

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองในการสกัดสาร
ธรรมชาติจากใบสักทองโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก



นางสาวสุพัฒตรา คุณาสินกุล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

OPTIMIZATION BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY FOR
NATURAL EXTRACTION FROM GOLDEN TEAK LEAVES USING
ULTRASONIC ASSISTED EXTRACTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering Program in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองในการสกัดสารธรรมชาติจาก
ใบสักทองโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



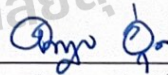
(อ. ดร.ธีระสุด สุขกำเนิด)
ประธานกรรมการ



(อ. ดร.อรุณศรี นุชิตประสิทธิ์ชัย)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.กัณทิมา ศิริจรชัย)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย)
กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุพัฒตรา คุณาสินกุล : การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักทองโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (OPTIMIZATION BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY FOR NATURAL EXTRACTION FROM GOLDEN TEAK LEAVES USING ULTRASONIC ASSISTED EXTRACTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. อรุณศรี นุชิตประสิทธิ์ชัย, 97 หน้า

คำสำคัญ : การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ใบสักทอง

ไม้สักหรือ *Tectona grandis* เป็นไม้เนื้อแข็งเขตร้อน มีความทนทานต่อสภาพอากาศและมีพื้นผิวที่สวยงาม ทำให้ไม้สักเป็นไม้ที่มีค่าสำหรับใช้ทำเครื่องเรือนและสร้างบ้าน ส่วนใบสักถูกใช้ในการห่ออาหารและผัก หรือถูกทิ้งเป็นจำนวนมากกลายเป็นปุ๋ยสำหรับดิน ใบสักจากเดิมถูกใช้เพื่อรักษาการติดเชื้อต่างๆ เนื่องจากการตรวจสอบสารพิษเคมีพบว่าใบสักมีองค์ประกอบทางเคมี เช่น สเตียรอยด์ (Steroids) แทนนิน (Tannin) ซาโปนิน (Saponin) แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) เป็นต้น นอกจากนี้ในชุมชนยังได้มีการสกัดสีจากใบสักเพื่อนำไปย้อมผ้าไหม งานวิจัยนี้จะศึกษาการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกช่วยสกัด (Ultrasonic Assisted Extraction, UAE) ซึ่งจะทำให้การสกัดทั้งใบสดและใบแห้ง ใช้ตัวทำละลายในการสกัด คือ น้ำ และตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล ตัวแปรที่นำมาพิจารณา คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (x_2) ระยะเวลาในการสกัด (x_3) และค่า pH (x_4) ในกรณีของตัวทำละลายผสม ตัวแปรที่ถูกนำมาพิจารณาเพิ่มเติม คือ ความเข้มข้นของเอทานอล (x_5) โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการสกัดและปริมาณสารสกัดจากใบสัก จากนั้นแก้แบบจำลองด้วยการใช้ตัวแก้ปัญหาลำดับไม่เชิงเส้น เพื่อให้ค่าปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงที่สุด

ผลการศึกษาการสกัดสารจากใบสักสดโดยใช้ตัวทำละลายน้ำ พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก เท่ากับ 34 มิลลิลิตร : 1 กรัมใบสัก อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด คือ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด คือ 57 นาที และค่า pH เท่ากับ 2 ซึ่งได้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุด คือ 8.33 (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักเปียก) สำหรับการศึกษาการสกัดสารจากใบสักสดโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก เท่ากับ 25 มิลลิลิตร : 1 กรัมใบสัก อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด คือ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด คือ 30 นาที ค่า pH เท่ากับ 1 และความเข้มข้นของเอทานอล 30% (ปริมาตร/ปริมาตร) ซึ่งได้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุด คือ 54.46 (กรัม/ 100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักเปียก)

ผลการศึกษาการสกัดสารจากใบสักแห้งโดยใช้ตัวทำละลายน้ำ พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก เท่ากับ 35 มิลลิลิตร : 1 กรัมใบสัก อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด คือ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด คือ 20 นาที และค่า pH เท่ากับ 1 ซึ่งได้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุด คือ 31.01 (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักแห้ง) สำหรับการศึกษาการสกัดสารจากใบสักแห้งโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก เท่ากับ 25 มิลลิลิตร : 1 กรัมใบสัก อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด คือ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด คือ 30 นาที ค่า pH เท่ากับ 2 และความเข้มข้นของเอทานอล 30% (ปริมาตร/ปริมาตร) ซึ่งได้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุด คือ 20.25 (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักแห้ง)



สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา สุวิมล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา N. Ananti
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม N. Ananti

SUPHATTRA KHUNASINKUN : OPTIMIZATION BY RESPONSE SURFACE
METHODOLOGY FOR NATURAL EXTRACTION FROM GOLDEN TEAK LEAVES USING
ULTRASONIC ASSISTED EXTRACTION. THESIS ADVISOR :
AROONSRI NUCHITPRASITTICHAJ, Ph.D., 97 PP.

Keyword : Ultrasonic assisted extraction, *Tectona grandis* leaves

Teak or *Tectona grandis* is a tropical hardwood tree. Its weather resistance and beautiful surface made teak as a valuable wood for outdoor furniture and house construction. Moreover, teak leaves are used in food and vegetable wrapping in rural area and some might fall down and waste them as fertilizer for soil. The original teak leaves were used to treat various infections. Due to the phytochemical analyzed it was found that the teak leaves contain chemical components such as steroids, tannins, saponins, anthocyanin, etc. In addition, in the community were also extracted dye from the teak leaves for silk dyeing. This research studied the natural extract from golden teak leaves by ultrasonic assisted extraction (UAE). Fresh and dried leaves were extracted and compared. Solvents used in extraction are water and mixed solvents (water and ethanol). The considered parameters in the optimization were ratio of solvent to sample (x_1), extraction temperature (x_2), extraction time (x_3) and pH values (x_4). For mixed solvent-extraction, the ethanol concentration (x_5) is an additional parameter. The response surface methodology coupled with the nonlinear solver was employed to find the maximum yield of natural extract from teak leaves. The response surface methodology (RSM) gives the model that relates the relationship between extraction parameters and the natural extract yield. Then, the nonlinear solver was used to solve the model for the maximum yield of natural extract. The optimal values of extraction parameters were successfully obtained for the natural extract from teak leaves.

The result of natural extract from fresh leaves with water solvent, the optimal conditions are a ratio of solvent to sample is 34 : 1 (ml : g of teak leaves), extraction temperature is 60 °C, extraction time is 57 minutes and the pH value is 2.0. The maximum natural extract yield is 8.33 (g/100 g of teak leaves on wet weight basis). The result of natural extract from fresh leaves with mixture solvent (water and ethanol),

the optimal conditions are a ratio of solvent to sample is 25 : 1 (ml : g of teak leaves), extraction temperature is 50 °C, extraction time is 30 minutes, pH value is 1.0 and ethanol concentration 30 % (v/v). The maximum natural extract yield is 54.46 (g/100 g of teak leaves on wet weight basis).

The result of natural extract from dried leaves with water solvent, the optimal conditions are a ratio of solvent to sample is 35 : 1 (ml : g of teak leaves), extraction temperature is 60 °C, extraction time is 20 minutes and the pH value is 1.0. The maximum natural extract yield is 31.01 (g/100 g of teak leaves on dry weight basis). The result of natural extract from dried leaves with mixture solvent (water and ethanol) the optimal conditions are a ratio of solvent to sample is 25 : 1 (ml : g of teak leaves), extraction temperature is 50 °C, extraction time is 30 minutes, pH value is 2.0 and ethanol concentration 30 % (v/v). The maximum natural extract yield is 20.25 (g/100 g of teak leaves on dry weight basis).



School of Chemical Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature _____
Advisor's Signature _____
Co Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

อ. ดร.อรุณศรี นุชิตประสิทธิ์ชัย และ อ. ดร.กัณทิมา ศิริจีระชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในด้านการทำงานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

อ. ดร.ธีระสุต สุขกำเนิด ประธานกรรมการ และ รศ. ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไพลย์ กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาอบรมสั่งสอนให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

คุณศรัณย์ ดอกไม้กุล เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี และบุคคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ส่งเสียค่าเล่าเรียน ค่าใช้จ่ายอื่นๆ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

สุพัตรา คุณาสินกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่	1
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ใบสั๊ก.....	4
2.1.1 ประวัติความเป็นมา.....	4
2.1.2 สารธรรมชาติในใบสั๊ก.....	5
2.1.3 สีย้อมธรรมชาติในใบสั๊ก.....	6
2.1.3.1 ข้อดีของสีย้อมธรรมชาติ.....	7
2.1.3.2 ข้อจำกัดของสีย้อมธรรมชาติ.....	8
2.2 การสกัดสารธรรมชาติ.....	9
2.2.1 การสกัดในระบบของเหลว-ของแข็ง.....	9
2.2.2 กลไกการสกัด.....	10
2.2.3 การถ่ายโอนมวลสารในการสกัด.....	10
2.2.4 วิธีการสกัด.....	12
2.2.4.1 การหมัก (Maceration).....	12
2.2.4.2 การสกัดแบบซอกซ์เลต (Soxhlet Extraction).....	12
2.2.4.3 การสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Assisted Extraction, MAE).....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4.4	การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Assisted Extraction, UAE)	13
2.2.4.5	การสกัดด้วยของไหลวิกฤติยิ่งยวด (Supercritical Fluid Extraction, SFE).....	14
2.2.5	การเลือกวิธีการสกัด.....	14
2.2.5.1	ธรรมชาติของพืช.....	14
2.2.5.2	คุณค่าของสารสกัดและค่าใช้จ่ายในการสกัด.....	14
2.2.5.3	ความต้องการการสกัด	14
2.2.6	การเลือกตัวทำละลาย.....	15
2.3	หลักการสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (UAE)	15
2.3.1	การหาตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุด	16
2.4	การออกแบบการทดลอง (Design Of Experiment, DOE).....	17
2.4.1	ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	17
2.4.2	วิธีการเลือกการออกแบบการทดลอง	18
2.4.3	การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis).....	19
2.5	วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)	19
2.5.1	การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (2^k Factorial Design)	21
2.5.1.1	วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent)	22
2.5.2	การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design, CCD).....	23
2.5.3	การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน (Box – Behnken Design, BBD).....	24
2.5.4	แบบจำลองการถดถอย (Regression Model).....	25
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	29
3.1	บทนำ	29
3.2	การเลือกตัวทำละลาย	30
3.3	สารเคมีและเครื่องมือ	30
3.3.1	วัสดุและสารเคมี.....	30
3.3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	30
3.4	การหาตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุดในอ่างล้างความถี่สูง	30
3.5	การทดลอง	31
3.5.1	การเตรียมใบสีก	31
3.5.2	วิธีการทดลอง.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2.1	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้ง.....	32
3.5.2.2	ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้งกรณีตัวทำละลายน้ำ.....	33
3.5.2.3	ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้งกรณีตัวทำละลายผสม.....	34
3.5.3	การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	35
3.5.4	การแยกเอทานอลออกจากสารสกัดเมื่อใช้ตัวทำละลายผสมด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ.....	35
3.5.5	การทำแห้งด้วยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศ.....	35
3.6	การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้ง.....	36
3.6.1	การคำนวณปริมาณสารสกัดจากใบสัก.....	38
4	ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล.....	39
4.1	บทนำ.....	39
4.2	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวตัวของแปรอิสระในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายเป็น น้ำ.....	39
4.2.1	ผลการทดลองในกรณีที่สกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ.....	40
4.2.1.1	ผลการทดลองสำหรับการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ.....	40
4.2.1.2	ผลของการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด.....	41
4.2.1.3	ผลการทดลองสำหรับการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน.....	43
4.2.1.4	ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด.....	44
4.2.2	ผลการทดลองในกรณีที่สกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ.....	45
4.2.2.1	ผลการทดลองสำหรับการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ.....	45
4.2.2.2	ผลของการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด.....	46
4.2.2.3	ผลการทดลองสำหรับการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน.....	48
4.2.2.4	ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด.....	49
4.3	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายผสม.....	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 ผลการทดลองในกรณีที่สกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม.....	51
4.3.1.1 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบแพกทอเรียลสองระดับ	51
4.3.1.2 ผลของการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด.....	52
4.3.1.3 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน	54
4.3.1.4 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด.....	55
4.3.2 ผลการทดลองในกรณีที่สกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายผสม.....	56
4.3.2.1 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบแพกทอเรียลสองระดับ	56
4.3.2.2 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน	57
4.3.2.3 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด.....	58
4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างใบสักสดและใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายน้ำและตัวทำละลายผสม	60
5 บทสรุป	63
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	63
5.2 ข้อจำกัดในการทดลอง.....	64
5.3 ข้อเสนอแนะ	64
5.3.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ผลงานวิจัย	64
5.3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับชุมชน	64
5.3.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุด	69
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสัก	71
ภาคผนวก ค ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัด.....	81
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แผนการทดลองของแพททอเรียลสองระดับ กรณี 3 ตัวแปรร่วมกับ center point.....22
2.2	แผนการทดลองของการออกแบบส่วนผสมกลาง กรณี 3 ตัวแปร.....24
2.3	แผนการทดลองของบ็อกซ์ – เบห์นเคน กรณี 3 ตัวแปร25
3.1	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสและใบสัก แห้งกรณีใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย32
3.2	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสและใบสัก แห้งกรณีใช้ตัวทำละลายผสม33
4.1	ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแพททอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสาร ธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)..... 41
4.2	ค่าสถานะที่เหมาะสมจากวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติ จากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)..... 41
4.3	ค่าของตัวแปรอิสระใหม่สำหรับการทดลองแบบแพททอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัด สารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)..... 42
4.4	การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลาย น้ำ 43
4.5	สถานะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำ ละลายเป็นน้ำ..... 44
4.6	ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแพททอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสาร ธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)..... 46
4.7	ค่าสถานะที่เหมาะสมจากวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติ จากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)..... 46
4.8	ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแพททอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสาร ธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)..... 47
4.9	การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำ ละลายน้ำ 48
4.10	สถานะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำ ละลายเป็นน้ำ 49

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11	ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)52
4.12	ค่าสถานะที่เหมาะสมจากวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)52
4.13	ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)53
4.14	การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายผสม54
4.15	สภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม55
4.16	ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายผสม)57
4.17	การวิเคราะห์การถดถอยของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายผสม ...58
4.18	สภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายผสม59
4.19	สรุปผลการทดลองของทั้ง 4 กรณี61
1ข	ข้อมูลการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ(กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)..... 72
2ข	ข้อมูลการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ) 73
3ข	ข้อมูลการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ) 74
4ข	ข้อมูลการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับหลังทำ Steepest Ascent (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ) 75
5ข	ข้อมูลการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนหลังทำ Steepest Ascent (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ) 76
6ข	ข้อมูลการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)..... 77
7ข	ข้อมูลการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับหลังทำ Steepest Ascent (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม) 78
8ข	ข้อมูลการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนหลังทำ Steepest Ascent (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)..... 79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
9ข	ข้อมูลการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายผสม).....80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ใบสีก..... 4
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ Phenolic compounds (1-3) (Pooja, Dinesh and Poonam,2018) 5
2.3	โครงสร้างทางเคมีของ Flavonoids (4-5) (Pooja, Dinesh and Poonam, 2018)..... 5
2.4	โครงสร้างทางเคมีของ Steroids/Sponins (Pooja, Dinesh and Poonam, 2018)..... 6
2.5	โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมธรรมชาติกลุ่ม Quinonoid (1-5) (Shahid and Faqeer,2018)..... 7
2.6	กระบวนการสกัดในระบบของเหลว – ของแข็ง..... 9
2.7	กลไกการสกัด (Suwei and Dongke, 2014)..... 10
2.8	การถ่ายโอนมวลสารจากพื้นผิวของแข็งไปยังของเหลว (Putra et.al, 2017)..... 11
2.9	การสกัดแบบซอกท์เลต..... 13
2.10	แสดงการเกิดการอัด (Compression) และการขยาย (Rarefaction) (F. John, 1995).... 16
2.11	การเกิดคาวีเทชัน (Zahra, Paul and Dean , 2018)..... 16
2.12	แบบจำลองสำหรับกระบวนการหรือระบบ 17
2.13	แผนผังการเลือกการออกแบบการทดลอง 18
2.14	พื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ (Montgomery, 2001)..... 20
2.15	เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง (Montgomery, 2001) 20
2.16	การทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ 21
2.17	การออกแบบส่วนผสมกลางสำหรับ 3 ตัวแปร (จรัล, 2009)..... 23
2.18	การออกแบบบล็อกซ์ – เบห์นเคนสำหรับ 3 ตัวแปร (ธนพงศ์, 2554)..... 25
3.1	แผนผังการทดลองทั้งหมด 29
3.2	การทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมพอยล์..... 31
3.3	ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสีกสดและใบสีกแห้งกรณีตัวทำละลายน้ำ 33
3.4	ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสีกสดและใบสีกแห้งกรณีตัวทำละลายผสม..... 34
3.5	ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสีกสำหรับเก็บข้อมูล..... 37
3.6	แผนผังขั้นตอนการหาค่าสถานะที่เหมาะสม 38
4.1	ผลกระทบของตัวแปรอิสระ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสีก (x_1) อุณหภูมิในการสกัด (x_2) เวลาในการสกัด (x_3) ค่า pH (x_4) 40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield ชุดข้อมูลก่อนทำ Steepest ascent ชุดข้อมูลหลังทำ Steepest ascent (กรณีสกัดธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ).....	42
4.3	(ก) 3D surface plot และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับเวลาในการสกัด (x_2) ต่อ %Yield (ข) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย(x_1) กับค่า pH (x_3) ต่อ %Yield (ค) 3D surface และContour plot ของเวลาในการสกัด (x_2) กับค่า pH (x_3) ต่อ %Yield (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ).....	45
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield ชุดข้อมูลก่อนทำSteepest ascent ชุดข้อมูลหลังทำ Steepest ascent (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ).....	47
4.5	(ก) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับเวลาในการสกัด (x_2) ต่อ %Yield (ข) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับค่า pH (x_3) ต่อ %Yield (ค) 3D surface และContour plot ของเวลาในการสกัด (x_2) กับค่า pH (x_3) ต่อ %Yield (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ).....	50
4.6	ผลกระทบของตัวแปรอิสระ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) อุณหภูมิในการสกัด (x_2) เวลาในการสกัด (x_3) ค่า pH (x_4) ความเข้มข้นของเอทานอล (x_5).....	51
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield ชุดข้อมูลก่อนทำ Steepest ascent ชุดข้อมูลหลังทำ Steepest ascent (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม).....	53
4.8	(ก) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับค่า pH (x_2) ต่อ %Yield (ข) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ต่อ %Yield (ค) 3D surface และ Contour plot ของค่า pH (x_2) กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ต่อ %Yield (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายผสม)	56
4.9	(ก) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับค่า pH (x_2) ต่อ %Yield (ข) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ต่อ %Yield (ค) 3D surface และContour plot ของค่า pH (x_2) กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ต่อ %Yield (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายผสม)	60
1ก	ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุด (ครั้งที่ 1 ก่อนการสกัด).....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2ก	ตำแหน่งที่มีความเข้มคลื่นเสียงสูงที่สุด (ครั้งที่ 2 ระหว่างการสกัด).....	70
1ค	(ก)-(น) ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ.....	84
2ค	(ก)-(น) ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ.....	87
3ค	(ก)-(น) ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายผสม	90
4ค	(ก)-(น) ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายผสม	93
5ค	(ก)-(ง) ตัวอย่างน้ำสีที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม	94



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

โดยทั่วไปสารธรรมชาติที่พบในพืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ซึ่งอาจมีฤทธิ์หรือไม่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยสารธรรมชาติสามารถพบได้ในทุกส่วนของพืช นอกจากประโยชน์ทางการรักษาโรคแล้ว วัสดุจากธรรมชาติบางส่วนถูกนำมาสกัดเป็นสีย้อมสำหรับย้อมเส้นใยเพื่อใช้แทนสีสังเคราะห์ ซึ่งในกระบวนการย้อมผ้าด้วยสีสังเคราะห์ จะก่อให้เกิดน้ำเสียในกระบวนการซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่รอบ ๆ บริเวณนั้น โดยวัสดุธรรมชาติที่นำมาสกัดสารธรรมชาติมีหลากหลาย อาทิเช่น ตะไคร้ ขมิ้นชัน อัญชัน ดาวเรือง ฯลฯ

ต้นสัถือเป็นวัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความแข็งแรงและสวยงาม มีความทนทานต่อสภาพอากาศ นิยมใช้ทำเครื่องเรือนและสร้างบ้าน ส่วนใบสัถหากไม่นำไปห่ออาหารหรือผัก ก็จะถูกทิ้งเป็นจำนวนมากกลายเป็นปุ๋ยสำหรับดิน ซึ่งจากเดิมใบสัถถูกนำมาใช้ในการรักษาการติดเชื้อต่างๆ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีของสารธรรมชาติที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ นอกจากนี้ในชุมชนได้มีการสกัดสีจากใบสัถเพื่อไปย้อมผ้าไหม พบว่าให้สีสันทนสวยงาม จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าวิธีที่ใช้ในการสกัดโดยทั่วไป คือ การต้ม (Boiling) และข้อจำกัดที่พบคือ ได้ปริมาณสารน้อยถึงแม้จะใช้วัสดุธรรมชาติในปริมาณมาก

วิธีที่ใช้ในการสกัดแบบทั่วไปคือ การต้ม ซึ่งข้อเสียของวิธีนี้คือต้องใช้ความร้อนสูงและใช้ตัวทำละลายมาก การหมัก (Maceration) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสกัดโดยทั่วไป แต่มีข้อเสีย คือ การสกัดมักไม่ค่อยสมบูรณ์เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ของตัวทำละลาย อีกทั้งใช้เวลาในการสกัดและตัวทำละลายมาก (อารีรัตน์ ชื่อดี, 2560) การสกัดแบบซอกซ์เลต (Soxhlet Extraction) เป็นวิธีการสกัดแบบต่อเนื่องเหมาะสำหรับการสกัดองค์ประกอบที่ทนต่อความร้อน ซึ่งไม่เหมาะกับการสกัดองค์ประกอบที่ไม่ทนความร้อน และมีข้อจำกัดคือตัวทำละลายที่ใช้ไม่ควรเป็นของผสม อีกทั้งวิธีนี้ใช้เวลาในการสกัดค่อนข้างนาน (อารีรัตน์ ชื่อดี, 2560) การสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical - Fluid Extraction) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพแต่มีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนใหญ่นิยมใช้กับการสกัดที่ต้องการความบริสุทธิ์มาก ๆ การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Assisted Extraction, UAE) และการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Assisted Extraction, MAE) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการสกัดแบบดั้งเดิม ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการสกัดและใช้ตัวทำละลายน้อยกว่าวิธีการต้มและวิธีการหมัก ช่วยเพิ่มผลผลิตจากการสกัด (Subhash C. et al, 2015) แต่วิธีการสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก มีราคาถูกและใช้งานง่ายกว่าวิธีการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นวิธีการรวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ ที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา

โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่เหมาะสมของผลตอบสนองนั้น (Montgomery, 2001) RSM ให้แบบจำลองที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ตัวแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Programming Solver, NLP) ถูกนำมาใช้แก้แบบจำลองเพื่อหาค่าสูงที่สุดของผลตอบสนองนั้น

จากประโยชน์และข้อจำกัดต่างๆจากการสกัดวัสดุธรรมชาติ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเนื่องจากต้นสักมีการปลูกอย่างแพร่หลายทั่วทุกภูมิภาค ส่วนใหญ่มักนำลำต้นไปใช้ประโยชน์ เพราะฉะนั้นเพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่าในประเทศไทยจึงมีการใช้สีย้อมธรรมชาติจากใบสัก โดยการนำใบสักไปสกัดสำหรับย้อมผ้าไหม แต่วิธีที่ใช้ในการสกัดโดยทั่วไป คือ การต้ม และข้อจำกัดที่พบคือปริมาณสารที่สกัดได้น้อย ถึงแม้จะมีงานวิจัยที่เสนอการสกัดด้วยคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ แต่วิธีนี้ยังไม่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงศึกษาการสกัดสารธรรมชาติด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดควาวิเทชัน (Cavitation) ซึ่งเป็นผลทำให้ผนังเซลล์แตกทำให้ตัวทำละลายเข้าไปละลายตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดออกมาได้มากขึ้น เพื่อให้ได้ปริมาณสารสกัดจากใบสักมากขึ้น โดยตัวแปรอิสระที่นำมาพิจารณา คือ อุณหภูมิในการสกัด อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก ชนิดของตัวทำละลาย ระยะเวลาในการสกัด และค่า pH ที่ส่งผลต่อปริมาณสารสกัดจากใบสัก และ หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดให้ได้ปริมาณมากขึ้น โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองควบคู่กับตัวแก้ปัญหามแบบไม่เชิงเส้น เพื่อหาค่าปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงที่สุด วิธีการพื้นผิวตอบสนองให้แบบจำลองที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการสกัดและปริมาณสารสกัดจากใบสักที่สกัดได้ จากนั้นแก้แบบจำลองด้วยการใช้ตัวแก้ปัญหามแบบไม่เชิงเส้น เพื่อให้ค่าปริมาณสารสกัดสูงที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสัก
- 2) เพื่อเสนอแนวทางการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักในชุมชนให้ได้ปริมาณมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) วัตถุดิบที่ใช้ ใช้เฉพาะส่วนของใบสักเท่านั้นโดยใช้ทั้งใบสดและใบแห้ง
- 2) วิธีที่ใช้ในการสกัด คือ การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ที่ความถี่ 40 kHz
- 3) ตัวทำละลายที่ใช้ คือ น้ำ และตัวทำละลายผสม (น้ำและเอทานอล)
- 4) ผลผลิตที่ได้เป็นปริมาณสารสกัดจากใบสัก
- 5) ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง ควบคู่กับตัวแก้ปัญหามแบบไม่เชิงเส้น เพื่อหาปริมาณสารสกัดจากใบสักที่สูงที่สุด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักเพื่อให้ได้ปริมาณสูงสุด
- 2) เสนอแนวทางและสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักให้กับชุมชน



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ใบสัก

2.1.1 ประวัติความเป็นมา

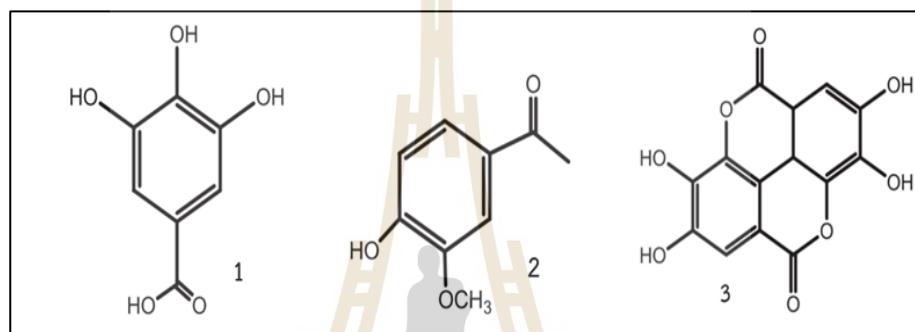
ไม้สักมีชื่อสามัญ คือ สัก (Teak) ซึ่งสักทอง (Golden Teak) เป็นหนึ่งในไม้สัก 5 ชนิด โดยมีชื่อวิทยาศาสตร์ *Tectona grandis* Linn. F. อยู่ในวงศ์ Verbenaceae เป็นไม้ผลัดใบขนาดใหญ่ สูงได้ถึง 30 เมตร เนื้อไม้สีเหลืองทองถึงน้ำตาลมีลายสีน้ำตาลแก่แทรก มีน้ำมันในตัว (ส่วนพัฒนาผลผลิตป่าไม้, 2547) เปลือกเรียบหรือแตกเป็นร่องตื้นเล็ก ๆ สีน้ำตาลปนเทา ใบเป็นใบเดี่ยว ยาวประมาณ 25 - 30 ซม. แสดงดังรูปที่ 2.1 ผลัดใบในฤดูแล้ง มีการกระจายพันธุ์ในภูมิภาคเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในประเทศไทยพบขึ้นเป็นหมู่ในป่าเบญจพรรณทางภาคเหนือ โดยทั่วไปจะพบที่ระดับความสูงไม่เกิน 700 ม. เหนือระดับน้ำทะเล เรื่อยลงมาทางภาคตะวันตกและบางส่วนของภาคกลาง (ส่วนพัฒนาผลผลิตป่าไม้, 2547) ปัจจุบันได้มีการนำไปปลูกทั่วทุกภูมิภาคของไทย สักเป็นไม้ที่สามารถเจริญเติบโตได้หลายร้อยปี โดยยังคงแข็งแรง ไม่ปรากฏช่วงการชราและการวายที่ชัดเจน ต่างจากไม้ยืนต้นอื่น ๆ สีของเนื้อไม้แปรผันตามสภาพแวดล้อมที่เจริญเติบโต (กรวิศว์ ฦ ถกลาง, 2553) นิยมใช้ทำเครื่องเรือน และสร้างบ้าน เนื่องจากมีความแข็งแรงและสวยงาม มีความทนทานต่อสภาพอากาศรวมทั้งปลวกและเชื้อรา (Shahid and Faqeer, 2018)



