร์ที่มีความละเอียดสูง อย่างไรก็ตามเครื่องมือดังกล่าวมีราคาสูงมาก มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และไม่สะดวกในการนำไปใช้นอกห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังมีการประกอบที่ซับซ้อนจึงต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการบำรุงรักษา ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องเอสพียอร์ที่มีขนาดเล็กลง มีส่วนประกอบที่ไม่ซับซ้อนโดยจะออกแบบให้สามารถใช้งานได้บนสมาร์ตโฟน

ในปัจจุบันนี้คนทั่วไปมีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวานและโรคหัวใจซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมการบริโภคของหวาน ทั้งนี้เพื่อสุขภาพที่ดีสำหรับผู้ใหญ่และเด็ก องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้แนะนำการบริโภคปริมาณการบริโภคน้ำตาลซึ่งไม่ควรเกิน 25 กรัมต่อวัน [9] ในขณะที่การบริโภคน้ำตาลในรูปแบบของเครื่องดื่มที่มีความหวาน ได้แก่ น้ำอัดลม น้ำผลไม้ เครื่องดื่มชูกำลัง และเครื่องดื่มเกลือแร่ ได้ทำให้ปริมาณการบริโภคน้ำตาลสูงเกินกว่าที่องค์การอนามัยโลกได้แนะนำไว้ ทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคได้

จากพฤติกรรมบริโภคน้ำตาลของคนไทยดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการสร้างสรรค์นวัตกรรมมาตรดัชนีหักเหที่อาศัยเทคนิคเอสพียอร์ โดยออกแบบให้สามารถทำงานบนสมาร์ตโฟนได้ เนื่องจากผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงประสิทธิภาพของสมาร์ตโฟนที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งความสามารถของตัวประมวลผล ความละเอียดของหน้าจอ ความละเอียดของกล้องถ่ายภาพ ความสามารถในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ยังมาพร้อมกับตัวเซนเซอร์หลายๆ แบบที่พร้อมใช้งาน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้สมาร์ตโฟนเป็นมาตรดัชนีหักเหที่อาศัยเทคนิคเอสพียอร์ ที่ใช้แสงจากหน้าจอสมาร์ตโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้กล้องถ่ายภาพด้านหน้าของสมาร์ตโฟนเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด โดยจะออกแบบอุปกรณ์เชิงแสงขึ้นมาใหม่โดยรวมปริซึมและเลนส์เข้าเป็นชิ้นเดียวกันโดยใช้การสร้างต้นแบบจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และหล่อแบบอีพ็อกซีใส เพื่อให้สามารถใช้งานเป็นมาตรดัชนีหักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์บนสมาร์ตโฟนได้ ซึ่งวิธีดังกล่าวสะดวกกว่าและมีคุณภาพดีกว่าการสร้างปริซึมและเลนส์แบบแยกชิ้นและนำมาติดกาวภายหลังตามวิธีการในเอกสารอ้างอิง [10] และจะทดสอบมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นด้วยการวัดค่าความหวานของเครื่องดื่มด้วย

วิธีการดำเนินการ

การออกแบบอุปกรณ์เชิงแสง

ผู้วิจัยได้ออกแบบปริซึมและอุปกรณ์เชิงแสง ให้สามารถทำงานได้ตามหลักการของเครื่องเอสพีอาร์ โดยจะจัดให้ลำแสงที่เป็นแสงโพลาไรซ์แบบขนาน (P-Polarized Light) จากหน้าจอสมาร์ทโฟนเข้าไปตกกระทบบนผิวโลหะ ด้วยมุมตกกระทบที่มากกว่าค่ามุมวิกฤตระหว่างกระจกสไลด์และของเหลว ($\theta_c > 62^\circ$) จนเกิดการสะท้อนกลับหมดของแสง กลับออกมาที่อีกด้านหนึ่งของปริซึม แล้วจึงทำการถ่ายภาพด้วยกล้องหน้าของสมาร์ทโฟน เพื่อบันทึกข้อมูลการวัดสัญญาณ เอสพีอาร์แบบภาพ และจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพที่บันทึกได้ต่อไป วิธีในการออกแบบตัวปริซึมนั้น ผู้วิจัยได้จำลองการทำงานของตัวปริซึมด้วยโปรแกรม Raytrace ซึ่งเป็นโปรแกรมออกแบบทางแสงแบบ 2 มิติ โดยตัวโปรแกรมจะคำนวณทิศทางหักเหของแสงตามกฎหมายของสเนลล์ (Snell's Law)

