

การสกัดและกลั่นน้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมด และเพคตินโดยใช้เทคนิค
ไมโครเวฟร่วมจากเปลือกส้มเขียวหวาน



อัจฉรา เหล่าประเสริฐ

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

การสกัดและกลั่นน้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมด และเพคตินโดยใช้เทคนิค
ไมโครเวฟร่วมจากเปลือกส้มเขียวหวาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การสกัดและกลั่นน้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมด และเพคตินโดยใช้
เทคนิคไมโครเวฟร่วมจากเปลือกส้มเขียวหวาน

อัจฉรา เหล่าประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นักรบ นาคประสม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองชัย จุวัฒน์สำราญ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา นาคประสม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การสกัดและกลั่นน้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมด และเพคตินโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟร่วมจากเปลือกส้มเขียวหวาน
ชื่อผู้เขียน	นางสาวอัจฉรา เหล่าประเสริฐ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นักรบ นาคประสม

บทคัดย่อ

เปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ที่อุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการด้วยการสกัดน้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมดและเพคตินโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟร่วม ผลวิจัยพบว่าที่กำลังวัตต์ 450 วัตต์ และที่เวลา 21 นาที มีการระเหยของน้ำมันหอมระเหยสูง ซึ่งได้ผลผลิตน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานสูงสุด 0.26 ± 0.085 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน คือที่กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ เวลาในการสกัด 64 วินาที และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:37.5 กรัมต่อมิลลิลิตร สามารถสกัดปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานสูงสุด 32.268 ± 0.336 มิลลิกรัม/กรัมของวัตถุดิบ สูดท้ายสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง คือ กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 75 วินาที อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:42.5 กรัมต่อมิลลิลิตร และ pH 1 ได้ปริมาณผลผลิตเพคตินที่สกัดได้สูงสุด 16.667 ± 0.037 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนากระบวนการสกัดสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกส้มเขียวหวานเพื่อนำไปใช้ผสมในเครื่องสำอางหรือผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคซึ่งมีประโยชน์ในด้านการเพิ่มรายได้และลดการกำจัดของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำผลไม้

คำสำคัญ : การสกัดโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟร่วม, ส้มเขียวหวาน, น้ำมันหอมระเหย, สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด, เพคติน

Title	MICROWAVE ASSISTED EXTRACTION AND DISTILLATION OF ESSENTIAL OIL, TOTAL PHENOLIC AND PECTIN FROM CITRUS RETICULATE PEELS
Author	Miss Atchara Laoprasert
Degree	Master of Engineering in Food Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Doctor Nukrob Narkprasom

ABSTRACT

Citrus reticulata Blanco peels are the main by-product of the industrial beverage fruit processing which are rich in bioactive compounds. The objectives of this research were to feasible study product development from tangerine peels consisting of essential oil, total phenolic and pectin by microwave assisted extraction. The result found that microwave power at 450 watt and irradiation time at 21 min had high evaporation of essential oil, with the highest yield (0.26 ± 0.085 % w/w). The highest yield of total phenolic (32.268 ± 0.336 mg/g of raw material) was received at microwave power of 300 W, irradiation time of 64 s., soil-liquid ratio of 1:37.5 g/ml. Finally, the highest pectin yield of 16.667 ± 0.037 % from *Citrus reticulata* Blanco peels was obtained at microwave power of 450 W, irradiation time of 75 s., soil-liquid ratio of 1:42.5 g/ml and pH of 1. This research can be used to develop the process of extracting bioactive substances from tangerine peels for use in cosmetics or dietary supplements that are not harmful to consumers adding to increased incomes and reducing waste in the juice processing industry.

Keywords : Microwave-assisted extraction *Citrus reticulata* Blanco Essential oil Total phenolic Pectin

กิตติกรรมประกาศ

การสกัดและกลั่นน้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมด และเพคตินโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟ ร่วมจากเปลือกส้มเขียวหวาน เป็นโครงการงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกาย และ กำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจาก บุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นักรบ นาคประสม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานวิจัย ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนโครงการงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองชัย จูวัฒนสารานุกูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวิวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา นาคประสม ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็น อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และได้กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการศึกษาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จ การศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ลักษณะโครงการวิจัยใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จ การศึกษา และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและวิศวกรรมอาหาร คณะ วิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่าน ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และ น้องๆ ที่คอยช่วยเหลือให้การศึกษสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมทั้งญาติพี่น้องทุกคนที่อบรมสั่งสอน ชี้แนะ แนวทางในการดำเนินชีวิต ตลอดจนให้การสนับสนุน อุปการะเลี้ยงดูข้าพเจ้าตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จ การศึกษาในครั้งนี้

อัจฉรา เหล่าประเสริฐ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร.....	5
2.1 ลักษณะทั่วไปของส้มเขียวหวาน.....	5
2.2 ฟลาโวนอยด์.....	8
2.3 น้ำมันหอมระเหย.....	10
2.4 เพคติน.....	11
2.5 การสกัดทั่วไป.....	12
2.6 กลั่นน้ำมันหอยระเหย.....	14
2.7 สกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ.....	17
2.8 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology).....	19
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	24
3.1 วัตถุประสงค์.....	24
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3.3 สารเคมี.....	25
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	25
3.5 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	26
3.6 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม	36
3.7 แผนภาพการดำเนินงาน.....	39
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการกลั่นแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Distillation, MAD).....	40
4.2 ผลของการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE).....	45
4.3 ผลศึกษาการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE).....	53
4.4 แนวทางการศึกษาการสกัดของเหลือทิ้งอุตสาหกรรมน้ำส้ม.....	61
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 ปัญหาที่พบ	64
5.3 ข้อเสนอแนะ	64
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก บทความวิจัย	66
บรรณานุกรม.....	79
ประวัติผู้วิจัย.....	84

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก	29
ตารางที่ 2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร และความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐานแกลลิก.....	30
ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานในการ ทดลองคัดเลือกปัจจัย	31
ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าหาค่าของปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมด จากเปลือกส้มเขียวหวานในการทดลองพินผิวตอบสนอง	32
ตารางที่ 5 ระดับของปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานในการทดลองคัดเลือก ปัจจัย	35
ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าหาค่าของปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือก ส้มเขียวหวานในการทดลองพินผิวตอบสนอง	36
ตารางที่ 7 การออกแบบพินผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดปริมาณฟีนอลิก ทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานแบบไมโครเวฟร่วมแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	37
ตารางที่ 8 การออกแบบพินผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดผลผลิตเพคตินจาก เปลือกส้มเขียวหวานแบบไมโครเวฟร่วมแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	38
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบกำลังไฟของไมโครเวฟกับผลผลิตต่อการใช้พลังงาน	41
ตารางที่ 10 อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาต่อผลผลิตน้ำมันหอมระเหยจากเปลือก ส้มเขียวหวาน(กรัม/100 กรัมของวัตถุดิบ).....	42
ตารางที่ 11 การทดลองเชิงเศษส่วนของแฟคทอเรียล 2^{4-1} (Fractional Factorial Experiments) โดยศึกษาระดับของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง.....	45
ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับความถดถอยของสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือก ส้มเขียวหวาน.....	46
ตารางที่ 13 ผลของการออกแบบพินผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดปริมาณสาร	48

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับความถดถอยของสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือก
ส้มเขียวหวาน..... 49

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบปริมาณฟีนอลิกที่สภาวะต่างๆในการสกัดจากเปลือกส้มเขียวหวาน 52

ตารางที่ 16 ผลการทดลองเชิงเศษส่วนของแฟคทอเรียล 2^{4-1} (Fractional Factorial Experiments)
โดยศึกษาระดับของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูงของการสกัดผลผลิตเพคติน 53

ตารางที่ 17 การวิเคราะห์ความถดถอยของสัมประสิทธิ์ในแต่ละปัจจัย..... 54

ตารางที่ 18 ผลของการออกแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดปริมาณ 56

ตารางที่ 19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการถดถอยของการสกัดเพคตินจากเปลือก
ส้มเขียวหวาน..... 57

ตารางที่ 20 การเปรียบเทียบผลผลิตเพคตินที่สภาวะต่างๆในการสกัดจากเปลือกส้มเขียวหวาน 60



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ลักษณะของสั้มเขียวหวาน	5
ภาพที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของพลาไวโนอยด์	8
ภาพที่ 3 โครงสร้างของสารประกอบพีนอลิก.....	9
ภาพที่ 4 โครงสร้างของเพคติน.....	11
ภาพที่ 5 อุปกรณ์การสกัดแบบต่อเนื่องขนาดในห้องปฏิบัติการ	13
ภาพที่ 6 แผนผังแสดงอุปกรณ์การสกัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	14
ภาพที่ 7 การกลั่นด้วยไอน้ำ.....	15
ภาพที่ 8 เครื่องกลั่นแบบไมโครเวฟร่วม.....	16
ภาพที่ 9 แสดง dipole rotation และ ionic conduction ของคลื่นไมโครเวฟ	18
ภาพที่ 10 แสดงกลไกการสกัดของวิธีการแบบดั้งเดิม (A) และการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (B)....	18
ภาพที่ 11 Mathematical model.....	20
ภาพที่ 12 เครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วม	26
ภาพที่ 13 เปลือกสั้มเขียวหวานก่อนสกัดน้ำมันหอมระเหย	27
ภาพที่ 14 เปลือกสั้มเขียวหวานหลังสกัดน้ำมันหอมระเหย.....	27
ภาพที่ 15 เครื่องสกัดแบบไมโครเวฟร่วม.....	28
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร และ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก	30
ภาพที่ 17 กรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรอง เพื่อแยกสารสกัดกับผงเปลือกสั้ม	33
ภาพที่ 18 นำเอทานอลล้างขวดสกัดและเติมลงไป	33
ภาพที่ 19 กรองสุญญากาศอีกครั้ง	33
ภาพที่ 20 นำสารสกัด (เพคตินและเอทานอล) ใส่หลอด.....	34

ภาพที่ 21	เตรียมหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกระหว่างตะกอนเพคตินกับของเหลวใส.....	34
ภาพที่ 22	ผลผลิตเพคติน.....	35
ภาพที่ 23	การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	37
ภาพที่ 24	แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน.....	39
ภาพที่ 25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไมโครเวฟที่ 100-800 วัตต์ต่อ.....	41
ภาพที่ 26	อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการสกัดต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด จากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร.....	50
ภาพที่ 27	อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อปริมาณ สารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่เวลาในการสกัด 60 วินาที.....	50
ภาพที่ 28	อิทธิพลของเวลาในการสกัดและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อปริมาณ สารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์.....	51
ภาพที่ 29	อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการสกัดต่อผลผลิตเพคติน จากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร.....	58
ภาพที่ 30	อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อผลผลิตเพคติน จากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่เวลาในการสกัด 75 วินาที.....	58
ภาพที่ 31	อิทธิพลของเวลาในการสกัดและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อผลผลิตเพคติน จากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์.....	59
ภาพที่ 32	แนวทางการศึกษาการสกัดของเหลือทิ้งอุตสาหกรรมน้ำส้มเพื่อเป็นสารตั้งต้นประกอบด้วยน้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมด และเพคตินในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ.....	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ส้มเขียวหวาน (*Citrus reticulata*) เป็นผลไม้ที่เกษตรกรนิยมปลูกกันมากในภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องจากมีรสชาติหอมหวานเป็นที่นิยมของผู้บริโภค ทั้งยังมีสรรพคุณทางยาโดยที่ส่วนเปลือกใช้เป็นยาแก้ลมวิงเวียน หน้ามืด ใช้เป็นยาแก้อาเจียน ใช้เป็นยาขับลม ท้องอืดแน่นเพื่อ จุกเสียดแน่นท้อง ส่วนผลอุดมไปด้วยวิตามินซีใช้ป้องกันโรคหวัดและการติดเชื้อแบคทีเรีย ช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือด บรรเทาอาการกระหายน้ำ ทั้งยังทำให้ระบบการย่อยอาหารของร่างกายทำงานเป็นไปอย่างปกติ ดังนั้นจึงนิยมนำมาแปรรูปเป็นน้ำส้มคั้นขายตามท้องตลาด จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าผลผลิตส้มทั่วโลกประมาณ 51.8 พันล้านตัน ถูกแปรรูปเป็นน้ำส้มคั้น 2 พันล้านตันโดยในอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำส้มนั้นเปลือกส้มเป็นของเสียของกระบวนการประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Boukroufa et al., 2015) ซึ่งการเพิ่มมูลค่าจากของเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้เป็นที่ต้องการอย่างมาก เนื่องจากการกำจัดของเสียเป็นจำนวนมากเหล่านี้เพิ่มค่าใช้จ่ายของโรงงาน และยังคงคำนึงถึงกฎหมายทางอุตสาหกรรม (Farhat et al., 2011) ดังนั้นการแปรรูปของเสียให้มีมูลค่าสูงขึ้นช่วยให้โรงงานลดค่าใช้จ่ายหรืออาจเพิ่มกำไร และยังเพิ่มผลิตภัณฑ์ทางเลือกใหม่ที่เป็นทางเลือกของอุตสาหกรรมน้ำส้มและผู้บริโภค จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าเปลือกส้ม (Boukroufa et al., 2015) และเมล็ด (M'hiri et al., 2015) มีสารสำคัญที่มีศักยภาพแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เบื้องต้น 3 ชนิด คือ น้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมด และเพคติน

น้ำมันหอมระเหยที่สกัดจากเปลือกส้มนั้นสามารถนำไปใช้ในอาหารเพื่อเป็นวัตถุดิบในการแต่งกลิ่นในเครื่องดื่ม ไอศกรีม ผลิตภัณฑ์อาหาร และอุตสาหกรรมยา เนื่องจากสามารถยับยั้งการอักเสบและต้านเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีศักยภาพในการเป็นตัวตั้งต้นในการทำผลิตภัณฑ์สบู่น้ำหอม เครื่องสำอาง สเปรย์กำจัดยุง และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดในบ้าน (Farhat et al., 2006) สารฟีนอลิกทั้งหมดเป็นสารสกัดทางธรรมชาติจากผักและผลไม้ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพนั้นมีประโยชน์ต่อสุขภาพ สามารถช่วยลดการเกิดมะเร็ง และโรคหัวใจ (Edrisi Sormoli and Langrish, 2016) นอกจากนี้สารต้านอนุมูลอิสระเมื่อเพิ่มเข้ามาในอาหารทำให้ลดการเหม็นหืน ชะลอการเกิดสารออกซิเดชันที่เป็นพิษ รักษาคุณภาพทางโภชนาการ และยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร (Moulehi et al., 2012) ซึ่งมีการทดสอบพบว่าสารฟีนอลิกมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบทางชีวภาพฟีนอลิกนั้นมีมากในเปลือกและเมล็ดของผลไม้ ซึ่งเป็นของเสียที่ไม่พึงประสงค์ในการแปรรูปน้ำผลไม้

เนื่องจากทำให้เกิดรสผาดและขม (Edrisi Sormoli and Langrish, 2016) แบบซับซ้อนในผนังเซลล์ของพืชซึ่งมีส่วนใหญ่ประกอบด้วย D-กรดกาแลค และน้ำตาลตามธรรมชาติ เช่น L-แรมโนส I-อราปิโนส และ D-กาแลคโตส เพคตินถูกใช้เป็นส่วนก่อเจล สารอิมัลชัน และตัวทำให้ข้นในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อผลิตแยมและเยลลี่ นอกจากนี้ยังใช้สารก่อเจลในผลิตภัณฑ์แคลอรีต่ำสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานและโรคอ้วน (Hosseini et al., 2016) ซึ่งเห็นได้ว่าการเพิ่มมูลค่าของเปลือกส้มที่เป็นของเสียของโรงงานเครื่องดื่มนั้นเป็นการศึกษาที่มีประโยชน์ในการแปรรูปเป็นสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ต่างๆ และยังช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม (Sahraoui et al., 2011) การสกัดเป็นเทคนิคที่สำคัญในการเพิ่มมูลค่าจากของเหลือทิ้งทางการเกษตรของกระบวนการอุตสาหกรรม โดยในการสกัดด้วยเทคนิคทั่วไปมีหลายวิธีได้แก่ วิธีการการหมัก การใช้ตัวทำละลายให้ไหลผ่านผนังเป็น การสกัดที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ใช้ความร้อนจึงลดการสูญเสียสารสำคัญแต่สิ้นเปลืองตัวทำละลายค่อนข้างมากและใช้ระยะเวลาในการสกัดค่อนข้างนานกว่าจะสกัดสารได้อย่างสมบูรณ์ (Sukhdev Swami Handa et al., 2008) ส่วนวิธีการขง การตุ๋น การต้มเป็นการสกัดโดยใช้ความร้อนซึ่งอาจทำให้เกิดการสูญเสียสารสำคัญได้ การขงจะใช้เวลาสั้น ๆ มากกว่าการต้มซึ่งใช้ความร้อนสูงและเวลานาน ส่วนการตุ๋นความร้อนเช่นกันแต่จะใช้ระยะเวลานานกว่าการต้ม เป็นต้นดังนั้นกระบวนการการพัฒนาวิธีการสกัดสารสำคัญจากพืชจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้สารสกัดที่มีคุณภาพซึ่งนอกเหนือจากวิธีการสกัดตามที่กล่าวมาแล้วนั้นในปัจจุบันการสกัดโดยใช้ไมโครเวฟร่วมเป็นวิธีที่มีความนิยมมากขึ้น เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการสกัดต่ำ ตัวทำละลายน้อย ผลผลิตสูงและมีคุณภาพกว่า และต้นทุนต่ำกว่าแบบใช้ความร้อนในการสกัด (Hosseini et al., 2016) ซึ่งเทคนิคการสกัดแบบไมโครเวฟร่วมเป็นวิธีการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นนี้จะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการทำให้อนุภาคหรือโมเลกุลที่มีขั้วเสียดสีกันและเกิดความร้อนขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อนำสารที่จะสกัดไปวางอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและด้วยคุณสมบัติความเป็นขั้วของโมเลกุลภายในสารที่จะสกัดจะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่หรือเสียดสีกันทำให้เกิดความร้อนขึ้นซึ่งมีผลต่อเซลล์พืชและเกิดการสกัดออกมาของสารสำคัญ (อารีรัตน์, 2560)

ดังนั้นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือศึกษาการนำของเสียจากเปลือกส้มเขียวหวานนี้มาสกัดสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และน้ำมันหอมระเหย เพื่อใช้ผสมในเครื่องสำอางหรือผลิตภัณฑ์อาหารเสริม โดยใช้เทคนิคการสกัดและกลั่นแบบไมโครเวฟร่วม ซึ่งกระบวนการที่คุ้มค่าต่อการลงทุนสามารถนำไปต่อยอดเพื่อขยายประสิทธิภาพการสกัดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากการสกัดเปลือกของส้มเขียวหวาน ดังนี้

1.2.1. ศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการกลั่นแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Distillation, MAD) โดยปราศจากตัวทำละลาย

1.2.2. ศึกษาการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE)

1.2.3. ศึกษาการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้เปลือกส้มเขียวหวานจากโรงงานแปรรูปน้ำส้มที่เป็นของเหลือทิ้ง นำเปลือกส้มเขียวหวานใส่ในภาชนะที่มีสารละลายโปแตสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.1 กรัม/น้ำ 1 ลิตร เป็นเวลา 10 นาที โดยเปลือกส้มเขียวหวานในการกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Distillation, MAD) จะถูกหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ส่วนเปลือกส้มในการทดลองการสกัดเพคตินและสารฟีนอลิกทั้งหมด นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเปลือกส้มแห้งป่นและกรองผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 30 เมท เก็บบรรจุในภาชนะปิดสนิท โดยสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE) ซึ่งตู้อบไมโครเวฟที่ใช้ให้ความร้อนเป็นตู้อบไมโครเวฟใช้ตามครัวเรือน รุ่น Samsung, ME711K นอกจากนี้สารเคมีและเครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลองจาก Union Science Co.,Ltd.

โดยที่ขอบเขตของงานวิจัยจะศึกษาความเป็นไปได้ในการสกัดสารสำคัญจากเปลือกส้มเขียวหวานดังนี้

1.3.1. ศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการกลั่นแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Distillation, MAD) โดยปราศจากตัวทำละลาย

ตัวแปรอิสระประกอบด้วย

- กำลังวัตต์ไมโครเวฟ ได้แก่ 100, 200, 300, 450, 600, 700 และ 800 วัตต์
- เวลาในการสกัด ได้แก่ 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 และ 30 นาที

ตัวแปรตามประกอบด้วย

- ผลผลิตน้ำมันหอมระเหย เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.3.2. ศึกษาการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE)

ตัวแปรอิสระประกอบด้วย

- กำลังวัตต์ไมโครเวฟ ได้แก่ 100, 200, 300, และ 450 วัตต์
- เวลาในการสกัด ได้แก่ 30, 60 และ 90 วินาที
- อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว ได้แก่ 1:20, 1:30 และ 1:40 กรัม/มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอล ได้แก่ 20, 35 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ตัวแปรตามประกอบด้วย

- ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด มิลลิกรัมของกรดแกลลิก/กรัมของวัตถุดิบแห้ง

1.3.3. ศึกษาการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE)

ตัวแปรอิสระประกอบด้วย

- กำลังวัตต์ไมโครเวฟ ได้แก่ 300, 450 และ 600 วัตต์
- เวลาในการสกัด ได้แก่ 30, 60, 90 และ 180 วินาที
- อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว ได้แก่ 1:10, 1:20, 1:30 และ 1:40 กรัม/มิลลิลิตร
- pH ได้แก่ 1 และ 2

ตัวแปรตามประกอบด้วย

- ผลผลิตเพคติน เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. สารสกัดเปลือกส้มเขียวหวานประกอบด้วยน้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมดและเพคติน

1.4.2. แนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากของเหลือทิ้งทางการเกษตรของอุตสาหกรรมน้ำส้มคั้น

1.4.3. ลดของเสียและเพิ่มมูลค่าจากของเหลือทิ้งของอุตสาหกรรมน้ำส้ม

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

2.1 ลักษณะทั่วไปของส้มเขียวหวาน



ภาพที่ 1 ลักษณะของส้มเขียวหวาน

ที่มา : Kornberger (2016)

ที่มา : (Kornberger 2016)

2.1.1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Citrus reticulata* Blanco

ชื่อวงศ์ : Rutaceae

ชื่อไทย : ส้มเขียวหวาน

ส้มเขียวหวาน เป็นพืชตระกูลส้มชนิดหนึ่ง เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ลำต้นมีทรงพุ่ม กิ่งมีหนามยาวเล็กน้อย ใบเลี้ยงเดี่ยว ใบมีลักษณะทรงไข่ยาวรี ดอกมีสีขาว มีกลิ่นหอม ผลมีลักษณะกลมแป้น เปลือกบางผิวเรียบเกลี้ยงลื่น เปลือกแกะออกง่าย ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อผลสุกจะมีสีเหลือง หรือสีเขียวอมเหลืองตามสายพันธุ์ มีเนื้อฉ่ำน้ำสีเหลือง อยู่ข้างในแยกเป็นกลีบ ๆ มีรสชาติเปรี้ยวอมหวานหรือหวานตามสายพันธุ์ มีกลิ่นหอม ส้มเขียวหวานที่นิยมปลูก ในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ เช่น ส้มโชกุน ส้มสายน้ำผึ้ง ส้มบางมด และส้มสีทอง เป็นต้น

2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

- 1) ลำต้น เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ลำต้นมีทรงพุ่ม มีกิ่งก้านขยาย มีต้นสูงโปร่ง เป็นเนื้อไม้แข็ง เปลือกมีผิวเรียบ ลำต้นมีกิ่ง มีหนามยาวเล็กน้อย เปลือกมีสีน้ำตาล
- 2) ใบ เป็นใบเลี้ยงเดี่ยว มีลักษณะทรงไข่ยาวรี ใบมีสีเขียวแก่ พื้นผิวใบเรียบเกลี้ยงเป็นมันค่อนข้างหนา มีกลิ่นหอมมาก เพราะมีต่อมน้ำมันอยู่ ใบด้านบนมีสีเขียวเข้ม ใต้ใบมีสีอ่อนกว่า
- 3) กิ่ง มีลักษณะกลม จะมีใบและมีหนามแหลมคมอยู่ทั่วไป มีกิ่งก้านขยาย มีสีเขียวเข้ม
- 4) ราก เป็นระบบแก้ว มีลักษณะกลม แทงลึกลงในดิน มีรากแขนงและรากฝอยขนาดเล็กแพร่กระจาย บริเวณรอบลำต้น มีสีน้ำตาล
- 5) ดอก ออกเป็นช่อ หรือออกเดี่ยว จะมีดอกออกเป็นกระจุก กลีบดอกมีสีขาว มีกลีบเลี้ยงสีเขียวอ่อน และมีกลิ่นหอม ออกตามซอกใบและปลายยอดกิ่ง
- 6) ผล มีลักษณะกลมแป้น เปลือกบางผิวเรียบเกลี้ยงลื่น เปลือกแกะออกง่าย ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อผลสุกจะมีสีเหลือง หรือสีเขียวยอมเหลือง ตามสายพันธุ์ ภายในผลมีเนื้อฉ่ำน้ำสีเหลือง อยู่ข้างในแยกเป็นกลีบจะมีเปลือกเยื่อบาง สีขาว หุ้มกลีบติดกันเป็นวงกลมหุ้มแกนกลางอีกที ข้างในจะมีเนื้อเป็นถุงน้ำเล็กสีเหลือง อยู่เบียดกันแน่น และมีเมล็ดอยู่ประปราย มีรสชาติเปรี้ยวอมหวาน หรือหวานตามสายพันธุ์ มีกลิ่นหอมสดชื่น
- 7) เมล็ด มีลักษณะรูปกลมรี เมล็ดเล็ก เปลือกเมล็ดแข็ง มีสีขาวนวล จะมีเมล็ดอยู่ข้างในเนื้อ