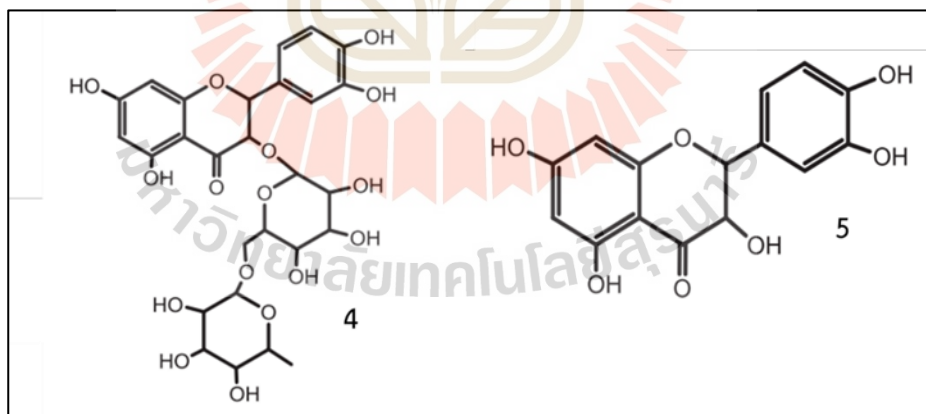
รูปที่ 2.1 ใบสัก

2.1.2 สารธรรมชาติในใบสัก

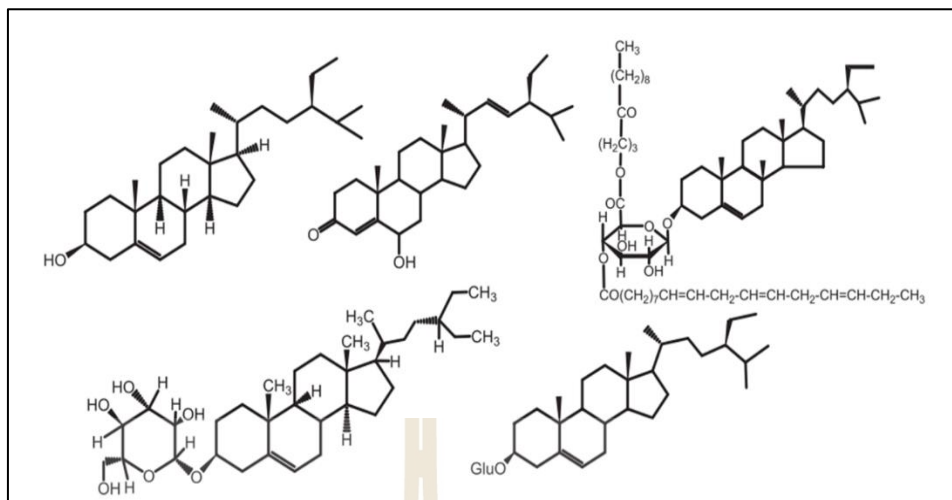
ใบสักจากเดิมถูกใช้เพื่อรักษาการติดเชื้อต่าง ๆ จากการตรวจสอบสารพฤกษเคมี (Phytochemicals) พบว่าใบสักมีองค์ประกอบทางเคมี เช่น Steroids, Tannin, Saponin, Anthocyanin, Coumarins, Amino acids, Caffeine, Carbohydrates, Carotenoid, Chlorophyll, Lipids, Minerals, Nucleotides, Organic acids, Polyphenols, Unsaponifiable compounds, and Volatile compounds (Shahid and Faqeer, 2018) Flavonoids compounds ได้แก่ Rutin, Quercetin และ Phenolic compounds (Nidavani and Mahalakshmi, 2014) ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2.2 ถึง 2.4



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ Phenolic compounds (1-3) (Pooja, Dinesh and Poonam, 2018)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ Flavonoids (4-5) (Pooja, Dinesh and Poonam, 2018)

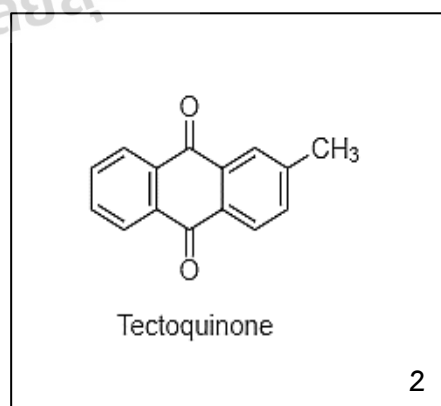
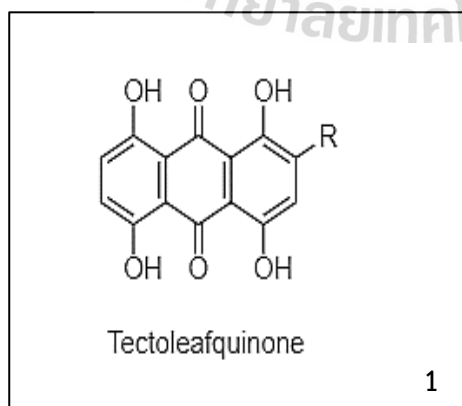


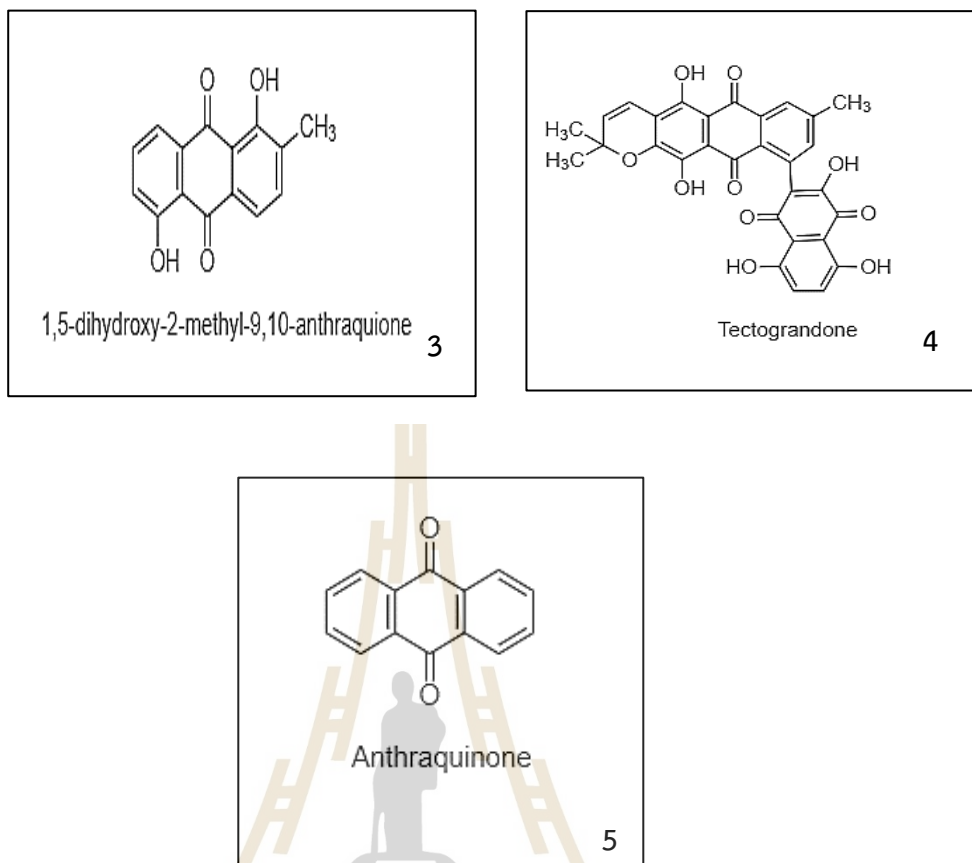
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ Steroids/Sponins (Pooja, Dinesh and Poonam, 2018)

นอกจากนี้ใบสักถูกนำมาสกัดสีเพื่อย้อมเส้นใย อาทิเช่น ผ้าไหม (Silk) (Rosyida and Suranto, 2018) และ ผ้าฝ้าย (Cotton) (Shailendra et. al, 2017)

2.1.3 สีย้อมธรรมชาติในใบสัก

โดยทั่วไปสีย้อมธรรมชาติที่พบในใบสักจะมีสีเหลืองหรือสีแดง โดยใบสักอ่อนจะพบสีแดงเป็นองค์ประกอบหลัก (Lunalisa, Swapana and Warjeet S, 2008) สีย้อมธรรมชาติที่พบในใบสักทองมักเป็นสารสีในกลุ่มควิโนนอยด์ (Quinonoid) เช่น Tectoquinone, Tectograndone, Tectoleafquinone, 1,5-dihydroxy-2-methyl-9,10-anthraquinone, Anthraquinone (Aguinaldo et. al., 1993) ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสารเหล่านี้แสดงดังรูปที่ 2.5 และพบว่าใบสักมีองค์ประกอบสีพื้นฐานเป็นสารประกอบแอนทราควิโนน (Shahid and Faqeer, 2018)





รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมธรรมชาติกลุ่ม Quinonoid (1-5) (Shahid and Faqeer,2018)

ในปัจจุบันแนวโน้มในการพัฒนาสีย้อมธรรมชาติมีมากขึ้น เนื่องจากเมื่อคำนึงถึงความปลอดภัยของสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของผู้ใช้งานนั้น พบว่าสีย้อมธรรมชาติมีความปลอดภัยมากกว่าสีสังเคราะห์ แต่ทั้งนี้สีย้อมธรรมชาติอาจมีข้อด้อยกว่าสีสังเคราะห์ในเรื่องของคุณภาพสี ความคงทนของสีหลังการย้อม ซึ่งข้อดีและข้อจำกัดของสีย้อมธรรมชาติได้ระบุไว้ ดังนี้ (Ashis and Adwaita, 2011)

2.1.3.1 ข้อดีของสีย้อมธรรมชาติ

- 1) เฉดสีที่ผลิตโดยสีย้อมธรรมชาติมักจะอ่อนโยนต่อสายตามนุษย์
- 2) สามารถนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ได้อย่างสม่ำเสมอเนื่องจากส่วนใหญ่เป็นพืชหมุนเวียนทางการเกษตร
- 3) สามารถผลิตสีจากวัสดุธรรมชาติที่หายากและสีที่ได้มีความกลมกลืนกัน
- 4) ในบางกรณีของเสียในกระบวนการสามารถนำไปทำเป็นปุ๋ยสำหรับใช้ในการเกษตร ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาในกำจัดของเสียจากธรรมชาติเหล่านี้

- 5) พืชหลายชนิดที่นำมาสกัดสีธรรมชาติสามารถเจริญเติบโตบนที่รกร้างว่างเปล่า ดังนั้นการใช้ประโยชน์ที่ดินเปล่าจึงเป็นข้อดีของวัสดุธรรมชาติ
- 6) สามารถผลิตสีจากสีย้อมธรรมชาติ โดยการผสมอย่างง่ายในเทคนิคการย้อมหรือการใช้มอร์แดนต์ต่าง ๆ ด้วยสีย้อมเดียวกันสามารถเปลี่ยนสีให้หลากหลายหรือสร้างสีใหม่ ซึ่งทำได้ง่ายกว่าในสีย้อมสังเคราะห์
- 7) ส่วนประกอบบางส่วนของวัสดุธรรมชาติมีคุณสมบัติต่อต้านสารก่อภูมิแพ้จึงพิสูจน์ได้ว่าปลอดภัยสำหรับการสัมผัสทางผิวหนังและส่วนใหญ่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์
- 8) สีย้อมธรรมชาติมีการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้แทนที่สีสังเคราะห์ในของเล่นเด็กได้

2.1.3.2 ข้อจำกัดของสีย้อมธรรมชาติ

- 1) ค่อนข้างยากที่จะทำให้เฉดสีที่ได้เหมือนกันในแต่ละรอบการผลิต เนื่องจากสีธรรมชาติจะแตกต่างกันไปตามฤดูกาลและพื้นที่เพาะปลูกของแหล่งวัสดุธรรมชาติ
- 2) ค่อนข้างยากที่จะสร้างสูตรมาตรฐานสำหรับการใช้สีย้อมธรรมชาติเนื่องจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติและการพัฒนาสีนั้นไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสีเท่านั้นแต่ยังรวมถึงวัสดุด้วย
- 3) การย้อมสีธรรมชาติต้องใช้ฝีมือที่มีทักษะ ผลผลิตสีที่ได้จากแหล่งย้อมธรรมชาติค่อนข้างต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้สีย้อมมากขึ้น และใช้เวลาในการย้อมสีมากขึ้นรวมทั้งค่าใช้จ่ายส่วนเกินสำหรับมอร์แดนต์
- 4) การขาดความรู้ทางเทคนิคที่แม่นยำเกี่ยวกับเทคนิคการสกัดและการย้อม
- 5) ผ้าที่ย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติอาจสีจาง สีตก เมื่อสัมผัสกับแสงแดดเหงื่อและอากาศ
- 6) สีย้อมธรรมชาติเกือบทั้งหมดจำเป็นต้องใช้มอร์แดนต์ในการย้อมติดกับพื้นผิวสิ่งทอ ซึ่งมอร์แดนต์บางชนิดหลังจากรวมกับสีย้อมในเส้นใย อาจก่อตัวเป็นตะกอนและตกค้างในน้ำทิ้งหลังการย้อมได้ เช่น จุนสี (มอร์แดนต์ทองแดง)

2.2 การสกัดสารธรรมชาติ

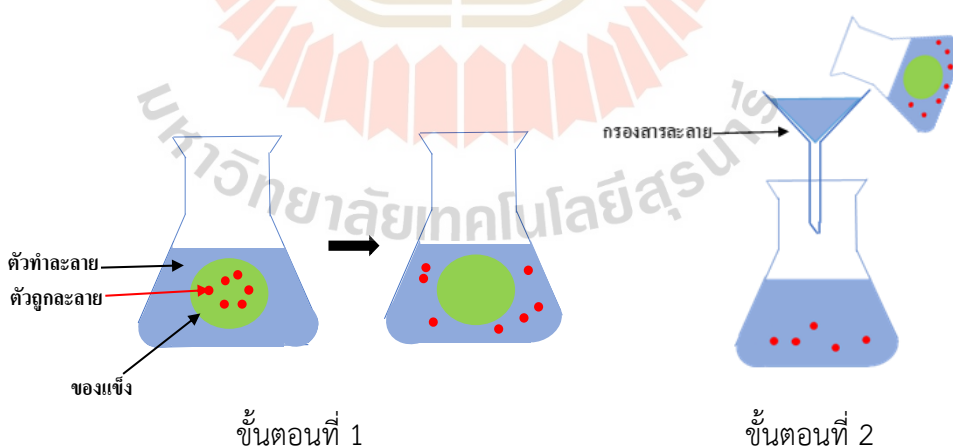
การสกัดสารธรรมชาติจากพืชถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ต้องสกัดสารที่ต้องการออกจากวัสดุธรรมชาติ เพราะฉะนั้นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดจึงมีความจำเป็นเพื่อช่วยให้สกัดได้ปริมาณสารสกัดสูงสุด ส่วนต่าง ๆ ของพืชที่สามารถนำมาสกัดสารธรรมชาติได้ เช่น ดอก ใบ ลำต้นหรือแก่น ราก ผล หรือเปลือกไม้ เป็นต้น ทั้งนี้สามารถใช้แบบสดหรือแห้งก็ได้

การสกัดเป็นการแยกตัวถูกละลาย (Solute) ออกจากตัวถูบด โดยในตัวทำละลาย (Solvent) การสกัดมีทั้งแบบการสกัดในระบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-Solid Extraction or Leaching) คือการสกัดที่ตัวถูบดเป็นของแข็งและตัวทำละลายเป็นของเหลว เช่น การสกัดน้ำมันออกจากถั่วเหลือง โดยใช้เฮกเซน (Hexane) เป็นตัวทำละลาย และการสกัดในระบบของเหลว-ของเหลว (Liquid-Liquid Extraction) คือการสกัดที่ตัวถูบดและตัวทำละลายต่างเป็นของเหลวที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible Liquid) เช่น การแยกกรดอะซิติก (Acetic Acid) ออกจากน้ำ (วิริยา พรหมกอง, 2553)

2.2.1 การสกัดในระบบของเหลว-ของแข็ง

กระบวนการนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรมเคมี โดยเฉพาะการสกัดสารจากธรรมชาติ โดยใช้ตัวทำละลายไม่ว่าจะเป็นน้ำ หรือตัวทำละลายอินทรีย์ โดยทั่วไปประกอบด้วยกระบวนการสำคัญ 2 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2.6 (Ahmed, 2015)

- 1) การสัมผัสกันของตัวทำละลายและของแข็งเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลาย (Leaching)
- 2) การแยกสารละลาย (ตัวทำละลาย + ตัวถูกละลาย) ออกจากกากของแข็งที่เหลืออยู่ (Washing) เช่น วิธีการกรอง



รูปที่ 2.6 กระบวนการสกัดในระบบของเหลว – ของแข็ง

2.2.2 กลไกการสกัด

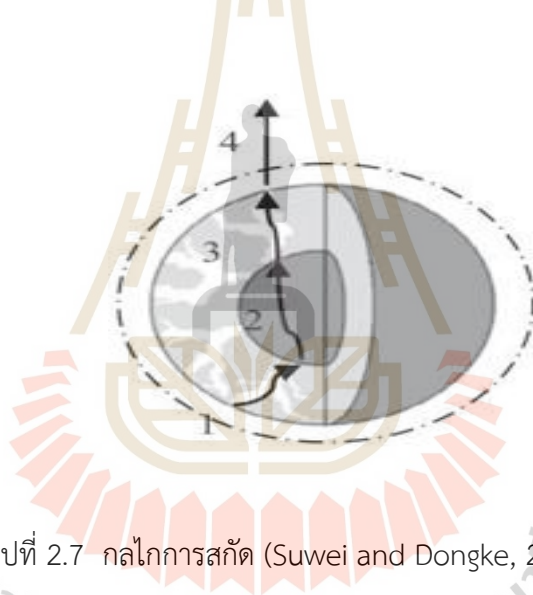
การถ่ายเทตัวถูกละลายจากของแข็งไปยังของเหลว จะมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ แสดงดังรูปที่ 2.7 (Suwei and Dongke, 2014)

ขั้นที่ 1 การแพร่ของตัวทำละลายเข้าสู่อนุภาคของแข็ง ขั้นตอนนี้ตัวทำละลายจะแพร่เข้ามาภายในอนุภาคของแข็งเพื่อจับกับตัวถูกละลาย การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและตัวทำละลายของเหลวทำได้โดยการบดของแข็งให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดระยะทางที่ตัวถูกละลายต้องผ่านให้สั้นลง

ขั้นที่ 2 การละลายของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย

ขั้นที่ 3 การแพร่ภายในของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย สารละลายที่ได้จากขั้นที่ 2 จะแพร่ออกมาที่ผิวของอนุภาคของแข็ง (ถือเป็นสารละลายอิ่มตัว)

ขั้นที่ 4 การแพร่ของตัวถูกละลายและตัวทำละลายจากผิวของอนุภาคของแข็งออกไปสู่สารละลายทั้งหมด การกวนขณะการสกัดจะช่วยให้การถ่ายโอนมวลสารเกิดขึ้นได้เร็ว

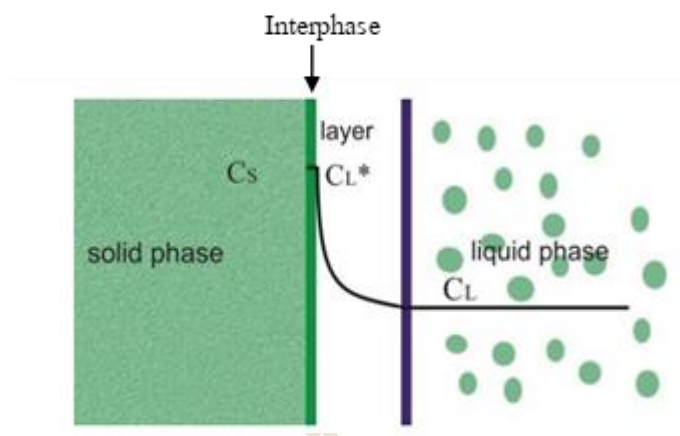


รูปที่ 2.7 กลไกการสกัด (Suwei and Dongke, 2014)

2.2.3 การถ่ายโอนมวลสารในการสกัด

การถ่ายโอนมวลสารในการสกัด (Mass Transfer in Extraction) จะเกิดขึ้นจาก 4 ขั้นตอนที่กำลังกล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับการถ่ายโอนมวลสารของกระบวนการถ่ายโอนภายในช่องว่างของพีชนั้นทำได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถระบุได้ว่ารูปร่างของช่องว่างภายในพีชที่เกิดการถ่ายโอนนั้นมีลักษณะอย่างไร ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาการถ่ายโอนมวลสารในการสกัด อาจคาดการณ์ได้จากกระบวนการถ่ายโอนมวลสารจากพีชสู่สารละลายทั้งหมด

สมมติว่ามีชั้นฟิล์มของของเหลวบาง ๆ ล้อมรอบของแข็ง การพิจารณาการถ่ายโอนมวลสารจากพื้นผิวของแข็งไปยังของเหลว แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การถ่ายโอนมวลสารจากพื้นผิวของแข็งไปยังของเหลว (Putra et.al, 2017)

เมื่อพิจารณากระบวนการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) และไม่คำนึงถึงความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายใน (Internal Mass Transfer Resistance) สมดุลมวลสามารถเขียนได้ดังนี้ (Putra et.al, 2017)

$$R_{\text{input}} - R_{\text{output}} + R_{\text{mass transfer}} = R_{\text{accumulation}} \quad (1)$$

$$0 - 0 + k_L A_s (C_L^* - C_L) = \frac{d(C_L V)}{dt} \quad (2)$$

$$k_L A_s (C_L^* - C_L) = C_L \frac{dV}{dt} + V \frac{dC_L}{dt} \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาที่ปริมาตร (V) คงที่

$$k_L A_s (C_L^* - C_L) = V \frac{dC_L}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dC_L}{dt} = \frac{k_L \cdot A_s}{V} (C_L^* - C_L) \quad (5)$$

t เป็นช่วงเวลาที่ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก C_0 ไปเป็น C หาได้จากการอินทิเกรต เมื่อเริ่มการสกัด ($t = 0$) จะเป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ (ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเป็นศูนย์) $C_0 = 0$ โดยให้ A_s คงที่

$$\int_0^C \frac{dC_L}{C_L^* - C_L} = \int_0^t \frac{k_L \cdot A_s}{V} dt \quad (6)$$

$$\ln\left[\frac{C_L^* - C_L}{C_L^*}\right] = \frac{-k_L \cdot A_s}{V} t \quad (7)$$

$$\frac{C_L^* - C_L}{C_L^*} = e^{\frac{-k_L \cdot A_s}{V} t} \quad (8)$$

$$C_L = C_L^* \left[1 - e^{\frac{-k_L \cdot A_s}{V} t}\right] \quad (9)$$

จากสมการ (9) เห็นได้ว่าการสกัดจะขึ้นอยู่กับเวลาและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ถ้าให้ส่วนที่เหลือคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการสกัดสูงขึ้นด้วย

โดยที่ C_s คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อยู่ในของแข็ง

C_L^* คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะอิ่มตัวที่สัมผัสกับของแข็งที่จุดระหว่างเฟสของแข็งกับของเหลว (Interphase)

C_L คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่เวลาใด ๆ

k_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Coefficient) ในเฟสของเหลว

A_s คือ พื้นที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว

V คือ ปริมาตรรวมของสารละลาย

t คือ เวลา

2.2.4 วิธีการสกัด

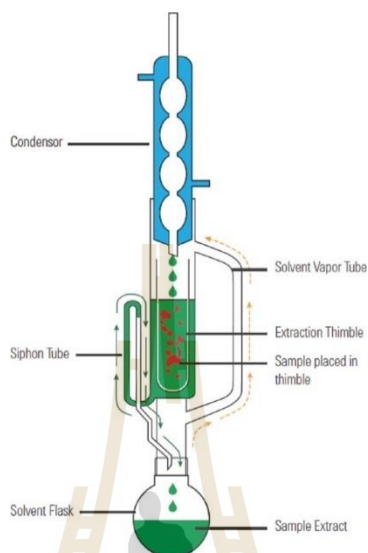
2.2.4.1 การสกัดด้วยการหมัก (Maceration)

เป็นการหมักวัสดุธรรมชาติกับตัวทำละลายจนเนื้อเยื่อของตัวอย่างอ่อนนุ่มและตัวทำละลายสามารถแทรกซึมเข้าไปละลายองค์ประกอบภายในตัวอย่างออกมาได้ วิธีการสกัดนี้เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีโครงสร้างหรือเนื้อเยื่อที่ไม่แข็งแรงแม่นัก เช่น ใบ ดอก ซึ่งทำให้อ่อนนุ่มได้ง่าย จัดเป็นวิธีที่ใช้ตัวทำละลายน้อย และเนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ใช้ความร้อนจึงเหมาะสมกับการสกัดสารที่ไม่ทนต่อความร้อน แต่วิธีการสกัดนี้มักจะไม่สมบูรณ์เนื่องจากไม่ค่อยมีการเคลื่อนที่ของตัวทำละลาย ซึ่งอาจส่งผลให้ตัวทำละลายเคลื่อนที่เข้าไปละลายตัวถูกละลายได้ช้าทำให้อัตราการสกัดเกิดช้าและค่อนข้างใช้เวลาในการสกัดนาน (อารีรัตน์ ชื่อดี, 2560)

2.2.4.2 การสกัดด้วยซอกซ์เลต (Soxhlet Extraction)

เป็นการสกัดในระบบปิด โดยใช้ตัวทำละลายซึ่งมีจุดเดือดต่ำ สำหรับกระบวนการสกัดนั้น ตัวทำละลายจะวนผ่านวัสดุธรรมชาติเข้าไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งองค์ประกอบในวัสดุธรรมชาติถูกสกัดออกมา เมื่อตัวทำละลายในเอ็กซ์แทรกชันทิมเบิล (Extraction Thimble) สูงถึงระดับด้านบนของกาลักน้ำ (Siphon Tube) สารสกัดจะไหลกลับลงไปในภาชนะวนเวียนเช่นนี้ ปริมาณสารที่สกัดจะเพิ่มตามการไหลวนของตัวทำละลายจนกระทั่งการสกัดสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 2.9 วิธีการสกัดแบบต่อเนื่องนี้เหมาะสมสำหรับการสกัดองค์ประกอบที่ทนต่อความร้อน และใช้ตัวทำละลายน้อย ไม่สิ้นเปลือง แต่มีข้อเสียคือไม่เหมาะที่จะใช้กับองค์ประกอบที่ไม่ทนต่อความร้อน

และตัวทำละลายที่ใช้ไม่ควรเป็นของผสม เพราะจะเกิดการแยกตัวทำละลายแต่ละชนิดเนื่องจากมีจุดเดือดต่างกัน จะมีผลให้สัดส่วนของตัวทำละลายแตกต่างกันไปจากเดิม และได้ผลการสกัดที่ไม่ดี (อารีรัตน์ ชื่อดี, 2560)



รูปที่ 2.9 การสกัดแบบซอกซ์เลต (แหล่งที่มา: <http://www.chromatographyonline.com/looking-past-understand-future-soxhlet-extraction>. สืบค้นเมื่อ 26 มิถุนายน 2563)

2.2.4.3 การสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Assisted Extraction, MAE)

เป็นวิธีการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผ่านคลื่นไปยังเซลล์ของวัสดุธรรมชาติ คลื่นจะทำให้โมเลกุลของน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในเซลล์นั้นสั่นสะเทือน เกิดแรงดันขึ้นภายในเซลล์ทำให้เซลล์แตก และปล่อยสารสำคัญที่อยู่ภายในออกมาผสมกับตัวทำละลายที่ใช้สกัด วิธีนี้มีความสะดวกรวดเร็ว สามารถลดช่วงระยะเวลาและปริมาณการใช้ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดได้ แต่อาจสิ้นเปลืองพลังงาน (วราภรณ์ สมพงษ์, ภาสกร ธีระศิลป์วิสุกุล และคณิน ศรีสาสิทธิ์รัตน์, 2559)

2.2.4.4 การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic Assisted Extraction, UAE)

คลื่นอัลตราโซนิคหรือคลื่นเหนือเสียง คือคลื่นเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วง 16 kHz ถึง 1 GHz ซึ่งเป็นคลื่นเสียงที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยิน การสั่นด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคสามารถทำให้สารที่ต้องการถูกปลดปล่อยออกมาจากวัสดุธรรมชาติได้ คลื่นเหนือเสียงที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์จะมี 2 ช่วงความถี่ คือ (อนงค์ ศรีโสภา และคณะ, 2560)

- 1) ช่วงความถี่สูง (1 – 10 MHz) นำมาประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยและการรักษาทางการแพทย์ เช่น การตรวจอัลตราซาวด์ทารกในครรภ์มารดา

- 2) ช่วงความถี่ต่ำ (20 – 100 kHz) นำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ทำความสะอาด กระบวนการแตกเซลล์ การเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

2.2.4.5 การสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical Fluid Extraction, SFE)

ของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical Fluid) หมายถึง ของไหลที่มีอุณหภูมิและความดันที่อยู่เหนือจุดวิกฤตของของไหล โดยหลักการสกัดด้วยวิธีนี้จะใช้ตัวทำละลายในสถานะที่มีอุณหภูมิ และความดันเหนือจุดวิกฤต ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการซึมผ่านของแข็งได้เหมือนแก๊ส และสามารถละลายสารได้เหมือนของเหลวจึงใช้เป็นสารสำหรับการสกัดได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างของตัวทำละลายที่ใช้การสกัด เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (พิชญา มั่นคง, 2561)

2.2.5 การเลือกวิธีการสกัด

การเลือกวิธีการสกัดมีได้หลายวิธี ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

2.2.5.1 ธรรมชาติของพืช โดยพิจารณา ดังนี้

- 1) ลักษณะโครงสร้างของเนื้อเยื่อพืช เช่น ดอก ใบ อาจสกัดด้วยวิธีมาเซอเรชัน หากเป็นสมุนไพรที่มีเนื้อเยื่อที่แข็งแรงและเหนียว เช่น เปลือก ราก เนื้อไม้ ควรใช้วิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง
- 2) ความสามารถในการละลายของสารที่ต้องการในตัวทำละลาย
- 3) ความคงตัวของสารที่ต้องการต่อความร้อน ถ้าเป็นสารที่ไม่ทนต่อความร้อนควรใช้ วิธีมาเซอเรชัน