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่นเดียว (630 nm) แล้วเปลี่ยนค่าดัชนีหักเห ค่ามุมตกกระทบและมุมหักเห ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ ความสูงและขนาดของอุปกรณ์ทุกตัวในแบบจำลอง จนได้ลำแสงที่มีลักษณะคล้ายพัด (Fan-Shaped Beam) ตกกระทบบนผิวของโลหะด้วยมุมตกกระทบตั้งแต่ 69° - 80° แล้วเกิดการสะท้อนกลับหมดและสามารถหักเหเข้าไปในกล้องหน้าของสมาร์ทโฟนได้ ซึ่งทำให้ผู้วิจัยทราบค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับสร้างปริซึมและอุปกรณ์เชิงแสงทุกตัวได้ ทั้งนี้ผู้วิจัยจะผนวกอุปกรณ์ทุกตัวให้เป็นชิ้นเดียวกัน โดยให้มีระยะห่างถูกต้องตามค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Raytrace

เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ทุกตัวที่จำเป็นจากโปรแกรม Raytrace แล้วผู้วิจัยได้ทำตัวแม่แบบสำหรับการหล่อเรซินเพื่อทำปริซึมจากวัสดุที่เป็นอีพ็อกซีแบบใส โดยผู้วิจัยได้ออกแบบตัวแม่แบบโดยใช้โปรแกรมออกแบบ 3 มิติ (Autodesk Fusion 360) ตามขนาดและรูปทรงตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรม Raytrace จากนั้นจึงพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Flashforge Creator X) จากนั้นนำตัวต้นแบบไปสร้างโมลด้วยซิลิโคนเพื่อใช้หล่อแบบอีพ็อกซีใส จนได้ปริซึมสำหรับมาตรดัชนีหักเหที่มีความใส พร้อมนำไปใช้ทดสอบหาค่าความไวและค่าความละเอียดของเครื่องมือต่อไป

ทดสอบเครื่องมือที่สร้างขึ้น

ทำการทดสอบมาตรดัชนีหักเหกับสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่าดัชนีหักเหเพื่อหาค่าความไว (Sensitivity) และค่าความละเอียด (Resolution) ของเครื่องมือที่สร้างขึ้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้

หาค่าความไวของเครื่องมือ

1. เตรียมสารละลายซูโครสในน้ำที่ค่าความเข้มข้นต่าง ๆ จำนวน 11 ค่า โดยมีค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของซูโครสต่อน้ำเท่ากับ 0 % 2 % 4 % 6 % 8 % 10 % 12 % 14 % 16 % 18 % และ 20 % ตามลำดับ ซึ่งทราบค่าดัชนีหักเหและค่าความหวาน (Brix Value) จากการวัดด้วยมาตรดัชนีหักเหมาตรฐาน (Standard Refractometer Abbe-2WAI) ที่อุณหภูมิ 26.3°C โดยได้แสดงค่าดัชนีหักเหและค่าความหวานในตารางที่ 1

2. ทดสอบมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นด้วยการหยดสารละลายซูโครสลงบนฟิล์มโลหะที่อยู่บนปริซึมที่สร้างขึ้น จากนั้นจึงถ่ายภาพของสัญญาณที่ได้เพื่อวิเคราะห์สัญญาณเอสพีอาร์ต่อไป

3. วิเคราะห์หาค่าความไวของเครื่องมือจากผลการทดลองที่ได้ในข้อที่ 2 โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์กับค่าความหวานของสารละลายซูโครสที่มีความเข้มข้น 0-20 % ทั้งนี้ค่าความไวของมาตรดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับค่าความชันของกราฟเส้นตรงที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีหักเหและค่าความหวานของสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้นโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-20 %

ความเข้มข้นของสารละลายซูโครส (W/W %)	ค่าดัชนีหักเห	ค่าความหวาน (% Brix)
0	1.3335	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