2.1.3 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบ

สะสมไปด้วยวิตามินต่าง ๆ ซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกายของเรา เช่น วิตามินซี วิตามินเอ (เบต้าแคโรทีน) วิตามินบี วิตามินดี ธาตุแคลเซียม ธาตุโพแทสเซียม ธาตุฟอสฟอรัส ธาตุเหล็ก และคอลลาเจน อีกด้วยและนอกจากนี้ยังมี โยอาหารที่ช่วยในระบบขับถ่าย ผลส้มสด 100 กรัม จะมีเบต้าแคโรทีน 82 ไมโครกรัมและวิตามินซี 50 ไมโครกรัม โดยส้ม 1 ผลส้มโดยทั่วไปจะมีน้ำหนักเฉลี่ยอยู่ที่ 140 กรัมเท่ากับ ส้ม 1 ลูก มีวิตามินซี 70 ไมโครกรัม และมีเบต้าแคโรทีน 115 ไมโครกรัม (MedThai, 2013)

2.1.4 สารต้านอนุมูลอิสระ

ร่างกายมีการป้องกันภาวะการสะสมของสารอนุมูลอิสระอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนแรกนั้น เกิดจากการที่ร่างกายมีการสร้างเอนไซม์หรือกลไก เช่น เอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant enzymes) ควบคุมอนุมูลอิสระให้อยู่ในปริมาณที่สมดุล ทั้งนี้เพราะอนุมูลอิสระเหล่านี้มีหน้าที่ช่วยทำลายสิ่งแปลกปลอม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อร่างกาย แต่เมื่อใดที่ร่างกายได้รับสารพิษจากภายนอกมาก เช่น การสูบบุหรี่ สัมผัสกับแสงแดดจ้า หรือเลือกรับประทานอาหารที่มีน้ำมัน อาหารปิ้งย่าง เผาไหม้ เกรียม ฯลฯ จะส่งผลให้ระบบควบคุมสารพิษในร่างกายทำงานได้น้อยลง อนุมูลอิสระจะมีการสะสมตัวมากขึ้นจนกลายเป็นสารพิษที่มีผลเสียต่อร่างกาย ดังนั้น กลไกการควบคุมอนุมูลอิสระของร่างกายอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ มีความจำเป็นต้องพึ่งพาในส่วนที่สองนั้น คือ กลุ่มของสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้มาจากอาหาร เช่น วิตามินเอ (Vitamin A) วิตามินซี (Vitamin C) วิตามินอี (Vitamin E) เบต้าแคโรทีน ที่มีในอาหาร รวมทั้งกลุ่มพอลิฟีนอล (Polyphenols) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) ที่พบมากอยู่ในพืชผัก และผลไม้ เพื่อเข้าไปช่วยเสริมสร้างระบบต้านออกซิเดชัน (Antioxidant) ในร่างกายให้มีประสิทธิภาพในการทำลายอนุมูลอิสระได้ดียิ่งขึ้นโดยทั่วไปสารต้านอนุมูลอิสระ แบ่งเป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1) Primary antioxidant สารในกลุ่มนี้ได้แก่สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) ทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน นอกจากนี้ยังรวมถึงสารโทโคฟีรอลธรรมชาติและสังเคราะห์ (Natural and synthetic tocopherol), Alkyl gallate, BHA, BHT และ TBHQ ซึ่งสารในกลุ่มดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน

2) กรดแอสคอร์บิก หรือวิตามิน สารในกลุ่มนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จึงเป็นการช่วยกำจัดออกซิเจนในระบบปิดได้

3) Secondary antioxidant สารในกลุ่มนี้ได้แก่ Dilauryl thiopropionate และ ทำหน้าที่สลายโมเลกุลของ Lipid hydroperoxide ทำให้เป็นสารที่มีความเสถียร

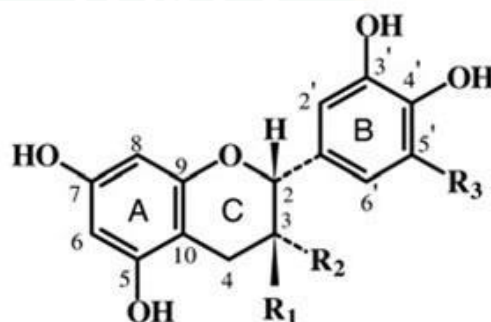
4) Enzymic antioxidant สารในกลุ่มนี้ได้แก่ เอนไซม์ต่างๆ ซึ่งแบ่งได้เป็น Primary Antioxidant enzyme และ Auxiliary antioxidant enzyme สารในกลุ่มนี้ทำหน้าที่กำจัดออกซิเจนหรืออนุพันธ์ของออกซิเจนโดยเฉพาะไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

5) Chelating agent หรือ Sequestrant สารในกลุ่มนี้ เช่น กรดซิตริก และกรดอะมิโน เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ไปจับไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก และทองแดง ซึ่งไอออนเหล่านี้เป็นไอออนที่ส่งเสริมและเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร (เจนวิธิสุข, 2544).

2.2 ฟลาโวนอยด์

ฟลาโวนอยด์ เป็นสารที่พืชส่วนใหญ่สร้างขึ้น เพื่อช่วยในการป้องกันอันตรายจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยสามารถดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต และปล่อยออกมาเป็นสีต่างๆของดอกไม้ จึงเป็นสารกลุ่มสำคัญที่ให้สีแก่พืช รวมถึงสีสวยงามของกลีบดอกไม้ นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องของการเจริญเติบโต ป้องกันจุลลินทรีย์ ที่ทำให้เกิดโรค และช่วยในเรื่องการขยายพันธุ์ได้ สารพวกฟลาโวนอยด์ มีหน้าที่เป็นสารให้สีและป้องกันรังสี UV-B จะพบมากได้ที่แวคิวโอล (Vacuole) ของ Guard cell และ Epidermal cell

สารฟลาโวนอยด์พบได้ทั่วไปในพืชผักและผลไม้ ไม่ว่าจะเป็นส่วนใบ ราก ดอก ผล เนื้อไม้ เปลือก ต้น หรือเมล็ด ฟลาโวนอยด์จัดเป็นสารสำคัญของกลุ่มโพลีฟีนอล (Polyphenol) มีสูตรโครงสร้างหลักเป็นฟลาเวอน (Flavan) หรือ 2-ฟีนิลเบนโซไพแรน (2-Phenylbenzopyran) ประกอบด้วยคาร์บอน 15 อะตอมที่มีสูตรโครงสร้างพื้นฐาน $C_6-C_3-C_6$ (ภาพที่ 2) ประกอบด้วย Substituted benzene ring จำนวน 2 หมู่ เชื่อมต่อกันด้วย Aliphatic chain ของคาร์บอน 3 อะตอมโดยมีความแตกต่างตรง Oxidation state ของ Aliphatic chain ของอะตอมคาร์บอน 3 อะตอมนี้ มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) รวมอยู่ในโมเลกุลตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป ตัวอย่างสารฟลาโวนอยด์ที่พบในพืชเช่น Naringin เป็นสารที่ทำให้รสขมในเปลือกผลของพืชตระกูลส้ม (Citrus fruit) หรือ Catechin พบในใบชาเขียว สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ส่วนใหญ่ จัดเป็น Nutraceutical มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ทำหน้าที่ในการชะลอหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ช่วยหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ แหล่งอาหารที่พบฟลาโวนอยด์มาก ได้แก่ พืช ผัก และผลไม้ เช่น ยอ ถั่วเหลือง กระชายดำ และสารสกัด จากเมล็ดองุ่น รวมทั้งเครื่องดื่มต่าง ๆ เช่น ชาและไวน์ เป็นต้น



ภาพที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์

ที่มา : โอภา และคณะ (2549)

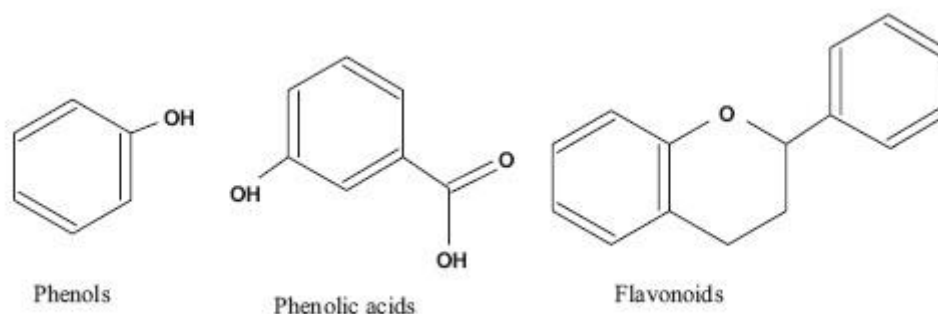
ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) ประเภทพอลิฟีนอล (Polyphenol) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนแอโรมาติก (Aromatic ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) รวมอยู่ในโมเลกุลตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป สามารถละลายในน้ำได้ มักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาล ในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (Glycoside) สารประกอบฟลาโวนอยด์ ได้แก่ Flavonone, Flavone, Catechin และ Anthocyanins

2.2.1 สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) หรือสารประกอบฟีนอล เป็นสารที่พบได้ตามธรรมชาติ ในพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ สมุนไพร ถั่วเมล็ดแห้ง เมล็ดธัญพืช ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในการเจริญเติบโต มีสรรพคุณที่ดีต่อสุขภาพคือ มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) สามารถละลายได้ในน้ำ

โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล

สารประกอบฟีนอล มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน ที่เป็นอนุพันธ์ของวงแหวนเบนซีน มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ต่ออยู่ สารประกอบฟีนอลพื้นฐาน คือ สารฟีนอล (phenol) ในโมเลกุลประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วงและหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่



ภาพที่ 3 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก

ที่มา : โอภา และคณะ (2549)

2.2.2 ฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา

สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์นอกจากจะเป็นสารที่ทำให้ดอกหรือผลไม่มีสีสวย เช่น สีเหลือง สีชมพู สีแดงฟ้า หรือสีม่วง ซึ่งมีประโยชน์ใช้ในการล่อแมลง นก หรือผึ้ง เข้ามาผสมเกสรเพื่อแพร่กระจายพันธุ์ มีรายงานการศึกษายืนยันถึงฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของฟลาโวนอยด์ที่ใช้ในการป้องกันและรักษาโรคต่างๆเช่น โรคเกี่ยวกับหัวใจและหลอดเลือด ฤทธิ์ต้านมะเร็ง ด้านแบคทีเรีย ด้านการอักเสบ และด้านอาการแพ้ ซึ่งพบว่า คุณสมบัติเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระของสารฟลาโวนอยด์ สำหรับกลไกในการต้านอนุมูลอิสระของสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ มีรายงานการศึกษาอย่างกว้างขวาง แต่ทั้งนี้ไม่มีรายงานยืนยันที่ชัดเจนถึงกลไกการออกฤทธิ์สำหรับฟลาโวนอยด์ต่างชนิดกัน อย่างไรก็ตามกลไกหลักในการออกฤทธิ์ของสารกลุ่มนี้รวมถึง กลุ่มโพลีฟีนอลอื่น ๆ มี 3 กลไก คือ

1) เป็นสารคีเลต (Chelating agent) โดยเฉพาะสารโพลีฟีนอลที่มีโครงสร้างเป็นออร์โธไดไฮดรอกซีฟีนอลิก (Ortho-dihydroxyphenolic) ทำหน้าที่จับหรือฟอร์มพันธะโคออร์ดิเนตกับโลหะหนัก เช่น ทองแดงและเหล็ก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระรวมทั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ

2) เป็นสารต้านออกซิเดชันโดยหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ในการยับยั้งหรือขจัดอนุมูลอิสระ เช่น Lipid alkoxyl และ Peroxyl radicals เป็นต้น

3) ทำหน้าที่ Regenerate วิตามินอี (α -tocopherol) โดยจะรีดิวซ์อนุมูล α -tocopherol กลับเป็น α -tocopherol เหมือนเดิม ทำให้สามารถทำหน้าที่เป็น antioxidant ได้มีรายงานการศึกษา พบว่าฟลาโวนอยด์โดยเฉพาะในกลุ่มฟลาโวน (Flavone) และไอโซฟลาโวน (Isoflavone) สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งการอักเสบ

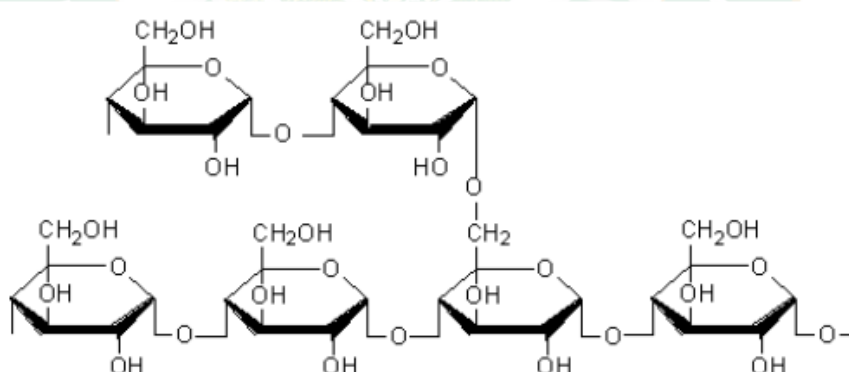
2.3 น้ำมันหอมระเหย

น้ำมันหอมระเหยเป็นสารอินทรีย์ที่พืชผลิตขึ้นตามธรรมชาติ เก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น กลีบดอก ผิวของผล เกสร ราก เปลือกของลำต้น หรือยางที่ออกมาจากเปลือก มีองค์ประกอบทางเคมีที่สลับซับซ้อนและแตกต่างกันนับสิบล้านชนิด น้ำมันมีลักษณะเป็นของเหลวไม่เหนียวเหนอะหนะเหมือนน้ำมันพืช มีกลิ่นหอมระเหยง่าย เวลาที่ได้รับความร้อนอนุภาคเล็ก ๆ ของน้ำมันหอมระเหยจะระเหยออกมาเป็นไอทำให้เราได้กลิ่นหอม กลิ่นของน้ำมันหอมระเหยในส่วนของดอกไม้มีบทบาทสำคัญในการช่วยดึงดูดแมลงมาผสมเกสร ปกป้องการรุกรานจากศัตรู และรักษาความชุ่มชื้นแก่พืช สำหรับประโยชน์ต่อมนุษย์ น้ำมันหอมระเหยมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค บรรเทาอาการอักเสบ หรือ

ลดบวม คลายเครียด หรือกระตุ้นให้สดชื่น ทั้งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิด

2.4 เพคติน

เพคตินมาจากภาษากรีกคำว่า Braconnot หมายถึงตัวประสานหรือตัวทำให้แข็ง (congeal or solidity) ในทางการค้าจะสกัดเพคตินจากเปลือกผลไม้ตระกูลส้มและกากแอปเปิ้ล (Fishman et al., 2006) เนื่องจากเพคตินเป็นสารประกอบโพลีเมอร์ที่พบในพืช โดยจับกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และไกลโคโปรตีนของผนังเซลล์พืช สารประกอบเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์และเป็นสารที่สำคัญในบริเวณผนังบางชั้นกลาง (middle lamella) ที่ยึดเหนี่ยวเซลล์เข้าด้วยกัน โดยเฉพาะบริเวณที่มีเนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม เช่น ต้นอ่อน ใบ และผลไม้ เพคตินเป็นสารโพลีแซคคาไรด์มีองค์ประกอบ 2 ส่วนใหญ่ ได้แก่ ส่วนของ homogalacturonan (1-4) linked ซึ่งเป็นกรดกาแลคทูโรนิกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และกลุ่มเมทิลเอสเทอร์ และส่วน rhamnogalactunan (1-2) repeating linked ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อกันซ้ำๆ ของน้ำตาลแรมโนสและกรดกาแลคทูโรนิก ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างของเพคติน

ที่มา : ชินานาฏ และสมัชญ์ (2555)

เพคติน (pectin) เป็นโพลีเมอร์ที่พืชสร้างขึ้น เป็นโพลีเมอร์ที่ซับซ้อนประกอบด้วยหน่วยสารเคมีหลายชนิดเพคตินเป็นสารมีขี้ผึ้งจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายมีขี้ผึ้ง เช่น น้ำหรือสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดต่าง แต่ไม่ละลายในสารละลายพวกน้ำมันซึ่งไม่มีขี้ผึ้ง นอกจากนี้คุณสมบัติสูงยังช่วยให้เพคตินละลายได้ดีขึ้น เพคตินเป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบมากในผักและผลไม้ที่กำลังเจริญเติบโตโดยเกาะ

กับผนังเซลล์ที่เรียกว่าผนังบางชั้นกลางและสะสมเพิ่มขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น เพคตินบางส่วนจะเกาะอยู่กับเซลลูโลส โดยทำหน้าที่เชื่อมเข้าด้วยกันและควบคุมการซึมผ่านของน้ำ เพคตินเป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถทำให้เจลคงรูปได้ สารประกอบเพคตินจัดเป็นกรดเพคตินิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นสารผสมอาหารเพื่อสร้าง ให้เกิดเนื้อสัมผัสตามต้องการ มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อละลายน้ำจะพองตัวเป็นเจลทำหน้าที่ได้ทั้งการเป็นสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) สารข้น (thickener) และสารที่ทำให้เกิดความเสถียร (stabilizer) ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภท โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม และยา เพื่อให้กระบวนการผลิตสะดวกขึ้นและช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น เช่น ในอุตสาหกรรมทำแยม เยลลี่ ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดความเสถียรในผลิตภัณฑ์นมและโยเกิร์ต ใช้เป็นสารข้นของซอส เครื่องปรุง น้ำเชื่อมเข้มข้น น้ำสลัด เครื่องดื่ม เป็นต้น ใช้ผลิตอาหารเด็ก เพราะเพคตินช่วยลดการระคายเคือง นอกจากเพคตินจะใช้ในอุตสาหกรรมเป็นสารผสมอาหารโดยตรงแล้ว ยังนำมาใช้เป็นเส้นใยในรูปของอาหารเสริมสุขภาพ เช่น ช่วยลดคอเลสเตอรอลและระดับน้ำตาลในเลือด ใช้เป็นเส้นใยอาหาร ป้องกันโรกระบบทางเดินอาหาร และใช้ในด้านเภสัชกรรมช่วยเพิ่มการทำงานของยา เป็นต้น

2.5 การสกัดทั่วไป

วิธีการที่ใช้ในการสกัดมีหลากหลายวิธีด้วยกันยกตัวอย่างได้ดังนี้คือ

2.5.1 การหมัก (Maceration Extraction--ME) วิธีการเป็นการนำผงสมุนไพรที่ผ่านการบดแล้วใส่ลงในภาชนะปิดจากนั้นเติมด้วยตัวทำละลายที่ต้องการสกัดแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3-7 วัน หมั่นกวนหรือคนสารสกัดบ่อย ๆ เพื่อให้ได้สารสำคัญออกมาจากสารสกัด เมื่อครบกำหนดเวลาจึงค่อย ๆ กรองนำสารสกัดออก ถ้าต้องการให้ได้สกัดสารออกมาได้มากที่สุดอาจสามารถสกัดซ้ำได้หลายครั้ง

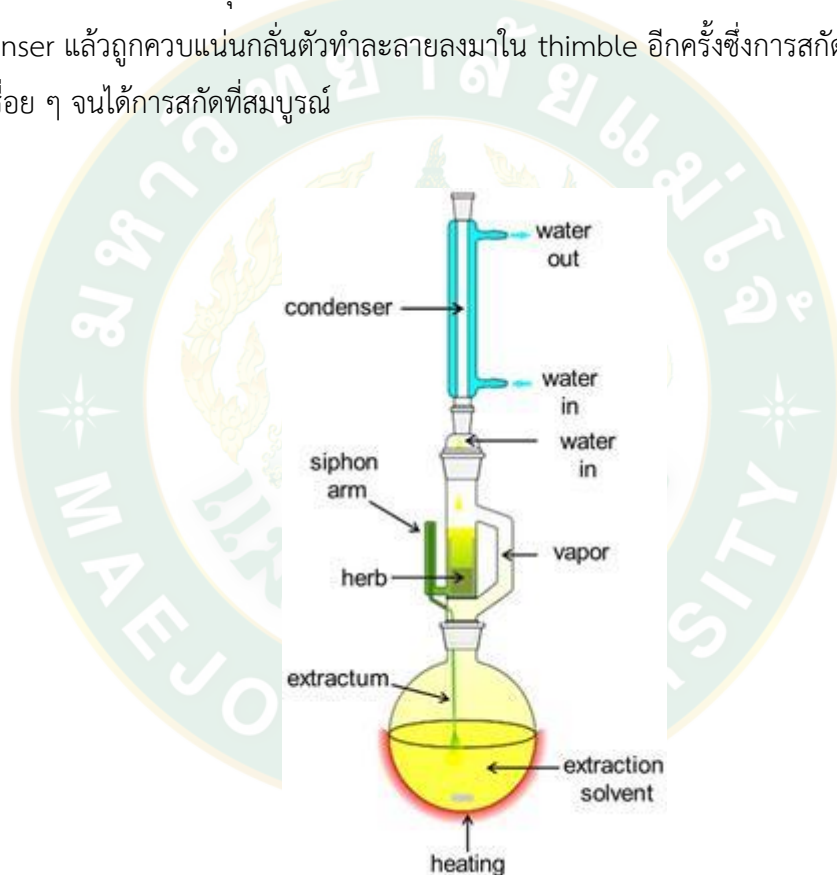
2.5.2 การใช้ตัวทำละลายให้ไหลผ่านผงสมุนไพร (Percolation Extraction) เป็นการสกัดแบบต่อเนื่องด้วยเครื่อง percolator โดยการนำสมุนไพรมาหมักกับตัวทำละลายให้พองตัวเต็มที่พอขึ้นประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วค่อย ๆ ใส่ผงสมุนไพรไปที่ละน้อย จากนั้นจึงเติมตัวทำละลายลงไปให้สูงเหนือระดับสมุนไพร แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงไขเพื่อนำสารที่สกัดไว้ออกมา แล้วจึงเติมตัวทำละลายลงไปเช่นเดิมเพื่อสกัดซ้ำ ควรระวังอย่าให้ตัวทำละลายแห้ง

2.5.3 การชง (infusion) เป็นการสกัดสมุนไพรโดยใช้ระยะเวลาช่วงสั้น ๆ ร่วมกับการใช้น้ำร้อนหรือน้ำเย็น

2.5.4 การตุ๋น (digestion) เป็นการสกัดสมุนไพรโดยใช้ความร้อนแต่ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการต้มโดยปริมาตรของตัวทำละลายอาจจะเหลือเพียง 1 ส่วนจาก 3 ส่วน

2.5.5 การต้ม (decoction) เป็นการต้มเพื่อสกัดสมุนไพรที่ละลายในน้ำได้ดีและทนความร้อนได้ดี ต้มหลังจากที่น้ำเดือดไปอีกประมาณ 15 นาที

2.5.6 การสกัดแบบต่อเนื่อง (soxhlet extraction) เป็นการสกัดแบบต่อเนื่องโดยการใช้ตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำร่วมกับการใช้ความร้อนเพื่อให้ตัวทำละลายในภาชนะบรรจุตัวทำละลายระเหยขึ้นไปกระทบกับ condenser ด้านบนแล้วถูกควบแน่นกลั่นตัวลงมาใน thimble ที่บรรจุผงสมุนไพรไว้ (สมุนไพรไม่ได้สัมผัสกับโดยตรงแต่จะอยู่ใน thimble ซึ่งทำมาจากกระดาษกรองที่มีความแข็งแรงหรือพวก cellulose) โดยตัวทำละลายใน chamber จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับกาลักน้ำ และไหลกลับลงไปภาชนะบรรจุตัวทำละลายด้านล่าง จากนั้นตัวทำละลายจะระเหยขึ้นไปกระทบกับ condenser แล้วถูกควบแน่นกลั่นตัวทำละลายลงมาใน thimble อีกครั้งซึ่งการสกัดจะวนเวียนซ้ำไปเช่นนี้เรื่อย ๆ จนได้การสกัดที่สมบูรณ์



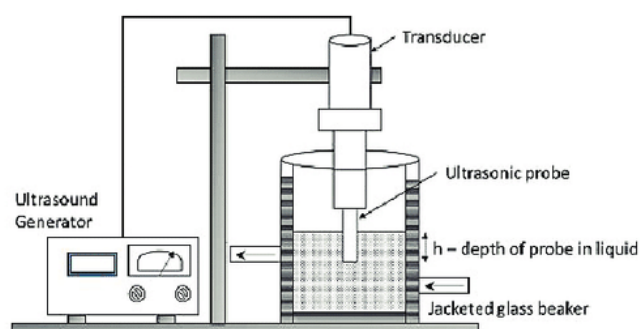
ภาพที่ 5 อุปกรณ์การสกัดแบบต่อเนื่องขนาดในห้องปฏิบัติการ

ที่มา : Devay (2013)