2.2.5.2 คุณค่าของสารสกัดและค่าใช้จ่ายในการสกัด

หากต้องการสารสกัดที่ไม่ใช่สารสำคัญและมีคุณค่าทางการรักษาน้อย เช่น สารที่ใช้แต่งสี กลิ่น รส ก็อาจใช้วิธีง่าย ๆ ที่ไม่ยุ่งยาก เช่น มาเซอเรชัน การต้ม นอกจากนี้ควรคำนึงถึงค่าใช้จ่ายทั้งหมด เปรียบเทียบกับราคาของสารสกัดที่เตรียมได้ว่าคุ้มค่ากับการลงทุนหรือไม่

2.2.5.3 ความต้องการการสกัด

หากต้องการสารสกัดเจือจาง ควรใช้วิธีมาเซอเรชัน แต่ถ้าต้องการสารสกัดเข้มข้นควรใช้วิธี การสกัดแบบต่อเนื่อง การสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค การสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายคือการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักทอง พบว่าเมื่อพิจารณาตามวิธีการเลือกการสกัด วิธีที่เหมาะสม คือ วิธีการสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic Assisted Extraction, UAE) เพราะเป็นเทคนิคที่ไม่รุนแรง ไม่ใช้ความร้อนสูงเกินไป อีกทั้งช่วยให้สามารถควบคุมตัวแปรสำหรับโซนิเคชัน (Sonication) ซึ่งเป็นการแยกสารหรือเซลล์โดยที่ตัวอย่างเป็นตัวอย่างทางชีวภาพด้วยการสั่นสะเทือนของคลื่นอัลตราโซนิคได้อย่างแม่นยำ (เช่น อุณหภูมิ, ความดัน, ความเข้มข้นของตัวทำละลาย) ใช้งานง่ายและมีคุณภาพสูง การสกัดด้วยเทคนิคนี้ช่วยเพิ่มผลผลิต และใช้ตัวทำละลายน้อยรวมทั้งช่วยลดระยะเวลาในการสกัด

2.2.6 การเลือกตัวทำละลาย

ในการเลือกตัวทำละลาย จะพิจารณาจากโครงสร้างทางเคมีของสารสกัดเป็นหลัก เช่น ความมีขั้ว สามารถละลายในน้ำหรือในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ความสามารถในการละลายสารที่ต้องการสกัด
- 2) สามารถแยกออกจากสารที่ถูกสกัดได้ง่าย
- 3) มีความคงตัว
- 4) ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการสกัด
- 5) มีความปลอดภัย ไม่มีพิษ
- 6) มีราคาถูก

ตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัด เช่น

น้ำ (Water) เป็นตัวทำละลายที่ดีหาง่ายและถูก แต่การสกัดด้วยน้ำจะเกิดสารละลายที่ละลายออกมาด้วย เช่น น้ำตาล แป้ง ซึ่งเป็นอาหารของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการบูดเสียของสารได้ มักนิยมใช้ในการสกัดสี

เฮกเซน (Hexane) เป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดน้ำมันจากพืชหรือสารสำคัญจากสมุนไพร จำเป็นต้องระมัดระวังอย่างมากหากนำไปใช้ เนื่องจากเฮกเซนจัดเป็นสารพิษที่มีอันตรายต่อผิวหนัง ดวงตา หากสูดดมจะทำให้เกิดอาการวิงเวียน ร่างกายอ่อนเพลีย

เอทานอล (Ethanol) เป็นตัวทำละลายที่ดีเมื่อเทียบกับน้ำ เอทานอลมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ แต่มีราคาสูง ซึ่งเป็นที่นิยมในการสกัดสมุนไพร (วรอัณณู ณรงค์เดชา, 2562)

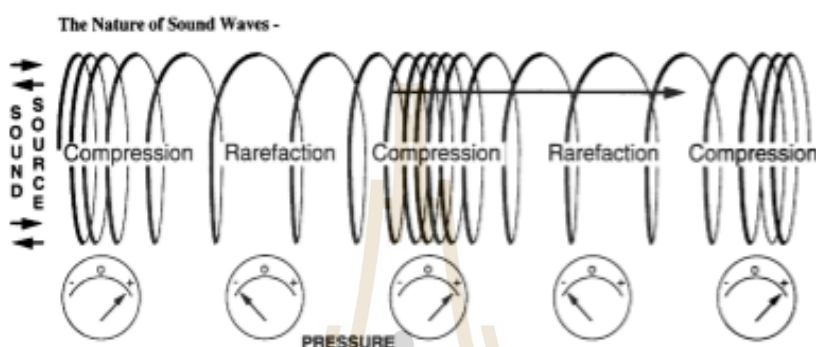
งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ น้ำ และเอทานอล เนื่องจากเป็นตัวทำละลายที่ปลอดภัยเป็นมิตรกับผู้ใช้

2.3 หลักการสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (UAE)

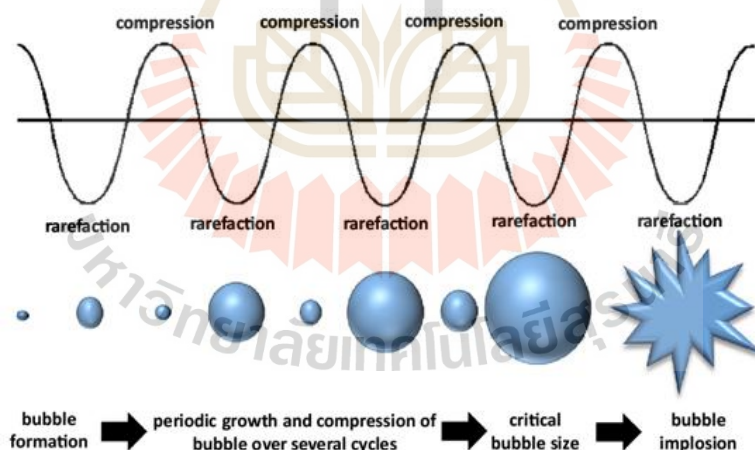
การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค เป็นการสกัดด้วยคลื่นเหนือเสียง ซึ่งเป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) นั่นคือการเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลางจะสั่นไปมาหรือย้ายตำแหน่งในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน การเคลื่อนที่ของคลื่นไปในตัวกลางของเหลวจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน เมื่อความดันของคลื่นเหนือเสียงมีค่าสูงคลื่นเหนือเสียงจะเกิดเป็นส่วนอัด (Compression) และเมื่อความดันของคลื่นเหนือเสียงลดลงจะเกิดเป็นส่วนขยาย (Expansion) สลับไปมาแพร่กระจายในตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 การอัดตัวของคลื่นเหนือเสียงมีผลทำให้โมเลกุลของตัวกลางถูกบีบอัดเข้าหากัน ส่วนการขยายตัวของคลื่นเหนือเสียงจะทำให้โมเลกุลของตัวกลางแยกตัวออกจากกัน ทำให้เกิดเป็นฟองของไอในตัวกลางของเหลว (อนงค์ ศรีโสภา และคณะ, 2560)

ควิวเทชัน (Cavitation) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อของเหลวมีความดันเฉพาะจุด (Local Pressure) ที่อยู่ภายใต้การขยายตัวของคลื่นเหนือเสียงต่ำกว่าความดันอิ่มตัว (Saturated Pressure) ของของเหลวที่อุณหภูมินั้น จึงเกิดเป็นฟองของไอขึ้น ฟองของไอนี้มีขนาดเล็กจำนวนมาก

เกิดขึ้นในตัวของเหลว บริเวณผิวของของแข็ง หรือบริเวณผิวของภาชนะที่บรรจุของเหลวนั้น เมื่อเกิดแรงอัดและแรงขยาย เนื่องจากความดันของคลื่นเหนือเสียงทำให้ฟองของไอมีขนาดใหญ่ขึ้นและหดตัวลงสลับกันเป็นจังหวะทำให้เกิดลักษณะคล้ายการกววนของเหลวอย่างรุนแรง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดด้วยระบบ ของเหลว-ของแข็งได้ (อนงค์ ศรีโสภา และคณะ, 2560) แสดงดังรูปที่ 2.11 ผลของควาวิเทชันจะทำให้ผนังเซลล์ของวัสดุธรรมชาติแตกและปลดปล่อยสารที่ต้องการสกัดออกมา ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการสกัดได้มากกว่าวิธีแบบดั้งเดิม (Gallo et al, 2018)



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดการอัด (Compression) และการขยาย (Rarefaction) (F. John, 1995)



รูปที่ 2.11 การเกิดควาวิเทชัน (Zahra, Paul and Dean , 2018)

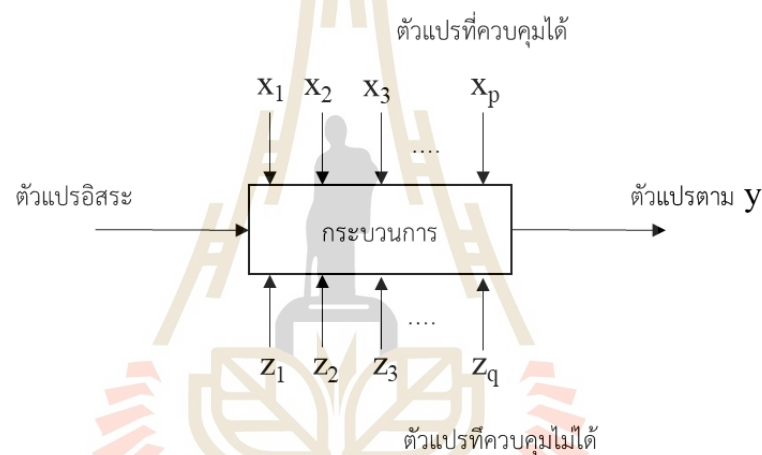
2.3.1 การหาตำแหน่งที่มีความเข้มของคลื่นเสียงสูงที่สุด

การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ด้วยอุปกรณ์อ่างล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner Bath) จำเป็นต้องมีการหาตำแหน่งที่มีความเข้มของคลื่นเสียงสูงที่สุด เนื่องจากความเข้มของคลื่นเสียงภายในอ่างที่แต่ละจุดไม่เท่ากัน โดยวิธีอย่างง่ายที่สุดที่ใช้ในการหาตำแหน่งนี้ คือวิธีการทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum Foils Test) วิธีการคือนำแผ่นอะลูมิเนียม

พอยล์วางลงในอ่าง จากนั้นเปิดเครื่องและตั้งเวลาในการทดสอบ เมื่อครบเวลา สังเกตจุดบนแผ่นอะลูมิเนียมพอยล์ บริเวณใดเกิดรูพรุนมากที่สุดแสดงว่าบริเวณนั้นมีความเข้มข้นของคลื่นเสียงมากที่สุด (Hugo et al, 2009)

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design Of Experiment, DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นวิธีการทางสถิติ ที่สร้างความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างชุดของตัวแปรอิสระที่เข้าสู่ระบบกับตัวแปรตามที่ต้องการจากกระบวนการ อธิบายได้ดังรูปที่ 2.12 โดยที่ $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ เป็นตัวแปรอิสระที่ถูกพิจารณาในกระบวนการ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้ เมื่อ y คือตัวแปรตามที่ต้องการจากกระบวนการ และ $z_1, z_2, z_3, \dots, z_q$ เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Astakhov, V. P., 2012)



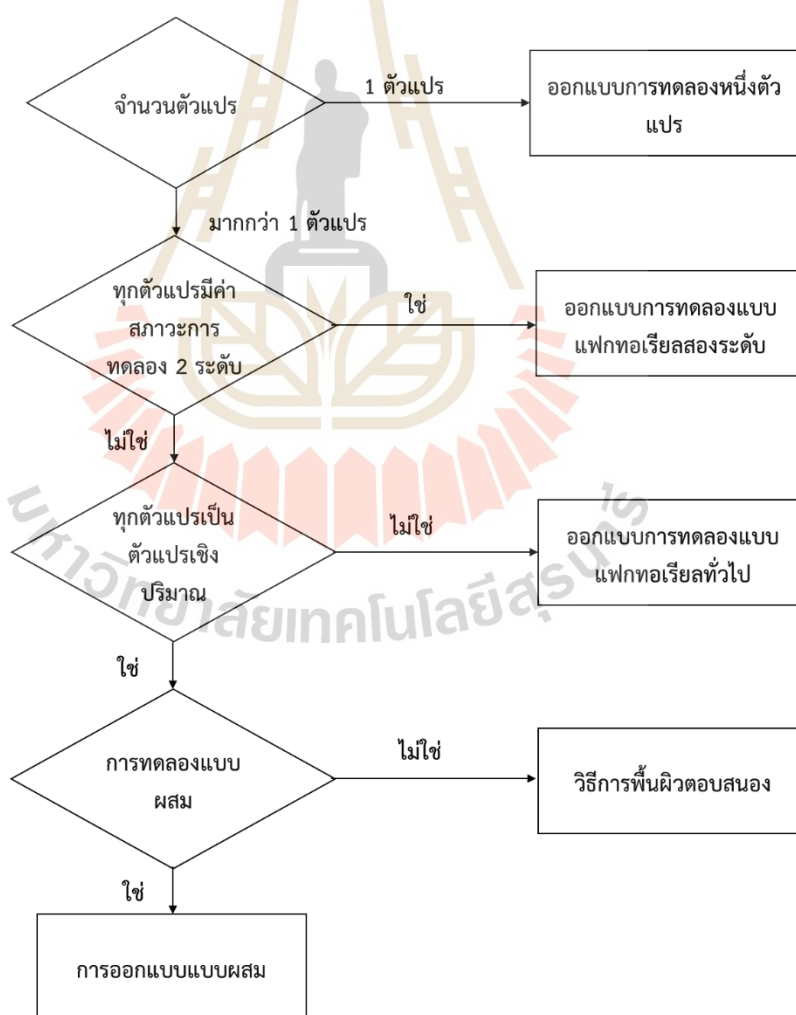
รูปที่ 2.12 แบบจำลองสำหรับกระบวนการหรือระบบ

2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

- 1) กำหนดปัญหา (Problem Identification)
- 2) เลือกตัวแปรตอบสนอง (Define Response Variables : y)
- 3) กำหนดปัจจัย (Factors Identification : x)
- 4) ออกแบบการทดลอง (Design Experiment)
- 5) ทำการทดลอง (Performing Experiment)
- 6) วิเคราะห์ข้อมูล (Analyze Data)
- 7) สรุปผลการทดลอง (Draw Conclusion)
- 8) กำหนดปัจจัย x ที่จะทำให้ y ดีที่สุด (Identify Optimal Settings For Factors)
- 9) ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผล (Run Confirmation Experiment)

2.4.2 วิธีการเลือกการออกแบบการทดลอง

วิธีการพิจารณาเพื่อเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมเริ่มจากการพิจารณาจำนวนตัวแปรที่สนใจ หากมีหนึ่งตัวแปรให้ใช้การออกแบบการทดลองแบบหนึ่งตัวแปร (One Factor Design of Experiment) แต่ถ้ามีจำนวนตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวแปรและแต่ละตัวแปรมีค่าสถานะการทดลองที่ 2 ระดับจะใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^k Factorial Design) ในกรณีที่แต่ละตัวแปรมีค่าสถานะการทดลองมากกว่า 2 ระดับและทุกตัวแปรไม่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (ตัวแปรที่ประกอบด้วยข้อมูลที่เป็นตัวเลข สามารถวัดได้) ให้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลทั่วไป ซึ่งเป็นตัวแบบการทดลองพื้นฐานที่ไม่มีเงื่อนไขใด ๆ และง่ายต่อการนำไปใช้งาน ในกรณีที่ทุกตัวแปรเป็นตัวแปรเชิงปริมาณให้ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) หากตัวแปรนั้นอยู่ในรูปแบบการทดลองที่เป็นแบบผสม ซึ่งหมายถึงตัวแปรเหล่านี้จะไม่เป็นอิสระต่อกัน ในกรณีที่การทดลองไม่ใช้การทดลองแบบผสมและตัวแปรทุกตัวเป็นอิสระต่อกันให้ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง แสดงตามแผนผังตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนผังการเลือกการออกแบบการทดลอง

ข้อดีของการออกแบบการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับ การลองผิดลองถูกคือ ใช้เวลาน้อยกว่า หาปัจจัยที่มีผลได้ง่าย เสียค่าใช้จ่ายน้อยและให้ผลที่เชื่อถือได้ทางสถิติ

การกำหนดจำนวนตัวแปรที่ต้องการศึกษาต้องพิจารณาจากตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตาม สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

2.4.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวเป็นการศึกษาผลของค่าตัวแปรอิสระที่แตกต่างกันที่มีผลต่อตัวแปรตามที่สนใจภายใต้ชุดการทดลองที่กำหนด ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยลดจำนวนตัวแปร โดยสามารถตัดตัวแปรอิสระที่ไม่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตามได้ ขั้นตอนสำหรับการวิเคราะห์ความไว เป็น ดังนี้

- 1) พิจารณาตัวแปรอิสระที่สนใจและมีผลต่อตัวแปรตาม
- 2) กำหนดขอบเขตการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระเหล่านั้น
- 3) เลือกวิธีการวัดหรือทำการทดลอง
- 4) คำนวณหาผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของแต่ละตัวแปรอิสระ
- 5) วิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยวิธีการเขียนกราฟระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามที่คำนวณได้
- 6) จากกราฟถ้าค่าตัวแปรตามมีลักษณะขนานกับแนวนอนต่อช่วงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระนั้น แสดงว่าตัวแปรตามไม่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระดังกล่าว

สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามและหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตามสามารถทำได้โดยการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

2.5 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

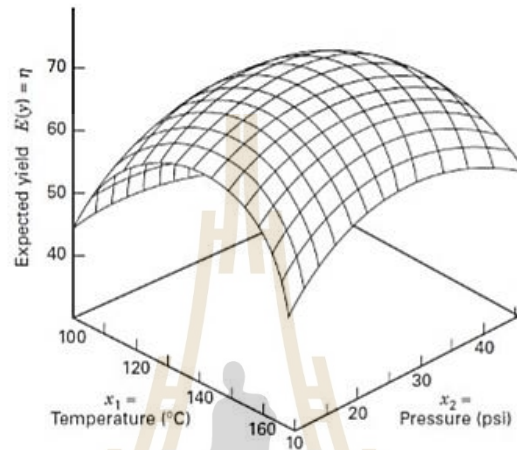
วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เป็นวิธีการรวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ ที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ ในความหมายของผลตอบสนองนี้จะหมายถึงตัวแปรตาม (Dependent Variable) โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรตาม เช่น ตัวแปรตาม y เป็นฟังก์ชันของ x_1 และ x_2 ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังนี้ (Montgomery, 2001)

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

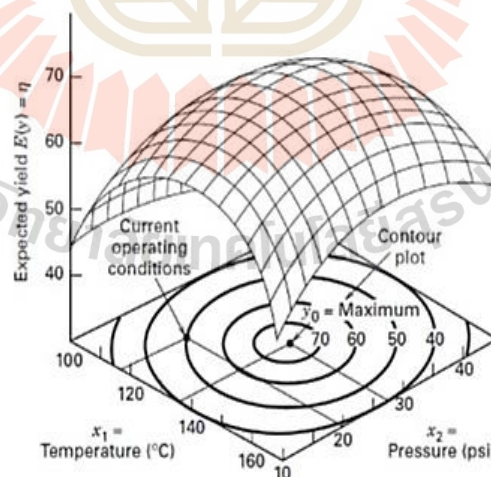
เมื่อ ε คือ ค่าความผิดพลาดของตัวแปรตาม y ที่มีผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการพื้นผิวได้ คือ

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

โดยส่วนมากจะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปของกราฟฟิก ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่ง η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดี โดยส่วนมากจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง แสดงดังรูปที่ 2.15 ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้เส้นที่มีค่าของตัวแปรตามคงที่จะครอบคลุมอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบสนองที่เท่ากันค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.14 พื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ (Montgomery, 2001)



รูปที่ 2.15 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง (Montgomery, 2001)

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนมากมักจะไม่นิยามความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นแรก คือ ต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดง

ความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตาม y และกลุ่มตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองอันดับหนึ่ง (First – Order Model)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องกับระบบ จึงใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่นแบบจำลองอันดับสอง (Second – Order Model)

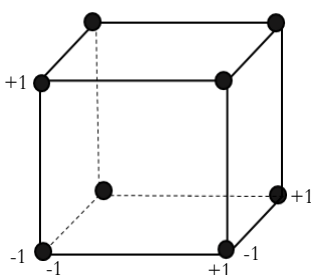
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยทำการวิเคราะห์การถดถอยกำหนดแบบจำลองอันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล

สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่มีส่วนโค้ง โดยทำการวิเคราะห์การถดถอยกำหนดแบบจำลองอันดับสอง ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางหรือการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยแบบจำลองอันดับสองจะถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันสำหรับการกำหนดเงื่อนไขเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตามในวิธีการพื้นผิวตอบสนองนี้

2.5.1 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (2^k Factorial Design)

การทดลองนี้สำหรับศึกษาตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป โดยที่ทุกตัวแปร มี 2 ระดับ มักกำหนดเป็นค่าสูงสุด-ต่ำสุด (High-Low) และ k คือ จำนวนตัวแปรที่ต้องการศึกษา โดยสามารถศึกษาผลกระทบของตัวแปรเดี่ยว (Main effect) และผลกระทบของตัวแปรร่วม (Interaction) แสดงตามรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ

ตารางที่ 2.1 แผนการทดลองของแฟกทอเรียลสองระดับ กรณี 3 ตัวแปรร่วมกับ center point

จำนวนการทดลอง	ตัวแปร		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนมากจะใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งหรืออันดับสองในการหาตัวแปรตาม แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่สนใจมีขนาดใหญ่ เพราะฉะนั้นการประมาณค่าเริ่มต้นของตัวแปรอิสระจึงมีความสำคัญ ในกรณีที่แบบจำลองไม่สามารถประมาณความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสองได้ วิธีการที่นำมาใช้ในการประมาณค่าที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ คือ วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด

2.5.1.1 วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent)

ในบางกรณีการประมาณค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมของสถานะการทำงานมีค่าต่างจากค่าที่เหมาะสมจริง ๆ เพราะฉะนั้นจึงมีการใช้วิธีการป็นขึ้นที่ชันที่สุด ซึ่งเป็นขั้นตอนสำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทางที่เพิ่มขึ้นสูงสุดในการตอบสนอง โดยมีวิธีการเป็นดังนี้

- 1) กำหนดแบบจำลองเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i$$

- 2) ทิศทางของการขึ้นทางชันคือทิศทางที่ตัวแปรตาม y เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่สุด

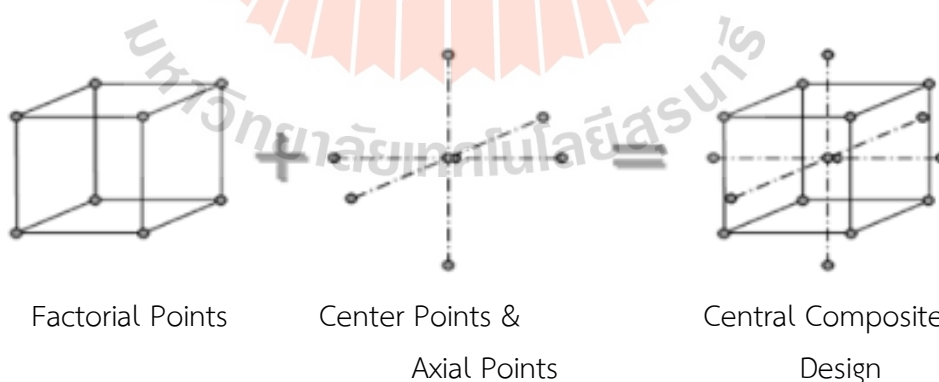
- 3) การทดลองจะดำเนินการไปตามเส้นทางที่ชันที่สุดจนกระทั่งไม่มีการตอบสนองเพิ่มขึ้นอีก
- 4) ค่าการเพิ่มขึ้น (Step size) ของแต่ละตัวแปรอิสระในกระบวนการคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย (Regression Coefficient, β) ของตัวแปรอิสระนั้นๆ ต่อค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยที่มีค่าสูงที่สุด $|\beta_j|$

$$\Delta x_i = \frac{\beta_i}{|\beta_j|} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad i \neq j$$

เมื่อ j คือ ตัวแปรอิสระที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยสูงที่สุด

2.5.2 การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

Central Composite Design (หรือ Box-Wilson Design) เป็นการทดลองที่ 3 ระดับ (นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ $-1, 0, +1$) กล่าวคือ จะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไป ตัวแปรละ 3 ค่า ใช้หลักการของการออกแบบแฟกทอเรียลรวมกับจุดศูนย์กลางของการออกแบบ (Center Point) และจุดในแนวแกน (Axial Point) แสดงดังรูปที่ 2.17 ตัวอย่างของแผนการทดลองของการออกแบบส่วนผสมกลาง กรณี 3 ตัวแปร คือ x_1, x_2 และ x_3 แสดงดังตารางที่ 2.2 โดยหลักการออกแบบแผนการทดลองประกอบด้วยส่วนของการออกแบบแฟกทอเรียลที่อยู่ในรูปรหัส (Coded Variables) คือ $+1$ และ -1 รวมกับจุดในแนวแกนที่อยู่ในรูปรหัส คือ $+\alpha$ (Alpha) และ $-\alpha$ (ค่า alpha จะแตกต่างกันตามจำนวนตัวแปรที่ศึกษา) และรวมจุดศูนย์กลางของการออกแบบที่จะกำหนดให้เป็น 0 เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดยโมเดลที่ได้จะยังคงมีทั้ง ผลกระทบหลัก ผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปรและผลกระทบกำลังสอง (Quadratic Effect) (จรัล, 2009)



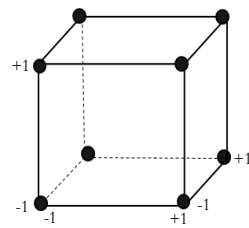
รูปที่ 2.17 การออกแบบส่วนผสมกลางสำหรับ 3 ตัวแปร (จรัล, 2009)

ตารางที่ 2.2 แผนการทดลองของการออกแบบส่วนผสมกลาง กรณี 3 ตัวแปร

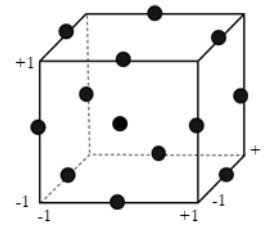
จำนวนการทดลอง	ตัวแปร		
	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1.68 ($-\alpha$)	0	0
10	+1.68 ($+\alpha$)	0	0
11	0	-1.68 ($-\alpha$)	0
12	0	+1.68 ($+\alpha$)	0
13	0	0	-1.68 ($-\alpha$)
14	0	0	+1.68 ($+\alpha$)
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0

2.5.3 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน (Box – Behnken Design, BBD)

Box – Behnken Design เป็นการออกแบบการทดลองแบบ 3 ระดับเพื่อศึกษาตัวแปรเชิงปริมาณสำหรับการกำหนดแบบจำลองอันดับสอง ใช้หลักการของแฟกทอเรียลแบบสองระดับรวมกับจุดกึ่งกลาง ดังแสดงตามรูปที่ 2.18 ตัวอย่างของแผนการทดลองของบ็อกซ์ – เบห์นเคนกรณี 3 ตัวแปร คือ x_1 , x_2 และ x_3 ดังตารางที่ 2.3 โดยหลักการออกแบบแผนการทดลองจะกำหนดให้ตัวแปร 2 ตัวอยู่ในรูปรหัส คือ +1 หรือ -1 ส่วนตัวแปรที่เหลือจะกำหนดให้เป็น 0 ข้อดีคือสามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสองและผลกระทบระหว่างปัจจัย (ธนพงศ์, 2554)



2k Factorial



Box – Behnken design (BBD)

รูปที่ 2.18 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนสำหรับ 3 ตัวแปร (ธนพงศ์, 2554)

ตารางที่ 2.3 แผนการทดลองของบ็อกซ์ – เบห์นเคน กรณี 3 ตัวแปร

จำนวนการทดลอง	ตัวแปร		
	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

2.5.4 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

เป็นวิธีการทางสถิติที่มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแบบการถดถอยที่เหมาะสมสำหรับพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามซึ่งเป็นตัวแปรที่สนใจศึกษา โดยอาศัยค่าของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรพยากรณ์ (Predictors) โดยตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณมีลักษณะดังนี้ (ศุทธิณี, 2555)

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i ; i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, k$$

เมื่อ	y_i	คือ	ค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรตาม
	$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$	คือ	พารามิเตอร์ (สัมประสิทธิ์การถดถอย)
	$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$	คือ	ค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว
	ε_i	คือ	ค่าคลาดเคลื่อนของค่าสังเกตที่ i
	n	คือ	จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด
	k	คือ	จำนวนตัวแปรอิสระ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prusty et al. (2010) ได้ศึกษาการสกัดสีจากใบสัก โดยใช้วิธีการสกัดแบบซอกท์แลต โดยขั้นตอนในการสกัดใช้ผงใบสักแห้ง 500 กรัม ในสารละลายเมทานอล (Methanol) ความเข้มข้น 10% (v/v) ปริมาตร 2500 มิลลิลิตร ให้ความร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และในการทดลองมีการใช้ตัวทำละลายที่ต่างกัน คือ พิโตรเลียมอีเธอร์ (Petroleum Ether) เอทิลอะซิเตท (Ethyl Acetate) อะซิโตน (Acetone) จากการทดลองพบว่าผลผลิตของสารสกัดสีย้อมธรรมชาติที่ใช้เมทานอลความเข้มข้น 10% (v/v) เป็นตัวทำละลาย ให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวทำละลายชนิดอื่น แต่ทั้งนี้เมทานอลถือเป็นสารเคมีอันตราย หากต้องการทำงานวิจัยที่ปลอดภัย เป็นมิตรกับผู้ใช้และสิ่งแวดล้อมอาจจะต้องพิจารณาการใช้ตัวทำละลายชนิดอื่นเพิ่มเติม