หาค่าความละเอียดของเครื่องมือ

ในการหาค่าความละเอียดของมาตรฐานหักเหได้วิเคราะห์จากระดับความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์ที่น้อยที่สุดที่ไม่ใช่สัญญาณรบกวน (Noise) จากภาพถ่ายสัญญาณเอสพีอาร์ แล้วจึงคำนวณหาค่าความละเอียดของเครื่องมือโดยอาศัยค่าความไวของเครื่องมือ

ทดสอบวัดความหวานของเครื่องดื่ม

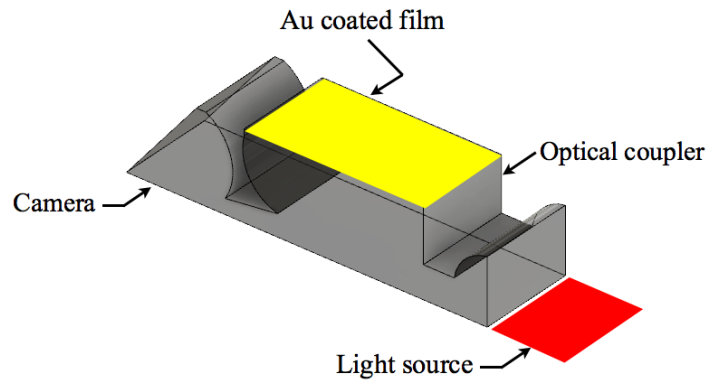
เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของมาตรฐานหักเหที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้ทดลองวัดค่าความหวานของเครื่องดื่ม ได้แก่ น้ำอัดลม (สไปรท์) น้ำผลไม้ (น้ำทับทิมบรรจุกล่องยี่ห้อ Tipco) เครื่องดื่มชูกำลัง (M150) และเครื่องดื่มเกลือแร่ (สไปนเซอร์)

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการออกแบบและสร้างปริซึมและอุปกรณ์เชิงแสง

ผู้วิจัยได้จำลองการทำงานของตัวปริซึมด้วยโปรแกรม Raytrace โดยตัวโปรแกรมจะคำนวณทิศทางการหักเหของแสงตามกฎของสเนลล์ ผู้วิจัยได้กำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงในโปรแกรมมีความยาวคลื่นเท่ากับ 630 nm และให้ค่าดัชนีหักเหของตัวปริซึมมีเท่ากับ 1.517 ซึ่งทราบค่าจากการวัดค่าดัชนีหักเหของอีพ็อกซีใสด้วยมาตรฐานหักเห (Abbe-2WAJ) แล้วจึงสร้างเลนส์ที่มีขนาดและรัศมีความโค้งแตกต่างกันจนทำให้ลำแสงจากหน้าจอสมาาร์ทโฟนให้เป็นลำแสงลักษณะคล้ายพัดไปตกกระทบที่ผิวของฟิล์มทองด้วยมุมตกกระทบตั้งแต่ 69°-80°

เมื่อผู้วิจัยทราบขนาด รูปทรงและสัดส่วนของปริซึมจากโปรแกรม Raytrace แล้วจึงได้ออกแบบตัวต้นแบบโดยใช้โปรแกรมออกแบบ 3 มิติ (Autodesk Fusion 360) ดังแสดงในภาพที่ 1 แล้วจึงพิมพ์ต้นแบบด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Flashforge Creator X) จากนั้นนำตัวต้นแบบไปสร้างโมลด้วยซิลิโคนเพื่อใช้หล่อแบบอีพ็อกซีใส จนได้ปริซึมสำหรับมาตรฐานหักเหที่รวมเลนส์และปริซึมเข้าเป็นชิ้นเดียวกัน ทำให้มีข้อดีเหนือกว่าวิธีการประกอบเลนส์แต่ละชิ้นเข้าด้วยกันเหมือนกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [8]