2.5.7 การสกัดแบบไหลย้อนกลับ (Heat Reflux Extraction) เป็นการสกัดสารสำคัญของสมุนไพรกับตัวทำละลายโดยใช้ความร้อนโดยจะสัมผัสกับความร้อนโดยตรงและถูกต้มให้ความร้อนจน

เดือด จากนั้นตัวทำละลายจะระเหยขึ้นไปด้านบน condenser แล้วจะถูกควบแน่นกลับลงมาเพื่อสกัดอย่างต่อเนื่อง และวนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้การสกัดที่สมบูรณ์ซึ่งสารสกัดจะเข้มข้นขึ้น

2.5.8 การสกัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก (Ultrasound Extraction) หรือ Sonication เป็นการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในช่วง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 2,000 กิโลเฮิร์ตซ์เพื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือเสียดสีกันเป็นความร้อนทำให้เกิดการสกัดและเกิดการปลดปล่อยสารสำคัญจากสมุนไพรออกมา



ภาพที่ 6 แผนผังแสดงอุปกรณ์การสกัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

ที่มา : Nino-Medina (2019)

2.5.9 การสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave Extraction) เป็นวิธีการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นนี้จะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการทำให้อนุภาคหรือโมเลกุลที่มีขั้วเสียดสีกันและเกิดความร้อนขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อนำสารที่จะสกัดไปวางอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและด้วยคุณสมบัติความเป็นขั้วของโมเลกุลภายในสารที่จะสกัดจะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่หรือเสียดสีกันทำให้เกิดความร้อนขึ้นซึ่งมีผลต่อเซลล์พืชและเกิดการสกัดออกมาของสารสำคัญ (อารีรัตน์, 2560)

2.6 กลั่นน้ำมันหอมระเหย

การสกัดสารระเหยจากพืชมีหลายวิธีด้วยกัน การสกัดบางวิธีให้น้ำมันหอมระเหย การสกัดบางวิธีได้สารระเหยที่สกัดจากพืช ซึ่งเราไม่ถือว่าเป็นน้ำมันหอมระเหย น้ำมันหอมระเหยจะได้จากการกลั่นจากไอน้ำ (Distillation) และการบีบ (Expression) เท่านั้น

การกลั่นเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการสกัดน้ำมันหอมระเหย หลักการของการกลั่นคือใช้น้ำร้อนหรือไอน้ำเข้าไปแยกน้ำมันหอมระเหยออกมาจากพืชโดยการแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชความร้อนจะทำให้สารละลายออกมากลายเป็นไอน้ำมากับน้ำร้อนหรือไอน้ำ การสกัดน้ำมันหอมระเหยมีหลายวิธีคือ

2.6.1 การกลั่น (Distillation)

1) การกลั่นด้วยน้ำ (Water Distillation)

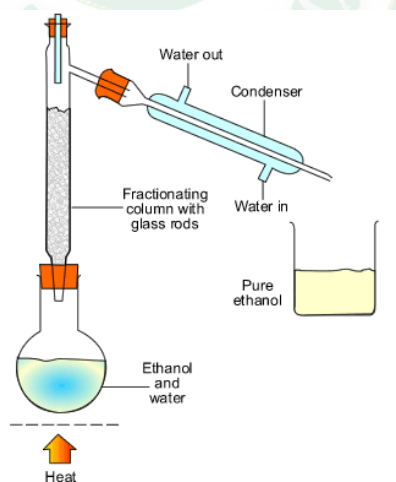
วิธีทำโดยนำพืชที่เราต้องการสกัด ใสลงไปในภาชนะ ซึ่งในภาชนะนั้นมักจะมีตะแกรงสำหรับวางพืชชนิดที่เราต้องการกลั่น จากนั้นก็เติมน้ำสะอาดจนท่วมพืชที่ต้องการกลั่น แล้วต้มน้ำจนเดือดกลายเป็นไอน้ำ การที่ต้องมีตะแกรงก็เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนถูกกับพืชโดยตรง เพราะน้ำมันหอมระเหยที่ได้อาจจะมึกลิ่นไหม้ผสมได้ น้ำมันหอมระเหยและน้ำ ในพืชชนิดนั้นๆ ระเหยขึ้นไปจากนั้นไอน้ำระเหยก็จะถูกทำให้เย็นลงเพื่อให้กลับมาเป็นของเหลวอีกครั้งซึ่งในขั้นตอนนี้น้ำมันหอมระเหยจะถูกแยกจากน้ำ

2) การกลั่นด้วยน้ำและไอน้ำ (Water and Steam Distillation)

วิธีนี้จะให้ไอน้ำผ่านส่วนผสมของพืชและน้ำที่รวมกันอยู่ เมื่อไอน้ำและน้ำมันหอมระเหย ระเหยขึ้นไป จึงถูกทำให้ไอน้ำเย็นลงแล้วนำไปแยกน้ำมันหอมระเหยออกมา

3) การกลั่นด้วยไอน้ำ (Steam Distillation)

โดยการนำพืชที่ต้องการกลั่นใส่ในหม้อ แล้วให้ความร้อนกับน้ำเพื่อให้เกิดไอน้ำแล้วให้ไอน้ำผ่านพืชที่ต้องการกลั่น ซึ่งปกติอุณหภูมิของไอน้ำมักจะไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส แต่ในทวีปอเมริกาและในยุโรป มักจะเพิ่มความดันอากาศภายในหม้อกลั่น ช่วยเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำและลดเวลาในการกลั่นได้ แต่ถ้าร้อนเกินไปอาจทำให้คุณสมบัติของน้ำมันเปลี่ยนไปได้



ภาพที่ 7 การกลั่นด้วยไอน้ำ

ที่มา : Konze (2004)

4) การกลั่นภายใต้สุญญากาศ (Steam and Vacuum Distillation)

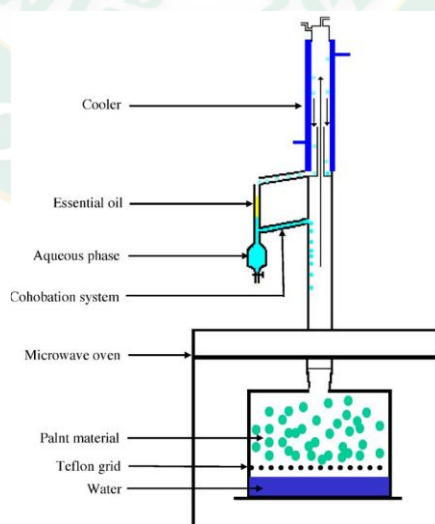
การกลั่นแบบนี้จะต้องดูอากาศภายในหม้อกลั่นออก ความดันอากาศภายในอยู่ระหว่าง 100 – 200 มิลลิเมตรปรอท ข้อดีของการกลั่นแบบนี้คือช่วยลดเวลาในการกลั่นลงมาก แต่ก็ต้องควบคุมการกลั่นให้มีประสิทธิภาพและการทำให้ไอน้ำเย็นลงต้องทำอย่างรวดเร็ว นั่นหมายถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น

2.6.2 บีบเย็น ทีบเย็น หรือสกัดเย็น (Cold Expression)

ส่วนมากมักจะใช้สกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้ม มะนาว ส้มโอ และมะกรูด ก่อนอื่นต้องปอกเปลือกของผลไม้เหล่านี้แล้วทำให้ชิ้นเล็กลง นำไปบีบจะได้ของเหลวที่มีทั้งน้ำและน้ำมันหอมระเหยผสมกันอยู่ จากนั้นต้องรอให้น้ำมันลอยตัวแยกจากน้ำแล้วจึงสามารถแยกส่วนที่เป็นน้ำมันหอมระเหยออกมาได้ วิธีนี้ถือเป็นวิธีที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด แต่น้ำมันหอมระเหยที่ได้จากการสกัดแบบนี้จะไม่บริสุทธิ์มากและมีอายุการเก็บรักษาประมาณ 6 เดือนและคุณสมบัติจะค่อยๆหมดสภาพไปขณะที่น้ำมันพื้นฐานอาจมีอายุประมาณ 1 ปี

2.6.3 การกลั่นโดยใช้ไมโครเวฟร่วม

เครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วมแสดงในภาพที่ 8 ประกอบด้วยตู้อบไมโครเวฟในครัวเรือนใช้กำลังไฟฟ้า และชุดเครื่องแก้วกลั่น โดยที่เปลือกส้มเขียวหวานก่อนและหลังสกัดน้ำมันหอมระเหย สำหรับการกลั่นโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนี้ พบว่ามีความสะดวกรวดเร็ว สามารถลดช่วงระยะเวลาและปริมาณการใช้ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดได้ดี

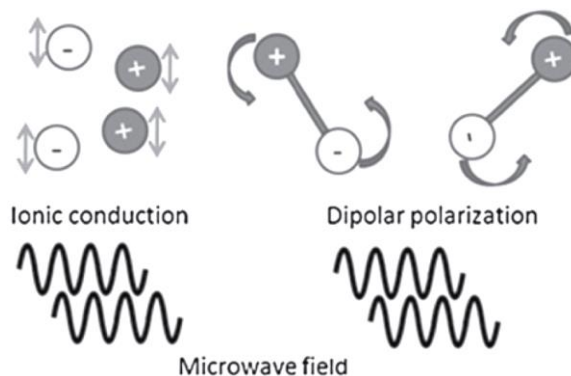


ภาพที่ 8 เครื่องกลั่นแบบไมโครเวฟร่วม

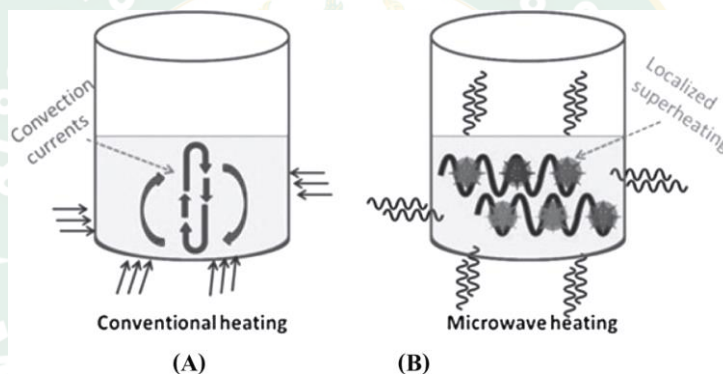
ที่มา: Mohamed (2008)

2.7 สกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

หลักการสกัดสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถอธิบายได้คือ เป็นการใช้คลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง 3×10^2 ถึง 3×10^5 เมกะเฮิรตซ์ และความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 1 เมตร ร่วมกับตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัดสารจากพืชสมุนไพรโดยเมื่อนำสารที่จะสกัดไปวางอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากนั้นด้วยคุณสมบัติความเป็นขั้วของโมเลกุลภายในสารที่จะสกัดจะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นซึ่งมีผลต่อเนื้อเยื่อเซลล์ ของสารสกัดและมีผลต่อการละลายของสารสำคัญที่ต้องการและด้วยคุณสมบัติของตัวทำละลายที่แตกต่างกันจึงทำให้มีลักษณะที่แตกต่างกันไปเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรืออาจกล่าวได้ว่ากระบวนการทำความร้อนของคลื่นไมโครเวฟเกิดจากกระบวนการถ่ายเทพลังงานจาก 2 กลไก ได้แก่ dipole rotation และ ionic conduction ผ่านการเปลี่ยนแปลง dipole และแทนที่ไอออนที่มีประจุในสารและตัวทำละลาย โดยที่ทั้งสองกระบวนการเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน การเคลื่อนย้ายไอออนจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเรียกว่า ionic conduction หากตัวทำละลายต้านการเคลื่อนที่ของไอออน จะส่งผลให้เกิดแรงเสียดทาน และทำให้เกิดความร้อนขึ้น การปรับเปลี่ยน dipole ของโมเลกุลรวมกับการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเรียกว่า dipole rotation โดยที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิรตซ์ คลื่นไมโครเวฟเปลี่ยน electric component ด้วยความเร็ว 4.9×10^4 ครั้งต่อวินาที จึงเกิดความร้อนขึ้นจากแรงเสียดทาน การถ่ายเทพลังงานเป็นคุณสมบัติหลักของการทำความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิรตซ์เป็นความถี่นิยมใช้กันมาก มีกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 600-700 วัตต์ ซึ่งโดยปกติการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการสกัดแบบดั้งเดิมนั้น พลังงานจะถ่ายเทไปยังสมุนไพรโดยการพาความร้อน (convection) การนำความร้อน (conduction) และการแผ่รังสี (radiation) ผ่านพื้นผิวภายนอกของสมุนไพรที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ (thermal gradient) ในกรณีของการสกัดสารด้วยคลื่นไมโครเวฟพลังงานไมโครเวฟถูกนำส่งโดยตรงไปยังสมุนไพรผ่านอันตรกิริยาระดับโมเลกุล (molecular interaction) ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านการเปลี่ยนแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนหรืออาจกล่าวได้ว่าคลื่นไมโครเวฟจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการให้อุณหภูมิหรือโมเลกุลที่มีขั้วเสียดสีกันและทำให้เกิดความร้อนขึ้น



ภาพที่ 9 แสดง dipole rotation และ ionic conduction ของคลื่นไมโครเวฟ
ที่มา : Veera et al. (2013)



ภาพที่ 10 แสดงกลไกการสัทของวิธีการแบบดั้งเดิม (A) และการสัทโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (B)
ที่มา : (Veera Ganeswar Gude et al., 2013)

นอกจากนี้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นไมโครเวฟขึ้นอยู่กับค่า Dissipation factor ($\tan \delta$) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของการสัทสารที่ใช้คลื่นไมโครเวฟโดยวัดความสามารถของวัตถุตัวอย่างในการดูดซึมพลังงานไมโครเวฟและกระจายความร้อนไปยังโมเลกุลข้างเคียงซึ่งเป็นค่าบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเกิดความร้อนของไมโครเวฟ โดยวัตถุตัวอย่างที่มีค่า $\tan \delta$ และ dielectric loss หรือ loss factor (ϵ'') สูง ร่วมกับค่า dielectric constant (ϵ') ปานกลาง จะสามารถเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อนได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทั้งสามประการนี้แสดงได้ดังสมการ

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad \dots (2.1)$$

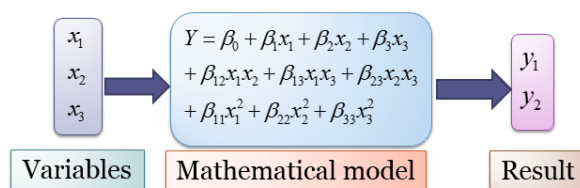
โดยที่ค่า dielectric constant (ϵ') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อนำวางใน สนามไฟฟ้ากระแสสลับหรือเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุตัวอย่างที่อุณหภูมิใด ๆ โดยถ้ามีค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มากแต่ค่าจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุตัวอย่างค่า dielectric loss หรือ loss factor (ϵ'') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง คำว่า “loss” หรือสูญเสียหมายถึง การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนดังนั้นจากสมการค่า loss tangent ($\tan \delta$) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนค่าเหล่านี้ ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าวัสดุจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น

แต่การสกัดด้วยไมโครเวฟนั้นเครื่องไมโครเวฟแต่ละเครื่องอาจจะมีประสิทธิภาพในการให้อุณหภูมิไม่เท่ากันเนื่องจากอายุการใช้งานของแต่ละเครื่อง ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบกำลังวัตต์เทียบเท่าของไมโครเวฟก่อนตามสมการที่ 2.2

$$Power = \frac{4.187 \left(\frac{kJ}{kg \cdot C} \right) \times 1.0(kg) \times (T_2 - T_1)(^{\circ}C)}{t(s)} \quad \dots (2.2)$$

2.8 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response Surface Methodology)

เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวแปร เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของความสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปกราฟิกสามมิติ การออกแบบพื้นที่การตอบสนองเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าจะมีประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ได้กับการพัฒนาทั้งการทดลอง และกระบวนการที่ต้องการพัฒนาและสามารถหาจุดเหมาะสมจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปแบบการวางแผนการทดลองต่างๆ ทำให้นักวิจัยสามารถตัดสินใจจุดที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติการทำการทดลอง วิธีการของพื้นที่การตอบสนองประกอบด้วยกลุ่มของเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาจากค่าสังเกตเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนอง (Response variable) ที่วัดได้ 1 หรือ 2 ค่า เช่น ปริมาณฟีนอลิกรวม กับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (Input variables) เช่น กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ อัตราส่วนระหว่างผงเปลือกส้มเขียวหวานกับตัวทำละลาย เวลา และความเข้มข้นของตัวทำละลาย



ภาพที่ 11 Mathematical model

สมการที่ใช้ในวิธีพหุคูณตอบสนอง

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon \quad \dots (2.3)$$

เมื่อ Y = ค่าตอบสนองที่สังเกตได้ ซึ่งมักรู้จักกันในชื่อ Dependent variable
 f = ฟังก์ชันของการตอบสนองของ X_1, X_2, \dots, X_n ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ซึ่งมักรู้จักกันในชื่อ Independent variable

ε = เทอมของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression relationship) เป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad \dots (2.4)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวเป็นสมการพื้นฐานง่ายที่สุด ที่มักรู้จักกันว่าเป็นรูปแบบหรือสมการลำดับที่หนึ่ง (First-order model or equation) ส่วนรูปแบบลำดับที่สอง (Second-order model) เป็นความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (Quadratic regression relationship) เขียนอยู่ในรูปของสมการที่ 2.5

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{11} X_1^2 + \dots + \beta_{nn} X_n^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{n-1,n} X_{n-1} X_n + \varepsilon \quad \dots (2.5)$$

พารามิเตอร์ของสมการนี้โดยทั่วไปมักไม่ทราบ ดังนั้นจะต้องถูกประมาณจากผลการทดลอง ความหมายในเชิงกายภาพของพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นดังนี้

β_0 = จุดตัด (Intercept) หรือ Grand mean

β_i = เป็นผลเชิงเส้นตรง (Linear effect) ของ X_i

β_{ii} = เป็นผลเชิงเส้นโค้ง (Quadratic effect) ของ X_i

β_{ij} = เป็นผลของปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction effect) ของ X_i และ X_j

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ferhat et al. (2006) ได้พัฒนาไมโครเวฟสำหรับกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสด (*Citrus sinensis* L.) โดยเครื่องประกอบด้วยส่วนทำความร้อนโดยไมโครเวฟ และส่วนกลั่น ปฏิบัติการที่ความดันบรรยากาศโดยไม่ใช่ตัวทำละลายหรือน้ำ โดยน้ำมันหอมระเหยได้จากการกลั่นในขั้นตอนเดียว และได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบระยะเวลาการสกัด ปริมาณ องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพของน้ำมันหอมระเหย ประสิทธิภาพ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ กับกรกลั่นโดยใช้น้ำและไอน้ำพาความร้อนแบบดั้งเดิม พบว่า เทคนิคการสกัดโดยใช้ไมโครเวฟมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เนื่องจากใช้เวลาในการสกัดน้อยกว่า (30 นาที เทียบกับ 3 ชั่วโมง) ผลผลิตน้ำมันหอมระเหยมากกว่า (0.42เปอร์เซ็นต์ เทียบกับ 0.39 เปอร์เซ็นต์) และได้คุณภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังนำเอาเปลือกส้มไปสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า เทคนิคการสกัดโดยใช้ไมโครเวฟทำให้ต่อมน้ำมันหอมระเหยของเปลือกส้มเปิดมากกว่าแบบการกลั่นโดยใช้น้ำและไอน้ำ จึงทำให้กลั่นน้ำมันหอมระเหยมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

Sahraoui et al. (2011) ได้ศึกษาการกลั่นไอน้ำโดยไมโครเวฟของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสด (*Citrus sinensis* L.) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการทำน้ำส้มคั้น ซึ่งได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคนี้กับเทคนิคการกลั่นโดยใช้ไอน้ำพาความร้อน การทดลองพบว่าการกลั่นไอน้ำโดยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการสกัดน้อยกว่า (6 นาที) มีคุณลักษณะใสสะอาด และได้น้ำมันหอมระเหยที่มีคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสที่ดีกว่า ที่กำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ โดยที่ผลทางเคมีและชีวภาพก็ยืนยันเทคนิคการกลั่นไอน้ำโดยไมโครเวฟมีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ในด้านของเวลาและพลังงาน

N. M'hiri et al. (2015) ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะต่าง ๆ ในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากเปลือกส้มของเทคนิคการสกัด 4 แบบ คือ การสกัดวิธีอัลตราโซนิค การสกัดวิธีไมโครเวฟร่วม การสกัดแบบของไหล CO₂ เหนือวิกฤต และการสกัดความดันสูง โดยเกณฑ์ตัวแปรตามของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด สารประกอบฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ตัวแปรควบคุมของการทดลองคืออัตราส่วนวัตถุดิบต่อตัวทำละลาย 5 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร ตัวทำละลายเอทานอล 80 เปอร์เซ็นต์ กวนผสมให้เข้ากัน ผลการทดลองพบว่า สภาวะการสกัดที่ได้สารฟีนอลิกทั้งหมดและสารประกอบฟลาโวนอยด์ คือที่สภาวะการสกัดวิธีอัลตราโซนิคใช้กำลังไฟฟ้า 125 วัตต์ เป็นระยะเวลา 30 นาที ที่ 35 องศาเซลเซียส ที่สภาวะการสกัดวิธีไมโครเวฟร่วมใช้กำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ ระยะเวลา 180 วินาที ที่สภาวะการสกัดแบบของไหล CO₂ เหนือวิกฤตใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 10 MPa และที่สภาวะการสกัดความดันสูงใช้ความดัน 50 MPa เป็นเวลา 30 นาที ที่ 35 องศาเซลเซียส

Calle et al. (2015) ได้พัฒนาวิธีหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารประกอบจากเปลือกส้ม ซึ่งใช้การสกัดแบบอัลตราโซนิคศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ความกว้างของตัวแปลง (amplitude) อัตรารอบ เวลาในการสกัด ชนิดของตัวทำละลายแบบมีขั้ว (น้ำกับเมทานอล อัตราส่วน 80:20 (v/v)) และไม่มีขั้ว (เฮกเซน) ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของตัวทำละลายทั้งสองชนิดคือที่ 32 เปอร์เซ็นต์ความกว้างของตัวแปลง อัตรารอบ 0.75 s/s และ เวลาในการสกัด 7.5 นาที โดยสารสกัดถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LC-QTOF MS/MS ในโหมดไอออนบวกและลบ พบว่า เครื่องวิเคราะห์มวลสารด้วยค่าดูดกลืนแสงความแม่นยำสูงแสดงสารประกอบที่มีความแตกต่างกัน 10 ชนิด นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบมาเซอเรชัน (maceration) โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่า แบบมาเซอเรชัน โดยตัวทำละลายแบบมีขั้วใช้เวลาในการสกัด 4 ชั่วโมง และตัวทำละลายแบบไม่มีขั้วใช้เวลาในการสกัด 10 ชั่วโมง ซึ่งใช้ระยะเวลามากกว่าการสกัดแบบอัลตราโซนิค

Boukroufa et al. (2015) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันหอมระเหย โพลีฟีนอลิก และเพคตินจากเปลือกส้ม ด้วยเทคนิคการสกัดแบบไมโครเวฟและอัลตราโซนิคโดยไม่ใช้ตัวทำละลาย น้ำมันหอมระเหยสกัดด้วยเทคนิคกลั่นด้วยน้ำและไอน้ำโดยไมโครเวฟร่วมแบบอาศัยแรงโน้มถ่วง (MHG) เปรียบเทียบกับการกลั่นด้วยไอน้ำ พบว่าผลผลิตน้ำมันหอมระเหยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยที่เทคนิคกลั่นด้วยน้ำและไอน้ำโดยไมโครเวฟร่วมแบบอาศัยแรงโน้มถ่วงสกัดได้ 4.22 ± 0.03 เปอร์เซ็นต์ และเทคนิคกลั่นด้วยน้ำสกัดได้ 4.16 ± 0.05 เปอร์เซ็นต์ น้ำของวัตถุดิบที่เหลือหลังการกลั่นถูกใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดโพลีฟีนอลิกและเพคติน วิธีสกัดสารโพลีฟีนอลิกแบบอัลตราโซนิค (UAE) ถูกนำมาศึกษาอิทธิพลของปัจจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ central composite designs พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของวิธีสกัดสารโพลีฟีนอลิกมากที่สุด (50.02 มิลลิกรัมแกลลิก/ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) คือ ณ กำลังไฟฟ้าของอัลตราโซนิค 0.956 วัตต์/ตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิ 59.83 องศาเซลเซียส เมื่อถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบให้ความร้อนพบว่า แบบอัลตราโซนิคสกัดโพลีฟีนอลิกมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การสกัดแบบให้ความร้อนและการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (MAE) ถูกนำมาเปรียบเทียบในการสกัดเพคติน พบว่าการสกัดแบบไมโครเวฟร่วมได้เพคติน 18.32 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา

Hosseini et al. (2016) ได้ใช้เทคนิคการสกัดแบบไมโครเวฟร่วมเพื่อสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเปรี้ยว การออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ถูกนำมาศึกษาอิทธิพลของเวลาการสกัด กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ และ pH ต่อผลผลิตและระดับเอสเทอร์ของเพคติน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สกัดเพคตินสูงสุด 29.1 เปอร์เซ็นต์ คือที่ pH 1.5 กำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ และเวลาการแผ่รังสี 3 นาที เมื่อวัดความหนืดพบว่าเพคตินมีความเข้มข้นต่ำใกล้เคียงกับพฤติกรรมของการไหลแบบนิวโตเนียนและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจะเปลี่ยนเป็นพฤติกรรมการไหลพิวโดพลาสติก