Arief et al. (2014) สกัดสารจากใบสักอ่อนด้วยตัวทำละลายเอทานอลความเข้มข้น 96% (v/v) นำสารที่สกัดได้มาใช้เป็นสารถนอมอาหารในไส้กรอกเนื้อวัว โดยสารประกอบที่ถูกนำมาใช้ เช่น Alkaloids, Saponin, Tannin, Phenol, Flavonoid, triterpenoids และ glycosides ซึ่งสามารถยับยั้งแบคทีเรียที่ก่อโรคทางทางเดินอาหาร เช่น *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, และ *Pseudomonas aeruginosa* ได้

Rane S. et al. (2017) สกัดสีจากใบสักสดโดยวิธีการหมัก ขั้นตอนการทดลองใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อัตราส่วนของใบสักต่อตัวทำละลาย คือ 1 : 10 กรัมต่อมิลลิลิตร ใช้เวลาในการสกัด 16 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสกัด 25 °C จากการทดลองพบว่าสารละลายสีที่ได้ คือ สีส้มน้ำตาล โดยสีส้มจะสว่างยิ่งขึ้น ถ้าเติมกรดอะซิติกหรือเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มเมื่อเติมต่างโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) และเมื่อนำสารละลายสีที่ได้ไปย้อมเส้นใยฝ้าย โดยเปรียบเทียบการใส่มอร์แดนต์จากธรรมชาติและสารเคมี พบว่าสีที่ย้อมได้เป็นเฉดสีน้ำตาลทั้งหมด

Rosyida and Suranto (2018) สกัดสีจากใบสักอ่อนโดยวิธีการหมัก และการต้ม ขั้นตอนการทดลองใช้ใบสัก 1 กิโลกรัม ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายปริมาตร 7 ลิตร สำหรับวิธีการหมักใช้เวลาสกัด 12 ชั่วโมง สำหรับวิธีการต้ม ใช้เวลาในการสกัด 15 นาที มีการปรับค่า pH ที่ 5, 7 และ 9 ผลการทดลองพบว่าสารสกัดจะมีสีม่วงถึงสีแดงเมื่อมีค่า pH เท่ากับ 5

Tibkawin, et al. (2019) ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสารสกัดจากใบสักอ่อนและใบสักแก่ในเรื่องลักษณะของเมล็ดโดยใช้วิธีการต้ม ขั้นตอนในการสกัดจะพิจารณาใบสักอ่อนและใบสักแก่ตามอายุของต้นสักและพิจารณาชนิดของตัวทำละลายได้แก่ น้ำ เมทานอลความเข้มข้น 50% (v/v) และ เอทานอลความเข้มข้น 50% (v/v) ใช้อุณหภูมิในการสกัด คือ 60°C อัตราส่วนของใบสักต่อตัวทำละลาย คือ 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร จากการทดลองพบว่า ใบสักอ่อนที่ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายให้ %yield สูงสุดเท่ากับ 22.9% ซึ่งเมล็ดที่ได้ คือสีน้ำตาล และสารสกัดจากใบสักอ่อนให้ %yield สูงกว่าสารสกัดจากใบสักแก่สีของสารละลายที่ได้จากการสกัดใบสักอ่อนแห้งที่ใช้ น้ำ เมทานอลความเข้มข้น 50% (v/v) และ เอทานอลความเข้มข้น 50% (v/v) เป็นตัวทำละลาย คือ สีน้ำตาล เหลือง สีน้ำตาลแดง และสีน้ำตาลแดง ตามลำดับ สีของสารละลายที่ได้จากการสกัดใบสักแก่แห้งที่ใช้ น้ำ เมทานอลความเข้มข้น 50% (v/v) และ เอทานอลความเข้มข้น 50% (v/v) เป็นตัวทำละลาย คือ สีน้ำตาลอ่อน สีน้ำตาลส้ม และสีน้ำตาลเข้ม ตามลำดับ

Asiong et al. (2017) ผลิตผงสีจากใบสักฟิลิปปินส์ (*Tectona philippinensis*) โดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำและทำผงสีด้วยวิธีการ Spray Drying ได้ผลิตภัณฑ์ผงสี 1.10% จากใบ เมื่อนำสีที่ได้ไปย้อมผ้าที่แตกต่างกัน ได้แก่ ผ้า ลินิน ไหม จูติ (ผ้าที่ทอในรูปแบบลายตาข่าย) พบว่าได้สีแตกต่างกันและหากใช้ไอออนโลหะหรือเมอร์แดนท์จับเส้นใยที่แตกต่างกันก็จะได้สีที่แตกต่างกัน

Shailendra et al. (2017) ศึกษาการย้อมสีบนผ้าฝ้าย โดยใช้สารสกัดสีจากใบสักแห้ง การย้อมสีมีการใช้และไม่ใช้เมอร์แดนท์และคุณสมบัติความคงทนของสีของเนื้อผ้าถูกกำหนดด้วยค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงและความเข้มของสี (K/S) ของสีย้อม จากงานวิจัยพบว่า ความคงทนของตัวอย่างสีในการทดสอบการขัดถูในสภาพเปียกนั้นดีมาก แต่มีความคงทนต่อแสงและการซักต่ำมาก มีการใช้สารส้มในการปรับปรุงความคงทนของการซักให้อยู่ในระดับปานกลาง และมีการเติมเกลือเหล็กลงในสารส้มเพื่อช่วยปรับปรุงให้อยู่ในระดับที่ดีขึ้น

Padma et al. (2017) ทำการศึกษาสองส่วนคือในส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและการย้อมสีธรรมชาติบนผ้าไหมและผ้าฝ้าย โดยนำใบสักแห้งแช่ในกรดอะซิติกและน้ำที่ pH 3 - 4 จากนั้นนำไปสกัดด้วยวิธีการต้มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีสำหรับการย้อมจะทำการสกัดสีจากใบสักแห้งโดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยก่อนนำไปย้อมจะถูกเจือจางด้วยน้ำเมอร์แดนท์ที่ใช้คือ Ferrous Sulphate, Alum, Alum-Tartaric Acid, Copper Sulphate, Potassium Dichromate, Stannous Chloride และ Stannic Chloride จากผลการทดลองในส่วนของการย้อมพบว่าสำหรับผ้าฝ้ายผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือการเติมเมอร์แดนท์ก่อนการย้อมด้วย Stannic Chloride และ Alum ในขณะที่ย้อมบนผ้าไหมได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกัน โดยสีที่ได้อยู่ในเฉดสีน้ำตาลและสีเทามีความคงทนต่อแสงและการซัก

Barzola-Miranda1 et al. (2018) ทาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสีแดงจากใบสักแห้ง โดยใช้วิธีการปั่นผิวตบสนองและออกแบบการทดลองโดยใช้บ็อกซ์ - เบห์นเคน (3 ตัวแปร 3 ระดับ) ตัวแปรอิสระที่พิจารณา คือ อุณหภูมิในการสกัด 30 °C ถึง 60 °C ความเข้มข้นของเอทานอล 30 % (v/v) ถึง 90 % (v/v) อัตราส่วนของของแข็งต่อของเหลว 1 : 10 ถึง 1 : 20 กรัมต่อมิลลิลิตร ใช้เวลาในการสกัด 15 นาทีโดยวิธีการต้ม จากงานวิจัยพบว่าตัวแปรอิสระทุกตัวมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ซึ่งได้สภาวะที่เหมาะสมในการสกัด คือ อุณหภูมิในการ

สกัด 54 °C ความเข้มข้นเอทานอล 64 % v/v และอัตราส่วนของของแข็งต่อของเหลว 1:16 กรัมต่อมิลลิลิตร

Qadariyah et al. (2018) สกัดสีจากใบสักแห้งโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก ใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลและน้ำ และใช้คลื่นเสียงความถี่ 40 Hz อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด คือ 60 °C อัตราส่วนของใบสักต่อตัวทำละลาย คือ 1: 200 กรัมต่อมิลลิลิตร ตัวแปรอิสระที่ถูกพิจารณาคือ เวลาในการสกัด และค่า pH จากงานวิจัย พบว่าที่ pH = 3 จะให้สารสกัดสีมากที่สุด และตัวทำละลายที่เป็นน้ำให้สารสกัดสีมากกว่าตัวทำละลายที่เป็นเอทานอล ความเข้มข้น 60% (v/v) โดยเวลาที่เหมาะสมจากการใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำ คือ 20 นาที และจากตัวทำละลายที่เป็นเอทานอล ความเข้มข้น 60% (v/v) คือ 60 นาที และสีที่สกัดได้มีสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ

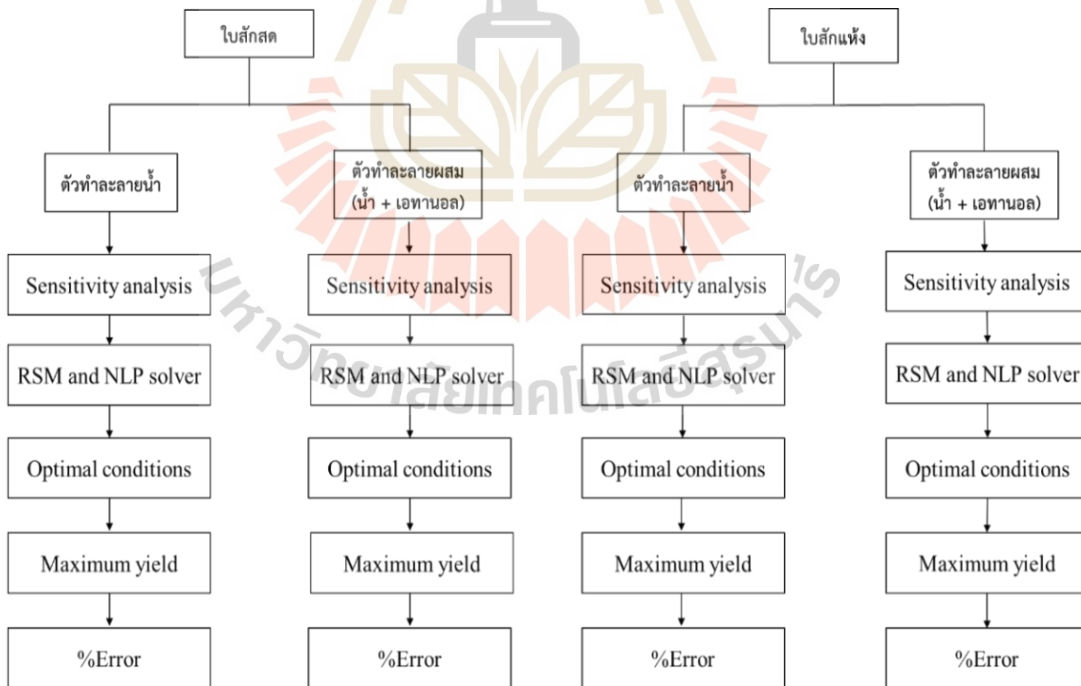
จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักรวมถึงการสกัดสีจากใบสักนั้นสามารถสกัดได้จากทั้งใบสดและใบแห้ง วิธีที่ใช้ในการสกัดส่วนใหญ่คือการหมักและการต้ม ตัวทำละลายที่ใช้ส่วนใหญ่คือ น้ำ เอทานอล และ เมทานอล ตัวแปรที่ถูกนำมาพิจารณาคือ อุณหภูมิในการสกัด ระยะเวลาในการสกัด อัตราส่วนของใบสักต่อตัวทำละลาย ความเข้มข้นของเอทานอล ความเข้มข้นของเมทานอล และค่า pH สีที่สกัดได้มีตั้งแต่สีน้ำตาลส้ม สีสน้ำตาลแดงจนถึงสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่จะสกัดสีเพื่อย้อมผ้าไหมและผ้าฝ้าย ในส่วนของงานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าที่เหมาะสมในการสกัดสีจากใบสักแห้งด้วยวิธีการต้มโดยใช้วิธีการพื้นผิวดูดซับและใช้การออกแบบการทดลองบ็อกซ์ – เบห์นเคน ได้ศึกษาตัวแปรอิสระเพียง 3 ตัว คือ อุณหภูมิในการสกัด ความเข้มข้นของเอทานอล และอัตราส่วนของใบสักต่อตัวทำละลาย และในส่วนของงานวิจัยที่ใช้วิธีการสกัดใบสักแห้งด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ได้ศึกษาตัวแปรอิสระ 2 ตัว คือ เวลาในการสกัดและค่า pH แต่ไม่มีการศึกษาค้นคว้าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพื้นผิวดูดซับ เพราะฉะนั้นจากงานวิจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องผู้ทำงานวิจัยจึงสนใจศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและใช้วิธีการพื้นผิวดูดซับ ทำการสกัดจากใบสักสดและใบสักแห้ง ใช้น้ำและตัวทำละลายผสม (น้ำและเอทานอล) เมื่อคำนึงถึงความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานจึงไม่ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยตัวแปรอิสระที่นำมาพิจารณาคือ อัตราส่วนของใบสักต่อตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด เวลาในการสกัด ความเข้มข้นของเอทานอล และค่า pH

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้ง โดยใช้ตัวทำละลาย เป็นน้ำและตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล โดยใช้วิธีการสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก การทดลองทั้งหมดแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ซึ่งขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตาม เพื่อกำหนดเป็นตัวแปรอิสระสำหรับการหาค่าสถานะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักในงานวิจัยนี้ จากนั้นใช้วิธีการพันผิวตอบสนอง และตัวแก้ปัญหแบบไม่เชิงเส้น เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติ (Optimal Condition) ให้ได้ปริมาณสูงสุด (Maximum Yield) จากนั้นนำผลที่ได้จากการทำนายมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในสถานะจริง เพื่อหาความคลาดเคลื่อน (% Error) สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยภาพรวมการทดลองทั้งหมดแสดงดังแผนผังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองทั้งหมด

3.2 การเลือกตัวทำละลาย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการสกัดสารธรรมชาติและต้องการใช้ตัวทำละลายที่ปลอดภัยและเป็นมิตรกับผู้ใช้ โดยตัวทำละลายที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ น้ำและตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล

3.3 สารเคมีและเครื่องมือ

3.3.1 วัสดุและสารเคมี

- 1) ใบสักสด (Fresh Leaves) และใบสักแห้ง (Dried Leaves)
- 2) น้ำ DI (Deionization Water)
- 3) เอทานอล (Ethanol Absolute, C_2H_5OH)
- 4) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)
- 5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH)

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

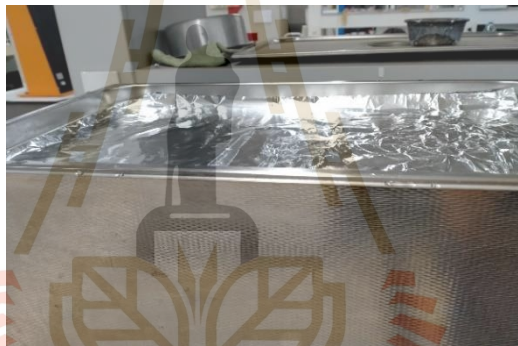
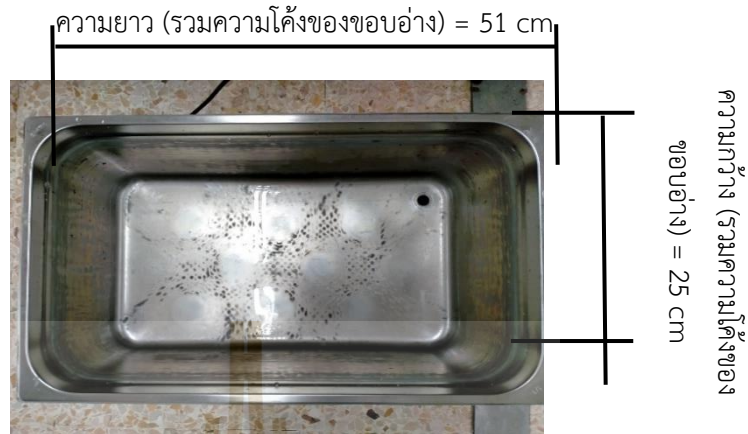
- 1) อ่างล้างทำความสะอาดคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner Bath) ความถี่ 40kHz ปริมาตร 20 ลิตร
- 2) เครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ (Rotary Evaporator)
- 3) เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze Dryer)
- 4) ตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศ (Vacuum Oven)
- 5) บั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)
- 6) เครื่องกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum Filter)
- 7) เครื่องบดไฟฟ้า (Blender) และตะแกรงร่อน (Sieve Mesh) ขนาด 2.36 mm
- 8) ตู้อบ (Oven)
- 9) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 10) หลอดเซนตริฟิวก์พลาสติก (Centrifuge Tube)
- 11) กระดาษกรองเบอร์ 5 (Filter Papers) และเทอร์มอมิเตอร์ (Thermometer)
- 12) ถุงซิปล็อค (Zip Lock Bag) และอุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ

3.4 การหาตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุดในอ่างล้างความถี่สูง

ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุด สามารถหาได้จากวิธีอย่างง่ายคือการทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) วัดขนาดความกว้าง ความยาวของอ่าง
- 2) ตัดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ให้ได้ขนาดพอดีกับอ่าง
- 3) วางแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ในอ่างที่เติมน้ำแล้ว
- 4) เปิดเครื่องให้สั่นโดยไม่ต้องตั้งอุณหภูมิ ตั้งเวลาในการทดสอบ 15 นาที

- 5) เมื่อครบกำหนดนำแผ่นพอยล์มาวัดบริเวณที่เกิดรูพรุนมากที่สุด จากนั้นทำเครื่องหมายกำหนดตำแหน่งในอ่างล้างความถี่สูง



รูปที่ 3.2 การทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมพอยล์

3.5 การทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้ง โดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำและตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล

3.5.1 การเตรียมใบสัก

ใบสักที่เก็บได้ถูกนำมาทำความสะอาดและบดด้วยเครื่องบดไฟฟ้าและแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 2.36 mm (ความชื้นประมาณ 73%) สำหรับกรณีใบสักแห้งจะถูกนำไปอบด้วยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ความชื้นประมาณ 3%) ก่อนนำไปจัดเก็บ

3.5.2 วิธีการทดลอง

3.5.2.1 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้ง

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้งเป็นการศึกษาผลของตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตามในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณของใบสักที่ใช้ สำหรับกรณีที่ใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ ตัวแปรอิสระที่นำมาวิเคราะห์ความอ่อนไหวคือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก อุณหภูมิในการสกัด เวลาในการสกัด และค่า pH ส่วนในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายผสมจะมีตัวแปรอิสระเพิ่มเติม คือ ความเข้มข้นของ เอทานอล โดยกำหนดกรณีฐาน (Base Case) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวและช่วงของตัวแปรอิสระที่ปรับขึ้น-ลงจากกรณีฐาน (Variation percentage, %) สำหรับกรณีที่ใช้ น้ำ เป็นตัวทำละลายแสดงดังตารางที่ 3.1 และในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายผสมค่ากลางและช่วงของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่ปรับขึ้น-ลงจากค่ากลางแสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายผสมค่ากลางของอุณหภูมิในการสกัดจะแตกต่างจากกรณีที่ใช้ น้ำ เป็นตัวทำละลายเนื่องจากต้องการศึกษาช่วงของอุณหภูมิที่ไม่สูงเกินค่าจุดเดือดของเอทานอล และค่ากลางของค่า pH จะปรับลงเพื่อศึกษาเฉพาะช่วงของความเข้มข้นกรด

โดยกำหนดให้	อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก	:	x ₁
	อุณหภูมิในการสกัด	:	x ₂
	เวลาในการสกัด	:	x ₃
	ค่า pH	:	x ₄
	ความเข้มข้นของเอทานอล	:	x ₅

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้งกรณีใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

ตัวแปรอิสระ	กรณีฐาน	ช่วงของตัวแปรอิสระ (%)
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1), ml/g	10 : 1	± 50, ±100
อุณหภูมิในการสกัด (x_2), ° C	60	± 8.3, ±16.67
เวลาในการสกัด (x_3), นาที	30	± 33, ±66
ค่า pH (x_4)	6	± 33, ±66

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสด และใบสักแห้งกรณีใช้ตัวทำละลายผสม

ตัวแปรอิสระ	กรณีฐาน	ช่วงของตัวแปรอิสระ (%)
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1), ml/g	15 : 1	$\pm 33, \pm 66$
อุณหภูมิในการสกัด (x_2), ° C	50	$\pm 10, \pm 20$
เวลาในการสกัด (x_3), นาที	30	$\pm 33, \pm 66$
ค่า pH (x_4)	4	$\pm 25, \pm 50$
ความเข้มข้นของเอทานอล (x_5), % v/v	60	$\pm 16.67, \pm 50$

3.5.2.2 ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้งกรณีตัวทำละลายน้ำ

1) นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ใส่ในขวดรูปชมพู่ จากนั้นทำการทดลองที่สภาวะการทดลองที่ถูกรอกแบบไว้ นำขวดตัวอย่างไปวางในอ่างที่ความถี่ 40 kHz โดยสารสกัดจากใบสักที่ได้จะเป็นแบบหยาบซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารสกัดและกากของวัตถุดิบ

2) นำมารองแยกสารสกัดและกากออกจากกัน โดยกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 ด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศจากนั้นนำไปแยกน้ำออกโดยการทำให้แบบแช่เยือกแข็ง ขั้นตอนการสกัดแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้งกรณีตัวทำละลายน้ำ

3.5.2.3 ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้งกรณีตัวทำละลายผสม

1) นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ใส่ในขวดรูปชมพู่ จากนั้นทำการทดลองที่สถานะการทดลองที่ถูกออกแบบไว้ นำขวดตัวอย่างไปวางในอ่างที่ความถี่ 40 kHz โดยสารสกัดจากใบสักที่ได้จะเป็นแบบหยابซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารสกัดและกากของวัตถุดิบ

2) นำมากรองแยกสารสกัดและกากออกจากกัน โดยกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 ด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ

3) แยกเอทานอลออกโดยนำไประเหยด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศจากนั้นนำไปทำแห้งด้วยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศ ขั้นตอนการสกัดแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้งกรณีตัวทำละลายผสม

3.5.3 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

Freeze drying หมายถึงการทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง โดยทำให้น้ำซึ่งเป็นของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งที่เป็นผลึกน้ำแข็งเล็ก ๆ ก่อน จากนั้นจะทำการลดความดันสภาพแวดล้อมให้ต่ำกว่าบรรยากาศปกติ เพื่อให้ผลึกน้ำแข็งสามารถ ระเหิด (Sublimation) กลายเป็นไอ โดยภายใต้อุณหภูมิเท่ากับหรือต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสจะทำให้ น้ำแข็งเกิดการระเหิดที่ความดัน 4.7 มิลลิเมตรปรอทหรือต่ำกว่า ขั้นตอนในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มีดังนี้

- 1) นำสารสกัดจากใบสักที่ได้หลังการกรองใส่ในหลอดทดลองเซนตริฟิวจ์พลาสติก ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
- 2) นำไปแช่แข็งที่ตู้แช่ -25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้สารสกัดกลายเป็นผลึกของแข็ง
- 3) นำหลอดทดลองที่เป็นผลึกของแข็งเข้าเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็งเป็นเวลา 36 ชั่วโมง

3.5.4 การแยกเอทานอลออกจากสารสกัดเมื่อใช้ตัวทำละลายผสมด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ

Rotary evaporator เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการระเหยสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว โดยการกลั่นเพื่อแยกตัวทำละลายที่ผสมอยู่ออกจากสารที่สนใจ ทำให้สารที่สนใจมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยตัวทำละลายที่ต้องการแยกจะถูกทำให้กลายเป็นไอด้วยระบบสุญญากาศจากปั๊ม และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเพื่อทำให้กลายเป็นไอง่ายขึ้น จากนั้นไอของตัวทำละลายจะผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) ที่มีระบบหล่อเย็น ทำให้ไอของตัวทำละลายกลายเป็นของเหลว ไหลลงภาชนะรองรับ (Receiving flask) ขั้นตอนแยกเอทานอลของการทดลอง มีดังนี้

- 1) นำสารสกัดจากใบสักที่ได้หลังจากการกรองทั้งหมดไปชั่งน้ำหนัก ก่อนนำไประเหยเอทานอลด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ
- 2) ทำการกลั่นแยกเอทานอลจนไม่พบว่ามีหยดของเหลวของเอทานอลที่เกิดจากการควบแน่นไหลลงมายังภาชนะรองรับ
- 3) นำสารสกัดที่ได้หลังจากการแยกเอทานอลแล้วไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง
- 4) จากนั้นนำไปทำแห้งด้วยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศต่อไป

3.5.5 การทำแห้งด้วยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศ

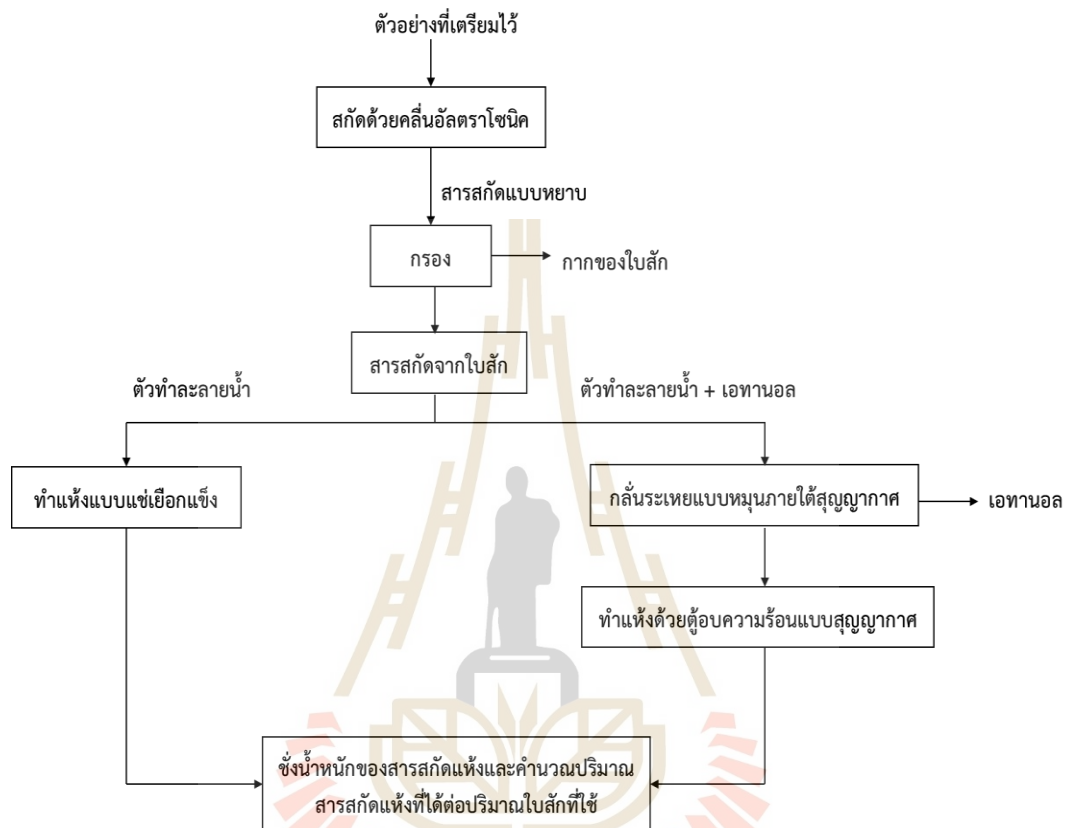
Vacuum oven เป็นเครื่องมือสำหรับการทำแห้งที่ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ซึ่งจุดเดือดของตัวทำละลายจะขึ้นอยู่กับระดับความเป็นสุญญากาศ เพราะฉะนั้นการทำแห้งด้วยวิธีนี้จะช่วยป้องกันความเสียหายของสารสกัดจากการใช้อุณหภูมิสูงๆได้ เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ใช้ตัวทำละลายผสมจึงไม่สามารถใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เนื่องจากอาจมีการหลงเหลือของเอทานอลในสารสกัดจากขั้นตอนการระเหย เพื่อป้องกันการปนเปื้อนในอุปกรณ์จึงใช้วิธีการทำแห้งด้วยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศ โดยขั้นตอนในการทำแห้ง มีดังนี้

- 1) เตรียมถ้วยอลูมิเนียมฟอยล์และชั่งน้ำหนัก
- 2) นำสารสกัดจากใบสักที่ได้หลังการระเหย ตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมฟอยล์ที่เตรียมไว้
- 3) ชั่งน้ำหนักสารสกัดตัวอย่างพร้อมกับถ้วยอลูมิเนียมฟอยล์
- 4) นำเข้าตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 45 °C ความดัน -0.02 MPa เป็นเวลา 28 ชั่วโมง

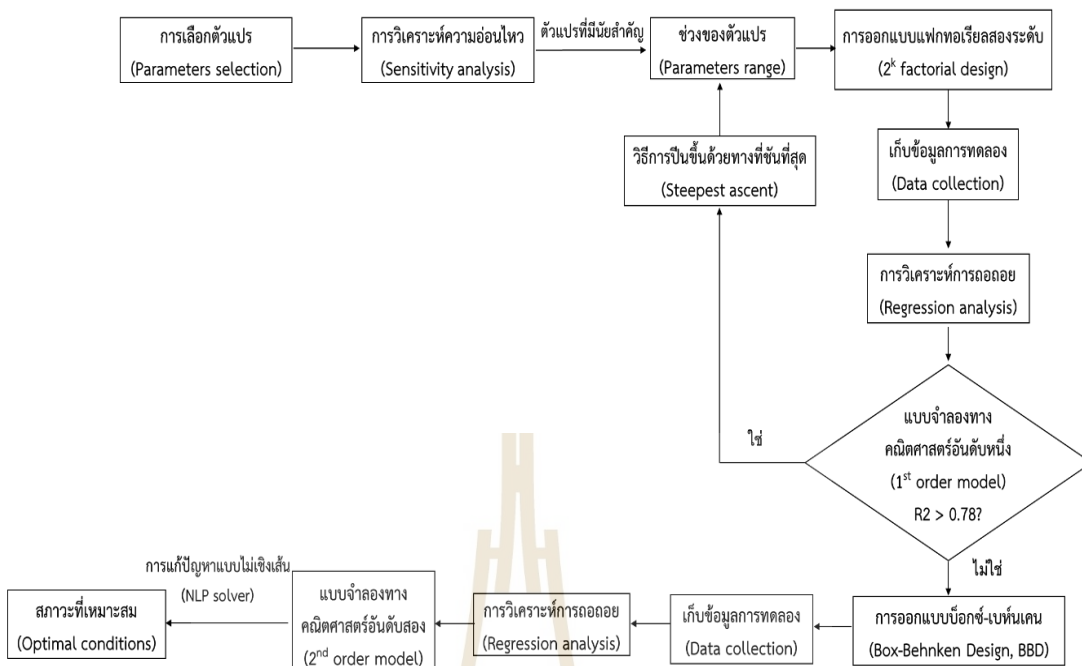
3.6 การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใบสักแห้ง