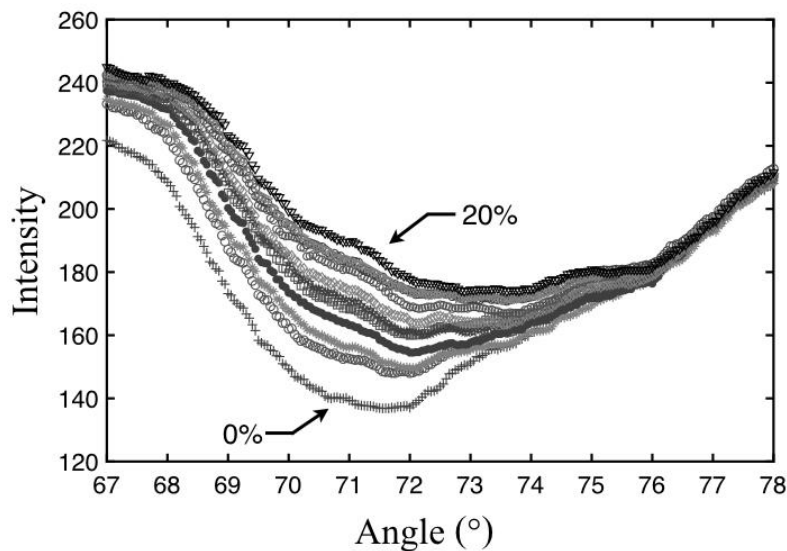


ภาพที่ 1 แผนภาพ 3 มิติของอุปกรณ์เชิงแสงที่ออกแบบโดยให้แสงจากหน้าจอสมาร์ทโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และมีกล้องหน้าของสมาร์ทโฟนเป็นตัวบันทึกสัญญาณ

ผลการทดสอบมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้น

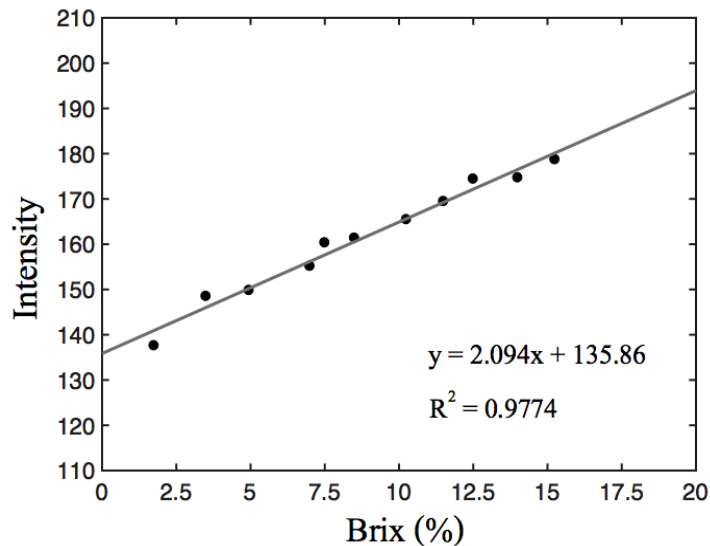
ผลการหาค่าความไวของมาตรดัชนีหักเห

ตำแหน่งมุมเรโซแนนซ์ของสัญญาณเอสพัวร์ (θ_{SPR}) คือตำแหน่งที่ค่าความเข้มของแสงที่สะท้อนออกจากฟิล์มทองคำต่ำสุด และเป็นตำแหน่งที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของสารละลายที่อยู่บนผิวของฟิล์มทอง ภาพที่ 2 ได้แสดงให้เห็นถึงสัญญาณเอสพัวร์ที่ได้จากการวิเคราะห์จากภาพถ่ายด้วยสมาร์ทโฟนเมื่อใช้มาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นวัดค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของสารละลายซูโครสในน้ำที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0 % ถึง 20 % โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งมุมเรโซแนนซ์ของสัญญาณเอสพัวร์มีการเลื่อนตำแหน่งไปยังค่ามุมที่มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซูโครสมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 2 สัญญาณเอสพัวร์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นของสารละลายซูโครสตั้งแต่ 0 % ถึง 20 %