Prakash Maran et al. (2013) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการสกัดแบบไมโครเวฟร่วมสำหรับสกัดเพคตินจากเปลือกส้มแห้ง การออกแบบพื้นผิวตอบสนองแบบ บล็อกซ์-เบทเทอเคน ถูกใช้เพื่อศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมของผลกระทบของปัจจัยของกระบวนการประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ระยะเวลาการแผ่รังสี pH และอัตราส่วนวัตถุดิบต่อตัวทำละลาย ต่อผลผลิตของเพคติน การทดลองพบว่าปริมาณของเพคตินเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของเพคตินลดลงเมื่อระยะเวลา pH และอัตราส่วนเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมที่ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 422 วัตต์ ระยะเวลาการแผ่รังสี 169 วินาที pH 1.4 และอัตราส่วนวัตถุดิบต่อตัวทำละลาย 1:16.9 กรัม/มิลลิลิตร สามารถสกัดเพคตินมากที่สุด 19.24 เปอร์เซ็นต์

Moulehi et al. (2012) ประเมินการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระของเมล็ดส้มแมนดาริน (*Citrus reticulata*) และส้มขม (*Citrus aurabium*) ในระหว่างสามช่วงคือ ยังไม่สุก กึ่งสุก และสุกในเชิงพานิชย์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างส้มสองสายพันธุ์ พบว่า ส้มแมนดารินมีสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดในช่วงกึ่งสุก และฟลาโวนอยด์สูงสุดในช่วงสุกในเชิงพานิชย์ ขณะที่ส้มขมมีสารประกอบแทนนินสูงสุดในช่วงกึ่งสุก ปัจจัยของความสุกและสายพันธุ์มีผลต่อสารต้านอนุมูลอิสระ ส้มแมนดารินอุดมไปด้วย naringin hesperidin และ กรด gallic acid ในช่วงสุกทั้งสามช่วง ขณะที่ส้มขมมีสารประกอบหลัก naringin และ neohesperidin ในช่วงการเจริญเติบโตของผล สารประกอบจากส้มสองสายพันธุ์ถูกนำไปทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระถูกทดสอบ 2 วิธี คือวิธี DPPH free radical scavenging และ วิธี β -แคโรทีน/กรดไลโนเลอิก

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 วัตถุประสงค์

3.1.1 นำเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำส้มคั้น (จากตลาดรวมโชค อ.เมือง จ.เชียงใหม่) ใส่ในภาชนะที่มีสารละลายโปแตสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.1 กรัม/น้ำ 1 ลิตร เป็นเวลา 10 นาที โดยเปลือกส้มเขียวหวานในการกลั่นน้ำมันหอมระเหยจะถูกหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ส่วนเปลือกส้มในการทดลองการสกัดเพคตินและสารฟีนอลิกทั้งหมด นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเปลือกส้มแห้งป่นและกรองผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 30 เมท เก็บบรรจุในภาชนะปิดสนิท

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ชุดสเก็ดแบบใช้คลื่นไมโครเวฟ ยี่ห้อ Samsung รุ่น ME711K ความถี่ (50Hz)
- 2) ชุดกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วม ยี่ห้อ Samsung
- 3) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ LabioMed, inc. รุ่น Spectro SC series 002416
- 4) เครื่องชั่งดิจิตอล แบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Ohaus coppocation รุ่น PA214
- 5) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ Gemmy Industrial Corp. รุ่น PLC-012E
- 6) เครื่องวัด a_w Meter ยี่ห้อ Aqua Lab รุ่น Series 3TE
- 7) เครื่องวัด pH ยี่ห้อ FiveEasyTM Plus รุ่น FEP20
- 8) เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert
- 9) เครื่องผสม ยี่ห้อ LMS รุ่น VTX-3000L
- 10) ระบบน้ำหล่อเย็นเครื่อง Thermo Electron Hake วัตต์KL 25 Recirculator Chiller
- 11) ออโต้ปีเปต Autoclavable ยี่ห้อ Nichipet EX II
- 12) บีกเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร ยี่ห้อ Pyrex No.1000
- 13) ขวดก้นกลม 500 มิลลิลิตร ยี่ห้อ Pyrex

3.3 สารเคมี

- 1) สารละลาย Folin-Ciocalteu phenol reagent ($3\text{H}_2\text{O} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 13\text{WO}_3 \cdot 5\text{MoO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) บริษัท Lobachemie
- 2) สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) บริษัท Quality reagent ประเทศนิวซีแลนด์
- 3) เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) บริษัท Lab-scan
- 4) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) บริษัท Lab-scan
- 5) กรดแกลลิก ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_5$) บริษัท Fluka
- 6) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2OH_4) บริษัท Lab-scan

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

- 1) โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 17.0 ใช้จัดการข้อมูลวิเคราะห์ข้อมูลและรายงานผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ
- 2) โปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert 7.0.0
 - 2.1) ศึกษาวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อทำนายสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดฟีนอลิกและเพคติน
 - 2.2) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square: R-Sq) เพื่อวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ใช้ในการทดลองมีความเหมาะสมหรือไม่
 - 2.3) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองโดยพิจารณาจากค่า P-value ของเทอมต่างๆ ที่วิเคราะห์ความแปรปรวนได้เปรียบเทียบกับค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด
 - 2.4) การสร้างสมการทำนายปริมาณฟีนอลิกและเพคตินที่ได้จากการสกัดเปลือกส้มเขียวหวานโดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและเพคตินที่ได้จากการสกัดเปลือกส้มเขียวหวาน

3.5 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.5.1 ศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการกลั่นแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Distillation, MAD) โดยปราศจากตัวทำละลาย

1) การกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วม

น้ำหนักเปลือกส้ม 100 กรัมใส่ในขวดกันกลม Duran ขนาด 500 มิลลิลิตร เครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วมแสดงในภาพที่ 12 ประกอบด้วยตู้อบไมโครเวฟในครัวเรือนใช้กำลังไฟ 100-800 วัตต์ และชุดเครื่องแก้วกลั่น โดยที่เปลือกส้มเขียวหวานก่อนและหลังสกัดน้ำมันหอมระเหยแสดงในภาพที่ 13 และภาพที่ 14 ส่วนน้ำมันหอมระเหยถูกรวมเก็บไว้วางกับเกลือแห้งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 12 เครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วม



ภาพที่ 13 เปลือกส้มเขียวหวานก่อนสกัดน้ำมันหอมระเหย



ภาพที่ 14 เปลือกส้มเขียวหวานหลังสกัดน้ำมันหอมระเหย

2) สูตรการคำนวณหาผลผลิตน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวาน

$$\text{ผลผลิตน้ำมันหอมระเหย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันหอมระเหย}}{\text{น้ำหนักเปลือกส้มเขียวหวานสด}} \times 100 \quad \dots (3.1)$$

3.5.2 ศึกษาการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE)

1) การสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดแบบไมโครเวฟร่วม

ผงเปลือกส้ม 1 กรัม ผสมกับตัวทำละลายที่ความเข้มข้นเอทานอล 35 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรต่อปริมาตร อัตราส่วนต่างๆ (1:20-40 กรัมต่อมิลลิลิตร) ใช้กำลังไฟฟ้าต่างๆ (200-450 วัตต์) ที่ระยะเวลาการแผ่รังสีต่างๆ (30-90 วินาที) นำตัวอย่างพักไว้ให้เย็น แล้วแยกของเหลวกับของแข็งโดยนำไปเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แล้วนำส่วนของเหลว 0.1 มิลลิลิตร เติมเอทานอล 0.4 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 2 (โดยมวลต่อปริมาตร) จำนวน 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ปิดปากหลอดด้วยกระดาษฟอยด์หรือถุงฟอยด์ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที (ในที่มืด) แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ LabioMed, inc. รุ่น Spectro SC series 002416 ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมในสารสกัดโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (gallic acid) และรายงานผลการทดลองเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมกรดแกลลิก (mg/g Galic acid equivalent, GAE)



ภาพที่ 15 เครื่องสกัดแบบไมโครเวฟร่วม

ที่มา : Narkprasom (2015)

2) การวิเคราะห์สารฟีนอลิกทั้งหมดจากผงเปลือกส้มเขียวหวานด้วยวิธี Spectrophotometer

2.1) ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) ของสารฟีนอลิกทั้งหมด จากผลการทดลอง พบว่าค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) ของสารละลายมาตรฐานฟีนอลิกเท่ากับ 750 นาโนเมตร

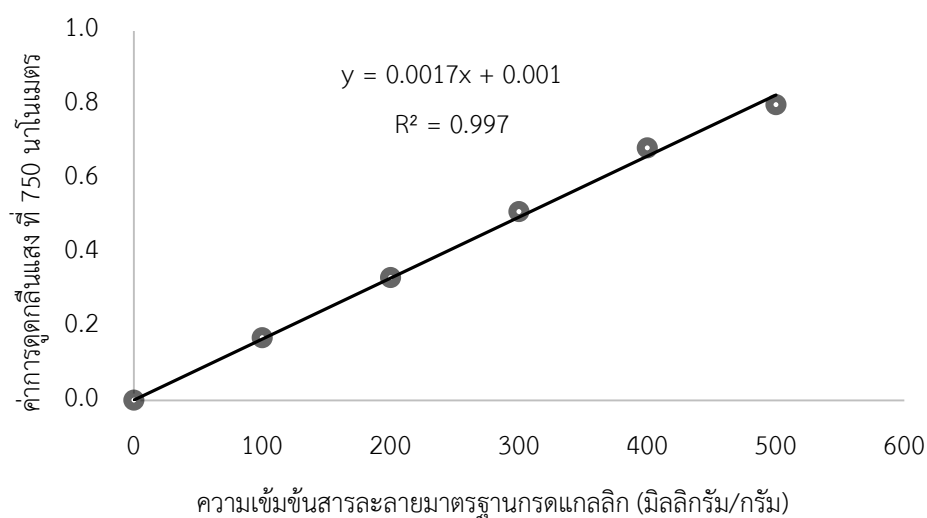
2.2) การสร้างกราฟมาตรฐานสารฟีนอลิกทั้งหมด จากการนำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมดังแสดงในตารางที่ 1 ได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นนำผลที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร และความเข้มข้นของสารฟีนอลิกทั้งหมดจะได้กราฟมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 16

ตารางที่ 1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก

ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน กรดแกลลิก (ppm)	ปริมาตรสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกความ เข้มข้น 1,000 ppm	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)
0	0	10
100	1	9
200	2	8
300	3	7
400	4	6
500	5	5
600	6	4
700	7	3
800	8	2
900	9	1
1000	10	0

ตารางที่ 2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแกลลิก

ความเข้มข้นสารละลายกรดแกลลิก(ppm)	Absorbance ($\lambda = 750$ นาโนเมตร)
0	0.001
100	0.169
200	0.333
300	0.511
400	0.683
500	0.800



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก

3) การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

คัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน โดยศึกษาปัจจัยของกำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวและ ความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอล วางแผนการทดลองเชิงเศษส่วนของแฟคทอเรียล 2^{4-1} (Fractional Factorial Experiments) โดยศึกษาอันดับของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงใน ตารางที่ 3 และทำการวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) เพื่อหาปัจจัยที่มีความสำคัญในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานในการทดลองคัดเลือกปัจจัย

ปัจจัย	ระดับ	
	-1	1
กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	300	600
เวลาในการสกัด (วินาที)	50	100
อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1:30	1:50
ความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร)	20	50

4) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากผงเปลือกส้มเขียวหวาน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากผงเปลือกส้มเขียวหวาน นั้น ขั้นตอนแรกจะต้องทำการออกแบบการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกการออกแบบการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยทำการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง โดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 การทดลอง โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากผงเปลือกส้มเขียวหวานทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ กำลังไมโครเวฟ (X_1) เวลาในการสกัด (X_2) และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (X_3) โดยจะกำหนดระดับค่าปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (1) ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่ารหัสของปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมด จากเปลือกส้มเขียวหวานในการทดลองพ่นผิวตอบสนอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	200	300	450 (1.5)
เวลาในการสกัด (วินาที)	30	60	90 (1)
อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1:20	1:30	1:40 (1)

3.5.3 ศึกษาการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE)

1) การสกัดเพคตินแบบไมโครเวฟร่วม

ผงเปลือกส้ม 1 กรัม ใส่ในขวดสกัดก้นกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่นที่อัตราส่วน ผงต่อตัวทำละลาย (1:30-50 กรัมต่อมิลลิลิตร) ที่ pH 1 ซึ่ง pH ถูกปรับด้วยกรดซัลฟิวริก 6.25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นำไปสกัดแบบไมโครเวฟร่วมให้ความร้อนที่กำลังไฟฟ้า (300-600 วัตต์) เป็น เวลาที่ใช้ในการสกัด (50-100 วินาที) หลังจากให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ นำตัวอย่างพักไว้ให้เย็นแล้ว มาแยกของเหลวกับของแข็งด้วยกรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรอง (Whatman No. 1) ของเหลว ใส่ถูกรวบรวมเก็บ เพคตินหยาบถูกแยกด้วยเทคนิคตกตะกอน โดยนำของเหลวใสผสมกับเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในอัตราส่วนเท่ากันโดยปริมาตร นำมาหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนเพคติน จากของเหลว นำเพคตินที่ได้ไปอบแห้งที่ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตเพคตินดังแสดงใน ภาพที่ 17-22 จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ผลผลิตเพคตินคำนวณจาก

$$\text{ผลผลิตเพคติน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักเพคติน}}{\text{น้ำหนักผงส้มเขียวหวานเริ่มต้น}} \times 100 \quad \dots (3.1)$$



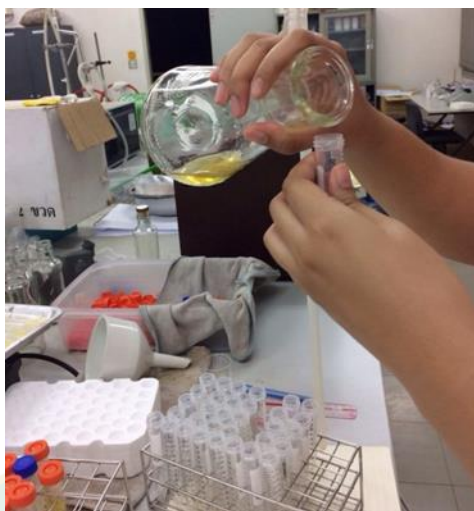
ภาพที่ 17 กรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรอง เพื่อแยกสารสกัดกับผงเปลือกส้ม



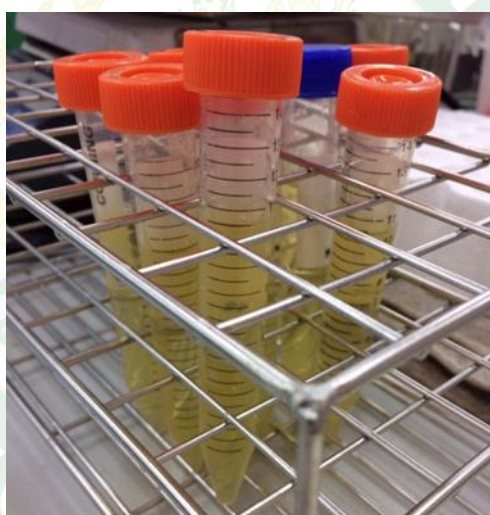
ภาพที่ 18 นำเอทานอลล้างขวดสกัดและเติมลงไป



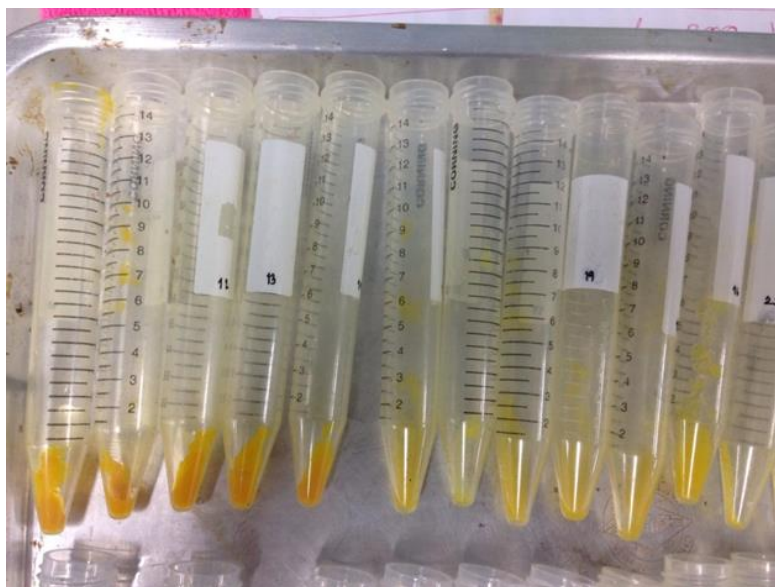
ภาพที่ 19 กรองสุญญากาศอีกครั้ง



ภาพที่ 20 นำสารสกัด (เพคตินและเอทานอล) ใส่หลอด



ภาพที่ 21 เตรียมหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกระหว่างตะกอนเพคตินกับของเหลวใส



ภาพที่ 22 ผลผลิตเพคติน

2) การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน

คัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน โดยศึกษาปัจจัยของกำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายและ pH วางแผนการทดลองเชิงเศษส่วนของแฟคทอเรียล 2^{4-1} (Fractional Factorial Experiments) โดยศึกษาระดับของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงใน ตารางที่ 5 และทำการวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) เพื่อหาปัจจัยที่มีความสำคัญในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน

ตารางที่ 5 ระดับของปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานในการทดลองคัดเลือกปัจจัย

ปัจจัย	ระดับ	
	-1	1
กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	300	600
เวลาในการสกัด (วินาที)	50	100
อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1:30	1:50
pH	1	2

2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคติน

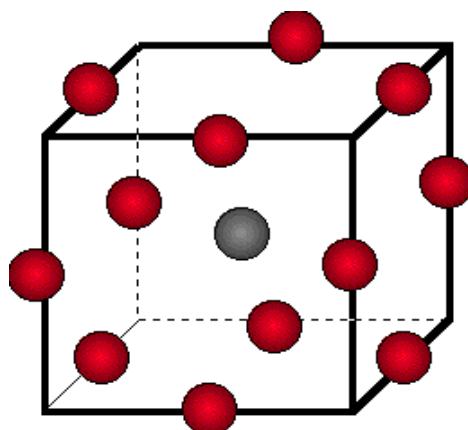
วิธีพื้นผิวตอบสนองถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ มีปัจจัยสำหรับการศึกษาประกอบไปด้วย กำลังไมโครเวฟ (X_1), เวลาที่ใช้ในการสกัด (X_2), อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (X_3) ตามลำดับ และกำหนดเป็นสามระดับ -1, 0, +1 ซึ่งการทำนายค่าสูงสุด ในการทดลองนี้จะเลือกพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนโดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และทำการทดลองหาปริมาณเพคตินที่สภาวะต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่ารหัสของปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานในการทดลองพื้นผิวตอบสนอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	300	450	600
เวลาในการสกัด (วินาที)	50	75	100
อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1:30	1:40	1:50

3.6 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม

วิธีพื้นผิวตอบสนองถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดปริมาณสารพอลิโทรมินทั้งหมดและผลผลิตเพคตินที่สภาวะต่างๆ จากของเหลือทิ้งทางการเกษตรจากเปลือกส้มเขียวหวาน โดยปัจจัยสำหรับการศึกษาในครั้งนี้จะระบุว่าเป็นตัวแปรเช่น X_1 , X_2 , X_3 ตามลำดับ และกำหนดเป็นสามระดับ -1, 0, +1 ซึ่งการทำนายค่าสูงสุด ในการทดลองนี้จะเลือกพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ตารางที่ 7 การออกแบบพื้นที่ผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานแบบไมโครเวฟร่วมแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

การทดลอง	กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาในการสกัด (วินาที)	อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)
1	200 (-1)	30 (-1)	1:30 (0)
2	450 (1.5)	30 (-1)	1:30 (0)
3	200 (-1)	90 (1)	1:30 (0)
4	450 (1.5)	90 (1)	1:30 (0)
5	200 (-1)	60 (0)	1:20 (-1)
6	450 (1.5)	60 (0)	1:20 (-1)
7	200 (-1)	60 (0)	1:40 (1)
8	450 (1.5)	60 (0)	1:40 (1)
9	300 (0)	30 (-1)	1:20 (-1)
10	300 (0)	90 (1)	1:20 (-1)
11	300 (0)	30 (-1)	1:40 (1)
12	300 (0)	90 (1)	1:40 (1)
13	300 (0)	60 (0)	1:30 (0)
14	300 (0)	60 (0)	1:30 (0)
15	300 (0)	60 (0)	1:30 (0)

ตารางที่ 8 การออกแบบพื้นที่ผิวตอบสนองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดผลผลิตเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานแบบไมโครเวฟร่วมแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

การทดลอง	กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาในการสกัด (วินาที)	อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)
1	300(-1)	50(-1)	1:40(0)
2	600(1)	50(-1)	1:40(0)
3	300(-1)	100(1)	1:40(0)
4	600(1)	100(1)	1:40(0)
5	300(-1)	75(0)	1:30(-1)
6	600(1)	75(0)	1:30(-1)
7	300(-1)	75(0)	1:50(1)
8	600(1)	75(0)	1:50(1)
9	450(0)	50(-1)	1:30(-1)
10	450(0)	100(1)	1:30(-1)
11	450(0)	50(-1)	1:50(1)
12	450(0)	100(1)	1:50(1)
13	450(0)	75(0)	1:40(0)
14	450(0)	75(0)	1:40(0)
15	450(0)	75(0)	1:40(0)

สมการพหุนามลำดับที่สอง เพื่อใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสามและการตอบสนอง (Y) สามารถคำนวณผลผลิตเพคตินและปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดตามสมการที่ 3.2

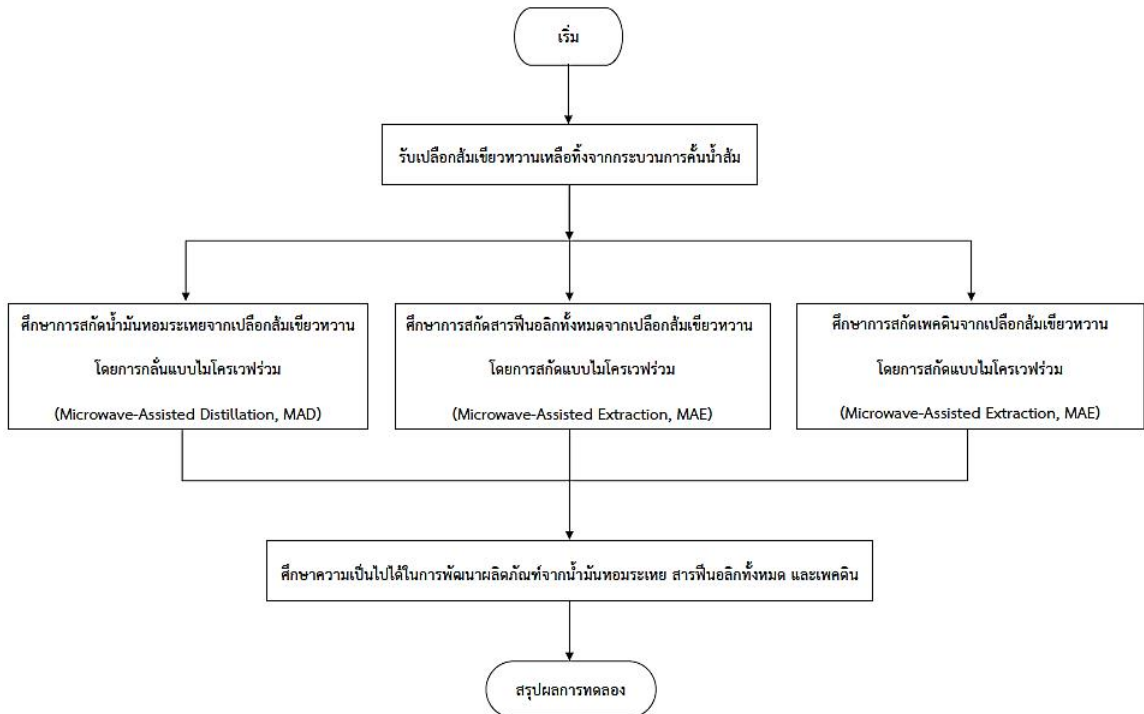
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{23} X_2 X_3 + \dots$$

$$\dots \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{11} X_{12} + \beta_{22} X_{22} + \beta_{33} X_{32}$$

... (3.2)

โดยที่ Y คือค่าทำนายการตอบสนอง β_0 เป็นค่าคงที่, X_1, X_2, X_3 เป็นตัวแปรอิสระ $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างตัวแปร $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง ซึ่งประสิทธิภาพของการทำนายผลผลิตสูงสุดโดยสมการพหุนามจะพิจารณาจากค่า R^2