เริ่มต้นด้วยการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ในกรณีที่ใช้ น้ำ เป็นตัวทำละลาย ตัวแปรอิสระที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (x_2) ระยะเวลาในการสกัด (x_3) และค่า pH (x_4) สำหรับกรณีที่ใช้ตัวทำละลายผสม (น้ำและเอทานอล) จะพิจารณาตัวแปรอิสระเพิ่มเติม คือ ความเข้มข้นของเอทานอล (x_5) จากนั้นทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระ เพื่อกำหนดตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ จากนั้นเมื่อได้ช่วงของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับ เพื่อใช้เป็นแบบการทดลองสำหรับสร้างชุดข้อมูลของสภาวะการทดลองที่ต้องการศึกษา จากนั้นเก็บข้อมูลการทดลอง (Data Collection) โดยข้อมูลที่ถูกรวบรวมจะได้อาจมาจากระดับของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสัก ซึ่งมีขั้นตอนในการสกัดคือ นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ที่สภาวะต่างๆที่ได้จากการออกแบบการทดลองไปสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค จากนั้นสารสกัดแบบหยาบที่สกัดได้จะถูกกรองแยกกากออกด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ซึ่งสารสกัดที่ได้จากตัวทำละลายที่เป็นน้ำจะถูกนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ในขณะที่เดียวกันสารสกัดที่ได้จากตัวทำละลายผสมจะถูกนำไปแยกเอทานอลด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ ก่อนนำไปทำแห้งโดยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศ จากนั้นชั่งน้ำหนักของตัวอย่างสารสกัดแห้งและคำนวณปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณของใบสักที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อเก็บข้อมูลการทดลองครบถ้วน ชุดข้อมูลนี้จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์การถดถอยของสภาวะการทดลองและผลของสารสกัดธรรมชาติเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง (1st order model) โดยที่ค่า R^2 เป็นค่าที่บ่งบอกความกลมกลืนของข้อมูลกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงเปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนที่ตัวแปรอิสระทั้งหมดในสมการมีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม ซึ่งค่านี้จะถูกใช้เป็นเกณฑ์การปรับข้อมูล หากค่า R^2 สูงกว่า 0.78 ซึ่งหมายความว่าข้อมูลเหมาะกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง วิธีการป้อนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด จะถูกใช้เพื่อหาสภาวะการทดลองไปยังพื้นที่ที่มีปริมาณของสารสกัดที่สูงขึ้นจะทำจนกระทั่งไม่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณของสารสกัดอีก หาก R^2 ต่ำกว่า 0.78 จะใช้การออกแบบบล็อกซ์ - เบห์นเคน เพื่อออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูลการทดลองซึ่งได้มาจากขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสำหรับสร้างชุดข้อมูลและทำการวิเคราะห์การถดถอยอีกครั้งเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง (2nd order model) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการทดลองและผลผลิตของสารสกัดที่ได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ถูกใช้เป็น

ฟังก์ชันในการหาสถานะที่เหมาะสมด้วยการแก้ปัญหาแบบไม่เชิง โดยใช้ Microsoft Excel Solver เพื่อแก้สมการทางคณิตศาสตร์อันดับสองเพื่อให้ได้สถานะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุด แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสำหรับเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนการหาค่าสภาวะที่เหมาะสม

3.6.1 การคำนวณปริมาณสารสกัดจากใบสัก

ผลผลิตสารสกัดแห้งทั้งหมดที่สกัดได้แสดงในรูป % Yield สามารถคำนวณได้จาก (Norul Azilah Abdul Rahman et al, 2013)

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ทั้งหมด (กรัม)}}{\text{ปริมาณใบสักสดหรือใบสักแห้งที่ใช้ (กรัม)}} \times 100$$

บทที่ 4

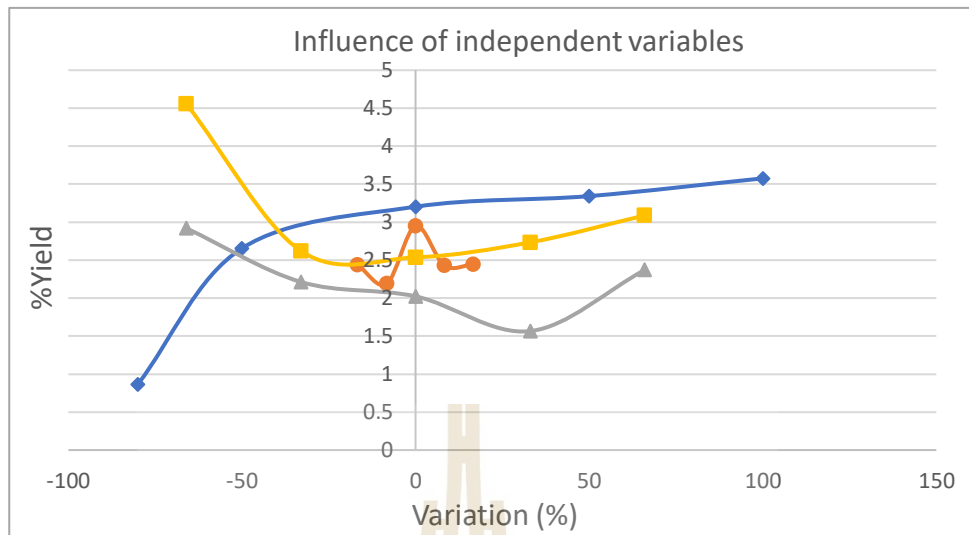
ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักทองโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกและใช้วิธีการฟื้นผิวตอบสนอง โดยทำการทดลองสกัดจากใบสักสดและใบสักแห้ง ตัวทำละลายที่ใช้ คือ น้ำและตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล ศึกษาผลของตัวแปรอิสระด้วยวิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหว และใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์ – เบห์นเคน นำเสนอผลการทดลองในรูปแบบจำลอง และใช้ตัวแก้ปัญหาลำดับไม่เชิงเส้นเพื่อหาสภาวะการสกัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงที่สุด

4.2 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวตัวของแปรอิสระในการสกัดเมื่อใช้ตัวทำละลายน้ำ

เมื่อนำช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (Variation (%)) พล็อตกราฟกับ % Yield ซึ่งคือปริมาณของสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ เพื่อดูแนวโน้มความมีนัยสำคัญของตัวแปรอิสระต่อ %Yield พบว่า ตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญมี 3 ตัว คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) โดยพบว่ากราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงช่วงของตัวแปรอิสระที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาในการสกัด (x_3) และ pH (x_4) กราฟมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงช่วงของตัวแปรอิสระที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า %Yield มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระเหล่านี้ แต่ในขณะที่กราฟของอุณหภูมิในการสกัด (x_2) มีแนวโน้มขนานกับช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระ นั่นคือ %Yield มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อช่วงของตัวแปรอิสระเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า %Yield ไม่มีความอ่อนไหวอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิในการสกัด แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของตัวแปรอิสระ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1)
 อุณหภูมิในการสกัด (x_2) เวลาในการสกัด (x_3)
 ค่า pH (x_4)

4.2.1 ผลการทดลองการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ

ตัวแปรอิสระและช่วงสภาวะการทดลองที่มีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวถูกนำมาทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ โดยมี 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก เวลาในการสกัด และค่า pH

4.2.1.1 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ

การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับถูกใช้เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง โดยกำหนดค่าอุณหภูมิในการสกัดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลอง ที่ 60 °C และกำหนดสัญลักษณ์ของตัวแปรอิสระใหม่ โดยให้เวลาในการสกัดเป็น x_2 และค่า pH เป็น x_3 ค่าตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองพิจารณาจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยจะเลือกจากช่วงที่มีความอ่อนไหวของ %Yield มากที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ระดับของตัวแปร		
		-1	0	1
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	2 : 1	10 : 1	20 : 1
เวลาในการสกัด (นาท)	x_2	10	30	50
ค่า pH	x_3	2	6	10

จากการเก็บข้อมูลโดยใช้การออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ กำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง เพื่อศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้งจากผลการทดลองทำการวิเคราะห์การถดถอย โดย y คือตัวแปรตามในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Regression) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง แสดงในสมการที่ (1) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.8893 และ R^2_{adj} เป็น 0.8419

$$y = 3.1213 + 1.0797x_1 - 0.0120x_2 - 0.5757x_3 \quad (1)$$

เพื่อหาช่วงค่าที่เหมาะสมของตัวแปรสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับ จึงต้องใช้วิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุดในการหาช่วงค่าที่เหมาะสมช่วงใหม่ของตัวแปร

4.2.1.2 ผลของการหาค่าสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด

สมการการถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งที่แสดงในสมการที่ (1) ถูกใช้เพื่อคำนวณหาการเพิ่มขึ้นของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระในการทดลองโดยค่าที่เหมาะสมที่พบแสดงในตารางที่ 4.2 ค่าสถานะการทดลองนี้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระที่ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับอีกครั้งเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งโดยช่วงของสถานะการทดลองใหม่ของแต่ละตัวแปรอิสระแสดงในตารางที่ 4.3

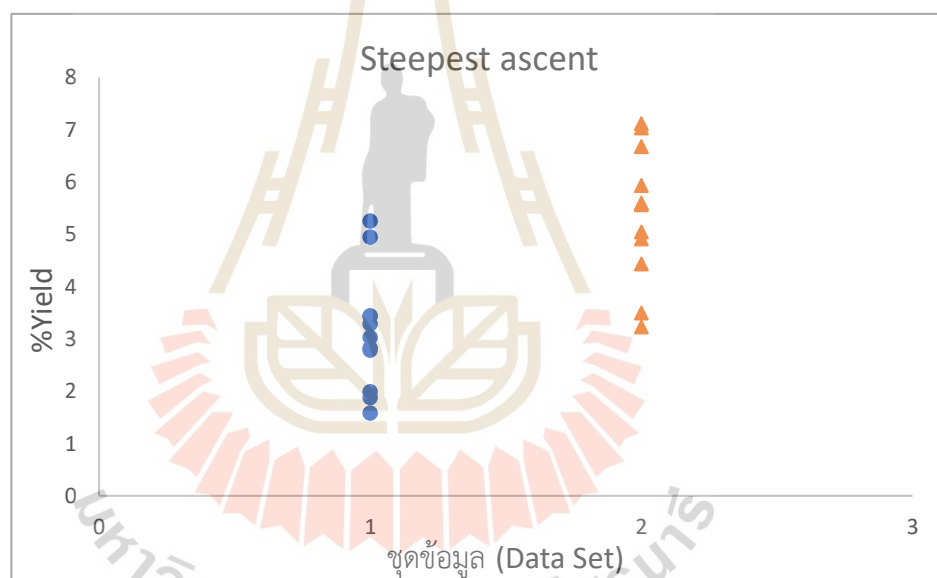
ตารางที่ 4.2 ค่าสถานะที่เหมาะสมจากวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ค่าสถานะการทดลอง
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	20 : 1
เวลาในการสกัด (นาท)	x_2	32
ค่า pH	x_3	2

ตารางที่ 4.3 ค่าของตัวแปรอิสระใหม่สำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ระดับของตัวแปร		
		-1	0	1
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	6 : 1	20 : 1	34 : 1
เวลาในการสกัด (นาท)	x_2	15	32	57
ค่า pH	x_3	2	6	10

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูล (Data Set) กับ %Yield ก่อนและหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยที่ %Yield คือ ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield ● ชุดข้อมูลก่อนทำ Steepest ascent ▲ ชุดข้อมูลหลังทำ Steepest ascent (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield พบว่าชุดข้อมูลหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด มี %Yield ที่เพิ่มขึ้นจากชุดข้อมูลก่อนใช้ นั่นคือสามารถพบช่วงของสภาวะการทดลองของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมช่วงใหม่เพื่อทำให้ %Yield มีค่าสูงสุด โดยที่ชุดข้อมูลหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุดมีการเปลี่ยนแปลงช่วงสภาวะการทดลองของตัวแปรอิสระ คือ เพิ่มช่วงของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักและเพิ่มช่วงของระยะเวลาในการสกัด ในขณะที่ใช้ช่วง

ของค่า pH เท่าเดิม ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายก็จะส่งผลให้สามารถสกัดสารธรรมชาติได้ปริมาณมากขึ้น

เมื่อนำชุดข้อมูลที่ได้จากการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ขั้นที่สุด สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้งไม่เป็นแบบเชิงเส้น ช่วงของตัวแปรนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ บ็อกซ์ – เบห์นเคน (BBD) สำหรับเก็บข้อมูลการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง

4.2.1.3 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน

การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน ถูกใช้เพื่อเก็บข้อมูลการทดลองสำหรับการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองเพื่อใช้เป็นฟังก์ชันสำหรับกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ โดยช่วงของตัวแปรอิสระใหม่จากตารางที่ 4.3 จะถูกนำมาใช้กับการทดลองในส่วนนี้

โดยจากผลการวิเคราะห์ชุดข้อมูลและความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ สามารถแสดงผลในรูปของการวิเคราะห์การถดถอย แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	4.5946	0.2007	22.8887	2.96E-06
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1)	0.8693	0.1229	7.0716	8.75E-04
เวลาในการสกัด (x_2)	0.2555	0.1229	2.0784	9.23E-02
ค่า pH (x_3)	-0.8138	0.1229	-6.6198	1.18E-03
x_1^2	-0.2717	0.1809	-1.5018	1.93E-01
x_2^2	0.2457	0.1809	1.3580	2.33E-01
x_3^2	1.1959	0.1809	6.6092	1.19E-03
x_1x_2	-0.1620	0.1738	-0.9320	3.94E-01
x_1x_3	0.2228	0.1738	1.2813	2.56E-01
x_2x_3	0.2499	0.1738	1.4375	2.10E-01

จากตารางแสดงผลการวิเคราะห์การถดถอยกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง พบว่ามีตัวแปรอิสระที่มีผลกระทบหลัก ๆ ต่อ %Yield อยู่ 2 ตัว คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) และ ค่า pH (x_3) และมีหนึ่งเทอมของผลกระทบตัวแปรพร้อมที่เป็น ผลกระทบร่วมของตัวแปรบริสุทธิ์ (Pure Interaction) ของค่า pH (x_3^2) ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาตัวแปรและตัวแปรพร้อมอื่น ๆ ที่มีนัยสำคัญของแบบจำลองที่ถูกลดรูป (Reduced Model) นี้คือค่า p - value ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 ผลกระทบตัวแปรอิสระที่ไม่มีนัยสำคัญจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในสมการการถดถอย (Regression Equation) โดยในแบบจำลองนี้จะเก็บตัวแปรอิสระหลักไว้คือ เวลาในการสกัด (x_2) เพราะฉะนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูป (Reduced Second Order Model)

แสดงในสมการที่ (2) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.9104 และ R^2_{adj} เป็น 0.8746 โดย y คือตัวแปรตาม ในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้

$$y = 4.5797 + 0.8693x_1 + 0.2555x_2 - 0.8138x_3 + 1.1977x_3^2 \quad (2)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปนี้ จะพบว่า y จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า pH ลดลง ซึ่งระยะเวลาในการสกัดไม่ค่อยมีนัยสำคัญต่อค่า y

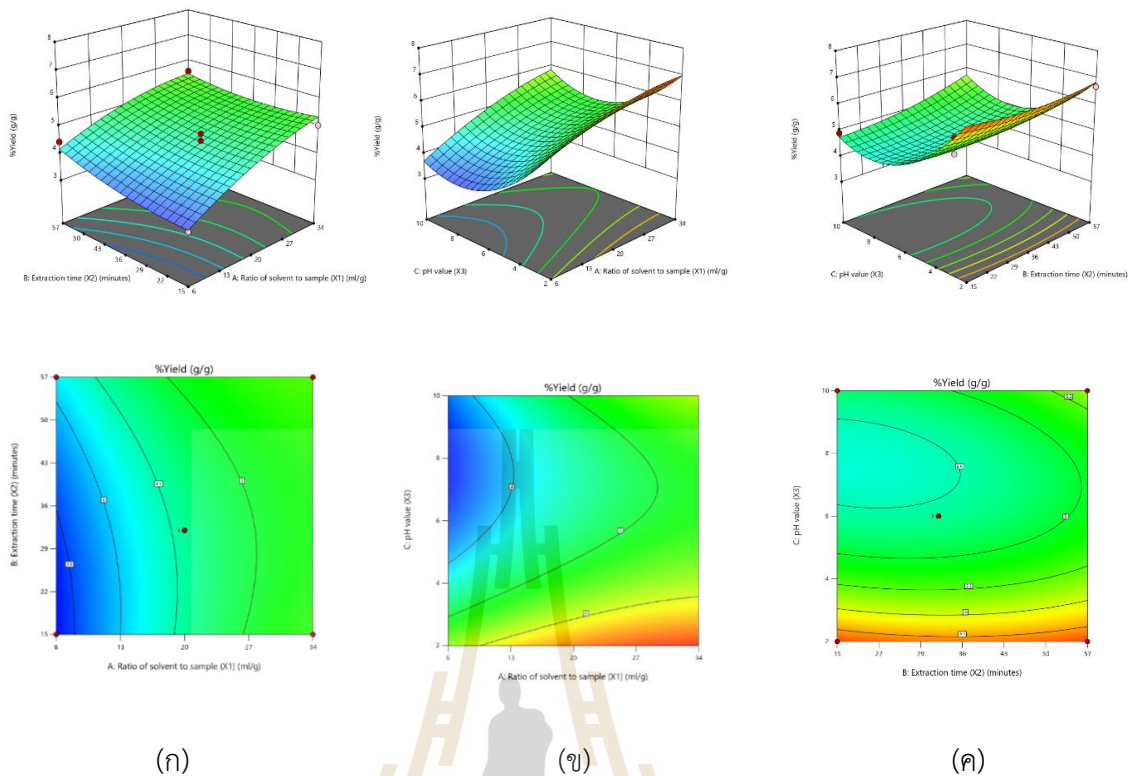
4.2.1.4 ผลการทดลองสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปในสมการที่ (2) ถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติ โดยการใช้การแก้ปัญหาแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น และหาค่าสถานะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงที่สุด โดยใช้คำสั่ง Solver ใน Microsoft excel ซึ่งตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงสถานะการสกัดที่ดีที่สุดและปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงที่สุดที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง และที่ได้จากการทำการทดลองจริง พบว่ามีคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 7.4% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธีการพื้นผิวตอบสนองและการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นสามารถนำไปใช้กับการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

ตารางที่ 4.5 สถานะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ

ตัวแปรอิสระ	สถานะที่เหมาะสม
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	34 : 1
เวลาในการสกัด (นาที)	57
ค่า pH	2
ปริมาณสารสกัดแห้งสูงสุดจากการทำนาย (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักเปียก)	7.72
ปริมาณสารสกัดแห้งสูงสุดจริงที่ได้ (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักเปียก)	8.33

โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ %Yield สามารถแสดงในรูปพื้นผิวสามมิติ (3D Surface Plot) และเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละคู่ตัวแปรอิสระ พบว่าค่าสถานะการทดลองที่เหมาะสมที่ได้จากกราฟใกล้เคียงกับค่าที่แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งได้จากการแก้ปัญหาแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น



รูปที่ 4.3 (ก) 3D surface plot และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับเวลาในการสกัด (x_2) ต่อ %Yield (ข) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับค่า pH (x_3) ต่อ %Yield (ค) 3D surface และContour plot ของเวลาในการสกัด (x_2) กับค่า pH (x_3) ต่อ %Yield (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ)

4.2.2 ผลการทดลองการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ

ตัวแปรอิสระที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวถูกนำมาทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ โดยมีตัวแปรอิสระที่ถูกนำมาพิจารณา 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก เวลาในการสกัด และค่า pH

4.2.2.1 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ

กำหนดอุณหภูมิในการสกัดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลอง ที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระจากการทดลองในส่วนของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์ช่วงของการทดลองใหม่ที่ใช้สำหรับการทดลองในส่วนนี้ โดยค่าสภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ระดับของตัวแปร		
		-1	0	1
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	20 : 1	30 : 1	40 : 1
เวลาในการสกัด (นาที)	x_2	10	20	30
ค่า pH	x_3	2	3	4

จากการเก็บข้อมูลโดยใช้การออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับและทำการวิเคราะห์การถดถอย กำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง เพื่อศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ โดย y คือตัวแปรตามในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นเนื่องจากค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.78 โดยสมการการถดถอยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง แสดงในสมการที่ (3) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.7866 และ R^2_{adj} เป็น 0.6952

$$y = 18.1108 + 0.3019x_1 - 1.2756x_2 - 5.8961x_3 \quad (3)$$

เพื่อหาช่วงค่าที่เหมาะสมของตัวแปรสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง จึงต้องใช้วิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด ในการหาช่วงค่าที่เหมาะสมช่วงใหม่ของตัวแปร

4.2.2.2 ผลของการหาค่าสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด

สมการการถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง ที่แสดงในสมการที่ (3) ถูกใช้เพื่อคำนวณหาการเพิ่มขึ้นของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระใหม่ในการทดลอง โดยค่าที่เหมาะสมที่พบแสดงในตารางที่ 4.7 ค่าสถานะการทดลองนี้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระที่ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับอีกครั้งเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งโดยช่วงของสถานะการทดลองใหม่ของแต่ละตัวแปรอิสระแสดงในตารางที่ 4.8

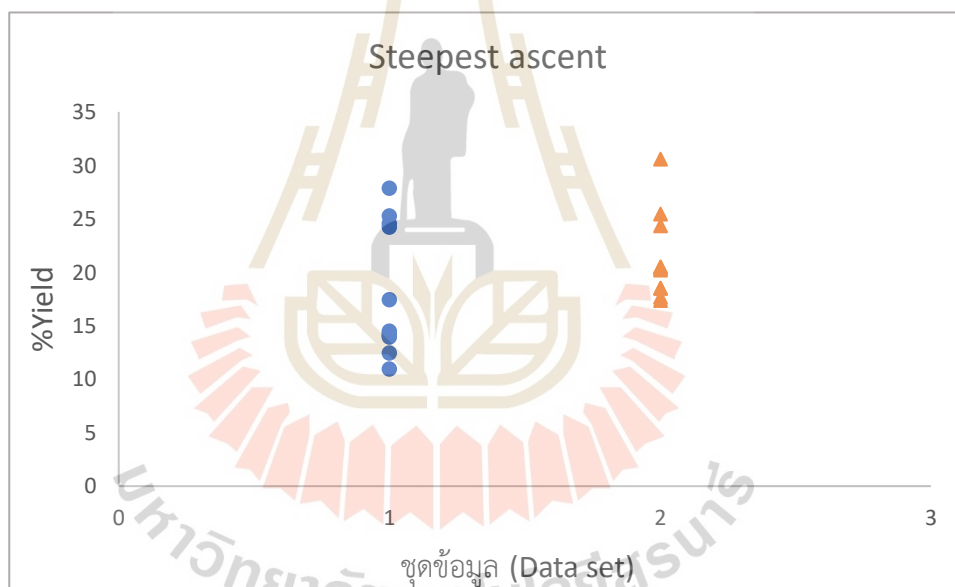
ตารางที่ 4.7 ค่าสถานะที่เหมาะสมจากวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ค่าสถานะการทดลอง
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	31 : 1
เวลาในการสกัด (นาที)	x_2	16
ค่า pH	x_3	1

ตารางที่ 4.8 ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ระดับของตัวแปร		
		-1	0	1
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	25 : 1	30 : 1	35 : 1
เวลาในการสกัด (นาที)	x_2	10	15	20
ค่า pH	x_3	1	2	3

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield ก่อนและหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยที่ %Yield คือ ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield ● ชุดข้อมูลก่อนทำ Steepest ascent ▲ ชุดข้อมูลหลังทำ Steepest ascent (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield พบว่าชุดข้อมูลหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด มีช่วงของ %Yield ที่เพิ่มขึ้นจากชุดข้อมูลก่อนทำ นั่นคือสามารถพบช่วงของสภาวะการทดลองของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมช่วงใหม่เพื่อทำให้ %Yield มีค่าสูงสุด โดยที่ชุดข้อมูลหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด มีการเปลี่ยนแปลงช่วงสภาวะการทดลองของตัวแปรอิสระ คือลดช่วงของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักและระยะเวลาในการสกัด และปรับค่า pH ลง โดยที่ค่า pH อาจมีนัยสำคัญต่อ %Yield มากกว่าอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักและระยะเวลาใน

การสกัด เพราะฉะนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสีก และที่ระยะเวลาในการสกัดมากขึ้น %Yield ลดลงอาจเป็นเพราะที่ช่วงเวลาเริ่มต้นในการสกัดอาจมีตัวถูกละลายอยู่ในบริเวณชั้นนอกของอนุภาคของพืชมากกว่าตัวทำละลายสามารถสัมผัสได้ง่ายกว่าส่วนภายในเนื้อเยื่อของพืช (Surasak Hemwimol et al., 2006) จึงทำให้ %Yield มีปริมาณมากในช่วงระยะเวลาแรกๆในการสกัด

เมื่อนำชุดข้อมูลที่ได้จากการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับหลังทำวิธีการปั่นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุดสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง โดย y คือตัวแปรตาม ในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสีกที่ใช้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามไม่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งดูจากสมการการถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง แสดงในสมการที่ (4) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.7470 และ R^2_{adj} เป็น 0.6386

$$y = 21.2603 + 0.0979x_1 + 1.4378x_2 - 3.5831x_3 \quad (4)$$

ดังนั้นช่วงของตัวแปรอิสระนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน สำหรับเก็บข้อมูลการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง

4.2.2.3 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน

สภาวะการทดลองของตัวแปรอิสระในตารางที่ 4.8 ถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองเพื่อใช้เป็นฟังก์ชันสำหรับกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ

โดยจากผลการวิเคราะห์ชุดข้อมูลและความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสีกที่ใช้ สามารถแสดงผลในรูปของการวิเคราะห์การถดถอย แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสีกแห้งที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	22.8167	0.3202	71.2517	1.03E-08
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อใบสีก (x_1)	0.9105	0.1961	4.6433	5.62E-03
เวลาในการสกัด (x_2)	-0.0197	0.1961	-0.1003	9.24E-01
ค่า pH (x_3)	-4.3709	0.1961	-22.2895	3.38E-06
x_1^2	0.2240	0.2886	0.7760	4.73E-01
x_2^2	0.8979	0.2886	3.1108	2.65E-02
x_3^2	1.2303	0.2886	4.2624	8.00E-03
x_1x_2	0.8979	0.2773	3.2377	2.30E-02
x_1x_3	0.6653	0.2773	2.3989	6.17E-02
x_2x_3	0.1685	0.2773	0.6074	5.70E-01

จากตารางแสดงผล พบว่าตัวแปรอิสระที่มีผลกระทบหลัก ๆ ต่อ %Yield คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) ค่า pH (x_3) ผลกระทบร่วมของตัวแปรบริสุทธิ์ คือ เวลาในการสกัด (x_2^2) ผลกระทบร่วมของตัวแปรบริสุทธิ์ ค่า pH (x_3^2) และผลกระทบตัวแปรร่วมของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักกับเวลาในการสกัด (x_1x_2) ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาตัวแปรและตัวแปรร่วมอื่น ๆ ที่มีนัยสำคัญของแบบจำลองที่ถูกลดรูป นี้คือค่า p - value ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 ผลกระทบตัวแปรอิสระที่ไม่มีนัยสำคัญจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในสมการการถดถอย เพราะฉะนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูป แสดงในสมการที่ (5) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.9793 และ R^2_{adj} เป็น 0.9637 โดย y คือตัวแปรตาม ในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้

$$y = 22.9546 + 0.9105x_1 - 0.0197x_2 - 4.3709x_3 + 0.8807x_2^2 + 1.2131x_3^2 + 0.8979x_1x_2 \quad (5)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปนี้ พบว่า y จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักเพิ่มขึ้น ซึ่งระยะเวลาในการสกัดและค่า pH ลดลง โดยที่ค่า pH มีนัยสำคัญต่อค่า y มากกว่าอัตราส่วนของตัวทำละลายและระยะเวลาในการสกัด