เมื่อทราบค่าความหวานในหน่วยปริมาตรของสารละลายซูโครส จึงสามารถพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณเอสพัวร์กับค่าความหวานดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งพบว่าเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นมีค่าสมการเป็น $y = 2.904x + 135.86$ เมื่อ y แทนค่าความเข้มของสัญญาณเอสพัวร์ และ x แทนค่าความหวานของสารละลายซูโครสในหน่วยปริมาตร สมการเส้นตรงนี้ได้ใช้เป็นสมการเทียบมาตรฐาน (Standard Calibration Equation) สำหรับประยุกต์มาตรดัชนีที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องวัดความหวาน โดยที่ค่าความชันของกราฟคือค่าความไวของมาตรดัชนีหักเหซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.904 int/Brix



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของความเข้มสัญญาณเอสพัวร์กับค่าความหวานของสารละลายซูโครส

ผลการหาค่าความละเอียดของมาตรดัชนีหักเห

ค่าความละเอียดของมาตรดัชนีหักเหได้จากการวัดระดับความเข้มของสัญญาณเอสพัวร์ต่ำสุดที่มากกว่าระดับสัญญาณรบกวน (Noise Level) ซึ่งจากการทดลองระดับความเข้มต่ำสุดของสัญญาณเอสพัวร์ที่หาได้จากการหาค่าความระดับความเข้มจากภาพถ่ายในแบนด์ค่าของสีแดงมีค่าเท่ากับ 0.07 % ของระดับความเข้มของสัญญาณสูงสุด (มีค่าเท่ากับ 255) ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความละเอียดของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นจากการคำนวณโดยใช้ค่าความไวทำให้ได้ค่าความละเอียดของมาตรดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 0.06 Brix

ตารางที่ 2 ผลการวัดความหวานของเครื่องดื่ม

เครื่องดื่ม	ค่าความเข้มของ สัญญาณเอสพัวร์	ค่าความหวานที่วัด โดยเครื่องที่สร้างขึ้น (% Brix)	ค่าความหวานที่วัด โดยเครื่องมาตรฐาน (% Brix)	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด (%)
สไปรท์	179.08	14.88	15.30	2.75
น้ำทับทิม	174.77	13.40	13.59	1.40
M150	191.59	19.19	19.20	0.05
สปอนเซอร์	176.64	14.04	14.20	1.23

ผลการวัดค่าความหวานของเครื่องดื่ม

เมื่อนำมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นไปทดสอบการวัดความหวานของเครื่องดื่ม ได้แก่ น้ำอัดลม (สไปรท์) น้ำผลไม้ (น้ำทับทิมบรรจุกล่องยี่ห้อ Tipco) เครื่องดื่มชูกำลัง (M150) และเครื่องดื่มเกลือแร่ (สปอนเซอร์) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่าผลการวัดค่าความหวานจากมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นมีความผิดพลาดจากเครื่องมาตรฐาน (Abbe-2WAI) ไม่เกิน 3 % และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรดัชนีหักเหที่สร้างขึ้นกับเครื่องมาตรฐาน พบว่ามาตรดัชนีที่สร้างขึ้นมีค่าค่าความละเอียดของการวัดค่าความหวานในหน่วยบริกซ์ (0.06 บริกซ์) ใกล้เคียงกับเครื่องมาตรฐาน (0.05 บริกซ์) ซึ่งยืนยันได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีคุณภาพในระดับเดียวกับเครื่องมือมาตรฐาน

แต่มาตรฐานนี้หักเหที่สร้างขึ้นมีราคาถูกกว่า ขนาดเล็กกว่า น้ำหนักน้อยกว่า จึงมีความเหมาะสมในเรื่องของการเป็นเครื่องวัดความหวานแบบพกพาสำหรับนำไปใช้วัดค่าความหวานของเครื่องดื่มนอกห้องปฏิบัติการได้

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างมาตรฐานหักเหแบบคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ทำงานบนสมาร์ตโฟน เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเครื่องวัดความหวานของเครื่องดื่ม โดยสามารถตรวจวัดจากค่าดัชนีหักเหของสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยมีหลักการในการออกแบบที่สำคัญคือต้องสามารถใช้แสงจากหน้าจอสมาร์ตโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้กล้องหน้าของสมาร์ตโฟนเป็นตัวตรวจวัดได้ มาตรฐานหักเหที่สร้างขึ้นทำงานได้โดยอาศัยอุปกรณ์ทางแสงที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยรวมปริซึมและเลนส์เข้าเป็นชิ้นเดียวกัน ทำให้มีขนาดที่เล็กลงมากจึงสามารถใช้งานบนสมาร์ตโฟนได้