3.7 แผนภาพการดำเนินงาน



ภาพที่ 24 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน

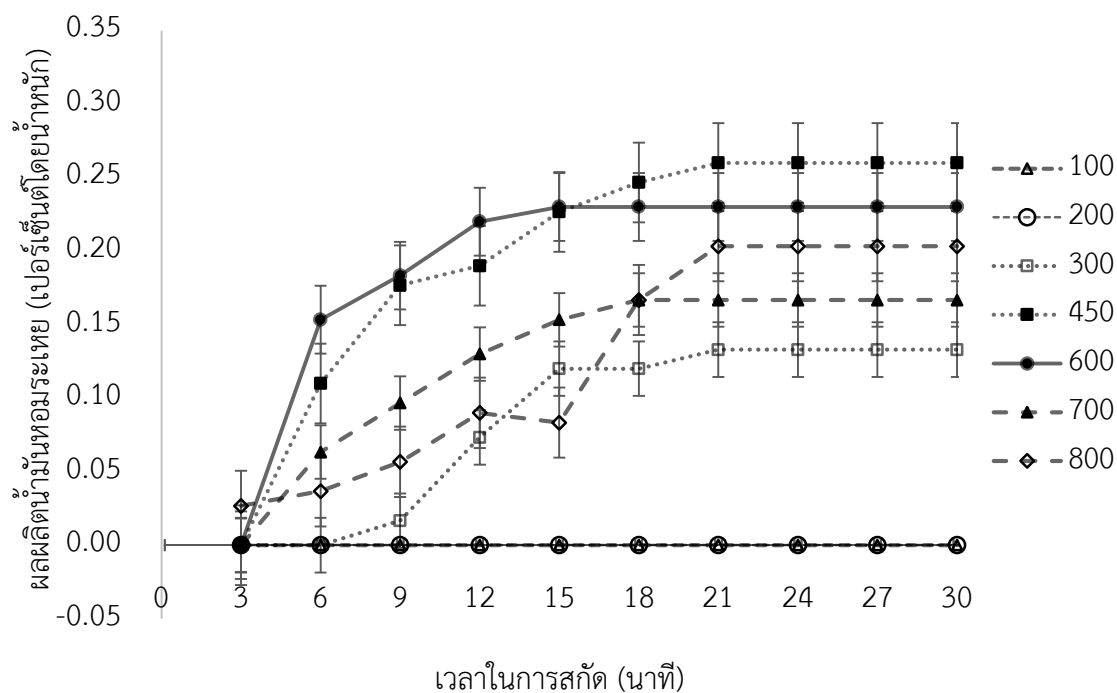


บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการกั่นแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Distillation, MAD)

การศึกษาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาต่อผลผลิตน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวาน การกั่นน้ำมันหอมระเหยโดยใช้เปลือกส้มเขียวหวานเป็นวัตถุดิบ 100 กรัม เก็บข้อมูลผลผลิตน้ำมันหอมระเหยทุกๆ 3 นาทีเป็นเวลา 30 นาที ที่กำลังวัตต์ต่างกัน 100-800 วัตต์ จากภาพที่ 25 แสดงให้เห็นว่าผลผลิตของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่เวลา 12 นาที ที่กำลังไมโครเวฟ 300, 450 และ 600 วัตต์ ผลผลิตน้ำมันหอมระเหยที่ได้ 0.07, 0.19 และ 0.22 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่ากำลังไมโครเวฟยิ่งสูงยิ่งในผลผลิตมาก และที่เวลา 21 นาที ผลผลิตน้ำมันหอมระเหยสูงสุดที่กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็น 0.26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ (Bousbia et al., 2009) ที่ศึกษาการกั่นชีวภาพของเปลือกส้มเขียวหวานชนิดใหม่บนพื้นฐานที่ผสมผสานการสกัดไม่เป็นพิษและไม่ใช้ตัวทำละลายโดยใช้เทคนิคอัลตราซาวด์และไมโครเวฟ เพื่อหาน้ำมันหอมระเหย พอลิฟีนอล และเพคติน พบว่าการกั่นน้ำมันหอมระเหยของเปลือกส้มโดยไมโครเวฟแบบอาศัยแรงโน้มถ่วงได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ดีที่สุด 4.22 ± 0.03 โดยน้ำหนัก ที่กำลังไฟ 500 วัตต์ เวลาที่ใช้ 15 นาที เนื่องจากเปลือกส้มต่างสายพันธุ์และการกั่นที่แตกต่างจึงได้สภาวะที่เหมาะสมในการกั่นน้ำมันหอมระเหยต่างกันและงานวิจัยของ (Nove and Elsa, 2017) ทำการศึกษาการกั่นน้ำมันลิลาวดีโดยใช้ไมโครเวฟร่วม พบว่ากำลังไมโครเวฟมีผลอย่างมากต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของน้ำมันลิลาวดี แต่ถ้ากำลังไมโครเวฟสูงเกินไปจะส่งผลต่อคุณภาพของน้ำมันหอมระเหย ที่เวลา 18-30 นาที ผลผลิตของน้ำมันหอมระเหยจะเริ่มช้าและคงที่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Mathialagan et al., 2014) ศึกษาการเปรียบเทียบน้ำมันหอมระเหยตะไคร้โดยวิธีการกั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟช่วยและวิธีการกั่นธรรมดาด้วยการต้ม พบว่าการกั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟช่วยในช่วงเริ่มต้นของการกั่นผลผลิตของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ในช่วงเวลาหนึ่งการกั่นจะช้าลงและคงที่ เนื่องจากปริมาณน้ำมันในวัตถุดิบมีน้อยลงในขณะที่ยืดเยื้อเพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อคำนึงถึงการใช้พลังงานในการกั่นน้ำมันหอมจากตารางที่ 9 พบว่าที่ 450 และ 600 วัตต์ มีผลผลิตต่อการใช้พลังงาน 1.65 และ 1.53 ผลผลิตต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อ 100 กรัมตามลำดับ จึงจะเห็นว่าที่กำลังไฟ 450 วัตต์ สามารถได้ผลผลิตมากและช่วยประหยัดพลังงานในการสกัดได้



ภาพที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไมโครเวฟที่ 100-800 วัตต์ต่อ
ผลผลิตน้ำมันหอมระเหยโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบกำลังไฟของไมโครเวฟกับผลผลิตต่อการใช้พลังงาน

กำลังไฟฟ้า	ผลผลิตน้ำมัน หอมระเหย	เวลา	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	ผลผลิตต่อ กิโลวัตต์-ชั่วโมง
100	0 ^c ±0	0	0	0 ^d ±0
200	0 ^c ±0	0	0	0 ^d ±0
300	0.13 ^b ±0.064	21	0.11	1.24 ^c ±0.397
450	0.26 ^a ±0.085	21	0.16	1.65 ^{abc} ±0.542
600	0.23 ^{ab} ±0.108	15	0.15	1.53 ^{ab} ±0.757
700	0.17 ^{ab} ±0.076	18	0.21	0.81 ^{bc} ±0.361
800	0.20 ^{ab} ±0.075	21	0.28	0.71 ^{cd} ±0.090

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามตัวอักษร a, b, c และ d คือ ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
($p < 0.05$) ในแนวตั้ง

ตารางที่ 10 อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาต่อผลผลิตน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวาน(กรัม/100 กรัมของวัสดุดิบ)

กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลา (นาที)				
	3	6	9	12	15
100	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0
200	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0
300	0 ^{Ba} ±0	0 ^{Bc} ±0	0.02 ^{Bb} ±0	0.07 ^{AB,a} ±0.081	0.12 ^{A,ab} ±0.035
450	0 ^{Da} ±0	0.11 ^{C,ab} ±0.030	0.18 ^{Bc,a} ±0.042	0.19 ^{B,a} ±0.053	0.23 ^{A,a} ±0.071
600	0 ^{Ba} ±0	0.15 ^{AB,a} ±0.095	0.18 ^{A,a} ±0.07	0.22 ^{A,a} ±0.114	0.23 ^{A,a} ±0.108
700	0 ^{Ba} ±0	0.06 ^{AB,abc} ±0.021	0.10 ^{AB,ab} ±0.02	0.13 ^{A,a} ±0.060	0.15 ^{A,ab} ±0.064
800	0.03 ^{A,a} ±0.046	0.04 ^{A,bc} ±0.055	0.06 ^{A,b} ±0.012	0.09 ^{A,a} ±0.058	0.13 ^{A,b} ±0.058

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามตัวอักษร A, B และ C คือ ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ในแนวนอน

ค่าเฉลี่ยตามตัวอักษร a, b และ c คือ ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ในแนวตั้ง

NS มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 10 อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาต่อผลผลิตน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวาน(กรัม/100 กรัมของวัตถุดิบ) (ต่อ)

กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลา (นาที)				
	18	21	24	27	30
100	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0
200	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0	0 ^{n.s.} ±0
300	0.12 ^{A,ab} ±0.035	0.13 ^{A,ab} ±0.064	0.13 ^{A,ab} ±0.064	0.13 ^{A,ab} ±0.064	0.13 ^{A,ab} ±0.064
450	0.25 ^{A,a} ±0.080	0.26 ^{A,a} ±0.085	0.26 ^{A,a} ±0.085	0.26 ^{A,a} ±0.085	0.26 ^{A,a} ±0.085
600	0.23 ^{A,ab} ±0.108	0.23 ^{A,ab} ±0.108	0.23 ^{A,ab} ±0.108	0.23 ^{A,ab} ±0.108	0.23 ^{A,ab} ±0.108
700	0.17 ^{A,ab} ±0.076	0.17 ^{A,ab} ±0.076	0.17 ^{A,ab} ±0.076	0.17 ^{A,ab} ±0.076	0.17 ^{A,ab} ±0.076
800	0.17 ^{A,b} ±0.069	0.20 ^{A,b} ±0.075	0.20 ^{A,b} ±0.075	0.20 ^{A,b} ±0.075	0.20 ^{A,b} ±0.075

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามตัวอักษร A, B และ C คือ ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ในแนวนอน

ค่าเฉลี่ยตามตัวอักษร a, b และ c คือ ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ในแนวตั้ง

NS มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

จากตารางที่ 10 พบว่ากำลังไมโครเวฟที่ 100 และ 200 วัตต์ ไม่สามารถกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้เนื่องจากใช้ความร้อนต่ำทำให้น้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานไม่สามารถระเหยออกจากเปลือกส้มเขียวหวานได้ โดยน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานถูกกลั่นออกมาได้ต้องใช้กำลังไมโครเวฟตั้งแต่ 300 วัตต์เป็นต้นไป ซึ่งที่กำลังไมโครเวฟที่ 300 – 700 วัตต์ ให้ผลผลิตน้ำมันหอมระเหยที่ 15-30 นาที ไม่แตกต่างกันทางสถิติ สอดคล้องกับการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกมะนาวซึ่งพบว่ากำลังวัตต์สูงจะสกัดน้ำมันหอมระเหยได้เร็วขึ้น (200-500 วัตต์) แต่เมื่อใช้กำลังวัตต์ 500-1000 วัตต์ พบว่าใช้เวลาในการสกัดเท่ากัน (Bousbia et al., 2009) กำลังวัตต์ของไมโครเวฟเป็นหน่วยของพลังงานต่อเวลาซึ่งควบคุมพลังงานที่วัตถุดิบได้รับในรูปแบบของพลังงานความร้อน ดังนั้นกำลังวัตต์ของไมโครเวฟที่สูงเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้น โดยความร้อนจะทำลายโครงสร้างเซลล์เมมเบรนของพืชวัตถุดิบ ทำให้น้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในเซลล์แยกออกมาจากเปลือกส้มเขียวหวานเร็วขึ้น (Kusuma et al., 2018) ดังนั้นกำลังวัตต์ของไมโครเวฟจึงแปรผกผันต่อเวลาในการสกัดซึ่งถ้าใช้กำลังวัตต์ของไมโครเวฟที่สูง จะใช้เวลาในการสกัดที่เร็ว และเมื่อเปรียบเทียบการสกัดน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วมและต้มสกัดจากเปลือกส้มโอ พบว่าการสกัดแบบไมโครเวฟใช้เวลาเร็วกว่า 6 เท่า ได้ผลผลิตน้ำมันหอมระเหยมากกว่า และมีคุณภาพที่ดีกว่า (Chen et al., 2016) และจากผลการทดลองกำลังไมโครเวฟที่ 800 วัตต์ สามารถกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้เนื่องจากใช้ความร้อนสูง แต่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของน้ำมันหอมระเหย กำลังไมโครเวฟที่ 800 วัตต์ จึงไม่เหมาะในการกลั่นน้ำมันหอมระเหย สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Jiao et al., 2012) ได้กล่าวไว้ว่าคุณภาพของน้ำมันหอมระเหยก็เป็นสิ่งสำคัญการใช้ความร้อนสูงอาจทำให้สารสำคัญในน้ำมันหอมระเหยเสื่อมสภาพได้ การกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบไมโครเวฟร่วมในระดับห้องปฏิบัติการนั้นพบว่ามีศักยภาพทั้งด้านเวลา พลังงานที่ใช้ และผลผลิตสามารถไปพัฒนาใช้กับระดับอุตสาหกรรมต่อไป (Filly et al., 2014)

4.2 ผลของการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE)

4.2.1 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

คัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน โดยศึกษาปัจจัยของกำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวและ ความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอล วางแผนการทดลองเชิงเศษส่วนของแฟคทอเรียล 2^{4-1} (Fractional Factorial Experiments) โดยศึกษาในระดับของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงใน ตารางที่ 11 และทำการวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) เพื่อหาปัจจัยที่มีความสำคัญในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

ตารางที่ 11 การทดลองเชิงเศษส่วนของแฟคทอเรียล 2^{4-1} (Fractional Factorial Experiments) โดยศึกษาในระดับของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง

การทดลอง	กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาในการสกัด (วินาที)	อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกรัมของวัตถุดิบ)
1	100 (-1)	30 (-1)	1:20 (-1)	20 (-1)	20.640
2	450 (1)	30 (-1)	1:20 (-1)	50 (1)	20.337
3	100 (-1)	90 (1)	1:20 (-1)	50 (1)	23.096
4	450 (1)	90 (1)	1:20 (-1)	20 (-1)	20.799
5	100 (-1)	30 (0)	1:40 (1)	50 (1)	23.354
6	450 (1)	30 (0)	1:40 (1)	20 (-1)	22.369
7	100 (-1)	90 (0)	1:40 (1)	20 (-1)	24.753
8	450 (1)	90 (0)	1:40 (1)	50 (1)	24.260

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับความถดถอยของสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

รูปแบบ	ค่าสัมประสิทธิ์	P-value
Intercept	22.451	0.0000005
X ₁ (กำลังไมโครเวฟ)	-0.510	0.0343934
X ₂ (เวลาในการสกัด)	0.776	0.0111066
X ₃ (อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว)	1.233	0.0029537
X ₄ (ความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอล)	0.311	0.1096453

ผลการวิเคราะห์ความถดถอยและวิเคราะห์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 12 พบว่าปัจจัยของอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว กำลังไมโครเวฟ และเวลาในการสกัดที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อความแตกต่างทางสถิติต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดที่สกัดได้ ($p < 0.05$) ตามลำดับใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยปรับลดและปรับเพิ่มโดยใช้วิธีการ Steepest ascent เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ความถดถอยข้างต้น พบว่า ความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอลมีผลน้อยต่อปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสกัดได้จากเปลือกส้มเขียวหวาน ส่วนปัจจัยกำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายมีผลมากต่อปริมาณของสารฟีนอลิกทั้งหมดสกัดได้จากเปลือกส้มเขียวหวาน นำไปศึกษาต่อ

4.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากผงเปลือกส้มเขียวหวาน

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากผงเปลือกส้มเขียวหวาน นั้น ขั้นตอนแรกจะต้องทำการออกแบบการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกการออกแบบการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยทำการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง โดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางทำซ้ำจำนวน 3 การทดลอง โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากผงเปลือกส้มเขียวหวานทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ กำลังไมโครเวฟ (X₁) เวลาในการสกัด (X₂)

และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (X_3) โดยจะกำหนดระดับค่าปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (1) ดังแสดงในตารางที่ 13

1) การศึกษาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมด

จากการศึกษาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดที่ 200, 300 และ 450 วัตต์ตามลำดับ พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดได้มากขึ้น แต่ถ้ากำลังไมโครเวฟเพิ่มสูงมากกว่า 450 วัตต์ จะทำให้ได้ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดลดลง เนื่องจากไมโครเวฟใช้หลักการสั่นสะเทือนของคลื่น ทำให้เกิดความร้อน และความร้อนนั้นจะทำให้ผนังเซลล์ของเปลือกส้มเขียวหวานเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้สารฟีนอลิกทั้งหมดสกัดออกมาได้มาก (ดวงกมล, 2557) จะเห็นได้ว่าไมโครเวฟมีผลต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากขึ้นความร้อนจะทำลายสารฟีนอลิกจากพืชเป็นไปตามการทดลองของ (Jiangfeng et al., 2011)

2) การศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมด

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดที่ 30, 60 และ 90 วินาทีตามลำดับ พบว่าเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดได้มากขึ้น แต่ถ้าเวลามากเกินไปจะทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการสกัดที่นานเกินความเหมาะสม อาจทำให้พันธะเอสเทอร์ของสารประกอบฟีนอลิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารชนิดอื่น (Dahmoune et al., 2014) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Jiangfeng et al., 2011) เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะสกัดสารฟีนอลิกมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลามากกว่าจุดที่เหมาะสมความร้อนจะทำลายสารฟีนอลิกจากพืช

3) การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมด

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่มีผลต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดที่ 1:20, 1:30 และ 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่ 1:30 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมด เนื่องจากอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่น้อย จะสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดได้น้อย ถ้าอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวมากก็สกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดได้มาก แต่จะทำให้สิ้นเปลืองวัตถุดิบและตัวทำละลายมากจนเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับ (ธนภัทร, 2560)

การสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากผงเปลือกส้ม โดยศึกษาปัจจัยกำลังไมโครเวฟ (200, 300 และ 450 วัตต์) เวลาในการสกัด (30, 60 และ 90 วินาที) และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (1:20, 1:30 และ 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร) วิธีพ่นผิวตบสนองโดยการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนนำมาใช้เพื่อออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลของการออกแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

การทดลอง	กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาใน การ สกัด (วินาที)	อัตราส่วน ของแข็งต่อ ของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมของวัตถุดิบ)		
				ผลจากการ ทดลอง	ผลจากการ ทำนาย	ค่าความ คลาดเคลื่อน
1	200 (-1)	30 (-1)	1:30 (0)	22.150	21.762	0.018
2	450 (1.5)	30 (-1)	1:30 (0)	21.887	22.453	0.026
3	200 (-1)	90 (1)	1:30 (0)	23.180	22.578	0.026
4	450 (1.5)	90 (1)	1:30 (0)	24.042	24.466	0.018
5	200 (-1)	60 (0)	1:20 (-1)	15.236	17.975	0.180
6	450 (1.5)	60 (0)	1:20 (-1)	19.310	20.312	0.052
7	200 (-1)	60 (0)	1:40 (1)	27.561	25.811	0.063
8	450 (1.5)	60 (0)	1:40 (1)	28.044	26.053	0.071
9	300 (0)	30 (-1)	1:20 (-1)	24.060	22.100	0.081
10	300 (0)	90 (1)	1:20 (-1)	25.676	23.895	0.069
11	300 (0)	30 (-1)	1:40 (1)	27.816	29.597	0.064
12	300 (0)	90 (1)	1:40 (1)	28.433	30.393	0.069
13	300 (0)	60 (0)	1:30 (0)	29.448	30.680	0.042
14	300 (0)	60 (0)	1:30 (0)	28.684	30.680	0.070
15	300 (0)	60 (0)	1:30 (0)	33.909	30.680	0.095

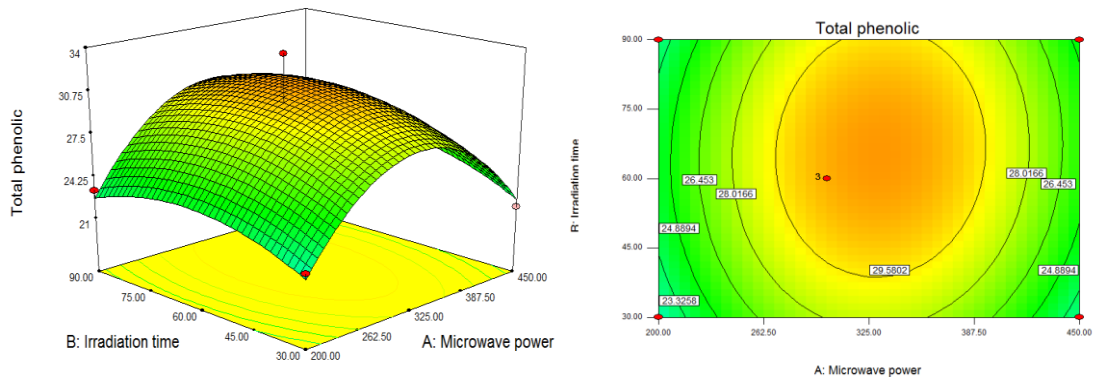
ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับความถดถอยของสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

รูปแบบ	ค่าสัมประสิทธิ์	P-value
Intercept	30.680	0.00001
X ₁ (กำลังไมโครเวฟ)	2.529	0.06513
X ₂ (เวลาในการสกัด)	0.647	0.57799
X ₃ (อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว)	3.499	0.02364
X ₁ X ₂	0.239	0.85077
X ₁ X ₃	-0.419	0.74282
X ₂ X ₃	-0.250	0.87630
X ₁ ²	-4.027	0.01301
X ₂ ²	-1.954	0.27314
X ₃ ²	-2.231	0.21890

จากตารางที่ 14 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนความถดถอยในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน พบว่า สมการพหุนามกำลังสองเหมาะสมที่นำมาใช้ทำนายสารฟีนอลิกทั้งหมด โดยมีค่า $R^2 = 0.844$, Multiple R = 0.919 และ Adjusted $R^2 = 0.563$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงว่าสมการมีความแม่นยำสามารถทำนายสภาวะที่เหมาะสมได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์นำไปสร้างสมการถดถอย ดังแสดงในสมการที่ 4.1

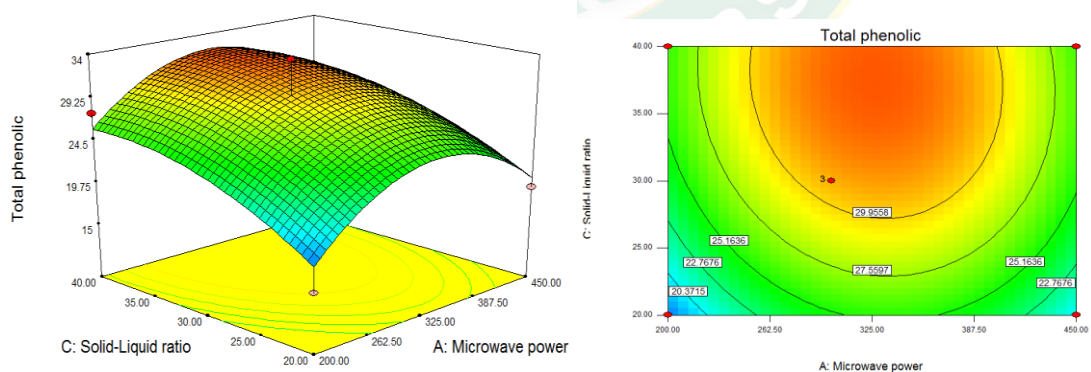
$$\text{สารฟีนอลิกทั้งหมด} = 30.680 + 2.529X_1 + 0.647X_2 + 3.499X_3 + 0.239X_1X_2 - 0.419X_1X_3 - 0.250X_2X_3 - 4.027X_1^2 - 1.954X_2^2 - 2.231X_3^2 \quad \dots (4.1)$$

ทั้งนี้ค่า $P < 0.05$ แสดงถึงรูปแบบเหล่านั้นมีความสำคัญต่อสมการถดถอยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าสูง ได้แก่ X₃ และ X₁² แสดงให้เห็นว่าปัจจัยอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวมีความสำคัญต่อการสกัดในรูปแบบเชิงเส้นตรงและรูปแบบกำลังสอง ส่วนกำลังไมโครเวฟมีความสำคัญต่อการสกัดในรูปแบบกำลังสอง



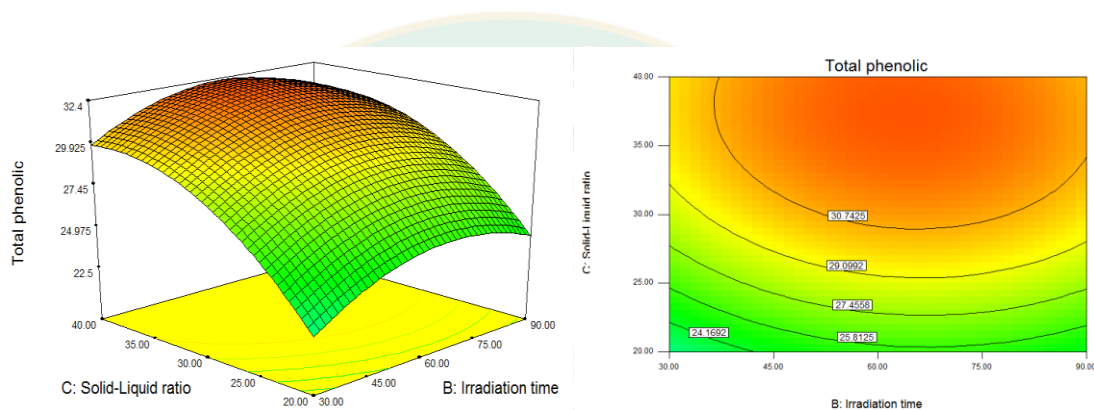
ภาพที่ 26 อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการสกัดต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด จากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร

จากภาพที่ 26 แสดงถึงอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการสกัดต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นจาก 200 วัตต์ไปจนถึง 300 วัตต์ หลังจากนั้นเพิ่มจนถึงจุดๆ หนึ่งแล้วเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 450 วัตต์ และเวลาที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้นจาก 30 วินาที ไปจนถึง 60 วินาที และหลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 90 วินาที ส่งผลให้มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด 32.298 มิลลิกรัมของกรดแกลลิก/กรัมของวัตถุดิบแห้ง



ภาพที่ 27 อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่เวลาในการสกัด 60 วินาที

จากภาพที่ 27 แสดงถึงอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่เวลาในการสกัด 60 วินาที พบว่าพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดเมื่อกำลังไมโครเวฟ เพิ่มขึ้นจาก 200 วัตต์ไปจนถึง 300 วัตต์ หลังจากนั้นเพิ่มจนถึงจุดๆ หนึ่งแล้วเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 450 วัตต์ และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 1:20 กรัมต่อมิลลิลิตร ไปจนถึง 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร และหลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร ส่งผลให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 32.251 มิลลิกรัมของกรดแกลลิก/กรัมของวัตถุดิบแห้ง



ภาพที่ 28 อิทธิพลของเวลาในการสกัดและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์

จากภาพที่ 28 แสดงถึงอิทธิพลของเวลาในการสกัดและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ พบว่าพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดเมื่อเวลาในการสกัด เพิ่มขึ้นจาก 30 วินาที ไปจนถึง 60 วินาที และหลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 90 วินาที และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 1:20 กรัมต่อมิลลิลิตร ไปจนถึง 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร และหลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร ส่งผลให้มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด 32.298 มิลลิกรัมของกรดแกลลิก/กรัมของวัตถุดิบแห้ง

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบปริมาณฟีนอลิกที่สภาวะต่างๆในการสกัดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

	กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาใน การ สกัด (วินาที)	อัตราส่วน ของแข็งต่อ ของเหลว (กรัมต่อ มิลลิลิตร)	ปริมาณฟีนอลิก (มิลลิกรัมต่อ กรัมของ วัตถุดิบ)
สภาวะที่เหมาะสมจากการทำนาย	334.87	64.04	1:37.51	32.390
การทำนายสภาวะที่เหมาะสมจากการ ทดลอง	300	64	1:37.50	32.077
ผลจากสภาวะที่เหมาะสมจากการ ทดลอง	300	64	1:37.50	32.268±0.336

สมการที่ 4.1 นำไปสร้างแผนภาพแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อแสดงอิทธิพลของ 2 ปัจจัย ณ ปัจจัย 3 คงที่ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร เวลาในการสกัด 60 วินาที และกำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ ต่อผลตอบสนองของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน ดังแสดงใน ภาพที่ 26-28 พบว่า สภาวะที่ทำให้สกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานสูงสุดอยู่ช่วงที่กำหนดของแต่ละปัจจัย โดยที่ กำลังไมโครเวฟ 200, 300 และ 450 วัตต์ เวลาในการสกัด 30, 60 และ 90 วินาที และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:20, 1:30 และ 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสมการที่ 4.1 คำนวณสภาวะที่สกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานสูงสุด 32.268±0.336 มิลลิกรัมของกรดแกลลิก/กรัมของวัตถุดิบแห้ง คือ กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ เวลาในการสกัด 64 วินาที และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:37.5 กรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทำนาย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (N. M'hiri et al., 2015) ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะการใช้งานที่แตกต่างกันต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกในเปลือกส้ม ทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกที่ 200 วัตต์ สามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม วัตถุดิบต่างชนิด ใช้กำลังวัตต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัตถุดิบต่างกัน โดยงานวิจัยอื่น พบว่า การสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้น หลังจากเพิ่มความร้อนและเวลาการแผ่รังสีของไมโครเวฟ เช่น การสกัดเม็ดมะม่วงหิมพานต์เมื่อใช้กำลังวัตต์สูง 720 วัตต์ สามารถสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด เนื่องจากความร้อนทำให้องค์ประกอบฟีนอลิกที่พันผูกไว้เป็นอิสระ นอกจากนี้เอนไซม์ออกซิเดชันและเอนไซม์ไฮโดรไลติกที่มีความสามารถทำลายสารต้นอนุมูลอิสระถูกความร้อนทำให้เสื่อมสภาพและปลดปล่อยออกมาจากผนังเซลล์ (Uslu and Özcan, 2019) สอดคล้องกับการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากชา

โดยวิธีไมโครเวฟร่วม พบว่าเมื่อเพิ่มความร้อน (230 องศาเซลเซียส) สามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกสูงสุด (Tsubaki et al., 2010)

4.3 ผลศึกษาการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม (Microwave-Assisted Extraction, MAE)

4.3.1 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินที่สกัดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

จากการทดลองตามตารางที่ 16 ผลของการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ตามตารางที่ 17 พบว่าปัจจัยของ pH ที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย เวลาที่ใช้ในการสกัด และกำลังไมโครเวฟมีผลต่อความแตกต่างทางสถิติต่อปริมาณของเพคตินที่สกัดได้ตามลำดับ ใช้วิธีการ Steepest ascent ปรับลดและปรับเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เพื่อหาการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า pH 1 มีผลต่อปริมาณของเพคตินที่สกัดได้จากเปลือกส้มเขียวหวาน ส่วนปัจจัยกำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย จะนำไปศึกษาต่อ

ตารางที่ 16 ผลการทดลองเชิงเศษส่วนของแฟคทอเรียล 2^{4-1} (Fractional Factorial Experiments) โดยศึกษาระดับของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูงของการสกัดผลผลิตเพคติน

การทดลอง	กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาในการสกัด (วินาที)	อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	pH	ผลผลิตเพคติน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
1	300 (-1)	60 (-1)	1:10 (-1)	1 (-1)	8.5
2	600 (1)	60 (-1)	1:30 (1)	1 (-1)	12.5
3	300 (-1)	180 (1)	1:30 (1)	1 (-1)	11.5
4	600 (1)	180 (1)	1:10 (-1)	1 (-1)	5
5	300 (-1)	60 (-1)	1:30 (1)	2 (1)	6
6	600 (1)	60 (-1)	1:10 (-1)	2 (1)	3.5
7	300 (-1)	180 (1)	1:10 (-1)	2 (1)	4.5
8	600 (1)	180 (1)	1:30 (1)	2 (1)	3.5

ตารางที่ 17 การวิเคราะห์ความถดถอยของสัมประสิทธิ์ในแต่ละปัจจัย

ปัจจัย	ค่าสัมประสิทธิ์	P-value
Intercept	6.87	0.00214
กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	-0.75	0.35566
เวลาในการสกัด (วินาที)	-0.75	0.35566
อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1.5	0.11748
pH	-2.5	0.03596

4.3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือง

1) การศึกษาอิทธิพลของค่า pH ของสารละลายที่มีผลต่อการสกัดเพคติน

จากการศึกษาค่า pH ของสารละลายที่มีผลต่อการสกัดเพคตินโดยใช้ pH1 และ 2 ตามลำดับ พบว่า เปลือกส้มเขียวหวานที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่ pH1 ได้ผลผลิตเพคตินมากที่สุดในการสกัด เนื่องจากเมื่อสกัดที่ pH ต่ำปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) มีอยู่ในระบบสูงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์มากขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพคตินที่ไม่ละลายน้ำ ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ เป็นผลทำให้ผลผลิตเพคตินที่สกัดได้มีปริมาณสูง แต่เมื่อ pH เพิ่มสูงขึ้นไฮโดรเจนไอออนในระบบการสกัดลดลงผลผลิตเพคตินที่สกัดได้ลดลง (ตระกูลอินทร์, 2533) แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองที่วัตถุดิบต่างกันอาจจะทำให้ใช้ pH ที่ต่างกัน เช่น ศึกษาการสกัดเพคตินจากเปลือกโกโก้ที่เหลืองจากกระบวนการผลิต สกัดที่ pH2.5 (Mollea et al., 2008)

2) การศึกษาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อการสกัดเพคติน

จากการศึกษาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อการสกัดเพคตินที่ 300, 450 และ 600 วัตต์ตามลำดับ พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มสูงขึ้นทำให้ผลผลิตเพคตินได้มากขึ้น แต่ถ้ากำลังไมโครเวฟเพิ่มสูงมากกว่า 600 วัตต์จะทำให้ได้ผลผลิตเพคตินลดลง เนื่องจากกำลังของไมโครเวฟและอุณหภูมิจะแปรผันตามกัน กำลังไมโครเวฟที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น (ธนภัทร, 2560) โดยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกถ่ายโอนไปยังโมเลกุลโดยกลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) และกลไกการชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว (dipole rotation) ซึ่งส่งผลให้พลังงานกระจายไปภายในตัวทำละลายและผนังแล้วเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุล จะส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานและความเกิดความร้อนขึ้น ของผนังเซลล์และเนื้อเยื่อเสียหาย จึงทำให้เพคตินแพร่กระจายเข้าสู่ตัวทำละลายทำให้ได้ผลผลิตของเพคตินเพิ่มขึ้น (Gfrerer and Lankmayr, 2005)

3) การศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการสกัดเพคติน

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการสกัดเพคตินที่ 50, 75 และ 100 วินาทีตามลำดับ พบว่าเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ผลผลิตเพคตินได้มากขึ้น แต่ถ้าเวลามากเกินไปจะทำให้ผลผลิตเพคตินลดลง เนื่องจากการสกัดที่เวลาน้อยกว่า การแพร่ของสารละลายกรดที่ใช้ในการสกัดเข้าสู่เนื้อเยื่อพืช และการแพร่ของโมเลกุลเพคตินออกจากเนื้อเยื่อพืช เกิดในอัตราที่ต่ำ จึงทำให้ได้ผลผลิตเพคตินน้อยแต่เมื่อเพิ่มเวลาของการสกัดให้นานขึ้น พบว่า ประสิทธิภาพของการสกัดสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลเพคตินสามารถละลายและแพร่ได้ดีและนาน จนถึงช่วงเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ผลผลิตเพคตินสูงที่สุด หลังจากนั้นถึงแม้จะเพิ่มเวลาในการสกัดก็จะมีผลต่อการสกัดเพคติน (ตระกูลอินทร์, 2533)

4) การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่มีผลต่อการสกัดเพคติน

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่มีผลต่อการสกัดเพคตินที่ 1:30, 1:40 และ 1:50 กรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวยิ่งมากก็ย่อมสกัดผลผลิตเพคตินได้มากขึ้น (ธนภัทร, 2560) แต่เนื่องจากในการทดลองต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดและประหยัดวัตถุดิบและตัวทำละลายในการทดลอง

ตารางที่ 18 ผลของการออกแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดปริมาณ
เพคตินโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

การ ทดลอง	กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาใน การสกัด (วินาที)	อัตราส่วน ของแข็งต่อ ของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ผลผลิตเพคติน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
				ค่าจากการ ทดลอง	ค่าจากการ ทำนาย	ค่าความ คลาดเคลื่อน
1	300 (-1)	50 (-1)	1:40 (0)	9.00	8.04	0.119
2	600 (1)	50 (-1)	1:40 (0)	13.00	11.79	0.103
3	300 (-1)	100 (1)	1:40 (0)	8.67	9.87	0.122
4	600 (1)	100 (1)	1:40 (0)	8.67	9.63	0.100
5	300 (-1)	75 (0)	1:30 (-1)	4.00	4.92	0.187
6	600 (1)	75 (0)	1:30 (-1)	7.67	8.83	0.131
7	300 (-1)	75 (0)	1:50 (1)	12.00	10.83	0.108
8	600 (1)	75 (0)	1:50 (1)	11.33	10.42	0.087
9	450 (0)	50 (-1)	1:30 (-1)	7.67	7.71	0.005
10	450 (0)	100 (1)	1:30 (-1)	11.33	9.21	0.230
11	450 (0)	50 (-1)	1:50 (1)	11.00	13.13	0.162
12	450 (0)	100 (1)	1:50 (1)	11.33	11.29	0.004
13	450 (0)	75 (0)	1:40 (0)	16.67	16.33	0.021
14	450 (0)	75 (0)	1:40 (0)	16.67	16.33	0.021
15	450 (0)	75 (0)	1:40 (0)	15.67	16.33	-0.040

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง คือ กำลังไมโครเวฟ เวลาและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว เมื่อมีการนำมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้งด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่าผลจากการผลิตเพคตินที่สูงที่สุดคือที่สภาวะกำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัดที่ 75 วินาที และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร ได้ผลผลิตเพคติน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) 16.67 เปอร์เซ็นต์ โดยสภาวะที่สกัดได้ต่ำสุด คือ ที่กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัดที่ 75 วินาที และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร ได้ค่าผลผลิตเพคติน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) 4.00 เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 18 นำไปวิเคราะห์ทางสถิติตามตารางที่ 19 เพื่อสร้าง

สมการทางคณิตศาสตร์ พบว่า สมการพหุนามกำลังสองถูกเลือกมาใช้ในการทำนายหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินโดยวิธีไมโครเวฟร่วม

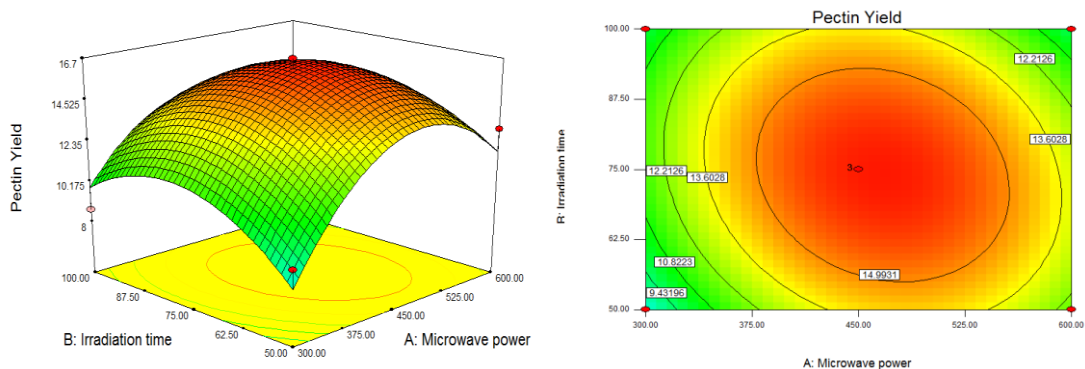
แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนความถดถอยในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน พบว่า สมการพหุนามกำลังสองเหมาะสมที่นำมาใช้ทำนายเพคติน โดยมีค่า $R^2 = 0.926$, Multiple R = 0.962 และ Adjusted $R^2 = 0.792$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงว่าสมการมีความแม่นยำสามารถใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์นำไปสร้างสมการถดถอย ดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$\text{ผลผลิตเพคติน} = 16.33 + 0.88X_1 - 0.08X_2 + 1.88X_3 - 1.00X_1X_2 - 1.08X_1X_3 - 0.83X_2X_3 - 4.04X_1^2 - 2.46X_2^2 - 3.54X_3^2 \quad \dots (4.2)$$

ทั้งนี้ค่า $P < 0.05$ แสดงถึงรูปแบบเหล่านั้นมีความสำคัญต่อสมการถดถอยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าสูง ได้แก่ X_3 , X_1^2 , X_2^2 และ X_3^2 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวมีความสำคัญต่อการสกัดในรูปแบบเชิงเส้นตรงและรูปแบบกำลังสองของกำลังไมโครเวฟ เวลาในการสกัด และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวมีความสำคัญต่อการสกัดในรูปแบบกำลังสอง

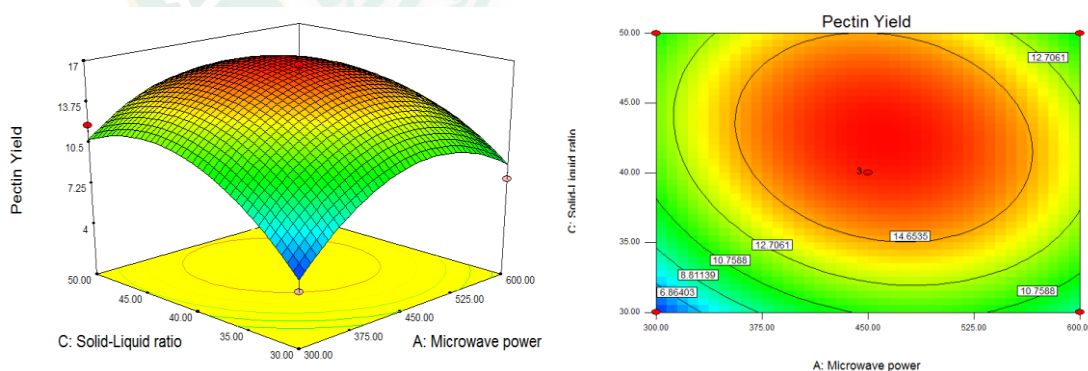
ตารางที่ 19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการถดถอยของการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน

รูปแบบ	ค่าสัมประสิทธิ์	P-value
Intercept	16.33	0.00003
X_1 (กำลังไมโครเวฟ)	0.88	0.25859
X_2 (เวลาในการสกัด)	-0.08	0.90813
X_3 (อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว)	1.88	0.04125
X_1X_2	-1.00	0.35034
X_1X_3	-1.08	0.31534
X_2X_3	-0.83	0.43003
X_1^2	-4.04	0.01034
X_2^2	-2.46	0.05922
X_3^2	-3.54	0.01721



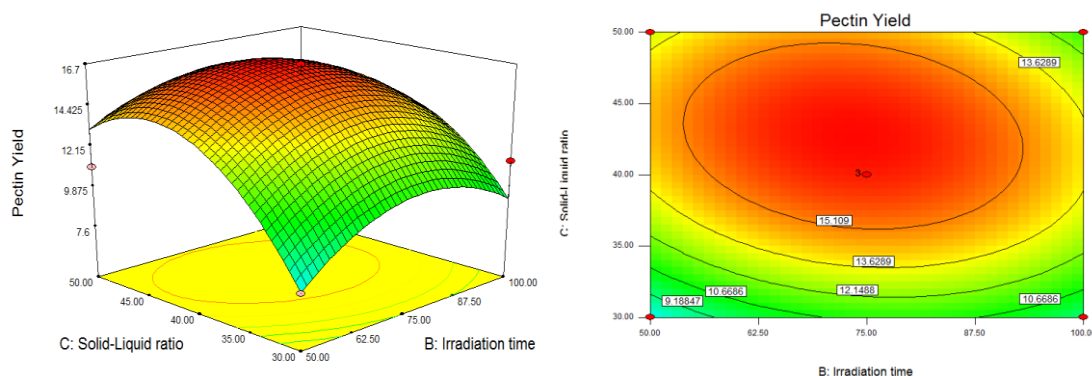
ภาพที่ 29 อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการสกัดต่อผลผลิตเพคติน จากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร

จากภาพที่ 29 แสดงถึงอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการสกัดต่อผลผลิตเพคติน จากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตเพคตินเมื่อกำลังไมโครเวฟ เพิ่มขึ้นจาก 300 วัตต์ไปจนถึง 450 วัตต์ หลังจากนั้นเพิ่มจนถึงจุดๆ หนึ่งแล้วเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 600 วัตต์ และเวลาที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้นจาก 50 วินาที ไปจนถึง 75 วินาที และหลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 100 วินาที ส่งผลให้มีผลผลิตเพคติน 14.993 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 30 อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อผลผลิตเพคติน จากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่เวลาในการสกัด 75 วินาที

จากภาพที่ 30 แสดงถึงอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อผลผลิตเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่เวลาในการสกัด 75 วินาที พบว่าพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตเพคตินเมื่อกำลังไมโครเวฟ เพิ่มขึ้นจาก 300 วัตต์ไปจนถึง 450 วัตต์ หลังจากนั้นเพิ่มจนถึงจุดๆ หนึ่งแล้วเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 600 วัตต์ และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร ไปจนถึง 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร และหลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 1:50 กรัมต่อมิลลิลิตร ส่งผลให้มีผลผลิตเพคติน 14.654 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 31 อิทธิพลของเวลาในการสกัดและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อผลผลิตเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์

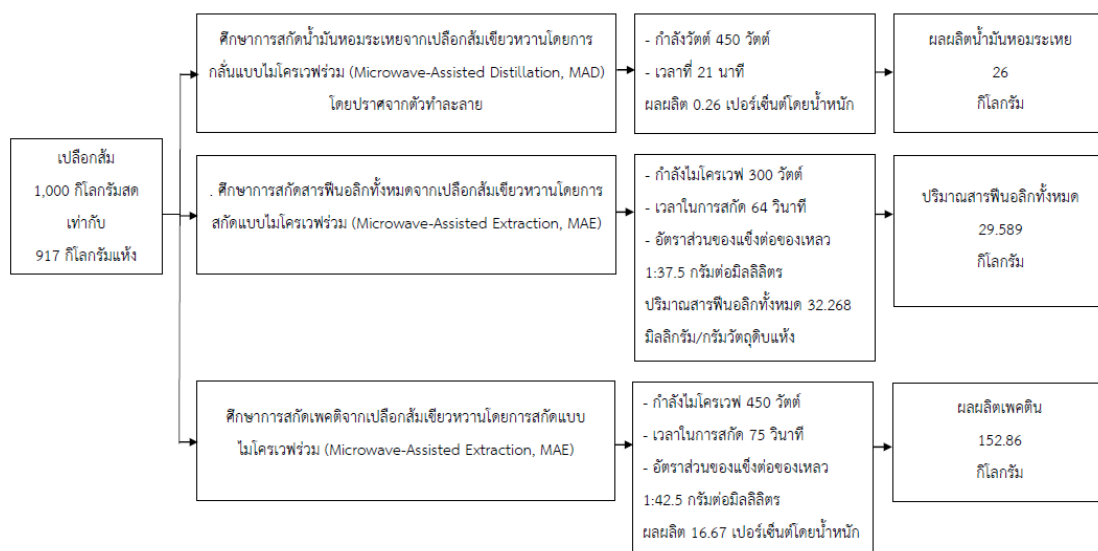
จากภาพที่ 31 แสดงถึงอิทธิพลของเวลาในการสกัดและอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อผลผลิตเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน ที่กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ พบว่าพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตเพคตินเมื่อเวลาในการสกัด เพิ่มขึ้นจาก 30 วินาที ไปจนถึง 40 วินาที และหลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 50 วินาที และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร ไปจนถึง 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร และหลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงจนถึง 1:50 กรัมต่อมิลลิลิตร ส่งผลให้มีผลผลิตเพคติน 15.109 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 20 การเปรียบเทียบผลผลิตเพคตินที่สภาวะต่างๆในการสกัดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

	กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาใน การสกัด (วินาที)	อัตราส่วน ของแข็งต่อ ของเหลว (กรัมต่อ มิลลิลิตร)	ผลผลิตเพคติน (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)
สภาวะที่เหมาะสมจากการทำนาย	462.05	73.23	1:42.49	16.617
การทำนายสภาวะที่เหมาะสมจากการ ทดลอง	450	75	1:42.5	16.581
ผลจากสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง	450	75	1:42.5	16.667±0.037

จากตารางที่ 20 พบว่าสามารถวิเคราะห์ทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแบบไมโครเวฟ โดยที่สภาวะที่ทำให้ได้เพคตินสูงสุด โดยกำหนดให้กำลังไมโครเวฟอยู่ระหว่าง 300, 450 และ 600 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัดอยู่ระหว่าง 50, 75 และ 100 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายอยู่ระหว่าง 1:30, 1:40 และ 1:50 กรัมต่อมิลลิลิตร สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินโดยวิธีไมโครเวฟร่วม คือ ที่กำลังไมโครเวฟ 462.05 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 73.23 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:42.49 กรัมต่อมิลลิลิตร ภายใต้สภาวะนี้ทำนายการสกัดเพคตินได้ 16.617 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากการทดลองไม่สามารถใช้ค่าได้ตามกำหนดจึงปรับค่าที่ใช้ในการทดลองที่ กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 75 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:42.5 กรัมต่อมิลลิลิตร การยืนยันความถูกต้องทำการทดลองที่สภาวะดังกล่าวได้เพคติน 16.667±0.037 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง (Prakash et al., 2014) ได้ศึกษาการสภาวะที่เหมาะสมของไมโครเวฟในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มแมนดาริน (*Citrus reticulata*) ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินโดยวิธีไมโครเวฟร่วม คือ ที่กำลังไมโครเวฟ 422 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 169 วินาที pH1.4 และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:16.9 กรัมต่อมิลลิลิตร ภายใต้สภาวะนี้สกัดเพคตินได้ 19.24 เปอร์เซ็นต์ แตกต่างกันเนื่องจากวัตถุดิบต่างสายพันธุ์กันและอุปกรณ์ในการสกัดไม่เหมือนกัน จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ได้สามารถนำไปปรับประยุกต์ใช้ในระดับที่ใหญ่ขึ้นหรือในอุตสาหกรรมในการผลิตเพคตินต่อไปได้

4.4 แนวทางการศึกษาการสกัดของเหลือทิ้งอุตสาหกรรมน้ำส้ม



ภาพที่ 32 แนวทางการศึกษาการสกัดของเหลือทิ้งอุตสาหกรรมน้ำส้มเพื่อเป็นสารตั้งต้นประกอบด้วย น้ำมันหอมระเหย สารฟีนอลิกทั้งหมด และเพคตินในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ

แนวทางการศึกษาของงานวิจัย แสดงตามภาพที่ 32 ส้มเขียวหวานจากเกษตรกรถูกเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเป็นน้ำส้มซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของอุตสาหกรรมโดยผ่านกระบวนการคั้น จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าผลผลิตส้มทั่วโลกประมาณ 51.8 พันล้านตัน ถูกแปรรูปเป็นน้ำส้มคั้น 2 พันล้านตันโดยในอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำส้ม เปลือกส้มเป็นของเสียของกระบวนการประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Boukroufa et al., 2015) โดยแนวทางการศึกษาเปลือกส้มเขียวหวาน 1,000 กิโลกรัม กลั่นน้ำมันหอมระเหยโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วมที่กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ และเวลาที่ 21 นาที สามารถกลั่นผลผลิตน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานได้ประมาณ 26 กิโลกรัม คิดเป็นรายได้ประมาณ 65,149 บาทเมื่อเทียบกับราคาขายที่ 59 มิลลิลิตรราคา 147.84 บาท อีกทั้งยังสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วมที่กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ และเวลาที่ 64 วินาที สามารถสกัดปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานได้ประมาณ 29.589 กิโลกรัมของแกลลิกต่อกิโลกรัมแห้ง และสุดท้ายการสกัดเพคตินโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วมที่กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ และเวลาที่ 75 วินาที สามารถสกัดผลผลิตเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานได้ประมาณ 152.86 กิโลกรัม คิดเป็นรายได้ประมาณ 580,868 บาทที่เพคตินระดับ industrial grade โดยราคาเพคตินขึ้นกับแหล่งวัตถุดิบที่ผลิตและเกรดของเพคติน เพคตินระดับ industrial grade ราคาประมาณ 3,800 บาท/กิโลกรัม (ข้อมูลจากบริษัทนำเข้าและจัดจำหน่ายเพคติน) และระดับ lab & pharmaceutical grade ราคาตั้งแต่ 6,650, 8,840, 9,600 และ 10,161 บาท/กิโลกรัม (ข้อมูลจาก

Fluka ประเทศเยอรมัน) (ชวนิษฐ์ และคณะ, 2548) โดยแนวทางการศึกษานี้จึงสามารถเพิ่มมูลค่าจากของเหลือทิ้ง ซึ่งจะทำให้ผู้ประกอบการน้ำส้มหรือเกษตรกรสวนส้มได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นและลดปริมาณของเสียโดยใช้เทคนิคการสกัดสารสำคัญด้วยวิธีไมโครเวฟร่วม เปลือกส้มเขียวหวานถูกนำมาสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยการกลั่นแบบไมโครเวฟร่วม (MAD) โดยน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเป็นสารตั้งต้นเพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

เปลือกส้มเขียวหวานเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปทางอุตสาหกรรมเกษตรที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยน้ำมันหอมระเหย เพคติน และสารฟีนอลิกทั้งหมดที่มีสรรพคุณทางเภสัชวิทยาและสามารถนำมาใช้ในทางโภชนาการเพื่อเพิ่มมูลค่า

5.1.1 หาสภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วม พบว่า ที่กำลังวัตต์ 450 วัตต์ เวลาที่ 21 นาที มีอัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยสูง ทำให้ได้ผลผลิตน้ำมันหอมระเหย 0.26 ± 0.085 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและน้ำมันที่ได้ไม่เสื่อมเสียคุณภาพ สภาวะที่ได้สามารถนำไปใช้ในการสกัดด้วยเทคนิคไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรมต่อไปและสามารถประยุกต์ทำน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มเขียวหวานไปใช้ในทางอาหารและนวดบำบัดได้อีกด้วย

5.1.2 หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวาน พบว่าที่ กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ เวลาในการสกัด 64 วินาที และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:37.5 กรัมต่อมิลลิลิตร สามารถสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดจากเปลือกส้มเขียวหวานสูงสุด 32.268 ± 0.336 มิลลิกรัมของกรดแกลลิก/กรัมของวัตถุดิบแห้ง สารฟีนอลิกทั้งหมดนำไปใช้พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางทำให้เกิดมูลค่าจากของเหลือทิ้งทางการเกษตรและสารฟีนอลิกทั้งหมดยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมีสมบัติป้องกันหรือช่วยทำให้ไขมันหรือน้ำมันเกิดการหืนได้ช้าลง จึงเป็นสารที่มักนำมาเติมลงในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีไขมันหรือน้ำมันและเครื่องสำอาง เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และผลิตภัณฑ์อาหารที่มีไขมันหรือน้ำมันมีความคงตัวรักษาคุณลักษณะ กลิ่นและรสชาติไว้ได้นานขึ้น

5.1.3 การสกัดเพคตินโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วมได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย กำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนวัตถุดิบต่อตัวทำละลาย และ pH 1 การทดลองเบื้องต้นเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ระดับ และวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน นำมาการวิเคราะห์คัดเลือกปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมการศึกษา จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง คือ กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 75 วินาที อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:42.5 กรัมต่อมิลลิลิตร ผลผลิตเพคตินที่สกัดได้สูงสุด 16.667 ± 0.037 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพคตินนำไปใช้ผสม

อาหารเป็นสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) สารข้น(thickener) และสารที่ทำให้เกิดความเสถียร (stabilizer) ในผลิตภัณฑ์อาหาร

5.2 ปัญหาที่พบ

จากการทดลองพบว่าการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกจะมีปฏิกิริยาไวต่อสารละลายบัฟเฟอร์ อากาศ และแสง ดังนั้นจึงต้องมีความตรงต่อเวลาในการวัดสาร และต้องมีความระวังในการทำการทดลอง รวมถึงมีข้อจำกัดของเครื่องมือโครเวฟที่ไม่สามารถปรับกำลังวัตต์ได้ตามต้องการ และในการสกัดเพคตินเลือกใช้กรดซัลฟิวริกในการปรับค่า pH ของตัวทำละลาย ซึ่งกรดซัลฟิวริกเป็นสารอันตรายจึงต้องระมัดระวังอย่างมากในการทำการทดลอง

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกควรทำในห้องที่ควบคุมแสง และระหว่างที่รอวัดสารควรเก็บสารไว้ในขวดที่ปิดสนิท หรือหุ้มหลอดทดลองด้วยกระดาษฟอลด์เพื่อป้องกันแสงและอากาศ และการอบเพื่อหาผลผลิตเพคติน ต้องปรับค่า pH ให้เป็นกลางก่อนนำไปอบ เพราะถ้านำไปอบโดยไม่ปรับ pH เพคตินที่ได้จะเป็นสีดำ เปลือกส้มเขียวหวานอาจจะต้องใช้เปลือกส้มออร์แกนิกหรือการแช่ล้างด้วยโอโซน ซึ่งโอโซนก็เป็นอีกวิธีที่ได้ผลดี สามารถกำจัดสารพิษ สารเคมี ฆ่าเชื้อโรคได้พร้อมๆกัน และไม่เหลือสารตกค้างในเปลือกส้ม ทำให้สารสกัดที่ได้จัดอยู่ในประเภทที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอางได้



ภาคผนวก





วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ อว 67.04.2/1515

วันที่ 15 ตุลาคม 2562

เรื่อง แจ้งตอบรับการตีพิมพ์บทความวิจัย

เรียน คุณนักรบ นาคประสม

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขอแจ้งให้ท่านทราบว่า บทความวิจัยของท่านเรื่อง “การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วม” ได้ผ่านการพิจารณาคุณภาพจากผู้ประเมินผลงานให้ตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีปีที่ 28 ฉบับที่ 10 (ตุลาคม) 2563 เรียบร้อยแล้ว

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีระชัย ถานานันต์)

บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้ประสานงาน นางสาวชัชฎา วุฒิชัยดำรงค์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน โดยเทคนิคไมโครเวฟร่วม

Study on the Optimization of Pectin from *Citrus reticulata* Blanco Peels by Microwave-Assisted Extraction

อัจฉรา เหล่าประเสริฐ, ชนวัฒน์ นิตน์วิจิตร, กาญจนา นาคประสม และ นักรบ นาคประสม*
Atchara Laoprasert, Chanawat Nitatwichit, Kanjana Narkprasom, Nukrob Narkprasom*

สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University,
Nong Han, San Sai, Chiang Mai 50290

เรืองชัย จูวัฒน์สำราญ

Ruangchai Juwattanasomran

สาขาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร
อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Department of Agronomy, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Nong Han,
San Sai, Chiang Mai 50290

บทคัดย่อ

เปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ที่อุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีศักยภาพในการผลิตเพคติน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มมูลค่าโดยการสกัดเพคตินโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วม อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย กำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย และ pH การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ระดับ และวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน นำมาการวิเคราะห์คัดเลือกปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสม การศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง คือ กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 75 วินาที อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:42.5 กรัมต่อมิลลิลิตร และ pH 1 ได้ปริมาณผลผลิตเพคตินที่สกัดได้สูงสุด 17.67 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนากระบวนการสกัดสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกส้มเขียวหวานเพื่อนำไปใช้ผสมในเครื่องสำอางหรือผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ซึ่งมีประโยชน์ในด้านการเพิ่มรายได้และลดการกำจัดของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำผลไม้

คำสำคัญ: การสกัดโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟร่วม, เปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง, การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน, การหาสภาวะที่เหมาะสม

Abstract

Citrus reticulata Blanco peels are the main by-product of the industrial beverage of fruit processing, which are rich in bioactive compound that have the potential to produce pectin. The objective of this research was to increase the value of pectin by microwave assisted extraction. The effects of extraction variables (microwave power, irradiation time, soil-liquid ratio and pH) were studied. The factorial 2 levels and Box-Behnken response surface design were applied to analyze the level of significant variables and optimum condition. The result found that the highest pectin yield of 17.67% from *Citrus reticulata* Blanco peels was obtained at microwave power of 450 W, irradiation time of 75 s., soil-liquid ratio of 1:42.5 g/ml and pH of 1. This research can be used to develop the process of extracting bioactive substances from tangerine peels for use in cosmetics or dietary supplements that are not harmful to consumers which it is useful in increasing income and reducing waste disposal in the juice industry.

Keyword: Microwave-assisted extraction, *Citrus reticulata* Blanco peels Waste, Pectin, Box-Behnken design, Optimization

1. บทนำ

ส้มเขียวหวาน (*Citrus reticulata* Blanco) เป็นผลไม้ที่เกษตรกรนิยมปลูกกันมากในภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องจากมีรสชาติหอมหวานเป็นที่นิยมของผู้บริโภค ที่มีสรรพคุณทางยาโดยที่ส่วนเปลือกใช้เป็นยาแก้ลมวิงเวียน หน้ามืด ใช้เป็นยาแก้ไอขับเสมหะ ใช้เป็นยาขับลม ท้องอืดแน่นเพื่อ จุกเสียดแน่นท้อง ส่วนผลอุดมไปด้วยวิตามินซีใช้ป้องกันโรคหวัดและการติดเชื้อแบคทีเรีย ช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือด บรรเทาอาการกระหายน้ำ ทั้งยังทำให้ระบบการย่อยอาหารของร่างกายทำงานไปเป็นอย่างดีปกติ ดังนั้นจึงนิยมนำมาแปรรูปเป็นน้ำส้มคั้นขายตามท้องตลาด ข้อมูลเบื้องต้นพบว่าผลผลิตส้มทั่วโลกประมาณ 51.8 พันล้านตัน ถูกแปรรูปเป็นน้ำส้มคั้น 2 พันล้านตันโดยในอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำส้มนั้นเปลือกส้มเป็นของเสียของกระบวนการประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [1] ซึ่งการเพิ่มมูลค่าจากของเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้เป็นที่ต้องการอย่างมาก เนื่องจากการกำจัดของเสียเป็นจำนวนมากเหล่านี้เพิ่มค่าใช้จ่ายของโรงงาน และยังคงคำนึงถึงกฎหมายทางอุตสาหกรรม [2] ดังนั้นการแปรรูปของเสียให้มีมูลค่าสูงขึ้นช่วยให้โรงงานลดค่าใช้จ่ายหรืออาจเพิ่มกำไร และเพิ่มผลิตภัณฑ์ทางเลือกใหม่ที่เป็นทางเลือกของอุตสาหกรรมน้ำส้มและผู้บริโภค จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าเปลือกส้ม [1] มีสารสำคัญที่มีศักยภาพแปรรูปเป็นเพคตินได้ อีกทั้งยังมีวัตถุดิบทางการเกษตรและของเหลือทิ้งทางการเกษตรหลากหลายชนิดที่จะสามารถนำมาสกัดเป็นเพคตินได้ เช่น เปลือกและกากผลส้ม เปลือกส้มโอ เปลือกฝรั่ง กากแอปเปิ้ล เปลือกมะละกอ เปลือกมะนาวและเปลือกกล้วยเป็นต้น [3] และมีการนำเทคนิคในการสกัดเพคตินหลายแบบได้แก่ การสกัดแบบให้ความร้อน การสกัดแบบ Soxhlet การสกัดแบบ Ultrasound และการสกัดแบบไมโครเวฟร่วม

เพคตินเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ผสมกันแบบซับซ้อนในผนังเซลล์ของพืชซึ่งมีส่วนใหญ่ประกอบด้วย D-กรดกาแลค และน้ำตาลตามธรรมชาติ เช่น L-แอมโนส I-อราบีโนส และ D-กาแลคโตส เพคตินถูกใช้เป็นสารก่อเจล สารอิมัลชัน และตัวทำให้ข้นในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อผลิตแยมและเจลลี่ นอกจากนี้ยังใช้สารก่อเจลในผลิตภัณฑ์เคลือบสำหรับผู้ป่วย

โรคเบาหวานและโรคอ้วน [4] ซึ่งเห็นได้ว่าการเพิ่มมูลค่าของเปลือกส้มที่เป็นของเสียของโรงงานเครื่องดื่มนั้นเป็นการศึกษาที่มีประโยชน์ในการแปรรูปเป็นสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ต่างๆ และช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม [5]

การใช้เทคนิคไมโครเวฟช่วยในการสกัด (Microwave-Assisted Extraction : MAE) โดยใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลน้ำในเซลล์พืชสั่นสะเทือน ทำให้เซลล์แตกออกจากการได้รับความร้อนยิ่งยวด และปล่อยสารสำคัญที่อยู่ภายในออกมา [6] ซึ่งเทคนิคนี้ช่วยในการเพิ่มมูลค่าจากของเหลือทิ้งทางการเกษตรของกระบวนการอุตสาหกรรม โดยเทคนิคการสกัดแบบไมโครเวฟร่วมเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการสกัดสารสำคัญ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในกระบวนการต่ำ ตัวทำละลายน้อย ผลผลิตสูงและมีคุณภาพกว่า และต้นทุนต่ำกว่าแบบใช้ความร้อนในการสกัด [4]

เทคนิคการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมมีปัจจัยประกอบด้วย กำลังไมโครเวฟ เวลา อัตราส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ทำให้ต้องเลือกใช้เทคนิคทางสถิติ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการออกแบบการทดลอง เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ถึงปัจจัยสำคัญและลดจำนวนในการทดลอง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นเป็นสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการหาสภาวะของกระบวนการ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ ในงานวิจัยอื่น ๆ วิธีพื้นผิวตอบสนองใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วม ได้แก่ เพคตินจากเปลือกส้ม [5] คาร์โบไฮเดรตจากของเหลือทิ้งอุตสาหกรรมผลิตแป้งข้าวโพด [7] โพลีฟีนอลจากเปลือกโอ๊ก [8] และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจากไซค์เซอร์รี่ [9]

เนื่องจากปัจจัยในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วมที่ต้องการศึกษามีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ระดับเพื่อใช้วิเคราะห์คัดเลือกปัจจัยที่สำคัญและวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่สำคัญต่างๆ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นตัวในการแก้ปัญหาได้สูง มีความสะดวกในการใช้งานกับการทำนายสภาวะที่มีปัจจัยหรือตัวแปรที่มีจำนวนมากได้ดี และมีประสิทธิภาพสูงในการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้งโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วม ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนสามารถนำไปต่อยอดเพื่อขยายประสิทธิภาพการสกัดต่อไป

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำส้มคั้น (จากตลาดรวมโชค อ.เมือง จ.เชียงใหม่) นำมาล้างทำความสะอาดใส่ในภาชนะที่ผสมสารละลายโปแตสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ (KMS) 0.1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เป็นเวลา 10 นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเปลือกส้มแห้งป่นและกรองผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 30 mesh นำผงเปลือกส้มเก็บบรรจุในภาชนะปิดสนิท เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.2 เครื่องสกัดแบบไมโครเวฟร่วม

เครื่องสกัดแบบไมโครเวฟร่วมประกอบด้วย ตู้อบไมโครเวฟในครัวเรือน และชุดเครื่องแก้วสกัดสารสำคัญ ระบบน้ำหล่อเย็นของคอนเดนส์เซอร์ชุดกลั่นใช้เครื่อง Thermo Electron Haake WKL 26 Recirculator Chiller โดยปรับน้ำหล่อเย็นควบคุมอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส เครื่องสกัดแบบไมโครเวฟใช้กำลังไฟ 100-800 W โดยใช้ขวดกันลมขนาด 500 ml เป็นภาชนะในการสกัด

2.3 การสกัดเพคตินจากผงเปลือกส้ม

ผงเปลือกส้ม 1 กรัม ใส่ในขวดสกัดกันกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่นที่อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายต่างๆ (1:30-50 กรัมต่อมิลลิลิตร) ที่ pH 1 ซึ่ง pH ถูกปรับด้วยกรดซัลฟิวริก 6.25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นำไปสกัดแบบไมโครเวฟร่วมให้ความร้อนที่กัลังไฟฟ้า (300-600 วัตต์) เป็นเวลาที่ใช้ในการสกัด (50-100 วินาที) หลังจากให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ นำตัวอย่างพักไว้ให้เย็นแล้วมาแยกของเหลวกับของแข็งด้วยกรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรอง (Whatman no 1) ของเหลวใสถูกรวบรวมเก็บ เพคตินหยาดถูกสกัดด้วยเทคนิคตกตะกอน โดยนำของเหลวใสผสมกับเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ (v/v) ในอัตราส่วนเท่ากันโดยปริมาตร นำมาหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนเพคตินจากของเหลว นำเพคตินที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่

2.4 การหาปริมาณผลผลิตเพคตินที่สกัดได้ (%)

ชั่งน้ำหนักเพคตินที่ถูกทำแห้ง และคำนวณปริมาณผลผลิตในการสกัดเพคตินเปลือกส้มเขียวหวาน ดังสมการที่ 1 [5]

$$Y = \left(\frac{m_p}{m_m} \right) \times 100 \quad (1)$$

โดย Y คือ ปริมาณผลผลิตเพคติน (%)

m_p คือ น้ำหนักของเพคตินที่สกัดได้ (กรัม)

m_m คือ น้ำหนักของผงเปลือกส้มเขียวหวาน (กรัม)

2.5 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน

คัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน โดยศึกษาปัจจัยของกัลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายและ pH วางแผนการทดลองเชิงเศษส่วนของแฟคทอเรียล 2^{3-1} (Fractional Factorial Experiments) โดยศึกษาระดับของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และทำการวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) เพื่อหาปัจจัยที่มีความสำคัญในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน

ตารางที่ 1 การคัดเลือกระดับของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน

ปัจจัย	ระดับ	
	ต่ำ	สูง
กัลังไมโครเวฟ (วัตต์)	300	600
เวลาที่ใช้ในการสกัด (วินาที)	50	100
อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1:30	1:50
pH	1	2

2.6 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม

วิธีพื้นผิวตอบสนองถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ มีปัจจัยสำหรับการศึกษาประกอบไปด้วย กัลังไมโครเวฟ (X_1) เวลาที่ใช้ในการสกัด (X_2) อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย (X_3) ตามลำดับ และกำหนดเป็นสามระดับ +1 0 -1 ซึ่งการทำนายค่าสูงสุดในการทดลองนี้เลือกพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบนเคนโดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และทำการทดลองหาปริมาณเพคตินที่สภาวะต่างๆ จำนวน 15 การทดลองตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
กำลังไมโครเวฟ (X_1) (วัตต์)	300	450	600
เวลาที่ใช้ในการสกัด (X_2) (วินาที)	50	75	100
อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย (X_3) (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1:30	1:40	1:50

ปริมาณเพคตินที่สภาวะต่างๆ ในการทดลองนำมาสร้างสมการพหุนามลำดับที่สอง เพื่อใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสามและการตอบสนอง (Y) สามารถคำนวณปริมาณเพคตินตามสมการที่ 2

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{11} X_{12} + \beta_{22} X_{22} + \beta_{33} X_{32} \quad (2)$$

โดยที่ Y คือค่าทำนายการตอบสนอง, β_0 เป็นค่าคงที่, X_1, X_2, X_3 เป็นตัวแปรอิสระ, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น, $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างตัวแปร, $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง ซึ่งประสิทธิภาพของการทำนายผลผลิตสูงสุดโดยสมการพหุนามจะพิจารณาจากค่า R^2

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินที่สกัดจากเปลือกส้มเขียวหวาน

ผลการวิเคราะห์ความถดถอยและวิเคราะห์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 3 พบว่าปัจจัยด้าน pH ที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อความแตกต่างทางสถิติต่อปริมาณของเพคตินที่สกัดได้ ($p \leq 0.05$) ตามด้วยอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย เวลาที่ใช้ในการสกัด และกำลังไมโครเวฟตามลำดับ ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยปรับลดและปรับเพิ่มโดยใช้วิธีการ Steepest ascent เพื่อหาการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ความถดถอยข้างต้น พบว่า pH 1 มีผลต่อปริมาณของเพคตินที่สกัดได้จากเปลือกส้มเขียวหวาน ส่วนปัจจัยกำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย นำไปศึกษาในวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของการถดถอย

ปัจจัย	ค่าสัมประสิทธิ์	P-value
Intercept	6.87	0.00214
กำลังไมโครเวฟ (X_1)	-0.75	0.35566
เวลาที่ใช้ในการสกัด (X_2)	-0.75	0.35566
อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย (X_3)	1.5	0.11748
ค่าความเป็นกรด-เบส (X_4)	-2.5	0.03596

3.2 ผลของ pH 1 เหมาะสมในการสกัดเพคติน

การศึกษา pH ของสารละลายที่มีผลต่อการสกัดเพคติน พบว่า ปริมาณเพคตินเพิ่มขึ้น เมื่อ pH ของสารละลายลดลง (pH 1 และ 2) และเมื่อ pH ของสารละลายต่ำกว่า pH 1 ปริมาณการสกัดเพคตินจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Tangwongchai et.al. [10] ที่ศึกษาการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มมะขามและการใช้ประโยชน์ในระบบอาหาร ใช้สภาวะ pH 2 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคติน โดยเมื่อสกัดที่ pH ต่ำปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) มีอยู่ในระบบสูงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์มากขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพคตินที่ไม่ละลายน้ำ เช่น โพรโตเพคตอนและแคลเซียม

เพกตินให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้เป็นผลทำให้ปริมาณเพกตินที่สกัดได้มีปริมาณสูง อย่างไรก็ตาม Trakunin ได้รายงานไว้ว่าเมื่อ pH เพิ่มขึ้นไฮโดรเจนไอออนในระบบการสกัดลดลงปริมาณเพกตินที่สกัดสามารถลดลงได้ [11] นอกจากนี้ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานของ Rungrodnimitchai [12] ที่ได้ศึกษาแหล่งที่มาของเพกตินจากเนื้อตาลโค่นโดยการสกัดไมโครเวฟ ในการสกัดได้ใช้ pH 2 ในการสกัดได้ปริมาณเพกตินมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกในช่วง pH 1-2 ในการหาสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งเปลือกส้มเขียวหวานที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่ pH 1 ได้ปริมาณเพกตินมากที่สุดในการสกัดต่อไป

3.3 ผลของกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟในการสกัดเพกติน

การศึกษากำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟในการสกัดเพกติน พบว่า เมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น (300-600 วัตต์) ปริมาณเพกตินเพิ่มขึ้น แต่เมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มมากกว่า 600 วัตต์ ปริมาณเพกตินมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ความร้อนสามารถทำลายเพกตินจากพืชเป็นไปตามการทดลองของ Gfrerer and Lankmayr [13] ที่รายงานว่าพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกถ่ายโอนไปยังโมเลกุลโดยกลไกขบวนการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) และกลไกการขนิบการหมุนของทั้งสองขั้ว (dipole rotation) ซึ่งส่งผลให้พลังงานกระจายไปภายในตัวทำละลายและผนังแล้วเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานและความเกิดความร้อนขึ้น ของผนังเซลล์และเนื้อเยื่อเสียหาย จึงทำให้เพกตินแพร่กระจายเข้าสู่ตัวทำละลายทำให้ได้ปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกกำลังไมโครเวฟสำหรับการสกัดในช่วง 300-600 วัตต์ ในการหาสภาวะที่เหมาะสม