4.2.2.4 ผลการทดลองสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด

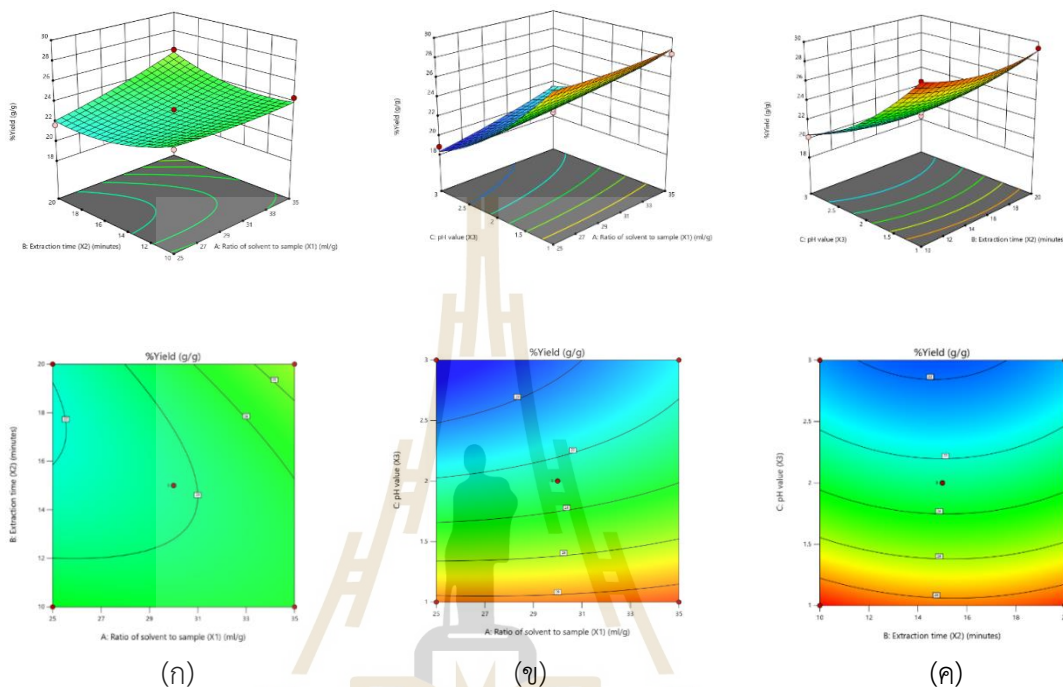
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปในสมการที่ (5) ถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสกัด โดยใช้การแก้ปัญหาแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น และค่าสถานะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุด ที่ได้จากการใช้คำสั่ง Solver ใน Microsoft excel แสดงในตารางที่ 4.10 ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุดที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง และที่ได้จากการทำการทดลองจริง พบว่ามีความคลาดเคลื่อน อยู่ที่ 0.65% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธีการพื้นผิวตอบสนองและการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นสามารถนำไปใช้กับการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

ตารางที่ 4.10 สถานะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ

ตัวแปรอิสระ	สถานะที่เหมาะสม
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	35 : 1
เวลาในการสกัด (นาที)	20
ค่า pH	1
ปริมาณสารสกัดแห้งสูงสุดจากการทำนาย (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักแห้ง)	31.21
ปริมาณสารสกัดแห้งสูงสุดจริงที่ได้ (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักแห้ง)	31.01

โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ %Yield แสดงในรูปพื้นผิวสามมิติ (3D Surface Plot) และเส้นโครงร่าง

(Contour Plot) ตามรูปที่ 4.5 ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละคู่ตัวแปรอิสระ พบว่าค่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ได้จากกราฟใกล้เคียงกับค่าที่แสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งได้จากการแก้ปัญหาแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น

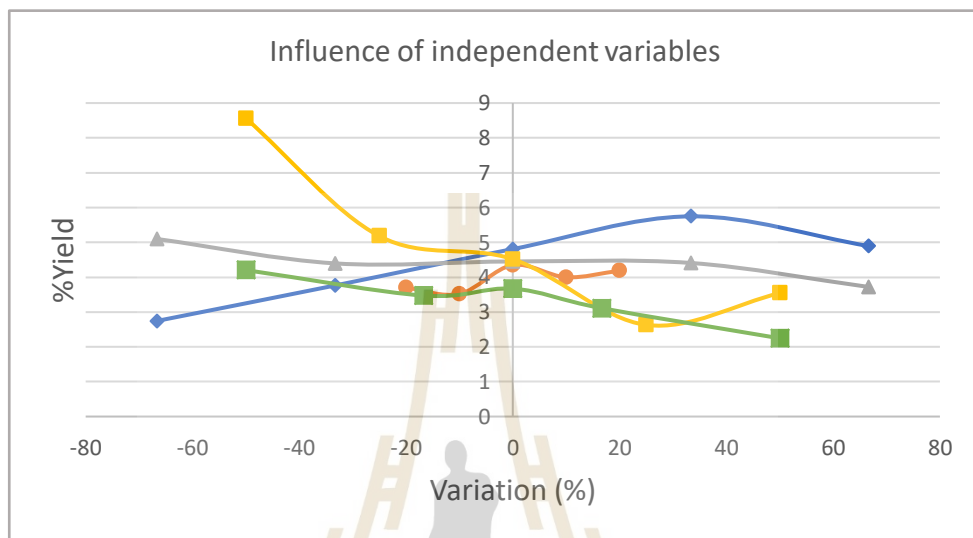


รูปที่ 4.5 (ก) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับเวลาในการสกัด (x_2) ต่อ %Yield (ข) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับค่า pH (x_3) ต่อ %Yield (ค) 3D surface และContour plot ของเวลาในการสกัด (x_2) กับค่า pH (x_3) ต่อ %Yield (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ)

4.3 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรอิสระในการสกัดเมื่อใช้ตัวทำละลายผสม

ตัวแปรอิสระที่ถูกพิจารณาในส่วนนี้ประกอบด้วย อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) อุณหภูมิในการสกัด (x_2) เวลาในการสกัด (x_3) ค่า pH (x_4) และความเข้มข้นของเอทานอล (x_5) เมื่อนำช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (Variation (%)) พล็อตกราฟกับ %Yield ซึ่งคือปริมาณของสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ เพื่อดูแนวโน้มความมีนัยสำคัญของตัวแปรอิสระต่อ %Yield แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า ตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญมี 3 ตัว คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก โดยพบว่ากราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงช่วงของตัวแปรอิสระที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า pH และความเข้มข้นของเอทานอลกราฟมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงช่วงของตัวแปรอิสระที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า %Yield มีความอ่อนไหวต่อการ

เปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระเหล่านี้ แต่ในส่วนของกราฟของอุณหภูมิในการสกัดและเวลาในการสกัด พบว่ากราฟมีแนวโน้มขนานกับช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระ นั่นคือ %Yield มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อช่วงของตัวแปรอิสระเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า %Yield ไม่มีความอ่อนไหวอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระทั้งสอง



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของตัวแปรอิสระ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1)
 อุณหภูมิในการสกัด (x_2) เวลาในการสกัด (x_3)
 ค่า pH (x_4) ความเข้มข้นของเอทานอล (x_5)

4.3.1 ผลการทดลองการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม

ตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวถูกนำมาทำการทดลอง โดยใช้ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ มี 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก ค่า pH และความเข้มข้นของเอทานอล

4.3.1.1 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ

ตัวแปรอิสระและช่วงของสภาวะการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวถูกนำมาทดลองด้วยการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง โดยกำหนดค่าอุณหภูมิการสกัดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลอง ที่ 50 °C และเวลาในการสกัด คือ 30 นาที ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองจะพิจารณาจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยเลือกช่วงของตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อ %Yield มากที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ระดับของตัวแปร		
		-1	0	1
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	15 : 1	20 : 1	25 : 1
ค่า pH	x_2	2	3	4
ความเข้มข้นของเอทานอล (% ปริมาตร/ปริมาตร)	x_3	30	50	70

จากการเก็บข้อมูลการทดลองและวิเคราะห์การถดถอยกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งเพื่อศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้ง โดย y คือตัวแปรตามในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นเนื่องจากค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.78 โดยสมการการถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง แสดงในสมการที่ (6) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.7982 และ R^2_{adj} เป็น 0.7118

$$y = 7.7954 + 0.1402x_1 - 2.0914x_2 - 0.3380x_3 \quad (6)$$

เพื่อหาช่วงค่าที่เหมาะสมของตัวแปรสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง จึงต้องใช้วิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุดในการหาช่วงค่าที่เหมาะสมช่วงใหม่ของตัวแปร

4.3.1.2 ผลของการหาค่าสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด

สมการการถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง ที่แสดงในสมการที่ (6) ถูกใช้เพื่อคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระในการทดลอง โดยค่าที่เหมาะสมที่พบแสดงในตารางที่ 4.12 ค่าสถานะการทดลองนี้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระที่ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับอีกครั้งเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งโดยช่วงของสถานะการทดลองใหม่ของแต่ละตัวแปรอิสระแสดงในตารางที่ 4.13

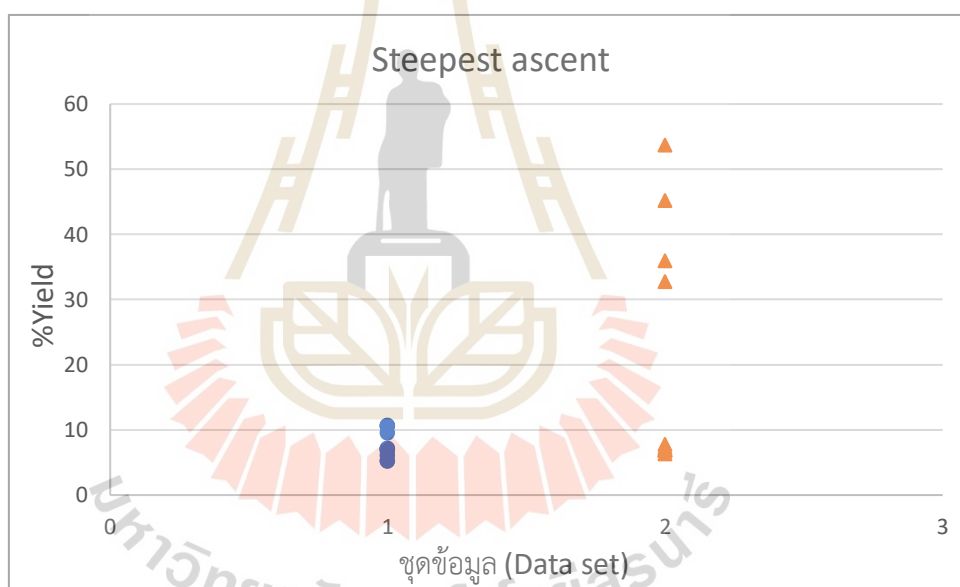
ตารางที่ 4.12 ค่าสถานะที่เหมาะสมจากวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุด (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ค่าสถานะการทดลอง
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	20 : 1
ค่า pH	x_2	1
ความเข้มข้นของเอทานอล (% ปริมาตร/ปริมาตร)	x_3	44

ตารางที่ 4.13 ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ระดับของตัวแปร		
		-1	0	1
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	15 : 1	20 : 1	25 : 1
ค่า pH	x_2	1	2	3
ความเข้มข้นของเอทานอล (% ปริมาตร/ปริมาตร)	x_3	30	50	70

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield ก่อนและหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยที่ %Yield คือ ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield ● ชุดข้อมูลก่อนทำ Steepest ascent ▲ ชุดข้อมูลหลังทำ Steepest ascent (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับ %Yield พบว่าชุดข้อมูลหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด ช่วงของ %Yield บางจุดที่เพิ่มขึ้นจากชุดข้อมูลก่อนทำอย่างมาก นั่นคือสามารถพบช่วงของสภาวะการทดลองของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมช่วงใหม่เพื่อทำให้ %Yield มีค่าสูงสุด โดยที่ชุดข้อมูลหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุดมีการเปลี่ยนแปลงช่วงสภาวะการทดลองของตัวแปรอิสระ คือ ปรับลดค่า pH แต่ยังคงใช้ช่วงของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักและระยะเวลาในการสกัดเท่าเดิมเนื่องจากค่าสภาวะการทดลองใหม่ที่ได้จากการทำวิธีการป็นขึ้นด้วย

ทางที่ชั้นที่สุดยังคงอยู่ในช่วงของสภาวะการทดลองเดิม ทั้งนี้จะพบว่าค่า pH มีนัยสำคัญต่อ %Yield ค่อนข้างมาก

เมื่อนำชุดข้อมูลที่ได้จากการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับหลังทำวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชั้นที่สุดสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง โดย y คือตัวแปรตามในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามไม่เป็นแบบเชิงเส้นเนื่องจาก R^2 น้อยกว่า 0.78 ซึ่งดูจากสมการการถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง แสดงในสมการที่ (7) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.7750 และ R^2_{adj} เป็น 0.6785

$$y = 19.5949 + 1.5319x_1 - 17.5900x_2 - 3.8596x_3 \quad (7)$$

ดังนั้นช่วงของตัวแปรอิสระนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน สำหรับเก็บข้อมูลการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง

4.3.1.3 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน

สภาวะการทดลองของตัวแปรอิสระในตารางที่ 4.13 ถูกนำมาใช้ในการทดลองสำหรับเก็บข้อมูล เมื่อนำชุดข้อมูลจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์การถดถอย

โดยจากผลการวิเคราะห์ชุดข้อมูลและความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ สามารถแสดงผลในรูปของการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายผสม

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	13.5266	0.4731	28.5895	9.81E-07
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1)	2.2661	0.2897	7.8212	5.48E-04
ค่า pH (x_2)	-17.3982	0.2897	60.0490	2.42E-08
ความเข้มข้นของเอทานอล (x_3)	-1.3375	0.2897	-4.6161	5.76E-03
x_1^2	1.7612	0.4265	4.1296	9.09E-03
x_2^2	13.6502	0.4265	32.0069	5.59E-07
x_3^2	-0.2465	0.4265	-0.5780	5.88E-01
x_1x_2	-3.4975	0.4097	-8.5357	3.63E-04
x_1x_3	-0.0450	0.4097	-0.1099	9.17E-01
x_2x_3	1.6516	0.4097	4.0307	1.00E-02

จากตารางแสดงผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง พบว่าตัวแปรอิสระที่มีผลกระทบหลัก ๆ ต่อ %Yield คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) ค่า pH (x_2) ความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ผลกระทบร่วมของตัวแปรอิสระคือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1^2) ค่า pH (x_2^2) ผลกระทบตัวแปรร่วมของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก

กับค่า pH (x_1x_2) และผลกระทบตัวแปรร่วมของค่า pH กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_2x_3) ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาตัวแปรและตัวแปรร่วมอื่น ๆ ที่มีนัยสำคัญของแบบจำลองที่ถูกลดรูป นี้คือค่า p-value ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 ผลกระทบตัวแปรอิสระที่ไม่มีนัยสำคัญจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในสมการการถดถอย เพราะฉะนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูป แสดงในสมการที่ (8) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.9989 และ R^2_{adj} เป็น 0.9978 โดย y คือตัวแปรตาม ในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสั๊กที่ใช้

$$y = 13.3749 + 2.2661x_1 - 17.3982x_2 - 1.3375x_3 + 1.7802x_1^2 + 13.6692x_2^2 - 3.4975x_1x_2 + 1.6516x_2x_3 \quad (8)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปนี้ พบว่า y จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสั๊กเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า pH และความเข้มข้นของเอทานอลลดลง นอกจากนี้ จะพบว่าค่า pH มีนัยสำคัญต่อค่า y มากกว่าอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสั๊กและความเข้มข้นของเอทานอลเป็นอย่างมาก

4.3.1.4 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด

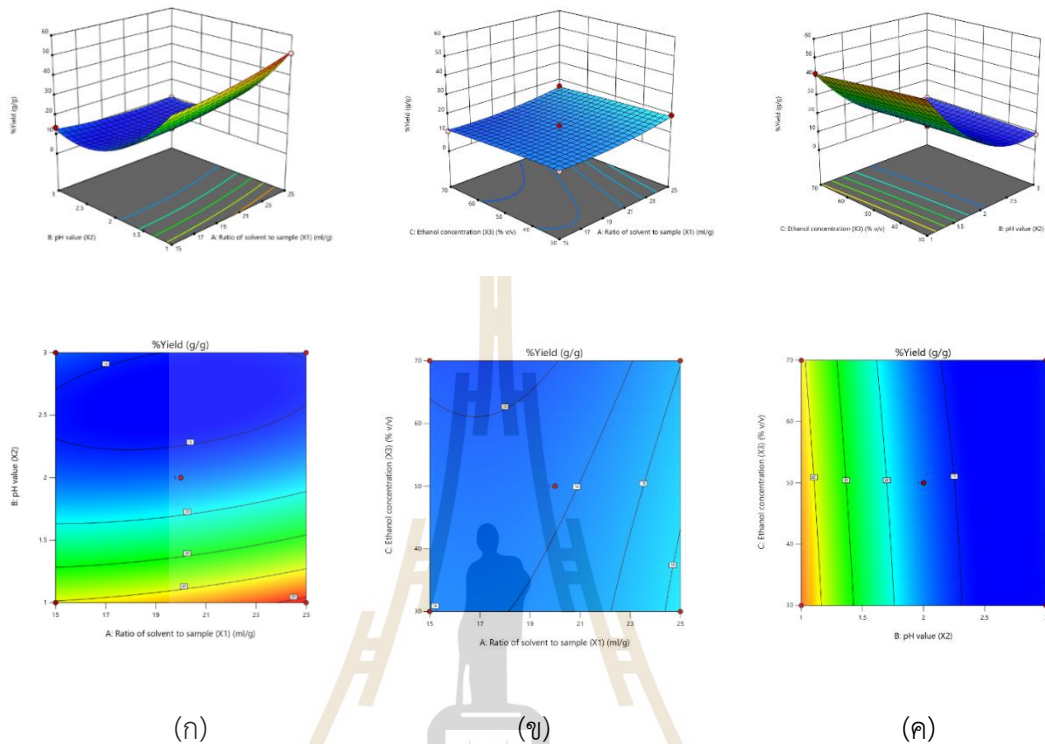
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปในสมการที่ (8) ถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสกัด โดยใช้การแก้ปัญหาแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นและหาค่าสภาวะที่เหมาะสมโดยการใช้คำสั่ง Solver ใน Microsoft excel ตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงค่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระที่ให้ปริมาณสารสกัดจากใบสั๊กสูงสุด โดยปริมาณสารสกัดจากใบสั๊กสูงสุดที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองและที่ได้จากการทำการทดลองจริง พบว่ามีความคลาดเคลื่อน อยู่ที่ 0.95% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธีการพื้นผิวตอบสนองและการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นสามารถนำไปใช้กับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสั๊กสดที่ใช้ตัวทำละลายผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

ตารางที่ 4.15 สภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติจากใบสั๊กสดและใช้ตัวทำละลายผสม

ตัวแปรอิสระ	สภาวะที่เหมาะสม
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสั๊ก (มิลลิลิตร : กรัม)	25 : 1
ค่า pH	1
ความเข้มข้นของเอทานอล (% ปริมาตร/ปริมาตร)	30
ปริมาณสารสกัดแห้งสูงสุดจากการทำนาย (กรัม/100 กรัมใบสั๊กโดยน้ำหนักเปียก)	54.98
ปริมาณสารสกัดแห้งสูงสุดจริงที่ได้ (กรัม/100 กรัมใบสั๊กโดยน้ำหนักเปียก)	54.46

โดยความความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสั๊กที่ใช้ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ %Yield แสดงในรูปพื้นผิวสามมิติ (3D Surface Plot) และเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ตามรูปที่ 4.8 ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละคู่ตัวแปรอิสระ

พบว่าค่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ได้จากกราฟใกล้เคียงกับค่าที่แสดงในตารางที่ 4.15 ซึ่งได้จากการแก้ปัญหาแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น



รูปที่ 4.8 (ก) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับค่า pH (x_2) ต่อ %Yield (ข) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ต่อ %Yield (ค) 3D surface และ Contour plot ของค่า pH (x_2) กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ต่อ %Yield (กรณีสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายผสม)

4.3.2 ผลการทดลองการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายผสม

ตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวมี 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก ค่า pH และความเข้มข้นของเอทานอล

4.3.2.1 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ

ตัวแปรอิสระและช่วงของสภาวะการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวถูกนำมาทดลองด้วยการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง โดยกำหนดค่าอนุภูมิภาคการสกัดเป็นค่าคงที่ที่ลดการทดลอง ที่ 50 °C และเวลาในการสกัด คือ 30 นาที ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองจะ

พิจารณาจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยเลือกช่วงของตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อ %yield มากที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายผสม)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปร	ระดับของตัวแปร		
		-1	0	1
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	x_1	15 : 1	20 : 1	25 : 1
ค่า pH	x_2	2	3	4
ความเข้มข้นของเอทานอล (% ปริมาตร/ปริมาตร)	x_3	30	50	70

จากการเก็บข้อมูลการทดลองและวิเคราะห์การถดถอยกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งเพื่อศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้ง โดย y คือตัวแปรตาม ในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ พบว่ามีความสัมพันธ์ไม่เป็นแบบเชิงเส้นเนื่องจาก R^2 น้อยกว่า 0.78 โดยสมการการถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่ง แสดงในสมการที่ (9) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.6218 และ R^2_{adj} เป็น 0.4596

$$y = 28.4581 + 3.3533x_1 - 2.4486x_2 + 0.4613x_3 \quad (9)$$

เนื่องจากชุดข้อมูลการทดลองที่ได้ไม่พบความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น การทดลองในส่วนนี้จึงไม่จำเป็นต้องทำการหาค่าสภาวะการทดลองใหม่โดยวิธีการป้อนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด ดังนั้นช่วงสภาวะของการทดลองนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับเก็บชุดข้อมูลเพื่อกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง โดยการออกแบบการทดลองบ็อกซ์ – เบห์นเคน

4.3.2.2 ผลการทดลองสำหรับการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน

ช่วงของสภาวะการทดลองในตารางที่ 4.16 ถูกนำมาใช้เพื่อทำการทดลองสำหรับเก็บข้อมูล เมื่อนำชุดข้อมูลจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์การถดถอย

โดยจากผลการวิเคราะห์ชุดข้อมูลและความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ สามารถแสดงผลในรูปของการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์การถดถอยของการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายผสม

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	13.2854	0.6672	19.9113	5.90E-06
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1)	1.0988	0.4086	2.6893	4.33E-02
ค่า pH (x_2)	-2.9003	0.4086	-7.0983	8.60E-04
ความเข้มข้นของเอทานอล (x_3)	-1.6923	0.4086	-4.1419	8.98E-03
x_1^2	1.8784	0.6014	3.1232	2.62E-02
x_2^2	2.6956	0.6014	4.4821	6.51E-03
x_3^2	-1.3949	0.6014	-2.3194	6.81E-02
x_1x_2	2.5626	0.5778	4.4347	6.80E-03
x_1x_3	0.0596	0.5778	0.1031	9.22E-01
x_2x_3	0.2829	0.5778	0.4896	6.45E-01

จากตารางแสดงผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง พบว่า ตัวแปรอิสระที่มีผลกระทบหลัก ๆ ต่อ %Yield คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1) ค่า pH (x_2) ความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) และผลกระทบร่วมของตัวแปรอิสระ คือ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อใบสัก (x_1^2) และ ค่า pH (x_2^2) และผลกระทบร่วมของอัตราส่วนตัวทำละลายต่อใบสักกับค่า pH (x_1x_2) โดยเกณฑ์การพิจารณาตัวแปรและตัวแปรร่วมอื่น ๆ ที่มีนัยสำคัญของแบบจำลองที่ถูกลดรูป นี้คือค่า p - value ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 ผลกระทบตัวแปรอิสระที่ไม่มีนัยสำคัญจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในสมการการถดถอย เพราะฉะนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปแสดงในสมการที่ (10) ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.9217 และ R^2_{adj} เป็น 0.8630 โดย y คือตัวแปรตาม ในที่นี้คือปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้

$$y = 12.4269 + 1.0988x_1 - 2.9003x_2 - 1.6923x_3 + 1.9857x_1^2 + 2.8029x_2^2 + 2.5626x_1x_2 \quad (10)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปนี้ พบว่า y จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า pH และความเข้มข้นของเอทานอลลดลง โดยจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยพบว่าค่า pH มีนัยสำคัญต่อค่า y มากกว่าความเข้มข้นของเอทานอลและอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก

4.3.2.3 ผลการทดลองสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด

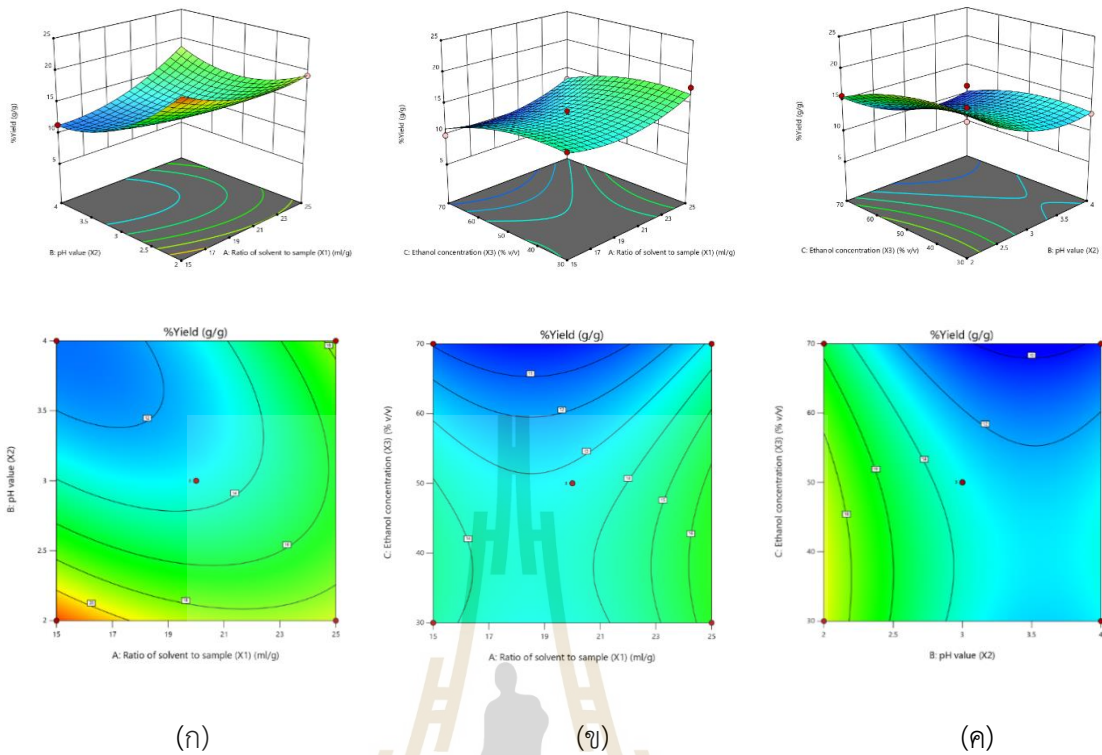
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสองที่ถูกลดรูปในสมการที่ (10) ถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสกัด โดยใช้การแก้ปัญหาแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นและหาค่าสถานะที่เหมาะสมโดยการใช้คำสั่ง Solver ใน Microsoft excel ตารางที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงค่าสถานะการทดลองที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระที่ให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงที่สุด โดยปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุดที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองและที่ได้จากการทำการทดลองจริง พบว่ามีความคลาดเคลื่อน อยู่ที่ 0.48% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธีการพื้นผิว

ตอบสนองและการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นสามารถนำไปใช้กับการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

ตารางที่ 4.18 สถานะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้ง และใช้ตัวทำละลายผสม

ตัวแปรอิสระ	สถานะที่เหมาะสม
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	25 : 1
ค่า pH	2
ความเข้มข้นของเอทานอล (% ปริมาตร/ปริมาตร)	30
ปริมาณสารสกัดแห้งสูงสุดจากการทำนาย (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักแห้ง)	20.34
ปริมาณสารสกัดแห้งสูงสุดจริงที่ได้ (กรัม/100 กรัมใบสักโดยน้ำหนักแห้ง)	20.25

โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ %Yield แสดงในรูปพื้นผิวสามมิติ (3D Surface Plot) และเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ตามรูปที่ 4.9 ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละคู่ตัวแปรอิสระ พบว่าค่าสถานะการทดลองที่เหมาะสมที่ได้จากกราฟใกล้เคียงกับค่าที่แสดงในตารางที่ 4.18 ซึ่งได้จากการแก้ปัญหาแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น



รูปที่ 4.9 (ก) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับค่า pH (x_2) ต่อ %Yield (ข) 3D surface และContour plot ของอัตราส่วนของตัวทำละลาย (x_1) กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ต่อ %Yield (ค) 3D surface และContour plot ของค่า pH (x_2) กับความเข้มข้นของเอทานอล (x_3) ต่อ %Yield (กรณีสกัดสารธรรมชาติ จากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายผสม)

4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างใบสักสดและใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ และตัวทำละลายผสม

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาการสกัดสีจากใบสักเป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 การสกัดสีจากใบสักสดด้วยตัวทำละลายน้ำ กรณีที่ 2 การสกัดสีจากใบสักสดด้วยตัวทำละลายผสม กรณีที่ 3 การสกัดสีจากใบสักแห้งด้วยตัวทำละลายน้ำ และ กรณีที่ 4 การสกัดสีจากใบสักแห้งด้วยตัวทำละลายผสม โดยสรุปผลการทดลองดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 สรุปผลการทดลองของทั้ง 4 กรณี

	ใบสักสด		ใบสักแห้ง	
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
	น้ำ	ผสม (น้ำ+เอทานอล)	น้ำ	ผสม (น้ำ+เอทานอล)
อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (มิลลิลิตร : กรัม)	34: 1	25: 1	35: 1	25: 1
อุณหภูมิในการสกัด (°C)	60	50	60	50
ระยะเวลาในการสกัด (นาที)	57	30	20	30
pH	2	1	1	2
ความเข้มข้นของเอทานอล (% ปริมาตร/ปริมาตร)	-	30	-	30
ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุด (ทำนาย) (กรัม/100 กรัมใบสัก น้ำหนักเปียก*) (กรัม/100 กรัมใบสัก น้ำหนักแห้ง**)	7.72*	54.98*	31.21**	20.34**
ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุด (การทดลอง) (กรัม/100 กรัมใบสัก น้ำหนักเปียก*) (กรัม/100 กรัมใบสัก น้ำหนักแห้ง**)	8.33*	54.46*	31.01**	20.25**
%Error	7.4	0.95	0.65	0.48