จากผลการวิจัยเมื่อทำการทดสอบมาตรฐานหักเหที่สร้างขึ้นโดยทำการวัดสารละลายซูโครสในน้ำที่มีความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 0-20 % ได้ความสัมพันธ์ของค่าความเข้มของสัญญาณเอสพีอาร์กับค่าดัชนีหักเหของสารละลายซูโครสที่เป็นลักษณะเชิงเส้น สามารถใช้สมการเส้นตรงที่ได้คำนวณหาค่าความไวและค่าความละเอียดของมาตรฐานที่สร้างขึ้นซึ่งมีค่า 2.904 Int/Brix และ 0.06 Brix ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบวัดค่าความหวานของเครื่องดื่ม พบว่ามีค่าความผิดพลาดจากเครื่องมาตรฐานไม่เกิน 3 %

มาตรฐานหักเหที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีค่าความละเอียดใกล้เคียงกับเครื่องมาตรฐาน แต่มีราคาต้นทุนถูกกว่ามาก และมีขนาดเล็กเหมาะกับการพกพาไปใช้นอกห้องปฏิบัติการได้ ดังนั้นผลการวิจัยนี้จึงมีประโยชน์ต่อยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศในแง่ของการสร้างนวัตกรรมของมาตรฐานหักเหที่สามารถทำงานบนสมาร์ตโฟนได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม และผลิตผลทางการเกษตร

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัย จากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้ทุนวิจัยเพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ ตามสัญญาเลขที่ สป 4/2556 และทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักบริหาร โครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] Castritius, S., Kron, A., Schäfer, T., Rädle, M. and Harms, D. J. (2010). "Determination of Alcohol and Extract Concentration in Beer Samples Using a Combined Method of Near-Infrared (NIR) Spectroscopy and Refractometry", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 58, 12634-12641.
- [2] Waes, C. V., Baert, J., Carlier, L. and Bockstaele, E. V. (1998). "A Rapid Determination of the Total Sugar Content and the Average Inulin Chain Length in Roots of Chicory (*Cichorium Intybus* L)", **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 76, 107-110.
- [3] Green, M. D., Nettey, H., Rojas, O. V., Pamanivong, C., Khounsaknalath, L., Ortiz, M. G., Newton, P. N., Fernández, F. M., Vongsack, L. and Manolin, O. (2007). "Use of Refractometry and Colorimetry as Field Methods to Rapidly Assess Antimalarial Drug Quality", **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**. 43, 105-110.

- [4] Homola, J., Yee, S. S. and Gauglitz, G. (1999). "Surface Plasmon Resonance Sensors: Review", **Sensors and Actuators B**. 54, 3-15.
- [5] Matsubara, K., Kawata, S. and Minami, S. (1988). "Optical Chemical Sensor Based on Surface Plasmon Measurement", **Applied Optics**. 27, 1160-1163.
- [6] Kano, K. and Kawata, S. (1995). "Grating-Couple Surface Plasmon for Measuring the Refractive Index of a Liquid Sample", **Japanese Journal of Applied Physics**. 34, 331-335.
- [7] Vala, M., Chadt, K., Piliarik, M. and Homola, J. (2010). "High-Performance Compact SPR Sensor for Multi-Analyte Sensing", **Sensors and Actuators B**. 148, 544-549.
- [8] GE Healthcare. (2007). **Biacore 3000 Instrument Handbook** (Online). Retrieved 21 June 2018, from <https://timothyspringer.org/files/tas/files/biacore3000-instrument.pdf>.
- [9] Lindmeier, C. and Davies, O. L. (2016). **WHO Call on Countries to Reduce Sugar Intake Among Adults and Children** (Online). Retrieved on 10 March 2018, from <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2015/sugar-guideline/en/>.
- [10] Preechaburana, P., Gonzalez, M., Suska, A. and Filippini, D. (2012). "Surface Plasmon Resonance Sensing on Cell Phones", **Angewandte Chemie International Edition**. 51, 11585-11588.