3.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการสกัดเพกติน

การศึกษาเวลาที่ใช้ในการสกัด พบว่า เมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น (50-100 วินาที) สามารถทำให้เกิดปริมาณเพกตินเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัดมากกว่า 100 วินาที ปริมาณเพกตินมีค่าลดลง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Chen et al. [14] คือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสามารถสกัดเพกตินได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลามากกว่าจุดที่เหมาะสมความร้อนสามารถทำลายเพกตินจากพืช การสกัดที่เวลาน้อยกว่าทำให้การแพร่ของสารละลายกรดที่ใช้ในการสกัดเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชและการแพร่ของโมเลกุลเพกตินออกจากเนื้อเยื่อพืช เกิดในอัตราที่ต่ำ จึงทำให้ได้ปริมาณเพกตินน้อย แต่เมื่อเพิ่มเวลาของการสกัดให้นานขึ้น พบว่า ประสิทธิภาพของการสกัดสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลเพกตินสามารถละลายและแพร่ได้ดีและนาน จนถึงช่วงเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณเพกตินสูงที่สุด หลังจากนั้นถึงแม้เพิ่มเวลาในการสกัดก็ไม่เห็นผลต่อการสกัดเพกติน [11] ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ใช้ในการสกัด ในช่วง (50-100 วินาที) ในการหาสภาวะที่เหมาะสม

3.5 ผลของอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายในการสกัดเพกติน

การศึกษ้อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายที่มีผลต่อการสกัดเพกติน พบว่า ปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น (1:30-1:50 กรัมต่อมิลลิเมตร) และเมื่ออัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายสูงกว่า 1:50 กรัมต่อมิลลิเมตร ปริมาณการสกัดเพกตินลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Maran et al. [5] ที่รายงานว่าหากต้องการผลผลิตที่มากขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ ที่ช่วยให้ตัวทำละลายสามารถซึมผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ของพืชได้ดีขึ้น การสกัดสารด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น กระบวนการสกัดเกิดจากการสัมผัสของสารกับตัวทำละลายที่เกิดจากการแตกของเซลล์ ส่งผลให้สามารถสกัดสารออกมาจากพืชได้ คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในเซลล์พืชเกิดการขยายตัวเฉพาะที่และเกิดการขยายตัวของผนังเซลล์ ส่งผลให้สามารถสกัดสารในพืชออกจากเซลล์ได้ ดังนั้น จึงเลือกอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย ในช่วง 1:30-1:50 กรัมต่อมิลลิเมตร ในการหาสภาวะที่เหมาะสม

3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง คือ กำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย เมื่อมีการนำมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่าผลจากการสกัดปริมาณเพคตินที่สูงที่สุดคือที่สภาวะกำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัดที่ 75 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร ได้ปริมาณเพคติน (% yield) 16.67 % โดยสภาวะที่สกัดได้ดีที่สุด คือ ที่กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัดที่ 75 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร ได้ค่าปริมาณเพคติน (% yield) 4.00 % จากตารางที่ 4 จากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่า สมการพหุนามกำลังสองถูกเลือกมาใช้ในการทำนายหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินโดยวิธีไมโครเวฟพร้อมดังแสดงในสมการที่ 3

$$\text{ปริมาณเพคติน} = 17.00 + 0.88X_1 - 0.12X_2 + 1.75X_3 - 1.00X_1X_2 - 1.25X_1X_3 - 0.75X_2X_3 - 4.25X_1^2 - 2.75X_2^2 - 4.00X_3^2 \quad (3)$$

โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ R^2 เท่ากับ 0.926 และจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยตารางที่ 5 พบว่า กำลังไมโครเวฟกำลังสอง (X_1^2) อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายกำลังสอง (X_3^2) อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายเชิงเส้น (X_3) และเวลาที่ใช้ในการสกัดกำลังสอง (X_2^2) มีผลต่อปริมาณเพคตินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สมการที่ 2 สามารถแสดงแผนภาพของพื้นผิวตอบสนองของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดปริมาณเพคติน ดังแสดงในภาพที่ 1-3 ซึ่งนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ และที่สำคัญสมการที่ 3 ยังสามารถนำมาใช้ทำนายสภาวะที่เหมาะสม โดยทำนายสภาวะที่สกัดเพคตินสูงสุดจากตัวแปรของกำลังไมโครเวฟ (X_1) ระหว่าง 300-600 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด (X_2) ระหว่าง 50-100 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย (X_3) ระหว่าง 1:30-1:50 กรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมจากการคำนวณของสมการที่ 3 คือ กำลังไมโครเวฟ (X_1) 462.05 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด (X_2) 73.23 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย (X_3) 1:42.49 กรัมต่อมิลลิลิตร ภายใต้สภาวะนี้สามารถสกัดเพคตินได้ 16.938 % ดังแสดงในตารางที่ 6

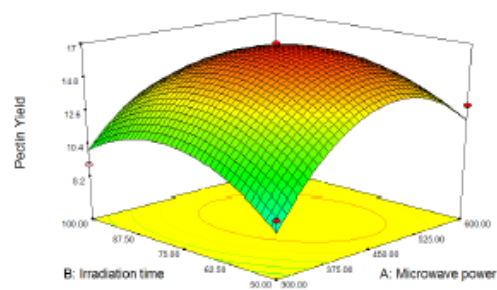
ตารางที่ 4 ผลของการออกแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดปริมาณเพคตินโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน

Run	กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาที่ใช้ในการ สกัด (วินาที)	อัตราส่วนผงต่อตัว ทำละลาย (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณผลผลิตเพคติน (%)	
				ผลจากการ ทดลอง	ผลจากการ ทำนาย
1	300(-1)	50(-1)	1:40(0)	9.00	8.25
2	600(1)	50(-1)	1:40(0)	13.00	12.00
3	300(-1)	100(1)	1:40(0)	8.67	10.00
4	600(1)	100(1)	1:40(0)	8.67	9.75
5	300(-1)	75(0)	1:30(-1)	4.00	4.88
6	600(1)	75(0)	1:30(-1)	7.67	9.13
7	300(-1)	75(0)	1:50(1)	12.00	10.88
8	600(1)	75(0)	1:50(1)	11.33	10.13
9	450(0)	50(-1)	1:30(-1)	7.67	7.88

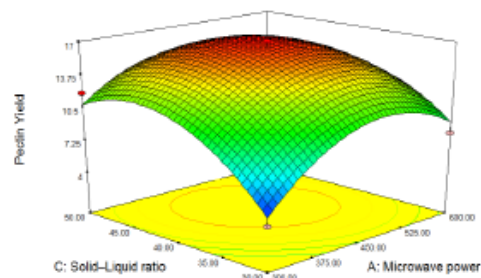
10	45(0)	100(1)	1:30(-1)	11.33	9.13
11	45(0)	50(-1)	1:50(1)	11.00	12.88
12	45(0)	100(1)	1:50(1)	11.33	11.13
13	45(0)	75(0)	1:40(0)	16.67	16.67
14	45(0)	75(0)	1:40(0)	16.67	16.67
15	45(0)	75(0)	1:40(0)	16.67	16.67

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการสกัดปริมาณเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวาน

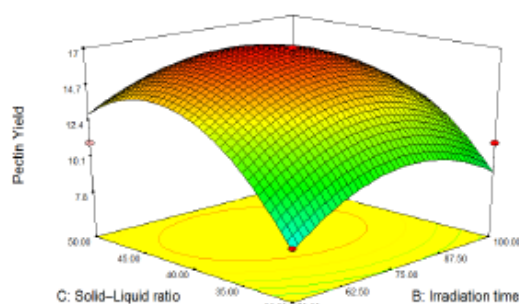
ปัจจัย	ค่าสัมประสิทธิ์	P-value
Intercept	17.00	0.00001
กำลังไมโครเวฟ (X_1)	0.88	0.20255
เวลาที่ใช้ในการสกัด (X_2)	-0.12	0.84238
อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย (X_3)	1.75	0.03256
X_1X_2	-1.00	0.28937
X_1X_3	-1.25	0.19872
X_2X_3	-0.75	0.41495
X_1^2	-4.25	0.00473
X_2^2	-2.75	0.02595
X_3^2	-4.00	0.00610



ภาพที่ 1 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการสกัดและกำลังไมโครเวฟในการสกัดเพคติน ที่อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายคงที่



ภาพที่ 2 อิทธิพลของอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายและกำลังไมโครเวฟในการสกัดเพคติน ที่เวลาที่ใช้ในการสกัดคงที่



ภาพที่ 3 อิทธิพลของอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายและเวลาที่ใช้ในการสกัดเพคติน ที่กำลังไมโครเวฟในการสกัดคงที่

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบปริมาณเพคตินที่ได้จากการทดลอง และสมการการทำนายการออกแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง

	กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลาที่ใช้ใน การสกัด (วินาที)	อัตราส่วนผงต่อ ตัวทำละลาย (กรัมต่อ มิลลิลิตร)	ปริมาณผลผลิต เพคติน (%)
สมการทำนายสภาวะที่เหมาะสม	462.05	73.23	1:42.49	16.938
สภาวะการทดลองจริง	450	75	1:42.5	16.904
ผลการทดลองจากสภาวะทดลองจริง	450	75	1:42.5	17.667±0.577

ตารางที่ 6 พบว่าสามารถวิเคราะห์ทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแบบไมโครเวฟ โดยที่สภาวะที่ทำให้ได้เพคตินสูงสุด โดยกำหนดให้กำลังไมโครเวฟอยู่ระหว่าง 300-600 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัดอยู่ระหว่าง 50-100 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลายอยู่ระหว่าง 1:30-1:50 กรัมต่อมิลลิลิตร สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินโดยวิธีไมโครเวฟร่วม คือ ที่กำลังไมโครเวฟ 462.05 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 73.23 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:42.49 กรัมต่อมิลลิลิตร ภายใต้สภาวะนี้ทำนายการสกัดเพคตินได้ 16.938 % แต่เนื่องจากให้การทดลองไม่สามารถใช้ค่าได้ตามกำหนดจึงปรับค่าที่ใช้ในการทดลองที่กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 75 วินาที และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:42.5 กรัมต่อมิลลิลิตร การยืนยันความถูกต้องทำการทดลองที่สภาวะดังกล่าวได้เพคติน 17.667±0.577 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทำนาย โดยผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Maran et al. [5] ที่ได้ศึกษาการสภาวะที่เหมาะสมของไมโครเวฟในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มแมนดาริน (*Citrus reticulata*) โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินโดยวิธีไมโครเวฟร่วม คือ ที่กำลังไมโครเวฟ 422 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 169 วินาที pH 1.4 และอัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:16.9 กรัมต่อมิลลิลิตร ภายใต้สภาวะนี้สกัดเพคตินได้ 19.24 % แตกต่างกันเนื่องจากวัตถุดิบต่างสายพันธุ์กันและอุปกรณ์ในการสกัดไม่เหมือนกัน การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ได้สามารถนำไปปรับประยุกต์ใช้ในระดับที่ใหญ่ขึ้นหรือในอุตสาหกรรมในการผลิตเพคตินต่อไปได้

4. สรุป

เปลือกส้มเขียวหวานเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปทางอุตสาหกรรมเกษตรที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยเพคตินที่สรรพคุณทางเภสัชวิทยาและสามารถนำมาใช้ในทางโภชนาการเพื่อเพิ่มมูลค่า โดยการสกัดเพคตินโดยเทคนิคไมโครเวฟร่วมอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย กำลังไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนวัตถุดิบต่อตัวทำละลาย และ pH 1 การทดลองเบื้องต้นเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ระดับ และวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบนเคน นำมาการวิเคราะห์ที่คัดเลือกปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมการศึกษา ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกส้มเขียวหวานเหลือทิ้ง คือ กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 75 วินาที อัตราส่วนผงต่อตัวทำละลาย 1:42.5 กรัมต่อมิลลิลิตร ผลผลิตเพคตินที่สกัดได้สูงสุด 17.67 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถประยุกต์การผลิตทำเพคติน ซึ่งสามารถนำไปใช้ผสมอาหารเป็นสารที่ทำให้เกิดเจล(Gelling agent) สารข้น(Thickener) และสารที่ทำให้เกิดความเสถียร(Stabilizer) ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภท เช่น แยม เยลลี่ ใช้เป็นสารข้นหนืดของซอส น้ำสลัด น้ำเชื่อมเข้มข้น และเป็นสารเพิ่มความคงตัวในผลิตภัณฑ์นมและโยเกิร์ต เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ลักษณะโครงการวิจัยใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 เพื่อสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยครั้งนี้

6. รายการอ้างอิง

- [1] Boukroufa, M., Boutekedjiret, C., Petigny, L., Rakotomanomana, N. and Chemat, F., 2015, Bio-refinery of orange peels waste: A new concept based on integrated green and solvent free extraction processes using ultrasound and microwave techniques to obtain essential oil, polyphenols and pectin, *Ultrasonics Sonochem.* 24: 72-79.
- [2] Sahraoui, N., Vian, M. A., Maataoui, M. E., Boutekedjiret, C. and Chemat, F., 2011, Valorization of citrus by-products using Microwave Steam Distillation (MSD), *Innovat Food Sci Emerg Tech.* 12: 163-170.
- [3] Vitthayaprapakorn, C., and Taveekasemsomphut, S., 2011, The optimum conditions of extracting pectin from agricultural materials, *Journal of RMUTP Research, (special Issue).* :20-25. (in Thai)
- [4] Hosseini, S. S., Khodaiyan, F. and Yarmand, M. S., 2016,, *Carbohydr Polym.* 140: 59-65.
- [5] Maran, J. P., Sivakumara, V., Thirugnanasambandham, K. and Sridhar, R., 2013, Optimization of microwave assisted extraction of pectin from orange peel, *Carbohydr Polym.* 97: 703-709.
- [6] Suedee, A., 2017, Microwave-Assisted Extraction of Active Compounds from Medicinal Plants, *EAU heritage. J. Sci. Tech.* 1: 1-14. (in Thai)
- [7] Yoshida, T., Tsubaki, S., Teramoto, Y. and Azuma, J., 2010, Optimization of microwave-assisted extraction of carbohydrates from industrial waste of corn starch production using response surface methodology, *Bioresour Technol.* 101: 7820-7826.

- [8] Bouras, M., Chadni, M., Barba, F. J., Grimi, N., Bals, O. and Vorobiev, E., 2015, Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from *Quercus* bark, *Ind Crop Prod.* 77: 590-601.
- [9] Simic, V. M., Rajkovic, K. M., Stojicevic, S. S., Velickovic, D. T., Nikolic, N. C., Lazic, M. L. and Karabegovic, I. T., 2016, Optimization of microwave-assisted extraction of total polyphenolic compounds from chokeberries by response surface methodology and artificial neural network, *Separ Purif Tech.* 160: 89-97.

- [10] Tangwongchai, R., Lerkchaiyaphum, K., Nantachai, K., Rojanakorn, T., 2006, Pectin extraction from Citron peel (*Citrus medica* Linn.) and its use in food system, *Songklanakarın J. Sci. Technol.* 28(6): 1351-1363. (in Thai)
- [11] Trakunin, T., 1990, Effect of sodium hexametaphosphate and ethylenediaminetetraacetic acid on pectin extraction from pomelo peel, M.S. Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)
- [12] Rungrodnimitchai, S., 2011, Novel source of pectin from young sugar palm by microwave assisted extraction, *Procedia Food Sci.* 1: 1553 – 1559.
- [13] Gfrerer, M. and Lankmayr, E., 2005, Screening optimization and validation of microwave assisted extraction for the determination of persistent organochlorine pesticides, *Anal. Chim. Acta.* 533: 203-211.
- [14] Chen, Y., Xie, M. Y. and Gong, X. F., 2007, Microwave-assisted extraction used for the isolation of total triterpenoid saponins from *Ganoderma atrum*, *Journal of Food Engineering.* 81: 162-170.

บรรณานุกรม

- ชวนิภูรุ สิริพิฑิตกรัตน์, พิลาณี ไวถนอมสัจต์, จิราพร เชื้อกุล และปริศนา สิริอาษา. 2548. การผลิตเพคตินจากเปลือกและกากผลส้มเหลืองทิ้ง. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43*, 469-480.
- ชินนานาฏ วิทยาประภากร และสมชัย ทวีเกษมสมบัติ. 2555. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากวัสดุทางการเกษตร. *RMUTP Research Journal Special Issue*, 183-189.
- ดวงกมล เรืองงาม. 2557. การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 23(2), 120-139.
- ธนภัทร ทรงศักดิ์. 2560. การสกัดสารสำคัญจากพืชสมุนไพรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://ccpe.pharmacycouncil.org/index.php?option=article_detail&subpage=article_detail&id=79 (19 กันยายน 2561)
- ธานี ตระกูลอินทร์. 2533. ผลของโซเดียมเฮกซามेटาฟอสเฟตและเอลิทินไดเอมีนเตตราอะซีติกต่อการศึกษาเพคตินจากเปลือกส้มโอ. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัญชญา เชนวิไลสุข. 2544. การตรวจหาและบ่งชี้ชนิดสารต้านอนุมูลอิสระจากผักพื้นบ้านและสมุนไพรไทย. *วารสารมหาวิทยาลัยพายัพ*, 20(2), 161-181.
- อารีรัตน์ ซื่อดี. 2560. การใช้คลื่นไมโครเวฟสกัดสารสำคัญจากพืชสมุนไพร. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย*, 11(1), 1-14.
- โอภา วัชรคุปต์, ปรีชา บุญจุง, จันทนา บุญยะรัตน์ และมาลีรักษ์ อัดต์สินทอง. 2549. สารต้านอนุมูลอิสระ. Attila Devay. 2013. *The Theory and Practice of Pharmaceutical Technology*. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2011-0016_01_the_theory_and_practise_of_pharmaceutical_technology/ch14.html (19 กันยายน 2561)
- Boukroufa, M., Boutekedjiret, C., Petigny, L., Rakotomanomana, N. & Chemat, F. 2015. Bio-refinery of orange peels waste: a new concept based on integrated green and solvent free extraction processes using ultrasound and microwave techniques to obtain essential oil, polyphenols and pectin. *Ultrason Sonochem*, 24(72-79).
- Bousbia, N., Vian, M. A., Ferhat, M. A., Meklati, B. Y. & Chemat, F. 2009. A new process for extraction of essential oil from Citrus peels: Microwave hydrodiffusion and gravity. *Journal of Food Engineering*, 409-413.

- Chen, Q., Hu, Z., Yao, F. Y.-D. & Liang, H. 2016. Study of two-stage microwave extraction of essential oil and pectin from pomelo peels. **LWT - Food Science and Technology**, 538-545.
- C. Mollea, F. Chiampo & R. Conti. 2008. Extraction and characterization of pectins from cocoa husks: A preliminary study. **Food Chemistry**, 107(3), 1353-1356.
- Dahmoune, F., Nayak, B., Moussi, K., Remini, H. & Madani, K. 2014. Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from *Myrtus communis* L. leaves. **Food Chemistry**, 166(585-595).
- Edrisi Sormoli, M. & Langrish, T. A. G. 2016. Spray drying bioactive orange-peel extracts produced by Soxhlet extraction: Use of WPI, antioxidant activity and moisture sorption isotherms. **LWT - Food Science and Technology**, 72, 1-8.
- Farhat, A., Fabiano-Tixier, A.-S., Maataoui, M. E., Maingonnat, J.-F., Romdhane, M. & Chemat, F. 2011. Microwave steam diffusion for extraction of essential oil from orange peel: Kinetic data, extract's global yield and mechanism. **Food Chemistry**, 125(1), 255-261.
- Ferhat, M. A., Meklati, B. Y., Smadja, J. & Chemat, F. 2006. An improved microwave Clevenger apparatus for distillation of essential oils from orange peel. **Journal of Chromatography A**, 1112(1), 121-126.
- Filly, A., Fernandez, X., Minuti, M., Visinoni, F., Cravotto, G. & Chemat, F. 2014. Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: From laboratory to pilot and industrial scale. **Food Chemistry**, 193-198.
- Fishman, M. L., Chau, H. K., Hoagland, P. D. & Hotchkiss, A. T. 2006. Microwave-assisted extraction of lime pectin. **Food Hydrocolloids**, 20(8), 1170-1177.
- Guillermo Nino-Medina. 2019. **Phenolic Compound Recovery from Grape Fruit and By- Products: An Overview of Extraction Methods**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-an-ultrasound-assisted-extraction-equipment_fig1_309333423 (19 กันยายน 2561)
- Hosseini, S. S., Khodaiyan, F. & Yarmand, M. S. 2016. Aqueous extraction of pectin from sour orange peel and its preliminary physicochemical properties. **Int J Biol Macromol**, 82(920-926).
- Jiao, J., Fu, Y. J., Zu, Y. G., Luo, M., Wang, W., Zhang, L. & Li, J. 2012. Enzyme-assisted

- microwave hydro-distillation essential oil from Fructus forsythia, chemical constituents, and its antimicrobial and antioxidant activities. **Food Chemistry**, 235-243.
- J. Prakash Maran, V. Sivakumar, K. Thirugnanasambandham & R. Sridhar. 2014. Microwave assisted extraction of pectin from waste Citrullus lanatus fruit rinds. **Carbohydrate Polymers**, 101(786-791).
- Jiangfeng Song, Dajing Li, Chunquan Liu & Ying Zhang. 2011. Optimized microwave-assisted extraction of total phenolics (TP) from Ipomoea batatas leaves and its antioxidant activity. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 12(3), 282-287.
- Kusuma, H. S., Altway, A. & Mahfud, M. 2018. Solvent-free microwave extraction of essential oil from dried patchouli (Pogostemon cablin Benth) leaves. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 343-348.
- Konze, A. 2004. การกลั่น (distillation). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.electron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=2372&Itemid=3 (30 ตุลาคม 2560)
- Kornberger, J. 2016. ลักษณะของส้มเขียวหวาน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.thai-thaifood.com/th/ส้มเขียวหวาน/> (30 ตุลาคม 2560)
- M. Gfrerer & E. Lankmayr. 2005. Screening, optimization and validation of microwave-assisted extraction for the determination of persistent organochlorine pesticides. **Analytica Chimica Acta**, 533(2), 203-211.
- M'hiri, N., Ioannou, I., Mihoubi Boudhrioua, N. & Ghou, M. 2015. Effect of different operating conditions on the extraction of phenolic compounds in orange peel. **Food and Bioproducts Processing**, 96(161-170).
- MedThai. 2013. สารสำคัญที่พบ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://medthai.com/ส้ม/> (30 ตุลาคม 2560)
- Mohamed A. Ferhat, Brahim Y. Meklati, Franco Visinoni, Maryline Abert Vian & Farid Chemat. (2008). Solvent free microwave extraction of essential oils. In **Chemistry Today** (pp. 2).
- Moulehi, I., Bourguou, S., Ourghemmi, I. & Tounsi, M. S. 2012. Variety and ripening impact on phenolic composition and antioxidant activity of mandarin (Citrus

- reticulate Blanco) and bitter orange (*Citrus aurantium* L.) seeds extracts. **Industrial Crops and Products**, 39(74-80).
- N. M'hiri, I. Ioannou, N. Mihoubi Boudhrioua & M. Ghoul. 2015. Effect of different operating conditions on the extraction of phenolic compounds in orange peel. **food and bioproducts processing**, 96(161-170).
- Nove Kartika Erliyanti & Elsa Rosyidah. 2017. Pengaruh Daya Microwave terhadap Yield pada Ekstraksi Minyak Atsiri dari Bunga Kamboja (*Plumeria Alba*) menggunakan Metode Microwave Hydrodistillation. **Rekayasa Mesin**, 8(175-178).
- Nukrob Narkprasom, Kanjana Narkprasom & Umaporn Upara. 2015. Optimization of Total Phenolic from *Cleistocalyx nervosum* by Microwave-Assisted Extraction. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, 8(3).
- Prakash Maran, J., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K. & Sridhar, R. 2013. Optimization of microwave assisted extraction of pectin from orange peel. **Carbohydr Polym**, 97(2), 703-709.
- Ranitha Mathialagan, Ir. Ts. Ahmad Ziad Bin Sulaiman & Abdurahman Nour. 2014. A Comparative Study of Lemongrass (*Cymbopogon Citratus*) Essential Oil Extracted by Microwave-Assisted Hydrodistillation (MAHD) and Conventional Hydrodistillation (HD) Method. **Int. J. Chem. Eng. Appl**, 5(104-108).
- Sahraoui, N., Vian, M. A., El Maataoui, M., Boutekedjiret, C. & Chemat, F. 2011. Valorization of citrus by-products using Microwave Steam Distillation (MSD). **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 12(2), 163-170.
- Sukhdev Swami Handa, Suman Preet Singh Khanuja, Gennaro Longo & Dev Dutt Rakesh. 2008. **Extraction Technologies for Medicinal and Aromatic Plants**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.unido.org/fileadmin/user_media/Publications/Pub_free/ (30 ตุลาคม 2561)
- Tsubaki, S., Sakamoto, M. & Azuma, J. I. 2010. Microwave-assisted extraction of phenolic compounds from tea residues under autohydrolytic conditions. **Food Chemistry**, 1255-1258.
- Uslu, N. & Özcan, M. M. 2019. Effect of microwave heating on phenolic compounds and fatty acid composition of cashew (*Anacardium occidentale*) nut and oil.

Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 344-347.

Veera Gnanaswar Gude, Prafulla PatilEdith, Martinez-GuerraShuguang & DengNagamany Nirmalakhandan. 2013. Microwave energy potential for biodiesel production.

Sustainable Chemical Processes, 1(5), 1-31.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวอัจฉรา เหล่าประเสริฐ
เกิดเมื่อ 25 กุมภาพันธ์ 2536
ประวัติการศึกษา พ.ศ.2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนเทิงวิทยาคม จังหวัดเชียงราย
พ.ศ.2558 ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอาหาร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