*ปริมาณสารสกัดจากใบสักต่อน้ำหนักเปียกของปริมาณใบสักที่ใช้

**ปริมาณสารสกัดจากใบสักต่อน้ำหนักแห้งของปริมาณใบสักที่ใช้

เมื่อพิจารณากรณีของการสกัดสารธรรมชาติของใบสักสด (กรณีที่ 1 และ 2) พบว่าอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักและระยะเวลาในการสกัดที่มากขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักที่ได้มีค่ามากขึ้น ในขณะที่เมื่อค่า pH ต่ำลงปริมาณสารสกัดจากใบสักที่สกัดได้มีค่ามากขึ้น และในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายผสมสามารถให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงกว่ากรณีที่ใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำซึ่งผลที่ได้มีค่าแตกต่างกันมาก

เมื่อพิจารณากรณีของการสกัดสารธรรมชาติของใบสักแห้ง (กรณีที่ 3 และ 4) พบว่าอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักที่สกัดได้มีค่ามากขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาในการสกัดที่มากขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของค่า pH ที่ต่ำลงส่งผลให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักมีค่ามากขึ้น และในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายน้ำให้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงกว่ากรณีที่ใช้ตัวทำละลายผสมแต่ไม่ได้แตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 และ 2

เมื่อพิจารณากรณีของการสกัดสารธรรมชาติของใบสักสดและใบสักแห้งควบคู่กันทั้ง 4 พบว่าความคลาดเคลื่อนของกรณีที่ 1 มีค่ามากกว่า 1% ซึ่งอาจส่งผลให้แบบจำลองนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าแบบจำลองของกรณีอื่นๆ

เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสักและระยะเวลาในการสกัดไม่ค่อยมีนัยสำคัญต่อปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงสุดที่สกัดได้ ซึ่งตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญสูงที่สุดสำหรับในงานวิจัยนี้คือ ค่า pH และลำดับต่อมาคือชนิดของตัวทำละลาย และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายน้ำอาจมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่ากรณีอื่นๆ



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักทองทั้งใบสักสดและใบสักแห้งโดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำและตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล ซึ่งการทดลองทั้งหมดแบ่งเป็น 4 กรณี และใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองและการแก้สมการแบบไม่เชิงเส้น เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระต่อปริมาณสารสกัดจากใบสักที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้และหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงที่สุด โดยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (NLP solver) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณสารสกัดจากใบสักสูงที่สุด

2. การสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดด้วยตัวทำละลายผสมให้ปริมาณสารสกัดที่ได้สูงที่สุด ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก เท่ากับ 25 : 1 (มิลลิลิตร : กรัม) ค่า pH เท่ากับ 1 และความเข้มข้นของเอทานอล เท่ากับ 30% (ปริมาตร/ปริมาตร) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ แสดงดังนี้

$$y = 13.3749 + 2.2661x_1 - 17.3982x_2 - 1.3375x_3 + 1.7802x_1^2 + 13.6692x_2^2 - 3.4975x_1x_2 + 1.6516x_2x_3$$

โดยที่ y คือ ปริมาณสารสกัดแห้งจากใบสักที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้

3. การสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งด้วยตัวทำละลายน้ำให้ปริมาณสารสกัดที่ได้สูงที่สุด ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก เท่ากับ 35 : 1 (มิลลิลิตร : กรัม) ระยะเวลาในการสกัด เท่ากับ 20 นาที และค่า pH เท่ากับ 1 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ แสดงดังนี้

$$y = 22.9546 + 0.9105x_1 - 0.0197x_2 - 4.3709x_3 + 0.8807x_2^2 + 1.2131x_3^2 + 0.8979x_1x_2$$

โดยที่ y คือ ปริมาณสารสกัดแห้งจากใบสักที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้

4. ตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้คือ ค่า pH และลำดับถัดมาคือชนิดของตัวทำละลาย

5. หากต้องการสกัดสารธรรมชาติให้ได้ %Yield สูงและใช้พลังงานต่ำ ต้องเป็นการสกัดจากใบสักสดเนื่องจากในกรณีของใบสักแห้งจะต้องมีการใช้พลังงานความร้อนในการทำแห้ง

5.2 ข้อจำกัดในการทดลอง

1. ปริมาณสารสกัดธรรมชาติจากใบสักอาจแตกต่างกันตามฤดูกาลและพื้นที่ที่นำใบสักมาทำการทดลอง
2. การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคมีความถี่ที่ 40 kHz ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ไม่สามารถปรับความถี่ได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ผลงานวิจัย

สมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้ทำนายปริมาณสารสกัดจากใบสักที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ภายใต้เงื่อนไขการสกัดและวิธีการสกัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น อีกทั้งปริมาณสารสกัดธรรมชาติและสีที่สกัดได้จากใบสักอาจแตกต่างกันตามพื้นที่ที่เพาะปลูก

5.3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับชุมชน

เพื่อให้ได้สารสกัดธรรมชาติจากใบสักที่มากขึ้นจากงานวิจัยนี้ สามารถเพิ่มปริมาตรของเครื่อง Ultrasonic cleaner bath จาก 20 ลิตร เป็น 40 ลิตร โดยสามารถคำนวณปรับค่าสภาวะการทดลอง (Upscale) ให้เหมาะสมกับปริมาตรของอุปกรณ์

5.3.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

ควรศึกษาสารสกัดที่ได้จากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักทอง โดยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพิ่มเติม

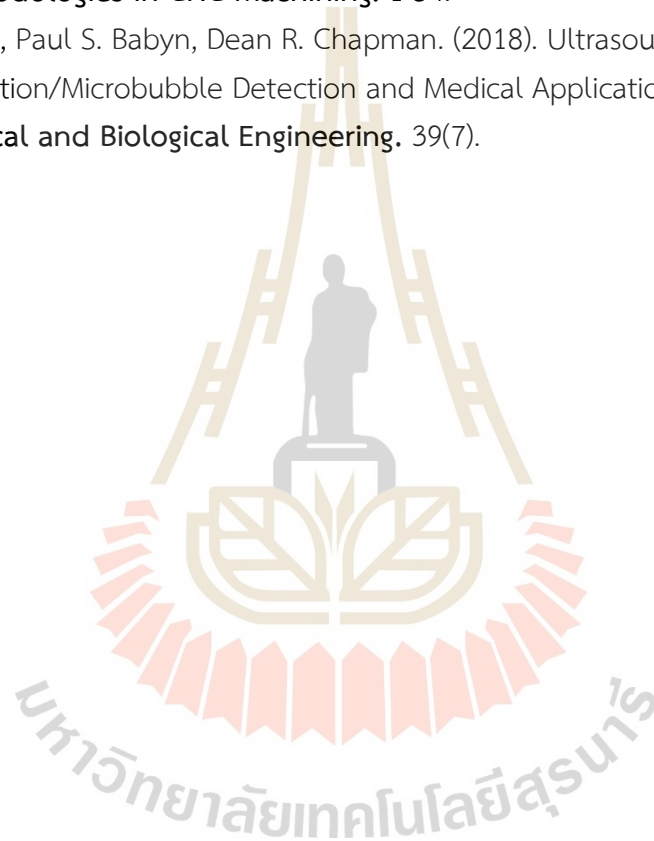
รายการอ้างอิง

- กรวิศุทธิ์ ฤ กลาง (2553). ถิ่นกำเนิดและการกระจายพันธุ์ของไม้สักทอง. **ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล**. Biology @ MUSC Knowledge Repository. [ออนไลน์] <https://wisdom.sc.mahidol.ac.th/repository/biology/2010/11/24/ถิ่นกำเนิดและการกระจาย. สืบค้นเมื่อ 21 พฤษภาคม 2563>.
- จรัล ทรัพย์เสรี (2552). Central Composite Design. **Quality**. ปีที่ 16 ฉบับที่ 145 72-73.
- ธนพงศ์ ปัญจิต (2554). สหสัมพันธ์สำหรับจำลองคุณลักษณะของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 31.
- พิชญา มั่นคง (2561). การผลิตน้ำมันเมล็ดมะรุม *Moringa oleifera* โดยการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตร่วมกับการสกัดด้วยแรงกล. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**. 12-16.
- วรอญญา ณรงค์เดชา (2562). การสกัดสีจากธรรมชาติ (Natural color extraction). **วิทยานิพนธ์ปริญญาเอกสาขาศิลปะและการออกแบบ มหาวิทยาลัยนเรศวร**. 1-10.
- วรางคณา สมพงษ์, ภาสกร ชีระศิลป์วิสิกุล และคณิน ศรีสาลีสกุลรัตน์ (2559). การสกัดกัมมี่ดมะขาม (*Tamarindus indica* L.) ด้วยไมโครเวฟและการใช้ในผลิตภัณฑ์แยมสตอว์เบอร์รี่. **วารสาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 290.
- วิริยา พรหมกอง (2553). การสกัด. **สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**. [ออนไลน์]. http://www.agri.ubu.ac.th/mis/evaluate/assess_learn/upload/65913.pdf สืบค้นเมื่อ 8 กรกฎาคม 2563.
- ศุทธิณี คุ่มครองทรัพย์ (2555). การสร้างตัวแบบการถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่าความเข้มข้นของ NO₂ ในจังหวัดชลบุรี. **การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา**. 4-5.
- สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (2558). **วัสดุที่ใช้ในการทอผ้า**. [ออนไลน์] https://research.psru.ac.th/files/res_che2553/resche_files/394_chapter2.pdf. สืบค้นเมื่อ 8 กรกฎาคม 2563. 8-10.
- ส่วนพัฒนาผลผลิตป่านไม้ (2547). คุณสมบัติของไม้ไทย. **สำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่านไม้ กรมป่าไม้**. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.
- อนงค์ ศรีโสภา, ประภรณ์ เลิศสุวรรณไพศาล, วิษณุ ธงไชย และกาญจนา วงศ์กระจ่าง (2560). สารสกัดดอกดาวเรืองจากภูมิปัญญาท้องถิ่นสู่นวัตกรรมลดริ้วรอย. **สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**. บทที่ 2. 3-8.

- อารีรัตน์ ชี้อติ (2560). การใช้คลื่นไมโครเวฟสกัด สารสำคัญจากพืชสมุนไพร. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม-เมษายน . [ออนไลน์].
<https://www.tcithaijo.org/index.php/EAUHJSci/article/download/74328/68141> /. สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2562.
- A.K.Prusty, Trupti Das, A.Nayak and N.B.Das. (2010). Colourimetric analysis and antimicrobial study of natural dyes and dyed silk. **Journal of Cleaner Production**. 18: 1750-1756.
- A Rosyida and Suranto. (2018). Use of Tectonagrandis Leaf Extract in Colouring Silk Cloth Material Based on pH and Mordant Variations. **Materials Science and Engineering**. 333.
- Ashis Kumar Samanta and Adwaita Konar. (2011). Dyeing of Textiles with Natural Dyes. **IntechOpen**. 30-52.
- F. John Fuchs. (1995). Ultrasonic Cleaning Fundamental Theory and Application. **Blackstone Ultrasonics**.
- Gallo, M., et al. (2018). Application of Ultrasound in Food Science and Technology: A Perspective. **Foods**. 7(10): 164.
- Hugo Miguel Santos et al. (2009). The Power of Ultrasound. **Ultrasound in Chemistry: Analytical Applications**.
- Irma Isnafia Arief, Tuti Suryati, Afiyah, D. N. and Wardhani, D. P. (2014). Physicochemical and organoleptic of beef sausages with teak leaf extract (Tectona grandis) addition as preservative and natural dye. **International Food Research Journal**. 21(5): 2033-2042.
- Jeelene B. Asiong, Shanice A. Facto, Janine O. Nidua and Annalyn N. Gebe. (2017). Development of an alternative natural dye from Philippine teak leaf (Tectona philippinensis). **Journal of BIMP-EAGA Regional Development**. 3(2).
- Lailatul Qadariyah, Mahfud Mahfud, Endah Sulistiawati, and Prima Swastika. (2018). Natural dye extraction from teak leaves (Tectona grandis) using ultrasound assisted extraction method for dyeing on cotton fabric. **MATEC Web of Conference**. 156.
- Lunalisa Potsangbam, Swapana Ningombam and Warjeet S Laitonjam. (2008). Natural dye yielding plants and indigenous knowledge of dyeing in Manipur, Northeast India. **Indian Journal of Traditional knowledge**. 7(1): 141-147.
- Meilana Dharma Putra, Agus Darmawan , Ilham Wahdini and Ahmed E. Abasaheed. (2017). Extraction of chlorophyll from pandan leaves using ethanol and mass transfer study. **Journal of the Serbian Chemical Society**. 82(7-8): 921-931.

- Montgomery, D.C. (2001). Design and Analysis of Experiments. **John Wiley & Sons Inc. 5th Edition.**
- Natthawadee Tibkawin, Nantaka Khorana, Apinun Limmongkon and Pensri Charoensit, (2018). The effect of different maturity stages on color appearance, antioxidant activity and cytotoxicity of teak leaf extracts. **Journal of IAMPS 35 & CU-MPU International Collaborative Research Conference.**
- Nidavani, R.B., & Mahalakshmi, A.M. (2014). Teak (*Tectona grandis* linn.): A renowned timber plant with potential medicinal values. **International Journal of Pharmaceutical Science.** 6: 48–54.
- Norul Azilah Abdul Rahman, Siti Marsinah Tumin, and Ruziyati Tajuddin, (2013). Optimization of Ultrasonic Extraction Method of Natural Dyes from *Xylocarpus Moluccensis*. **International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics.** 3(1).
- Padma S. Vankar, L.Warjeet Singh, Vandana Tiwaria, Rakhi Shanker and Lunalisa Potsangbam. (2017). Chemistry of *Tectona* leaves dye and its Dyeing properties for Cotton and Silk fabrics. **ResearchGate.**
- Pooja Vyas, Dinesh Kumar Yadav and Poonam Khandelwal. (2018). *Tectona grandis* (teak) – A review on its phytochemical and therapeutic potential. **Natural Product Research.** 33: 2338-2354.
- Shahid-ul-Islam and Faqeer Mohammad. (2018). Reflectance Spectroscopic Optimization of Dyeing Process and Color Characterization of Ammonia Post-Treated Wool Dyed with *Tectona grandis* L. Leaves Extract. **Environmental Progress & Sustainable Energy.** 37: 1993-1999.
- Shailendra Rane, Manish Hate, Prashant Hande, Ajitkumar BS, Ajit Datar. (2017). Dyeing of cotton with *Tectona grandis* leaves and *Terminalia arjuna* bark extracts. **International Journal of Textile Science.** 6(2): 72-77.
- Sonia E. Barzola-Miranda¹, Alicia Casariego-Año, Margarita Nuñez de Villavincencio y José L. and Rodríguez-Sánchez. (2018). OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE EXTRACCIÓN DE LOS PIGMENTOS DE LAS HOJAS DE TECA (*TECTONA GRANDIS* L.) UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA. **Ciencia y Tecnología de Alimentos.** 28(2): 11-16.
- Subhash C. Mandal M. Pharm. (2015). Chapter 6 - Classification of Extraction Methods. **Essentials of Botanical Extraction.** 83-136.

- Surasak Hemwimol, Prasert Pavasant and Artiwan Shotipruk. (2006). Ultrasound-assisted extraction of anthraquinones from roots of *Morinda citrifolia*. **Ultrasonics Sonochemistry**. 13: 543-548.
- Suwei Zhao and Dongke Zhang. (2014). Supercritical CO₂ extraction of Eucalyptus leaves oil and comparison with Soxhlet extraction and hydro-distillation methods. **Separation and Purification Technology**. 133: 443-451.
- Viktor P. Astakhov. (2012). Design of Experiment Methods in Manufacturing: Basics and Practical Applications. **Single and Multi-objective Optimization Methodologies in CNC Machining**. 1-54.
- Zahra Izadifar, Paul S. Babyn, Dean R. Chapman. (2018). Ultrasound Cavitation/Microbubble Detection and Medical Applications. **Journal of Medical and Biological Engineering**. 39(7).





ภาคผนวก ก

ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุด



รูปที่ 1ก ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุด (ครั้งที่ 1 ก่อนการสกัด)



รูปที่ 2ก ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นเสียงสูงที่สุด (ครั้งที่ 2 ระหว่างการสกัด)



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. การเตรียมตัวอย่างก่อนการสกัด

- 1) ขวดตัวอย่างที่ใส่ใบสักและตัวทำละลายพร้อมปรับค่า pH ให้ตรงตามสภาวะการทดลองนำไปเขย่าด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath) เป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปสกัดด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง (Ultrasonic cleaner bath)

2. ข้อมูลการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดโดยใช้ตัวทำละลายน้ำ

ตารางที่ 1ข ข้อมูลการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

Run	อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (X_1), mL/g	เวลาในการสกัด (X_2), minute	ค่า pH (X_3)	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%wet weight))
1	2	10	2	2.82
2	20	10	2	4.93
3	2	50	2	1.87
4	20	50	2	5.24
5	2	10	10	1.57
6	20	10	10	3.28
7	2	50	10	1.98
8	20	50	10	3.42
9	10	30	6	3.43
10	10	30	6	2.78
11	10	30	6	3.02

อุณหภูมิในการสกัด 60 °C

ตารางที่ 2ข ข้อมูลการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

Run	อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (X_1), mL/g	เวลาในการสกัด (X_2), min	ค่า pH (X_3)	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%wet weight))
1	6	15	6	3.22
2	34	15	6	5.03
3	6	57	6	4.43
4	34	57	6	5.60
5	6	32	2	5.56
6	34	32	2	7.10
7	6	32	10	3.49
8	34	32	10	5.92
9	20	15	2	7.03
10	20	57	2	6.67
11	20	15	10	4.90
12	20	57	10	5.54
13	20	32	6	4.64
14	20	32	6	4.25
15	20	32	6	4.89

อุณหภูมิในการสกัด 60 °C

*หมายเหตุ : การทดลองใบสักสดตัวทำละลายน้ำไม่ได้ทำการเขย่าก่อนนำไปสกัด

3. ข้อมูลการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งโดยใช้ตัวทำละลายน้ำ

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

Run	อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (X_1), mL/g	เวลาในการสกัด (X_2), min	ค่า pH (X_3)	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%dry weight))
1	20	10	2	24.17
2	40	10	2	27.85
3	20	30	2	24.55
4	40	30	2	25.25
5	20	10	4	17.39
6	40	10	4	13.93
7	20	30	4	10.92
8	40	30	4	12.42
9	30	20	3	14.45
10	30	20	3	14.22
11	30	20	3	14.06

อุณหภูมิในการสกัด 60 °C

ตารางที่ 4ข ข้อมูลการทดลองแยกทอเรียลสองระดับหลังทำ Steepest Ascent (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

Run	อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (X_1), mL/g	เวลาในการสกัด (X_2), min	ค่า pH (X_3)	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%dry weight))
1	25	10	1	20.38
2	35	10	1	24.33
3	25	20	1	30.56
4	35	20	1	25.42
5	25	10	3	17.38
6	35	10	3	18.52
7	25	20	3	17.65
8	35	20	3	18.49
9	30	15	4	20.48
10	30	15	4	20.44
11	30	15	4	20.22

อุณหภูมิในการสกัด 60 °C



ตารางที่ 5 ข้อมูลการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนหลังทำ Steepest Ascent (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายน้ำ)

Run	อัตราส่วนของตัว ทำละลายต่อใบสัก (X_1), ml/g	เวลาในการ สกัด (X_2), min	ค่า pH (X_3)	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%dry weight))
1	25	1	2	23.68
2	35	10	2	24.41
3	25	20	2	21.67
4	35	20	2	25.99
5	25	15	1	28.60
6	35	15	1	28.39
7	25	15	3	18.82
8	35	15	3	21.27
9	30	10	1	29.56
10	30	20	1	29.36
11	30	10	3	20.19
12	30	20	3	20.66
13	30	15	2	23.24
14	30	15	2	22.43
15	30	15	2	22.78

อุณหภูมิในการสกัด 60 °C

4. ข้อมูลการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดโดยใช้ตัวทำละลายผสม

ตารางที่ 6x ข้อมูลการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)

Run	อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (X_1), ml/g	ค่า pH (X_2)	ความเข้มข้นของเอทานอล (X_3), %v/v	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%wet weight))
1	15	2	30	9.46
2	25	2	30	10.62
3	15	4	30	6.96
4	25	4	30	7.14
5	15	2	70	10.56
6	25	2	70	10.55
7	15	4	70	5.28
8	25	4	70	5.18
9	20	3	50	6.82
10	20	3	50	6.07
11	20	3	50	7.01

อุณหภูมิในการสกัด 50 °C เวลาในการสกัด 30 นาที

ตารางที่ 7ข ข้อมูลการทดลองแยกทอเรียลสองระดับหลังทำ Steepest Ascent (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)

Run	อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (X_1), ml/g	ค่า pH (X_2)	ความเข้มข้นของเอทานอล (X_3), %v/v	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%wet weight))
1	15	1	30	45.20
2	25	1	30	53.73
3	15	3	30	6.87
4	25	3	30	6.91
5	15	1	70	32.76
6	25	1	70	35.95
7	15	3	70	6.31
8	25	3	70	6.82
9	20	2	50	7.08
10	20	2	50	7.25
11	20	2	50	7.78

อุณหภูมิในการสกัด 50 °C เวลาในการสกัด 30 นาที



ตารางที่ 8 ข้อมูลการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนหลังทำ Steepest Ascent (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดและใช้ตัวทำละลายผสม)

Run	อัตราส่วนของตัว ทำละลายต่อใบสัก (X_1), ml/g	ค่า pH (X_2)	ความเข้มข้นของ เอทานอล(X_3), %v/v	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%wet weight))
1	15	1	50	40.82
2	25	1	50	51.29
3	15	3	50	13.58
4	25	3	50	10.06
5	15	2	30	13.71
6	25	2	30	19.39
7	15	2	70	10.78
8	25	2	70	16.28
9	20	1	30	47.43
10	20	3	30	8.76
11	20	1	70	41.80
12	20	3	70	9.74
13	20	2	50	13.13
14	20	2	50	13.65
15	20	2	50	13.79

อุณหภูมิในการสกัด 50 °C เวลาในการสกัด 30 นาที

5. ข้อมูลการทดลองสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งโดยใช้ตัวทำละลายผสม

ตารางที่ 9ข ข้อมูลการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (กรณีการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งและใช้ตัวทำละลายผสม)

Run	อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อใบสัก (X_1), mL/g	ค่า pH (X_2)	ความเข้มข้นของเอทานอล (X_3), %v/v	ปริมาณสารสกัดแห้งที่สกัดได้ต่อปริมาณใบสักที่ใช้ (g/100 g of teak leaves (%dry weight))
1	15	2	50	23.11
2	25	2	50	19.22
3	15	4	50	11.37
4	25	4	50	17.74
5	15	3	30	14.55
6	25	3	30	17.59
7	15	3	70	9.83
8	25	3	70	13.10
9	20	2	30	18.45
10	20	4	30	12.89
11	20	2	70	15.72
12	20	4	70	11.29
13	20	3	50	12.79
14	20	3	50	13.84
15	20	3	50	13.22

อุณหภูมิในการสกัด 50 °C เวลาในการสกัด 30 นาที

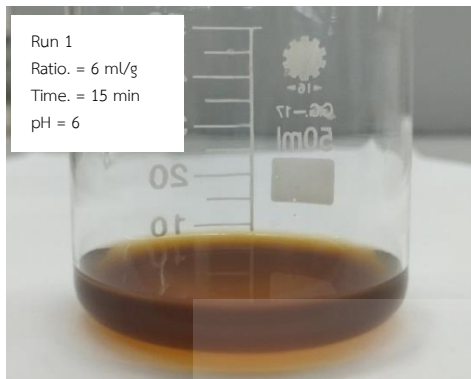


ภาคผนวก ค

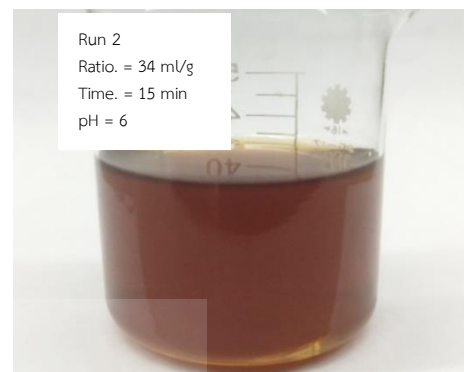
ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

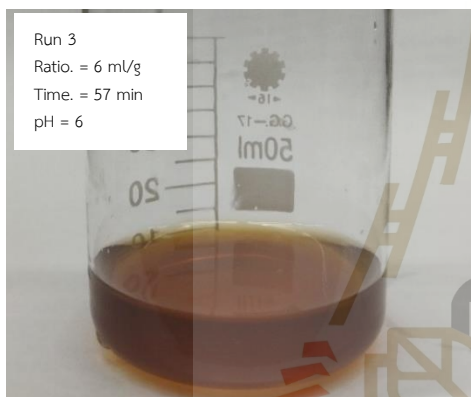
1. ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดใบสักสด : ตัวทำละลายน้ำ (BBD)



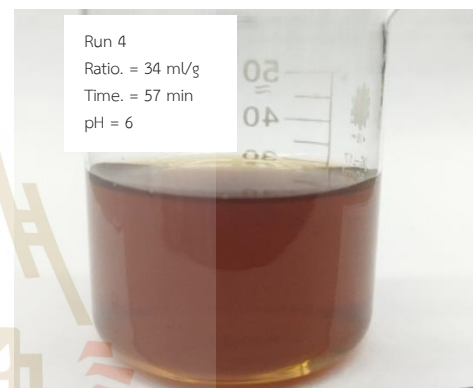
(ก)



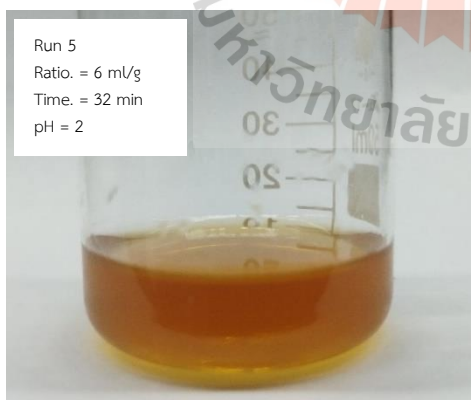
(ข)



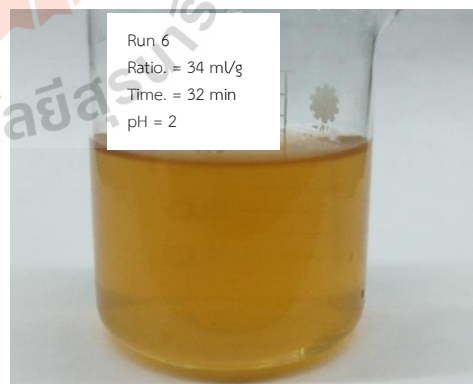
(ค)



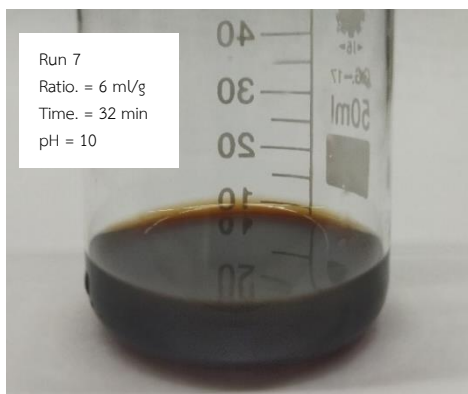
(ง)



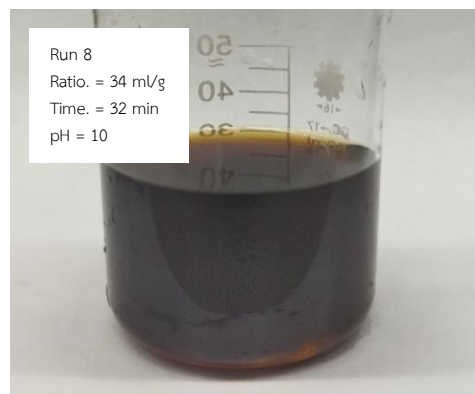
(จ)



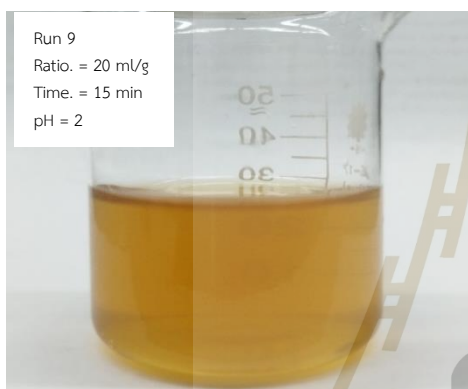
(ฉ)



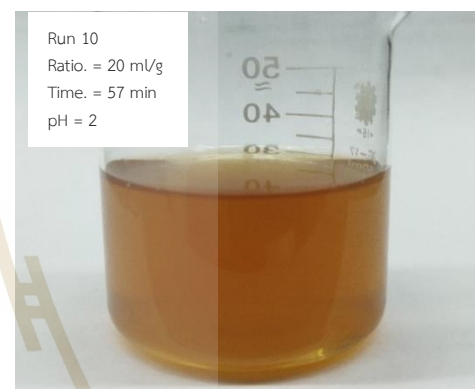
(๗)



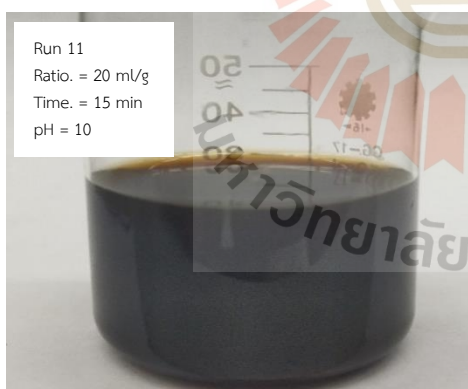
(๘)



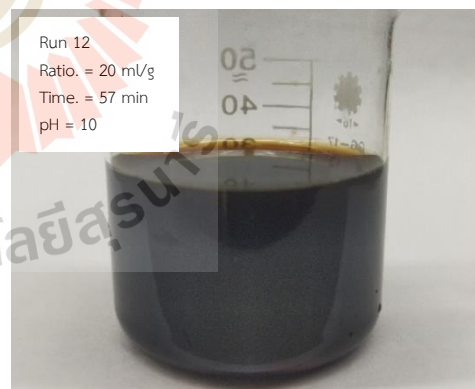
(๙)



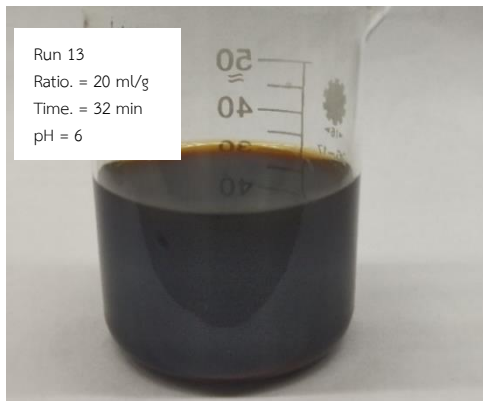
(๑๐)



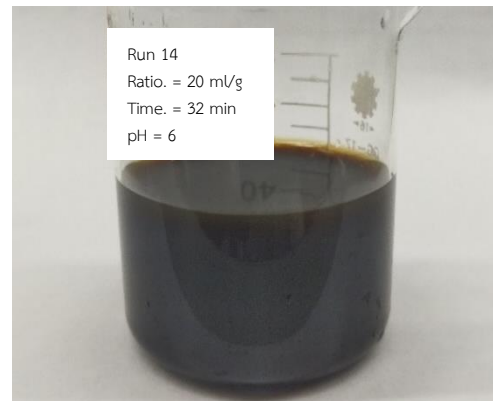
(๑๑)



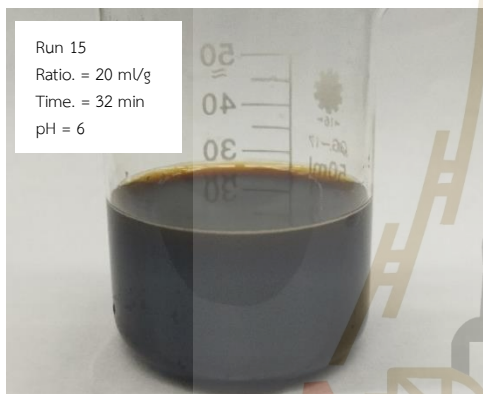
(๑๒)



(ด)



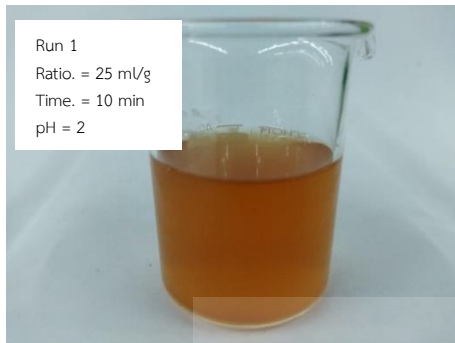
(ต)



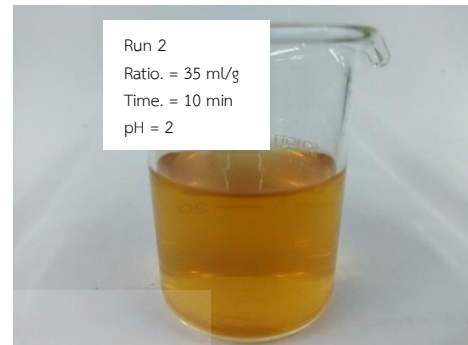
(น)

รูปที่ 1ค (ก)-(น) ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ

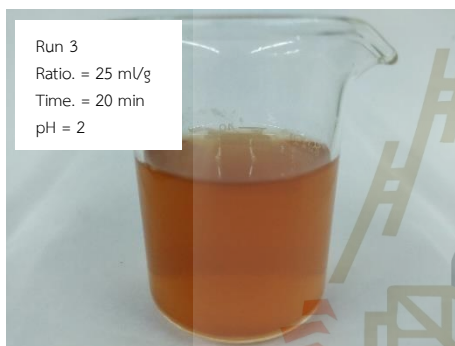
2. ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดใบสักแห้ง : ตัวทำละลายน้ำ (BBD)



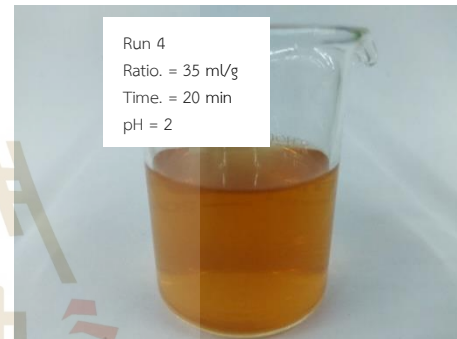
(ก)



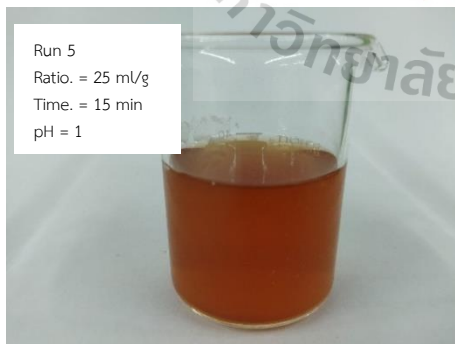
(ข)



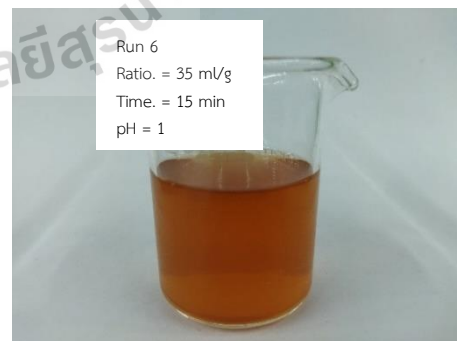
(ค)



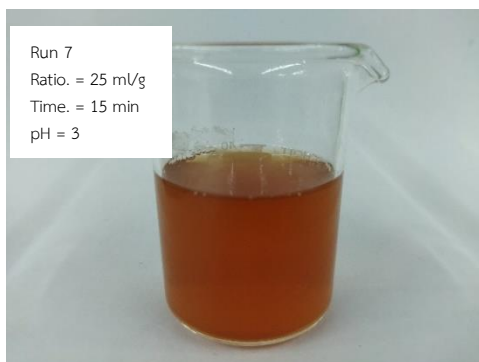
(ง)



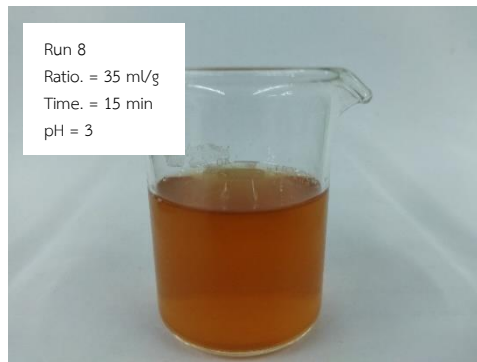
(จ)



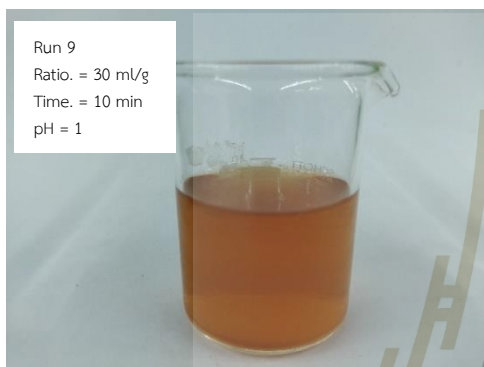
(ฉ)



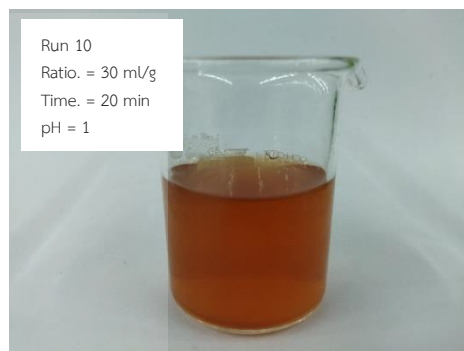
(ง)



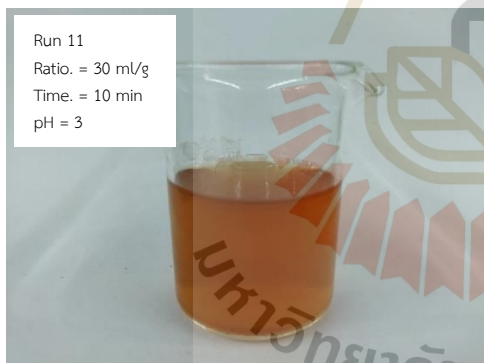
(ฉ)



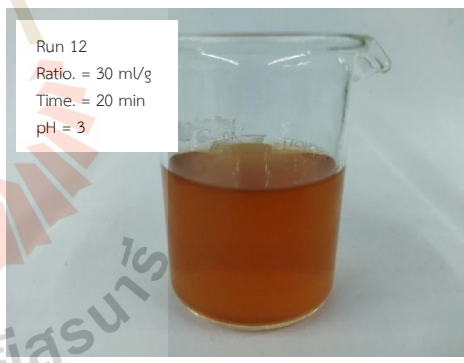
(ญ)



(ฉ)



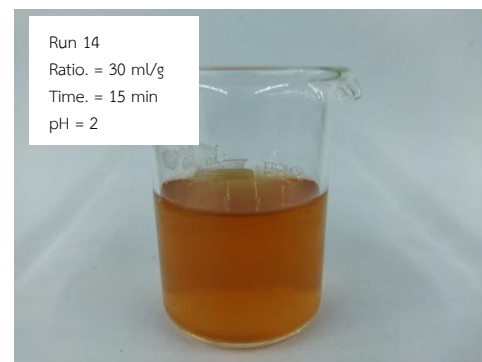
(ต)



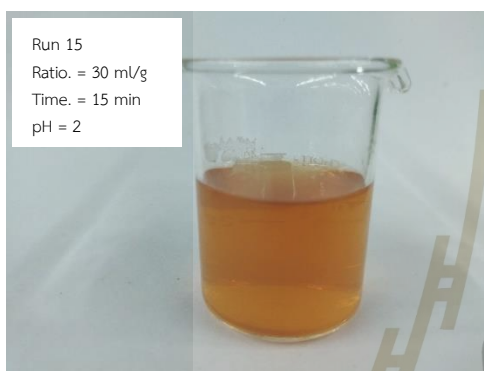
(ด)



(ด)



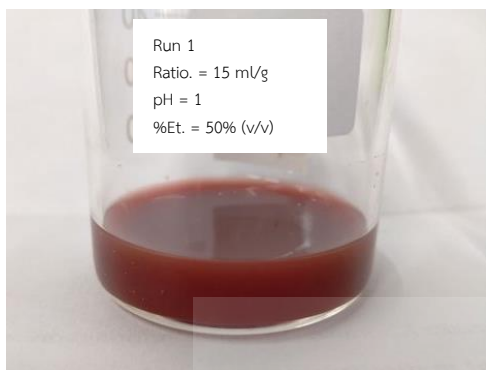
(ต)



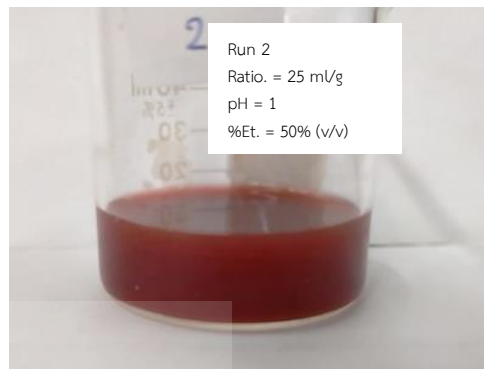
(น)

รูปที่ 2ค (ก)-(น) ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ

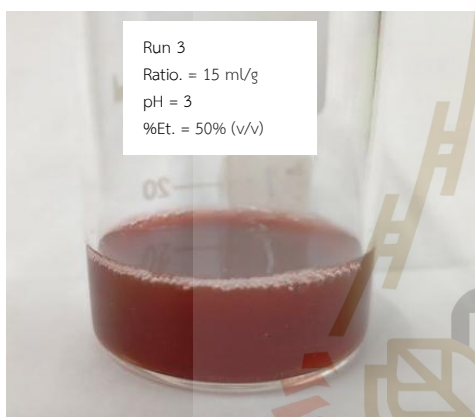
3. ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดใบสักสด : ตัวทำละลายผสม (BBD)



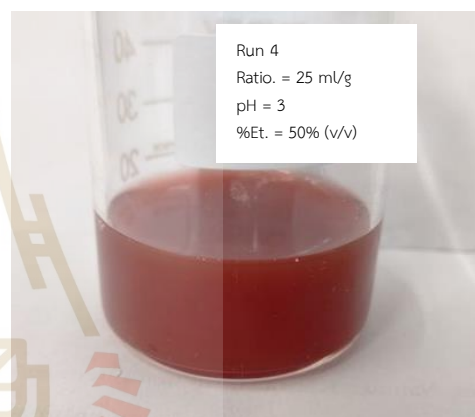
(ก)



(ข)



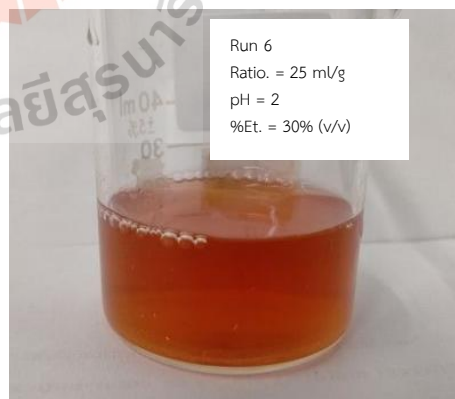
(ค)



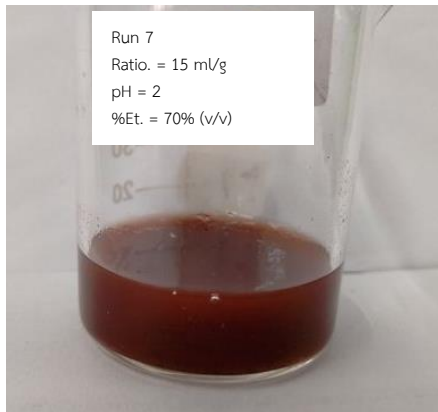
(ง)



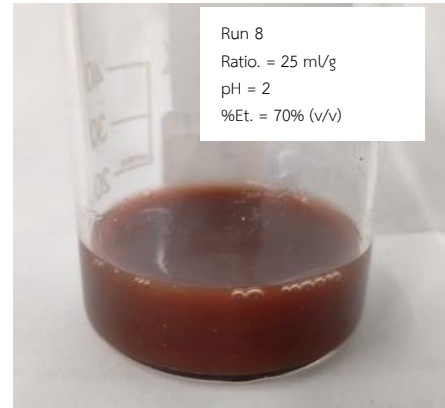
(จ)



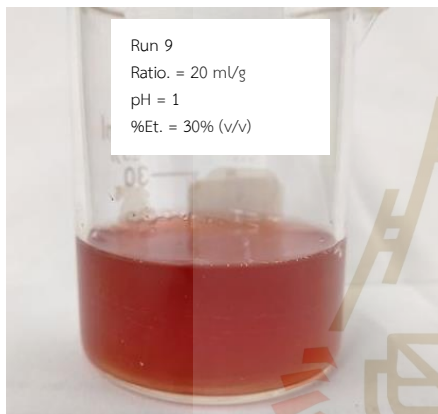
(ฉ)



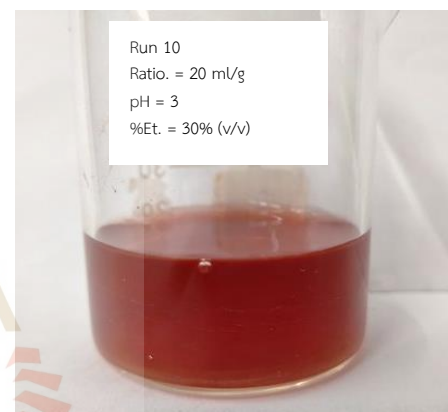
(จ)



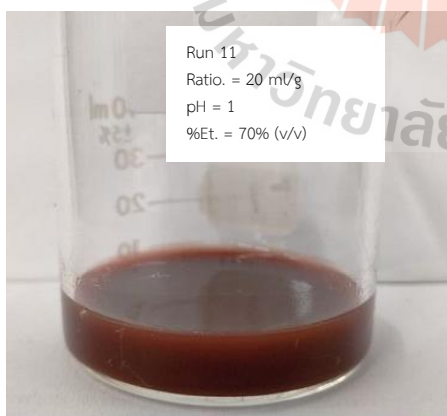
(ฉ)



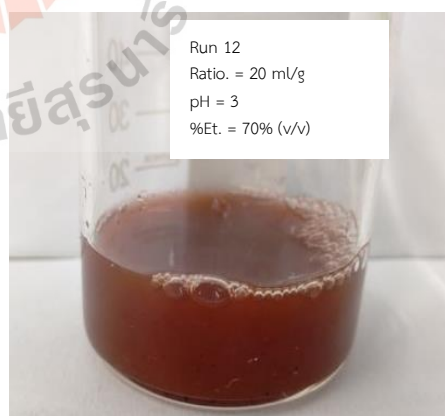
(ง)



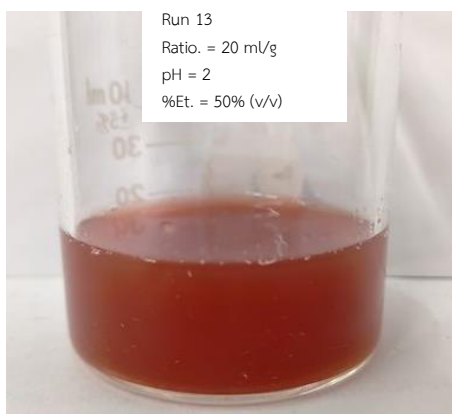
(ฉ)



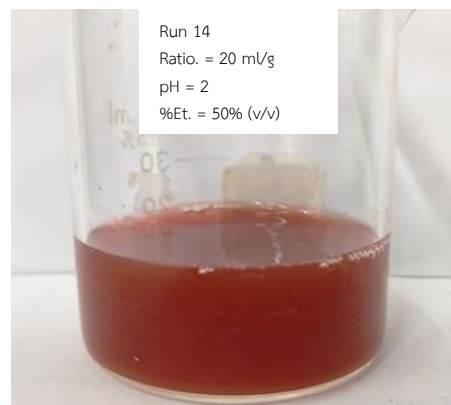
(ฉ)



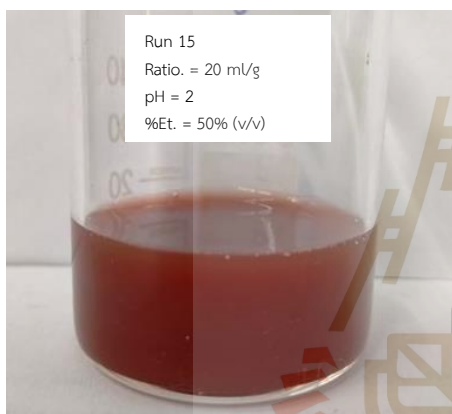
(ฉ)



(ด)



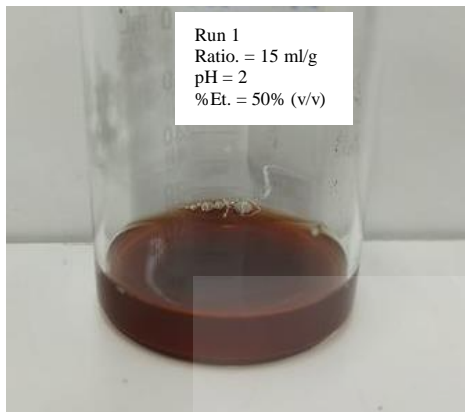
(ต)



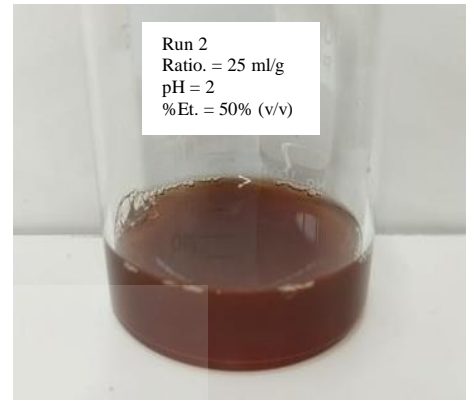
(น)

รูปที่ 3ค (ก)-(น) ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักสดที่ใช้ตัวทำละลายผสม

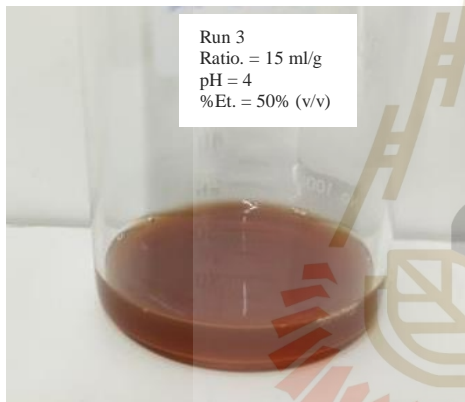
4. ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดใบสักแห้ง : ตัวทำละลายผสม (BBD)



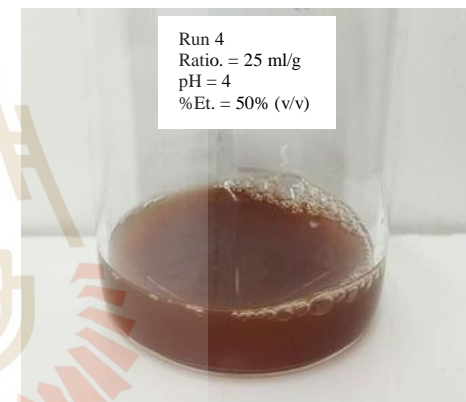
(ก)



(ข)



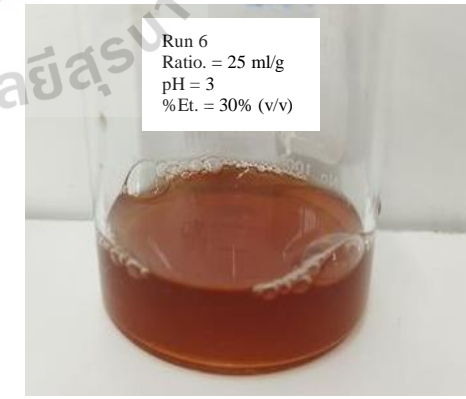
(ค)



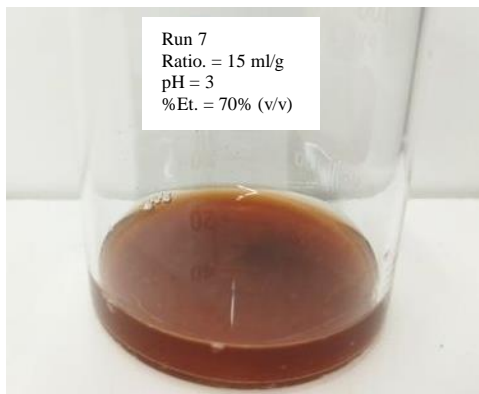
(ง)



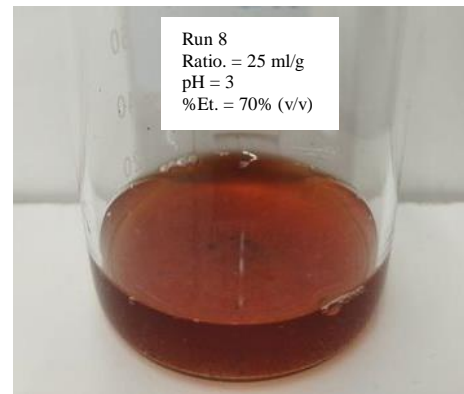
(จ)



(ฉ)



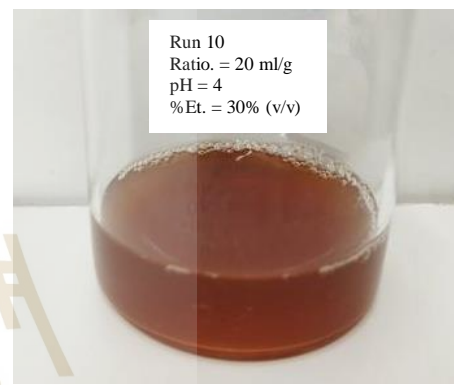
(๗)



(๘)



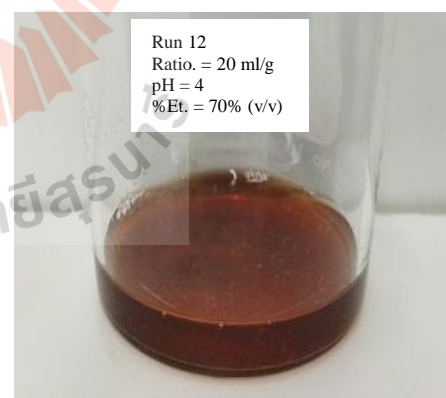
(๙)



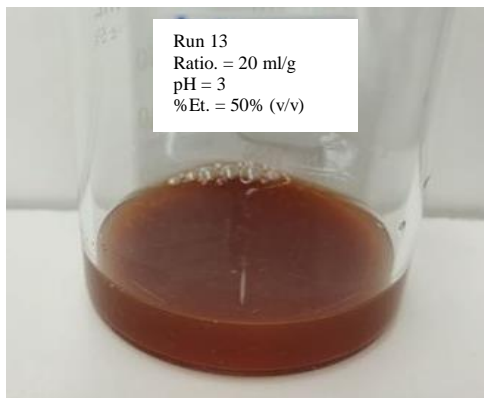
(๑๐)



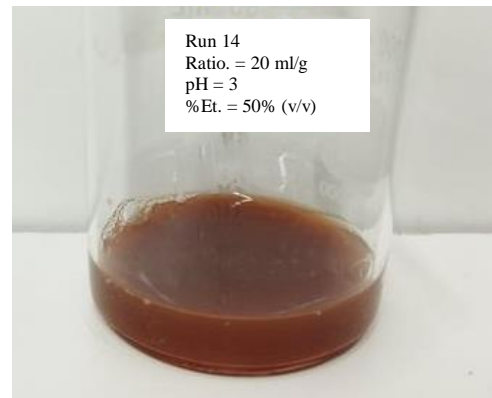
(๑๑)



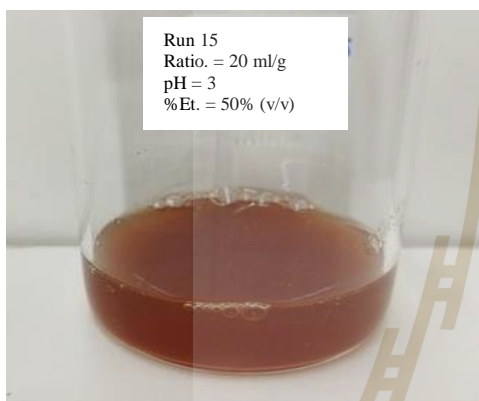
(๑๒)



(ด)



(ต)



(น)

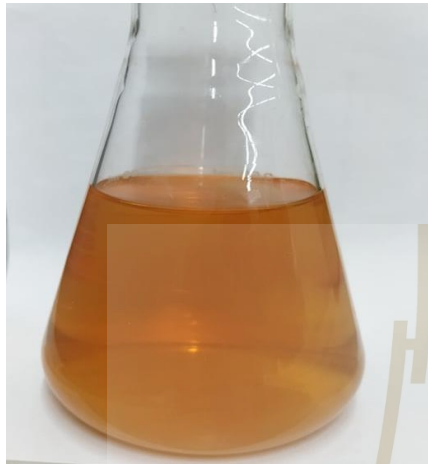
รูปที่ 4ค (ก)-(น) ตัวอย่างน้ำสีจากการสกัดสารธรรมชาติจากใบสักแห้งที่ใช้ตัวทำละลายผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5. ตัวอย่างน้ำสีที่สกัดได้จากการใช้สภาวะที่เหมาะสม

ใบสักสด: ตั้วทำละลายน้ำ pH = 2

ใบสักแห้ง : ตั้วทำละลายน้ำ pH = 1



(ก)



(ข)

ใบสักสด : เอทานอล 30% pH = 1

ใบสักแห้ง : เอทานอล 30% pH = 2



(ค)



(ง)

รูปที่ 5ค (ก)-(ง) ตัวอย่างน้ำสีที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม



ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

Suphattra Khunasinkun, Aroonsri Nuchitprasittichai and Guntima Sirijeerachai. (2020)
Optimization for Ultrasonic Assisted Extraction of Natural Dye Extraction from Golden Teak leaves Using Response Surface Methodology.The 29th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TIChE2020), Bio-economy for sustainable future. 1-2 June 2020, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. pp. 535-543.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุพัฒตรา คุณาสินกุล เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2538 ณ จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2561 ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 ได้ทำโครงการวิจัยในหัวข้อ “การสกัดสารประกอบฟลาโวนอยด์จากใบสบาดือบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก” ซึ่งทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง จากนั้นศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2561 โดยได้รับทุนสนับสนุนจากทางมหาวิทยาลัย โดยในระหว่างการศึกษา ได้มีโอกาสปฏิบัติงานผู้ช่วยสอนปฏิบัติการในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ซึ่งในระหว่างที่ศึกษาต่อระดับปริญญาโท ได้มีโอกาสนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCChE 2019) ประเทศญี่ปุ่น และ ในงานประชุมวิชาการของสมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 (The 29th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemical Conference, TIChE 2020)



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี