การสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาโดยใช้เครื่องสกัดแบบแพคเบด

นายปิยะพงค์ กิตติสารธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PHENOLIC COMPOUND EXTRACTION FROM *Clerodendrum inerme* USING PACKED BED EXTRACTOR

Mr. Piyapong Kittisaratham

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาโดยใช้เครื่องสกัดแบบแพคเบด
โดย	นายปิยะพงค์ กิตติสารธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. ชุติมณฑน์ สถิรพิพัฒน์กุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดุสิต)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. ชุติมณฑน์ สถิรพิพัฒน์กุล)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเช็ง สิทธิกิจโยธิน)

ปิยะพงศ์ กิตติสารธรรม: การสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาโดยใช้เครื่องสกัดแบบแพคเบด. (PHENOLIC COMPOUND EXTRACTION FROM *Clerodendrum inerme* USING PACKED BED EXTRACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. ชุติมณฑน์ สถิรพิพัฒน์กุล, 91 หน้า.

สำมะงาเป็นพืชสมุนไพรที่พบได้ทั่วไปในประเทศไทย ได้ถูกรายงานว่า มีการนำมาใช้ในการรักษาโรคแพทย์แผนไทย ในต้นสำมะงาประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิกหลายชนิด ซึ่งมีเอกสารยืนยันว่า มีประโยชน์ในด้านการยับยั้งจุลินทรีย์ การต้านมะเร็ง การลดอาการอักเสบ และการต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ระบบ คือ การสกัดแบบกะ และการสกัดแบบต่อเนื่องในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแบบกะ คือ สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) เป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ที่เวลาการสกัด 240 นาที ซึ่งได้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 14.48 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแบบแพคเบด คือ สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร และที่เวลาการสกัด 180 นาที ได้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 14.83 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง พบว่าที่ภาวะที่เหมาะสมนั้น เครื่องสกัดแบบแพคเบดมีการสกัดที่ดีกว่าการสกัดแบบกะ อัตราการสกัดสารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนตัวทำละลาย ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยสูงสุดที่ 23.6×10^{-13} ตารางเมตรต่อวินาที ในขณะที่ในการสกัดแบบกะ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.64×10^{-13} ตารางเมตรต่อวินาที

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554

5370460121: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: *CLERODENDRUM INERME* / PACKED BED EXTRACTOR / PHENOLIC COMPOUND EXTRACTION

PIYAPONG KITTISARATHAM: PHENOLIC COMPOUND EXTRACTION FROM *Clerodendrum inerme* USING PACKED BED EXTRACTOR. ADVISOR: CHUTIMON SATIRAPIPHATKUL, D. Eng, 91 pp.

Clerodendrum inerme, a medical plant widely found in Thailand, has been reported for the use in Thai traditional medicine. The whole plant of *C. inerme* contains many phenolic compounds, which have documented benefits as antimicrobial, anti-carcinogenic, anti-inflammatory and antioxidant. This research aims to study the suitable condition of phenolic compound extraction from *C. inerme*. The experiments are divided into two systems: batch extraction and continuous extraction in a packed bed extractor. The suitable conditions for the batch extraction were: 50% (v/v) ethanol solution as solvent, extraction temperature at 75°C, solvent-to-solid ratio of 20:1 (ml/g), particle size of less than 75 μm, extraction time of 240 min, in which the yield of phenolic compounds at 14.48 mg. equivalent gallic acid / g. dry weight was obtained. The suitable conditions in the packed bed were: 50% (v/v) ethanol solution at flow rate of 25 ml/min, extraction temperature 75°C, particle size of 180-300 μm, and extraction time of 180 min, whereas the yield of phenolic compounds at 14.83 mg. equivalent gallic acid / g. dry weight was obtained. It was found that at the suitable condition, the packed bed extractor had a better performance than that of the batch extraction. The extraction rate of the phenolic compound increased with increasing feed flow rate. At feed flow rate of 25 ml/min, the highest average diffusivity of phenolic compound at 23.6 $\times 10^{-13}$ m^2/s was obtained, whereas in the batch extraction, the average diffusivity of phenolic compound was 1.64 $\times 10^{-13}$ m^2/s.

Department : Chemical Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือที่ดีจากบุคคลต่างๆ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อ.ดร. ชุติมณฑน์ สถิรพิพัฒน์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ และ รศ.ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการวิจัย และให้ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตั้งแต่ต้นจนสำเร็จเป็นรูปเล่ม

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รศ.ดร. ศราวุธ ริมดุสิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.วันเช็ง สิทธิกิจโยธิน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเพื่อน พี่และน้องๆ ทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ทุกคนในครอบครัว และท่านผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้ให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าในการศึกษามาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ข้อมูลทั่วไปของสำมะงา	4
2.2 สารประกอบฟีนอลิก	6
2.2.1 ตัวอย่างสารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืช	7
2.2.2 ประโยชน์ของสารประกอบฟีนอลิก	9
2.3 สารประกอบฟีนอลิกในสำมะงา	10
2.4 การสกัดของแข็งด้วยตัวทำละลาย (Solid-liquid extraction)	15
2.5 ขั้นตอนกระบวนการชะละลาย (Leaching Step)	15
2.5.1การแพร่โดยการพา (Convective diffusion)	17
2.5.2 การแพร่ภายในอนุภาค (Internal diffusion)	18

หน้า

2.6 การเตรียมวัสดุในกระบวนการชะละลาย 20
2.7 กระบวนการสกัดสารสำคัญจากพืช 20
2.8 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัด 21
2.8.1 ระยะเวลาการสกัด 21
2.8.2 ขนาดอนุภาคของแข็ง 21
2.8.3 ชนิดตัวทำละลาย 21
2.8.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 22
2.8.5 การปั่นกวน 22
2.8.6 อัตราการป้อนตัวทำละลาย 22
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัด 22
2.9.1 ผลของอัตราส่วนของตัวทำละลายในสารละลาย 22
2.9.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อการสกัด 23
2.9.3 ผลของอัตราส่วนของแข็งต่อตัวทำละลายในการสกัด 23
2.9.4 ผลของอัตราการป้อนตัวทำละลายต่อการสกัด 25
2.9.5 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัด 26

บทที่ 3 อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย 27
3.1 อุปกรณ์ 27
3.2 เคมีภัณฑ์ 27
3.3 สมุนไพรที่ใช้ในการทดลอง 28
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย 28

บทที่ 4 ผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง 31
4.1 ผลการทดลองแบบกะ 32

หน้า

4.1.1 ผลของความเข้มข้นเอทานอลต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก 31
4.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก 36
4.1.3 ผลของอัตราตัวทำละลายต่อของแข็งต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก 40
4.1.4 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกในการสกัดสำมะงาขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร 44
4.2 การทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด 46
4.2.1 ผลของอัตราการป้อนตัวทำละลายต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก 46
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก 51
4.3 การเปรียบเทียบผลได้สารประกอบฟีนอลิกในการสกัดแบบกะและเครื่องสกัดแบบแพคเบด 56
4.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusivity) ของการสกัดสารประกอบฟีนอลิก 58
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 60
5.1 สรุปผลการวิจัย 60
5.2 ข้อเสนอแนวทางการปรับปรุง 62
รายการอ้างอิง 63
ภาคผนวก 69
ภาคผนวก ก 70
ภาคผนวก ข 72
ภาคผนวก ค 86
ภาคผนวก ง 90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 91

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบฟีนอลิกในสำมะงา	13
4.1	ค่า resident time ที่อัตราการป้อนต่างๆ ในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	51
4.2	เปรียบเทียบความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้ ปริมาตรที่ได้จากการสกัด และ เวลาที่ใช้ในการสกัด ในการสกัดแบบกะและแบบแพคเบดที่ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 10.45 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง	56
4.3	ค่าผลได้และความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่เวลาการสกัดเข้าสู่สมดุล ที่อัตรการป้อนตัวทำละลายต่างๆ	57
ข-1	ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)	72
ข-2	ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)	74
ข-3	ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนการสกัด 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)	75
ข-4	ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส, ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนการสกัด 15:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)	77
ข-5	ผลการทดลองแบบกะ ที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส, ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนการสกัด 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)	77

ตารางที่ หน้า

ข-6 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 มิลลิลิตรต่อนาที 78
ข-7 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนตัวทำละลาย 12 มิลลิลิตรต่อนาที 80
ข-8 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนตัวทำละลาย 18 มิลลิลิตรต่อนาที 82
ข-9 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที 84
ค-1 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 มิลลิลิตรต่อนาที 87
ค-2 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 12 มิลลิลิตรต่อนาที 87
ค-3 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 18 มิลลิลิตรต่อนาที 87
ค-4 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที 87
ค-5 ค่า residence time ที่อัตราการป้อน 4 มิลลิลิตรต่อนาที 88
ค-6 ค่า residence time ที่อัตราการป้อน 12 มิลลิลิตรต่อนาที 88
ค-7 ค่า residence time ที่อัตราการป้อน 18 มิลลิลิตรต่อนาที 88
ค-8 ค่า residence time ที่อัตราการป้อน 25 มิลลิลิตรต่อนาที 89

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สำมะงา (*Clerodendrum inerme (Linn.) Gaertn.*)	4
2.2	ตัวอย่างโครงสร้างฟีนอลิกที่พบในสำมะงา	6
2.3	โครงสร้างทางเคมีของหมู่ฟีนอล	7
2.4	โครงสร้างฟลาโวนอยด์ (Flavonoid)	8
2.5	โครงสร้างกรดแกลลิก (Gallic acid)	8
2.6	โครงสร้างเอลลาจิแทนนิน (Ellagitannin)	9
2.7	ขั้นตอนกระบวนการชะละลาย	16
2.8	ผลของอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งในการสกัดฟีนอลิกจากเปลือกลำไย	24
2.9	เครื่องสกัดแบบ immersion extractor	25
3.1	ชุดเครื่องสกัดแบบแพคเบด	29
4.1	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที เมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 30 50 70 และ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร)	34
4.2	ผลของความเข้มข้นเอทานอลต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และที่เวลาการสกัด 240 นาที เมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 30 50 70 และ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร)	35
4.3	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที เมื่อทำการแปรผันอุณหภูมิ 50 60 และ 75 องศาเซลเซียส	38

ภาพที่ หน้า

4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) และที่เวลาการสกัด 240 นาที เมื่อทำการแปรผันอุณหภูมิ 50 60 และ 75 องศาเซลเซียส 39

4.5 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที เมื่อทำการแปรผันอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งเป็น 10:1 (---◆---), 15:1 (---■---) และ 20:1 (—▲—) (มิลลิลิตรต่อกรัม) 42

4.6 ผลของอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และที่เวลาการสกัด 240 นาที เมื่อทำการแปรผันอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งเป็น 10:1, 15:1 และ 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) 43

4.7 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาค180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราส่วน ของตัวทำละลายต่อของแข็ง 20:1 (มิลลิลิตรต่อนาที) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที 47

4.8 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาค180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิการสกัด 75 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการสกัด 0-180 นาที โดยแปรผัน อัตราการป้อนตัวทำละลายเป็น 4 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที 48

ภาพที่ หน้า

4.9 การเคลื่อนที่ของสารประกอบฟีนอลิกภายในคอลัมน์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 มิลลิลิตรต่อนาที และ ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ที่เวลาการสกัด (ก) ก่อนการป้อนตัวทำละลาย (ข) หลังการป้อนตัวทำละลาย 5 นาที(ค) หลังการป้อนตัวทำละลาย 30 นาที 49

4.10 ผลของอัตราการป้อนตัวทำละลายต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส และที่เวลาการสกัด 180 นาที เมื่อทำการแปรผันอัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที 50

4.11 ภาพถ่ายอนุภาคสำมะงาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามขนาดอนุภาคต่างๆ (ก) 180-300 ไมโครเมตร (ข) 300-600 ไมโครเมตร (ค) 600-850 ไมโครเมตร (ง) มากกว่า 850 ไมโครเมตร 53

4.12 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการสกัด 0-180 นาที โดยแปรผันขนาดอนุภาคสำมะงา 180-300 300-600 600-850 และ มากกว่า850 ไมโครเมตร 54

4.13 ผลของขนาดอนุภาค ต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที และที่เวลาการสกัด 180 นาที เมื่อทำการแปรผันขนาดอนุภาคสำมะงา 180-300 300-600 600-850 และ มากกว่า 850 ไมโครเมตร 55

ก-1 กราฟมาตรฐานสารประกอบฟีนอลิก 71

ง-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า lnY กับ เวลา ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร 90

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

N_A คือ ค่าฟลักซ์เฉลี่ย (กิโลกรัม•(ตารางเมตร·วินาที)$^{-1}$)

k_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (เมตรต่อวินาที)

C_{L1} คือ ความเข้มข้นของของเหลวภายนอก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_{Li} คือ ความเข้มข้นของของเหลวที่ติดกับผิวของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

K คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ภาวะสมดุล

J_s คือ ค่าฟลักซ์ของการแพร่ (กิโลกรัม•(ตารางเมตร·วินาที)$^{-1}$)

D_s คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร•วินาที)

c คือ ความเข้มข้นสารละลาย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

X คือ ระยะทางการแพร่ (เมตร)

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (ตารางเมตร•วินาที)

r คือ รัศมีของการแพร่ (เมตร)

t คือ เวลา (นาที)

Y คือ สัดส่วนระหว่างค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกที่เหลืออยู่ในพืชในแต่ละช่วงเวลากับค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่อยู่ในพืชแห้ง

C คือ ความเข้มสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้ตามช่วงเวลา (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_0 คือ ความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่ทั้งหมดที่อยู่ในพืชแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

V คือ ปริมาตรที่อยู่ภายในคอลัมน์ (มิลลิลิตร)

Q คือ อัตราการป้อนตัวทำละลาย (มิลลิลิตรต่อนาที)

Re_p คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

D_p คือ equivalent spherical diameter of the particle (เมตร)

v คือ superficial velocity (เมตรต่อนาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร))

μ คือ ความหนืดของไหล (กิโลกรัม•(เมตร·วินาที)$^{-1}$)

ε คือ ความพรุนหรืออัตราส่วนปริมาตรช่องว่างของแข็งกับปริมาตรของแข็งทั้งหมด

τ คือ ความคดเคี้ยวของเส้นทางในการแพร่

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความอุดมสมบูรณ์มีทรัพยากรธรรมชาติที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมุนไพรที่มีอยู่รอบตัวเป็นสิ่งที่เคียงคู่กับวิถีของคนไทยมาอย่างช้านาน จากขนบธรรมเนียมประเพณีที่ใช้สมุนไพรในการรักษาโรคหรือนำมาใช้ในการทำเป็นเครื่องสำอางที่ไว้ใช้สำหรับการดูแลร่างกายที่ใช้ในชีวิตประจำวัน จัดเป็นภูมิปัญญาไทยในการนำคุณประโยชน์ของสมุนไพรไทยเหล่านั้นที่ได้ถ่ายทอดมาจากรุ่นสู่รุ่นต่อมา ในปัจจุบันได้มีการสนับสนุนให้ใช้สมุนไพรไทยเพื่อช่วยประเทศชาติในการลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อยาจากต่างประเทศได้ปีละจำนวนมาก อีกทั้งสมุนไพรยังหาได้ง่ายและมีความปลอดภัยมากกว่าสารที่สังเคราะห์ขึ้น ก่อให้เกิดการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างในระดับอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหารเสริม และเวชสำอาง เป็นต้น ร่วมทั้งมีการพัฒนาวิจัยในสมุนไพรเพื่อให้ได้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากธรรมชาติชนิดใหม่ๆ และสกัดให้ได้ในปริมาณมาก

สารประกอบฟีนอลิก เป็นกลุ่มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบได้ทั่วไปในพืชตามธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid), กรดฟีนอลิก (Phenolic acid) และ กรดแทนนิน (Tannin acid) เป็นต้น (Martins และคณะ, 2011) โดยที่สารประกอบฟีนอลิกเหล่านี้มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ทำหน้าที่ป้องกันหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นในร่างกายที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคต่างๆเช่น โรคมะเร็ง โรคหัวใจ เป็นต้น อีกทั้งยังช่วยชะลอกระบวนการที่ทำให้แก่ก่อนวัย จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารสำคัญที่ใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ยา อาหารเสริม และเวชสำอาง

สำมะงา (*Clerodendrum inerme (Linn.) Gaertn.*) เป็นสมุนไพรชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายๆประเทศ ในประเทศไทยนั้น มีการนำสำมะงามาใช้เป็นยาต้มแก้ไข้ เป็นยาถูนวดแก้ปวดข้อ รักษาโรคผิวหนัง ทาบริเวณเป็นฝี มีน้ำเหลือง แก้อาการบวมฟกช้ำ (พร้อมจิตร และคณะ, 2000) ส่วนในประเทศอินเดียนั้น นิยมนำมาใช้ในการรักษาโรคผิวหนัง กามโรค แผลติดเชื้อโรคเท้าช้าง โรคหอบหืด แผลไฟไหม้ และโรคไขข้อ (Avani, Harish, และ Neetha, 2005) เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการรายงานว่า สารสกัดจากสำมะงามีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ในหลายชนิด (Chahal, Sarin, และ Malwal, 2010) และสารสกัดที่ได้จากใบสามารถนำมาใช้ลดความดันโลหิตสูง (Guessan, Zirihi, และ Malwal, 2010) เนื่องจากในต้นและใบสำมะงามีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่อยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิกและอนุพันธ์ฟลาโวนอยด์เป็น

ส่วนใหญ่ (Gurudeebun และคณะ, 2010) จากประโยชน์ดังที่กล่าวมา สำมะงาจึงเป็นพืชที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาการสกัดที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นสมุนไพรที่หาได้ง่าย ราคาถูกและยังไม่นิยมแพร่หราเป็นที่รู้จักมากนัก จึงจำเป็นในการนำความรู้ทางด้านคุณประโยชน์มาเผยแพร่ให้เป็นที่นิยมมากยิ่งขึ้นและ เมื่อพิจารณาในด้านการสกัดจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ยังไม่มีการศึกษาการสกัดแบบแพคเบด ซึ่งระบบนี้มีข้อดีมากกว่าการสกัดแบบกะ คือ สารสกัดที่ได้มีความเข้มข้นสูงกว่า, สามารถสกัดได้คราวละมากๆ, ง่ายต่อการควบคุมดำเนินการ และประหยัดเวลาในการสกัด

ด้วยเหตุนี้ในการดำเนินงานวิจัยจึงมุ่งเน้นในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาด้วยเครื่องสกัดแบบแพคเบด โดยอาศัยข้อมูลเบื้องต้นจากการสกัดในระบบแบบกะในระดับหลอดทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาในระบบแบบกะ

1.2.2 เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาในเครื่องสกัดแบบแพคเบด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาแบบกะในหลอดทดลองโดยการแปรผันภาวะต่างๆ คือ

1.3.1.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 50, 60 และ 75 องศาเซลเซียส

1.3.1.2 ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 30, 50, 70 และ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร)

1.3.1.3 อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1, 15:1 และ 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)

1.3.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาในเครื่องสกัดแบบแพคเบดโดยใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากการสกัดแบบกะและแปรผันภาวะต่างๆคือ

1.3.2.1 อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4, 12, 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

1.3.2.2 ขนาดอนุภาคของสำมะงา 180-300, 300-600, 600-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร

1.3.3 ทำการเปรียบเทียบค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกในการสกัดแบบกะและในเครื่องสกัดแบบแพคเบด

1.3.4 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการสกัดที่ภาวะต่างๆ

1.3.5 ภาวะที่เหมาะสมจะพิจารณาค่าผลได้ (yield) ในหน่วยน้ำหนักมิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่ว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาและข้อมูลของการสกัดโดยใช้เครื่องสกัดแบบแพคเบด

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของสำมะงา

สำมะงา เป็นไม้พุ่ม สูง 1- 2 เมตร ใบเดี่ยว รูปวงรี หรือรูปไข่ กว้าง 2- 4 ซม. ยาว 4- 8 ซม. ก้านใบสีน้ำตาลแดงหรือม่วงแดง ดอกออกเป็นช่อตามซอกใบ กลีบดอกสีขาว ผลมีเมล็ดเดียว พบได้ตามชายฝั่งทะเลในเอเชียใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก จนถึงออสเตรเลีย ในไทยพบตามชายฝั่งทะเลทางภาคตะวันออกเฉียงใต้ ภาคกลาง และภาคใต้ ขึ้นตามป่าชายหาดระดับความสูงไม่เกิน 200 เมตร สำมะงาแสดงดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 สำมะงา (*Clerodendrum inerme (Linn.) Gaertn.*)
(Shrivastava และ Patel, 2007)

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Clerodendrum inerme (Linn.) Gaertn.*

วงศ์: VERBENACEAE

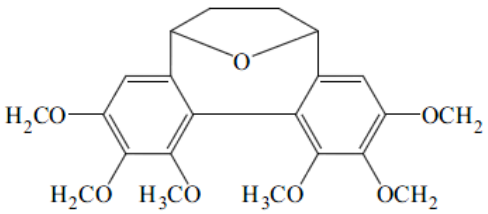
ชื่อสามัญ: Garden Quinine, Seaside Clerodendron

ชื่ออื่นๆ: สำลีงา, สำมะลีงา (ภาคตะวันออก), เขี้ยวงู (ภาคตะวันตก), ส้มเนรา, สักขีรีย่าน, สำปันงา (ภาคใต้), สำมะลีงา (ทั่วไป)

สรรพคุณ: ในส่วนของราก เป็นยาต้มแก้ไข้ ต้มเคี่ยวกับน้ำมันพืชใช้เป็นยาถูนวดแก้ปวดข้อ ในส่วนของใบตากแดดให้แห้ง แล้วนำมาต้มน้ำอาบรักษาโรคผิวหนัง ส่วนใบสด ตำแล้วผสมเหล้า ทาบริเวณเป็นฝี มีน้ำเหลือง แก้อาการบวม ฟกช้ำจากการหกล้มได้ดี (พร้อมจิตร และคณะ, 2000) ในประเทศอินเดียมีการนำมาใช้ในการรักษาโรคผิวหนัง กามโรค แผลติดเชื้อโรคเท้าช้างโรคหอบหืด แผลไฟไหม้ และโรคไขข้อ (Avani, Harish, และ Neetha, 2005) เป็นต้น นอกจากนี้ในงานวิจัยต่างๆ ได้รายงานถึงชนิดของสารประกอบฟีนอลิกในกลุ่มต่างๆที่พบในสำมะงา ได้แก่

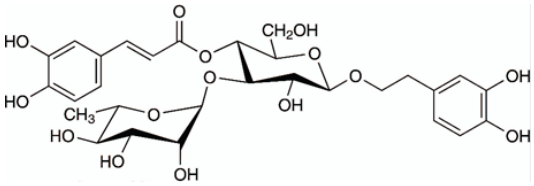
1. สารกลุ่ม Flavonoids (Vendantham, Subramanian, และ Harbone, 1977; El-Shamy, El-Shabrawy, และ El-Fiki, 1996)
    1.1 สาร 4'-methylscutellarein
    1.2 สาร 5-hydroxy-4'-7-dimethoxy flavones
    1.3 สาร Salvigenin
    1.4 สาร Cyanaroside
2. สารกลุ่ม Neolignan ที่ได้จากส่วนใบ และเมล็ด (Spencer และ Flippen-Anderson, 1981; Achari และคณะ, 1990)
    2.1 สาร Neolignans I
    2.2 สาร Neolignans II
    2.3 สาร Neolignans III
3. สารกลุ่ม Phenylpropanoid (Fauvel, Gleye, และ Andary, 1989)
4. สารกลุ่ม Clerodane diterpenes (Achari และคณะ, 1990)
    4.1 สาร 3-epicaryoptin
    4.2 สาร Clerodemic acid
    4.3 สาร Cleroinermin
    4.4 สาร 15- methoxy-14, 15-dihydro-3-epicaryoptin
5. สารกลุ่ม Triterpenes (Achari และคณะ, 1990)
6. สารกลุ่ม Neo-Clerodane Diterpene (Calis และคณะ, 1994)
    6.1 สาร Inerminoside A 1
    6.2 สาร Inerminoside B 2
7. สารกลุ่ม Phenols (Calis และคณะ, 1994)
8. สารกลุ่ม Irodoid glycosides (Calis และคณะ, 1994)

ตัวอย่างโครงสร้างสารประกอบฟีนอลิกชนิดต่างๆ ที่พบในสำมะงา แสดงในรูปที่ 2.2



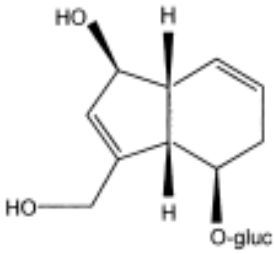
Neolignan I

(Spencer และ Flippen-Anderson, 1981)



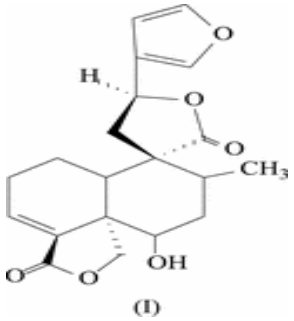
Phenylpropanoid

(Fauvel, Gleye, และ Andary, 1989)



Irodoid glycosides

(Calis และคณะ, 1994)



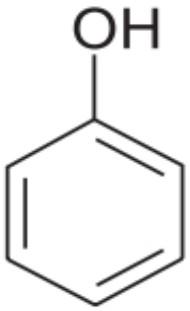
Clerodane diterpene

(Achari และคณะ, 1990)

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างสารประกอบฟีนอลิกที่พบในสำมะงา

2.2 **สารประกอบฟีนอลิก**

สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) คือ อนุพันธ์ของเบนซินที่มีหมู่ไฮดรอก-ซิลต่ออยู่เป็นหลักและอาจมีหมู่แทนที่ต่าง ๆ ในตำแหน่ง ออโท (Orto) เมตา(Meta) หรือพารา (Para) โดยสารฟีนอลิกพื้นฐาน คือ สารฟีนอล (Phenol) ประกอบด้วยวงแหวนเบนซิน 1 วง และหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของหมู่ฟีนอล (Michalowicz และ Duda, 2006)

สารประกอบฟีนอลิกสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามจำนวนของวงแหวนฟีนอล ได้แก่

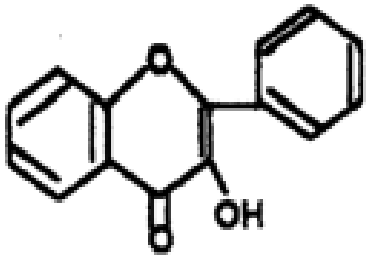
1. Monocyclic phenol เช่น กรดฟีนอลิก (Phenolic acid), คูมาริน (Coumarin)
2. Dicyclic phenol เช่น ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids), นีโอลิกแนน (Neolignans)
3. Polycyclic phenol หรือ polyphenol เช่น ลิกนิน (Lignin), กรดแทนนิน (Tannin acid)

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารที่พบได้ในพืชทั่วไปตามธรรมชาติ โดยเกิดขึ้นจากกระบวนการเมทาบอลิซึมในขั้นที่สอง (secondary metabolites) ซึ่งพืชจะทำการสังเคราะห์ขึ้นในระหว่างการเจริญเติบโต หรือเมื่อถูกกระตุ้นการสร้างจากปัจจัยต่างๆ เช่น เพื่อปกป้องและฟื้นฟูจากการติดเชื้อ ซ่อมแซมส่วนที่เสียหาย และปกป้องพืชจากรังสียูวีเมื่อได้รับแสงแดด รวมทั้งยังเป็นสารที่ทำให้เกิดสีในพืชและจะพบได้ในทุกส่วนของพืช (Naczk และ Shahida, 2004) กลุ่มสารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืชที่สำคัญมีหลายชนิด เช่น ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid), กรดฟีนอลิก (Phenolic acid) และกรดแทนนิน (Tannin acid) เป็นต้น (Martins และคณะ, 2011)

2.2.1 ตัวอย่างสารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืช

2.2.1.1 ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid)

ฟลาโวนอยด์ เป็นสารกลุ่มใหญ่ที่พบมากกว่าครึ่ง ในสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดกว่า 8000 ชนิดที่ได้จากธรรมชาติ (Harborne, Baxter, และ Moss, 1999) สามารถละลายน้ำได้ มีรงควัตถุสีเหลืองประกอบด้วยจำนวนคาร์บอน 15 อะตอมที่ประกอบไปด้วยสามวงเบนซีนโดยมีออกซิเจนเชื่อมอยู่สองอะตอมในวงเบนซีน กลุ่มฟลาโวนอยด์หลักประกอบไปด้วยฟลาโวน (Flavone), ฟลาโวนอล (Flavonol), ฟลาวาโนน (Flavanone), แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) และ ไอโซฟลาโวนอยด์ (Isoflavonoids) พบได้ทั่วไปใน หอมหัวใหญ่, บรอคโคลี่, แอปเปิ้ล ผลไม้ที่มีรสเปรี้ยวและยังพบได้ใน ชา,ไวน์ (Heim, Tagliaferro และ Bobilya, 2001) ตัวอย่าง โครงสร้างฟลาโวนอลแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างฟลาโวนอล (Flavonol) (Heim, Tagliaferro, และ Bobilya, 2001)

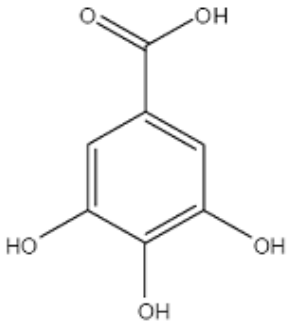
2.2.1.2 **กรดฟีนอลิก** (Phenolic acid)

กรดฟีนอลิก เป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบไปด้วยวงของฟีนอลิกและเป็นฟังก์ชั่นของกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) กรดฟีนอลิกที่พบจะแบ่งได้ตามโครงสร้างออกเป็น 2 ชนิดคือ

(1) กรดไฮดรอกซี่เบนโซอิค (Hydroxybenzoic acid) ได้แก่ กรดแกลลิก (Gallic acid), กรดพาราไฮดรอกซี่เบนโซอิค (p-Hydroxybenzoic acid), กรดวานิลิค (Vanillic acid) และ กรดไซรินจิค (Syringic acid) เป็นต้น

(2) กรดไฮดรอกซี่ซินนามิค (Hydroxycinnamic acid) ได้แก่ กรดคาเฟอิค (Caffeic acid), กรดเฟรูลิค (Ferulic acid) และ กรดพาราคูมาริน (p-Coumarin acid)

พบได้ทั่วไปในพืช ผลไม้อบแห้ง และกาแฟ (Bravo, 1998) ตัวอย่างโครงสร้างกรดแกลลิกแสดงดังรูปที่ 2.5



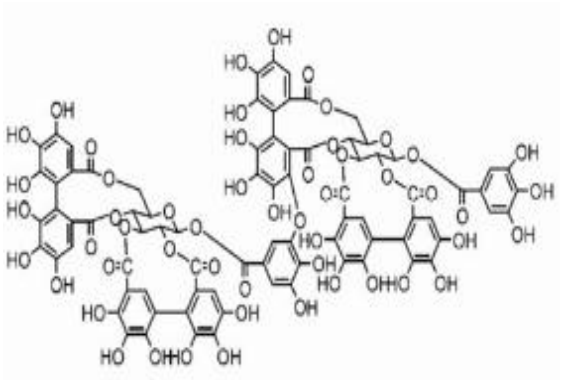
รูปที่ 2.5 โครงสร้างกรดแกลลิก (Gallic acid) (Bravo, 1998)

2.2.1.3 **กรดแทนนิน** (Tannin acid)

กรดแทนนินหรือแทนนิค เป็นสารประกอบฟีนอลิกจำพวกโพลีฟีนอล (Polyphenol) ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและเป็นกรดอ่อน ประกอบด้วยกรดแกลลิก 9 โมเลกุล และ น้ำตาลกลูโคส 1 โมเลกุล

กรดแทนนิคแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ คอนเดนส์แทนนิน (Condensed tannins) และไฮโดรไลซ์แทนนิน (Hydrolysable tannins) ตัวอย่างสารที่พบเช่น โปรแอนโทไซยานิดิน (Proanthocyanidin) และ เอลลาจิแทนนิน (Ellagitannin)

พบมากในใบชา เช่น ชาเขียว ชาดำ ชาอู่หลง (Dai และ Mumper, 2010) เป็นต้น ตัวอย่างโครงสร้างเอลลาจิแทนนิน (Ellagitannin) แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างเอลลาจิแทนนิน (Ellagitannin)

(Dai และ Mumper, 2010)

2.2.2 **ประโยชน์ของสารประกอบฟีนอลิก**

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระชนิดหนึ่ง ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิตามินซี วิตามินอี และแคโรทีนอยด์ (Rice-Evan และ Miller, 1995) โดยสารนี้สามารถต้าน และชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นในร่างกาย ทำให้สามารถป้องกันเซลล์จากการถูกทำลายโดยการจับกับอนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระถูกทำลายไปและหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ลง ขณะเดียวกันสารต้านอนุมูลอิสระก็จะถูกทำลายตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งในทางการแพทย์ถือว่า จะช่วยป้องกันการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคไขมันโลหิตสูง โรคมะเร็ง โรคหัวใจ โรคไต รวมทั้งช่วยชะลอริ้วรอยที่แก่ก่อนวัย นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยยืนยันว่า มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียหลายชนิด และใช้เป็นสารกันหืนในอาหารได้เช่นกัน (Naczk และ Shahida, 2004)

2.3 สารประกอบฟีนอลิกในสำมะงา

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวกับสารประกอบฟีนอลิกที่พบในสำมะงามา มีดังนี้

Ahmed, Chander, และ Perrira (1981) ได้รายงานถึงการนำใบสำมะงามาผสมกับอาหารของหนอนตายยาก (Housefly larval) พบว่า จะมีผลทำให้น้ำหนักในระยะดักแด้มีค่าลดลงและยับยั้งการตายของตัวแก่แบบฉบับพลันได้

Pereira และ Gurudutt (1990) ได้รายงานถึงสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในใบสำมะงา คือ 3-Epicaryoptin เป็นสารที่ช่วยยับยั้งพฤติกรรมการกินอาหารปกติ (Antifeedant activities) สำหรับหนอนตายยากและยุง

Masuda และคณะ (1999) ได้รายงานฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดด้วยเมทานอลจากใบพืชชนิดต่างๆที่ขึ้นในป่าชายเลน พบว่า สารสกัดสำมะงามีความสามารถในการป้องกันการตายของเซลล์หนูจาก oxidative stress เช่น H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะมีค่า 50.2 ± 21.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจัดว่าเป็นค่าที่สูง

Gebbinck, Jansen, และ Groot (2002) ได้ศึกษาสารในกลุ่ม neo-clerodane diterpenes หลายชนิด ในต้นสำมะงา พบว่า มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการช่วยยับยั้งพฤติกรรมการกินอาหารปกติของแมลงที่กัดแทะพืชทางการเกษตรได้

Pandey และคณะ (2003) ได้รายงานสารสกัดจากสำมะงาด้วยเฮกเซน พบว่าประกอบด้วยสารหลายชนิด คือ สารกลุ่ม sterols ได้แก่ 4a-methyl-24b-ethyl-5a-cholesta-14, 25-dien-3b-ol และสาร 24 β-ethylcholesta-5, 9(11), 22E-trien-3β-ol และสารกลุ่ม aliphatic glucoside คือ 11- pentacosanone และสารกลุ่ม aliphatic ketone คือ 6-nonacosanone รวมทั้งสารกลุ่ม diterpene คือ สาร clerodermic acid

Anitha และ Kannan (2005) ได้รายงานถึงฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราจากสารสกัดใบและลำต้นของสำมะงาด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซีเตตและเฮกเซน พบว่า สารสกัดจากใบสำมะงาที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถยับยั้งเชื้อราชนิด pathogenic ได้ดีกว่า human dermatophytes

Khan และคณะ (2005) ทำการศึกษาการสกัดสำมะงาด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ คือ เมทานอล เอทิลอะซีเตต และน้ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียจำนวน 18 ชนิด พบว่า สารสกัดสำมะงาด้วยน้ำมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้มากที่สุดถึง 15 ชนิด

Pandy และคณะ (2006) ได้ศึกษาการสกัดสำมะงาด้วยตัวทำละลายเฮกเซนและบิวทานอล พบว่า สารสกัดที่ได้จากการใช้เฮกเซน ประกอบด้วยสาร pentadecanoic acid-β-D-glucoside และสาร Stigmasterol glucoside ส่วนสารสกัดที่ได้จากการใช้บิวทานอล ประกอบด้วยสารในกลุ่ม flavonoids จำนวน 2 ชนิด คือ acacetin และ apigenin

Uddin, Grice, และ Trilogo (2009) ทำการศึกษาสารสำคัญที่ได้จาการสกัดพืชสมุนไพร 16 ชนิด ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน, ไดคลอโรมีเทน, เมทานอล และน้ำ ด้วยเครื่องสกัดซ็อกห์เลท พบว่า การสกัดด้วยเมทานอลจะให้ค่าผลได้ 1.43 เปอร์เซ็นต์ และการสกัดด้วยน้ำจะให้ค่าผลได้ 3.24 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำสารสกัดที่ได้มาทดสอบการเป็นพิษต่อเซลล์ fibroblasts (NIH3T3) ของหนู และเซลล์ลายของมะเร็งในคน 3 ชนิด (gastric: AGS, colon: HT-29; และ breast: MDA-MB-435S) ด้วยวิธี MTT assay พบว่า สารสกัดเมทานอลของสำมะงามีความเป็นพิษต่อเซลล์หนูต่ำ แต่มีค่าความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งอย่างจำเพาะเจาะจงอยู่ในช่วง IC_{50} (0.2-2.3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และจะมีความสามารถในการฆ่าเซลล์มะเร็งมีค่า IC_{50} ตั้งแต่ช่วงความเข้มข้น 2.38 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นต้นไป แต่ในส่วนสารสกัดด้วยน้ำจะต้องใช้ความเข้มข้นตั้งแต่ 2.50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ขึ้นไปจึงจะสามารถฆ่าเซลล์มะเร็งได้

Yankanchi และ Gadache (2010) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดเมทานอลจากใบของสำมะงาด้วยเครื่องสกัดซ็อกห์เลท พบว่า มีฤทธิ์ในการยับยั้งมอดที่ขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาเม็ด ข้าวสาลีได้ โดยการใช้สารสกัดที่ความเข้มข้น 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถยับยั้งมอดตัวโตเต็มวัยได้ 60 และ 86 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 21 วัน จัดมีประสิทธิภาพในการยับยั้งที่สูงมากเมื่อเทียบกับการใช้สารสกัดจาก *Withania somnifera* L. , *Gliricidia sepia* L. และ *Cassia tora* L.

Yankanchai และ Koli (2010) ได้ศึกษาสารสกัดเมทานอลจากใบสำมะงาด้วยด้วยเครื่องสกัดซ็อกห์เลท พบว่า มีฤทธิ์ในการแก้อักเสบและบรรเทาความเจ็บปวดในสัตว์ทดลองได้ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยมี lysosomal membrane ที่มีความคงตัวสูง และมีฤทธิ์ยับยั้ง phospholipase

Gurudeeban และคณะ (2010) ได้ศึกษาการสกัดสำมะงาด้วยตัวทำละลายเมทานอลด้วยเครื่องสกัดซ็อกห์เลท พบว่า ประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิก 0.74 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/น้ำหนัก) เมื่อคิดเทียบกับกรดแกลลิก และสารฟลาโวนอยด์มีค่าเท่ากับ 0.13 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/น้ำหนัก) เมื่อคิดเทียบกับคาเทชิน (Catechin) ของน้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น และเมื่อนำสารสกัดที่ความเข้มข้น 2500 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มาทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีต่างๆ คือ วิธีDPPH radical

scavenging วิธีHydroxyl radical scavenging และวิธี Nitrite radical scavenging พบว่า มีค่าเท่ากับ 88.21± 2.1, 71.4 ± 3.2 และ 61.3±3.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Amirtharaj และ Saravanan (2010) ได้ศึกษาการสกัดสำมะงาในส่วนที่อยู่เหนือดินด้วยคลอโรฟอร์ม ด้วยวิธีการสกัดแบบซ็อกห์เลต พบว่า จะให้ค่าผลได้สารสกัดเท่ากับ 12.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาวิเคราะห์พบสารที่สำคัญในหลายๆชนิด ได้แก่ อัลคาลอยด์ (Alkaloids), คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates), ไกลโคไซด์ (Glycosides), ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids), กรดแทนนิน (Tannins-acid) และทำการทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีต่างๆ คือ DPPH radical scavenging Reducing power assay และวิธี Nitric oxide scavenging scavenging จะได้ค่า IC50 เท่ากับ 21.5, 22 และ106 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

Guessan, Zirihi, และ Malwal (2010) ได้ศึกษาการใช้สารสกัดสำมะงาด้วยตัวทำละลายน้ำในการลดความดันโลหิตของกระต่าย พบว่า สารสกัดที่ความเข้มข้นน้อยกว่าหรือ เท่ากับ 10^{-4} มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จะไม่ส่งผลต่อความดันเลือดของหนู ส่วนที่ความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 10^{-3} มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีผลทำให้ความดันเลือดของหนูต่ำลง

Ravikumar, Selven, และ Gracelin (2010) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในปลาสวยงามด้วยวิธี disc diffusion โดยการใช้สารสกัดด้วยคลอโรฟอร์ม จากพืชป่าชายเลน 17 ชนิด พบว่า พืชจำนวน 6 ชนิดเท่านั้นที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ดี โดยสารสกัดจากลำต้นของสำมะงา จะให้น้ำหนักสารสกัดสูง 5.67 เปอร์เซ็นต์ และมีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ 3 ชนิด จากจำนวนจุลินทรีย์ 14 ชนิดที่นำมาทดสอบ

Upmanyu และคณะ (2011) ทำการศึกษาสารสกัดใบสำมะงาจากการใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli, B. subtilis, S. aureus, P. auregenosa, Micrococcus leuteus, A. niger* ด้วยวิธี disc diffusion method พบว่า สารสกัดปิโตรเลียมอีเทอร์ และสารสกัดจากเอทิลอะซีเตต จะให้ฤทธิ์การยับยั้งสูงสำหรับเชื้อแบคทีเรียทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เชื้อ *S. aureus* จะมีความอ่อนไหวต่อสารสกัดปิโตรเลียม-อีเทอร์สูงสุด ส่วนสารสกัดปิโตรเลียมอีเทอร์และสารสกัดเอทิลอะซีเตต จะยับยั้งเชื้อรา *C. albicans* และ *A. niger* ได้ดีที่ทุกความเข้มข้น คือ 20-60 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร โดยสารสกัดจะยับยั้ง *C. albicans* ได้ดีกว่า *A. niger* ส่วนสารสกัดเอทานอล จะยับยั้งเชื้อรา *A. niger* ที่ความเข้มข้นเพียงค่าเดียว คือ 60 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และไม่มีผลยับยั้งเชื้อ *A. niger* ที่ความเข้มข้นใดๆ เลย และสารสกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม จะมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและราได้น้อย

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบฟีนอลิกในสำมะงา

ส่วนที่ใช้ในการสกัด	ตัวทำละลาย	สภาวะที่ใช้ในการสกัด				ผลการทดลอง	รายการอ้างอิง
		ปริมาณ (กรัม)	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	วิธีการสกัด		
ใบแห้งและลำต้นแห้ง	เอทิลอะซีเตตและเฮกเซน	100	1 วันและ 2 วัน ตามลำดับ	25	แบบแช่	ค่าผลได้สารสกัดด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซีเตตในส่วนใบมีค่าเท่ากับ 6.3% (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) และ ในส่วนลำต้นมีค่าเท่ากับ 2.1% (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ค่าผลได้สารสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ในส่วนใบมีค่าเท่ากับ 0.64% (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) และ ในส่วนลำต้นมีค่าเท่ากับ 0.21% (น้ำหนักต่อน้ำหนัก)	Anitha และ Kannan (2005)
ใบแห้ง	คลอโรฟอร์ม	500	2วัน	50	เครื่องสกัดแบบซอกห์เลต	ค่าผลได้สารสกัด 12.7%, (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ทำการทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีต่างๆ คือ DPPH radical scavenging Reducing power assay และ Nitric oxide scavenging scavenging จะได้ค่า IC50 เท่ากับ 21.5 , 22 และ106 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร	Amirtharaj และ Saravanan (2010)

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบฟีนอลิกในสำมะงา (ต่อ)

ส่วนที่ใช้ในการสกัด	ตัวทำละลาย	สภาวะที่ใช้ในการสกัด				ผลการทดลอง	รายการอ้างอิง
		ปริมาณ (กรัม)	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	วิธีการสกัด		
ลำต้นแห้ง	คลอโรฟอร์ม	500	7วัน	25	แบบแช่	ค่าผลได้สารสกัด 5.67 % (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) มีฤทธิ์การยับยั้งจุลินทรีย์ได้ 4 ชนิด คือ *E. coli*, *Shigella flexneri*., *Vibrio sp.* และ *Clostridium sp.* เมื่อทำการทดสอบกับเชื้อรา พบว่า สามารถยับยั้งเชื้อ *Penicillium chrysogenum*	Ravikumar, Selvan, และ Gracelin (2010)
ใบแห้ง	เมทานอล	100	2วัน	50	เครื่องสกัดแบบซอกห์เลต	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก 0.74 % (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) (กรดแกลลิก) ค่าผลได้ฟลาโวนอยด์ 0.13% (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) (คาเทชิน)	Gurudeeban และคณะ (2010)

2.4 การสกัดของแข็งด้วยตัวทำละลาย (Solid-liquid extraction)

การสกัดด้วยของเหลว (Liquid extraction) บางครั้งเรียกว่า การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นกระบวนการถ่ายโอนส่วนประกอบหนึ่งจากของแข็งหรือของเหลวด้วยตัวทำละลายที่เป็นของเหลว ดังนั้น ในทางเทคนิคจึงแบ่งแยกการสกัดด้วยของเหลวออกเป็นสองประเภท คือ การสกัดของแข็งด้วยของเหลว (Solid-liquid extraction) หรือการชะละลาย (Leaching) และการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการการชะละลาย เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารของโรงงานผลิตกาแฟเป็นการแยกส่วนของกาแฟออกจากเมล็ดกาแฟโดยใช้น้ำร้อนการกำจัดสารคาเฟอีนออกจากกาแฟหรือชาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยวดยิ่ง, การสกัดน้ำตาลจากหัวบีทด้วยน้ำร้อน และในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันประกอบอาหารเป็นการสกัดน้ำมันจากถั่วเหลืองโดยใช้เฮกเซน

สารประกอบสำคัญทางชีวเคมี สารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ สารดังกล่าวมักจะอยู่ในของแข็ง หรือ พืช ในการสกัดจะออกแบบให้เป็นการนำตัวละลาย (Solute) ที่ต้องการออกมาหรือแยกสารละลายที่ไม่ต้องการออกจากเฟสของแข็ง โดยเฟสของแข็งกับเฟสของเหลวจะถูกทำให้สัมผัสกัน ในทั้งสองเฟสจะอยู่ติดกันและตัวละลายสามารถแพร่จากเฟสของแข็งไปยังเฟสของเหลว ซึ่งผลที่ได้เป็นการสกัดสารละลายออกจากของแข็ง เรียกกระบวนการสกัดนี้ว่า การชะละลายของแข็งด้วยของเหลว (Liquid-solid leaching) หรือ การชะละลาย (Leaching)

2.5 ขั้นตอนกระบวนการชะละลาย (Leaching Step)

กระบวนการสกัดสารสำคัญจากพืชด้วยตัวทำละลาย เป็นการสกัดของแข็งด้วยตัวทำละลายของเหลว (Solid-liquid extraction) จะเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลสารของตัวละลายที่อยู่ในอนุภาคของแข็ง กระบวนการที่เกิดการถ่ายโอนมวลสารขึ้น (Geankoplis, 2003) มีดังต่อไปนี้

(1) เมื่อแช่สมุนไพรในตัวทำละลาย ตัวถูกละลาย (Solute) ที่อยู่ชั้นผิวของอนุภาคจะถูกถ่ายโอนมาที่ชั้นของเหลวที่อยู่รอบๆอนุภาคของแข็ง เนื่องจากมีความแตกต่างความเข้มข้นของทั้งสองบริเวณมาก

(2) หลังจากนั้นตัวทำละลายจะแพร่หรือแทรกซึมเข้าไปในอนุภาคสมุนไพร โดยตัวทำละลายจะละลายตัวถูกละลายที่อยู่ภายในอนุภาค

(3) ตัวถูกละลายที่อยู่ภายในอนุภาค จะแพร่ย้อนกลับออกมาที่ชั้นผิวอนุภาค

(4) ตัวถูกละลายที่อยู่ชั้นผิวอนุภาค จะถ่ายโอนมาที่ชั้นของเหลวที่อยู่รอบๆอนุภาคของแข็ง

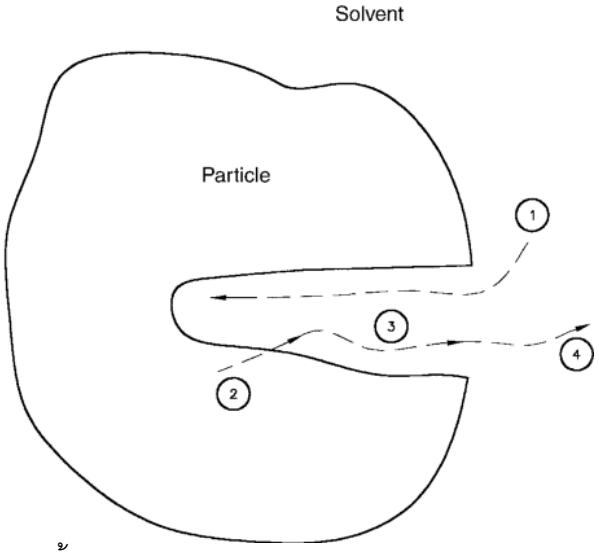
จากงานวิจัยของ Gertenbach, 2001 ได้อธิบายว่า เมื่อพิจารณาขั้นตอนการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคของแข็ง ที่มีความพรุนตัวหรือมีรูพรุนอยู่ภายในของอนุภาค ในการสกัดขั้นตอนที่ตัวถูกละลายจากภายในอนุภาคไปยังชั้นตัวทำละลายที่อยู่รอบผิวอนุภาค สามารถอธิบายขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้ (แสดงดังรูปที่ 2.7)

(1) หลังจากแช่ของแข็งในตัวทำละลาย ตัวทำละลายจะแพร่ไปยังภายในอนุภาคผ่านรูพรุนภายในโครงสร้างของแข็ง

(2) ตัวถูกละลาย จะถูกละลายออกมาจากภายในอนุภาคของแข็ง รวมทั้งสารที่ต้องการและสารที่สามารถละลายได้

(3) ตัวถูกละลายที่อยู่ภายในอนุภาค จะถ่ายโอนผ่านรูภายในอนุภาคมายังชั้นผิวของอนุภาค

(4) จะเกิดการชะ (Washing) ของตัวถูกละลายจากบริเวณผิวอนุภาค ไปยังชั้นของเหลวที่อยู่รอบๆอนุภาค



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการสกัด (Leaching step) (Gertenbach, 2001)

โดยทั่วไปอัตราการถ่ายโอนของตัวทำละลายจากชั้นสารละลายรวม (bulk solution) ไปยังพื้นที่ผิวอนุภาคของแข็งจะเกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว และอัตราการถ่ายโอนของตัวละลายภายในอนุภาคของแข็งสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ช้าหรือเร็ว อัตราการแพร่ของตัวละลายที่ผ่านของแข็งและตัวทำละลายไปยังพื้นที่ผิวอนุภาคของแข็ง จะถูกควบคุมด้วยความต้านทานในกระบวนการชะละลายทั้งหมดและสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรต่างๆ ถ้าโครงสร้างของแข็งที่มีรูพรุนมากและมีตัวละลายอยู่ภายในและตัวทำละลายอยู่ในช่องว่างของอนุภาคของแข็ง อัตราการแพร่ผ่านไปยังภายในอนุภาคของแข็งสามารถอธิบายได้โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusivity) ที่ขึ้นกับค่าสัดส่วนช่องว่างในอนุภาคของแข็ง (Void fraction) และความคดเคี้ยวภายในอนุภาคของแข็ง

2.5.1 **การแพร่โดยการพา** (Convective diffusion)

ทันทีที่ตัวทำละลายถูกถ่ายโอนไปยังพื้นผิวของอนุภาคของแข็งผ่านชั้นฟิล์มบางๆ และตัวละลายที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคแข็ง จะเกิดการถ่ายโอนตัวทำละลายกับสารที่มีอยู่ในบนผิวของอนุภาคของแข็ง เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น อัตราการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นอธิบายได้จากสมการ (Geankoplis, 2003)

$$N_A = k_c(c_{L_1} - c_{L_i}) \tag{3.1}$$

โดยที่ N_A คือ ค่าฟลักซ์เฉลี่ย (กิโลกรัม·(ตารางเมตร·วินาที)$^{-1}$)

k_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (เมตรต่อวินาที)

C_{L1} คือ ความเข้มข้นของของเหลวภายนอก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_{Li} คือ ความเข้มข้นของของเหลวที่ติดกับผิวของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร เมื่อค่าความเข้มข้นของ C_{L1}- C_{Li} หรือ ค่าแรงขับ (Driving force) มีค่าลดต่ำลง ความเข้มข้นของ C_{Li} จะอยู่ในสมดุลกับความเข้มข้นของผิวของของแข็ง C_{L1} สามารถอธิบายดังสมการ

$$\mathrm{K} = \frac{c_{L_i}}{c_i} \tag{3.2}$$

โดยที่ K คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ภาวะสมดุล

(Equilibrium distribution coefficient)

2.5.2 การแพร่ภายในอนุภาค (Internal diffusion)

เมื่อตัวทำละลายเข้าไปในภายในอนุภาคของแข็ง ตัวทำละลายจะเคลื่อนที่เข้าไปในอนุภาคของแข็งโดยการแพร่ โดยทั่วไปอัตราการแพร่ของของแข็งจะช้ากว่าอัตราการแพร่ในแก๊สและของเหลว ดังนั้นอัตราการถ่ายเทมวลในของแข็งจะเป็นส่วนที่สำคัญในกระบวนการสกัด และการแพร่ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในภาวะที่ไม่คงตัว หมายถึง สมบัติของระบบที่จุดใดๆ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้นภาวะไม่คงตัวของการถ่ายโอนมวลจะมีค่าความแตกต่างความเข้มข้น (Concentration gradient) เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์การถ่ายโอนมวลสารขึ้นกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยกฎของฟิกซ์ (Fick's Law)

การแพร่ของตัวถูกละลายภายในของแข็งสามารถอธิบายได้ตามกฎของฟิกซ์ ที่กำหนดให้ฟลักซ์ (Flux) คือ ปริมาณของสารที่เคลื่อนที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทมวลสารนั้น โดยอัตราการถ่ายเทมวลดังกล่าว จะขึ้นกับความแตกต่างของมวลสารและระยะทางของการถ่ายเทมวล สามารถใช้ได้กับของแข็งหลากหลายรูปแบบและการแพร่จะปรากฏบริเวณของเหลวที่อยู่ภายในของแข็ง ดังสมการที่ 3.3 ซึ่งสมการนี้เรียกว่า Fick's first law diffusion

$$J_s = -D_s \frac{\partial c}{\partial X} \tag{3.3}$$

โดยที่ J_s คือ ค่าฟลักซ์ของการแพร่ (Diffusion flux) (กิโลกรัม•(ตารางเมตร·วินาที)$^{-1}$)

D_s คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity) (ตารางเมตร•วินาที)

C คือ ความเข้มข้น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

X คือ ระยะทางการแพร่ (เมตร)

จากสมการที่ 3.3 ในกรณีของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุน อัตราส่วนช่องว่างและความคดเคี้ยวของเส้นทางในการแพร่ จะส่งผลต่อการแพร่ เพื่อคำนวณอัตราการแพร่ของมวลสารภายในของแข็งที่เป็นรูพรุน จึงนิยามค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นมาอีกหนึ่งตัวแปร คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (Effective diffusivity) โดยมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลาย (Bulk diffusivity)

ดังสมการที่ 3.4

$$D_{eff} = \frac{\varepsilon}{\tau} D_{AB} \quad (3.4)$$

โดยที่ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (effective diffusivity) (ตารางเมตร·วินาที)

ε คือ อัตราส่วนปริมาตรช่องว่างกับปริมาตรของแข็งทั้งหมด (Porosity)

τ คือ ความคดเคี้ยวของเส้นทางในการแพร่ (tortuosity)

จากกฎของฟิกซ์ข้อที่ 1 สมการที่ 3.3 เมื่อความเข้มข้น (C) ขึ้นกับ ระยะทางการแพร่ (r) และเวลา (t) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.5 ซึ่งสมการนี้จะเรียกว่า Fick's second law diffusion

$$D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial^2 r} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.5)$$

โดยที่ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (ตารางเมตร·วินาที)

C คือ ความเข้มข้น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

r คือ รัศมีของการแพร่ (เมตร)

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต:

1. $Y = 1 , 0<r<R , t = 0$

2. $Y = 0 , r \pm R , t \geq 0$

จากสมการที่ 3.5 ทำการแก้สมการโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.6 โดยกำหนดให้ $Y = C/C_0$ (Pinelo และคณะ 2005)

$$Y = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{X^2}\right)} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 ในรูปแบบทั่วไปจะกำหนดให้ ความต้านทานภายนอกมีค่าน้อยมากและในเทอมแรกของอนุกรมจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยจึงนำมาใช้คิดหาค่า D_{eff} (Schwartzberg และคณะ 1975) โดยจะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.7

$$lnY = ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{X^2} t \quad (3.7)$$

ทำการพลอตกราฟระหว่าง lnY กับ t ค่าความชันที่ได้จะมีค่าเท่ากับ ($-\frac{\pi^2 D_{eff}}{X^2}$) นำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ยังผล (D_{eff})

2.6 การเตรียมวัสดุในกระบวนการชะละลาย

วัสดุทางชีวเคมีจะมีโครงสร้างประกอบด้วยเซลล์และสารละลายที่ต้องการอยู่ในเซลล์ อัตราการชะละลายโดยทั่วไปจะเกิดได้ช้าเพราะผนังเซลล์จะเป็นตัวต้านทานในการแพร่ ทำให้อัตราการชะละลายต่ำ อย่างไรก็ตามการบดให้วัสดุมีขนาดเล็กเพียงพอจะทำให้กระบวนการชะละลายเกิดได้เร็วขึ้น ในการสกัดหัวบีท การตัดหัวบีทให้มีขนาดเล็กลงเป็นแผ่นบางๆ มีรูปทรงแบบลิ่มสำหรับกระบวนการชะล้างโดยใช้น้ำนั้น จะทำให้ความต้านทานการแพร่มีค่าลดลง

สำหรับกระบวนการสกัดสมุนไพรจากใบ ลำต้น และราก การอบแห้งก่อนการสกัด จะช่วยให้ผนังเซลล์แตกออกเพื่อให้ตัวทำละลายสามารถที่จะละลายสารละลายออกมาได้โดยตรง ตัวอย่างเช่น ผนังเซลล์ของถั่วเหลืองและเมล็ดพืชจะซึมผ่านได้มากขึ้นเมื่อวัสดุถูกลดขนาดลงเหลือ 0.1 มิลลิเมตรถึง 0.5 มิลลิเมตร แต่ถ้าตัวทำละลายดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าของอนุภาคของแข็ง หรือละลายได้เพียงเล็กน้อยในสารละลาย ก็ไม่มีความจำเป็นต้องบด หรือสับให้มีขนาดเล็กแต่อย่างใด ดังนั้น การเตรียมวัสดุก่อนเข้าสู่กระบวนการสกัดจึงมีความสำคัญ

2.7 กระบวนการสกัดสารสำคัญจากพืช

ในการสกัดสารสำคัญจากพืชที่ต้องการให้ออกมามากที่สุด มีเทคนิคการสกัดหลายวิธี ดังต่อไปนี้

(1) การแช่ (Percolation) คือ การแช่ผงพืชในตัวทำละลายและมีการเติมตัวทำละลายใหม่ตลอดเวลา อาจจะทำในภาชนะที่เรียกว่า เพอโคเลเตอร์ (Percolator) มีข้อเสียคือ ใช้ตัวทำละลายเป็นจำนวนมากและใช้เวลานาน

(2) การสกัดแบบหมุนเวียน (Repercolation) คือ การสกัดโดยนำตัวทำละลายใหม่กับสารที่สกัดจากการแช่มาหมุนเวียนการสกัด โดยที่วิธีนี้จะทำให้ได้สารที่ต้องการมีความเข้มข้นมากกว่าแบบแช่ (Percolation)

(3) การสกัดต่อเนื่องแบบสวนทาง (Continuous-Counter current extraction) คือ กระบวนการสกัดที่สำคัญ โดยใช้วิธีไหลสวนทางต่อเนื่องเป็นขั้นๆ ในหลายๆเครื่องสกัดหรืออาจใช้เครื่องสกัดเป็นเพียงเครื่องเดียว โดยในการสกัด ตัวทำละลายทำหน้าที่ละลายตัวถูกละลายทุก

ชนิดที่อยู่ในของแข็งที่ป้อนเข้ามา และไม่มีการดูดซึมของตัวทำละลายกับของแข็ง ดังนั้น สมดุลหมายถึง การที่ตัวทำละลายเข้าไปทำละลายตัวถูกละลายอย่างสมบูรณ์ และเกิดจนสารละลายทั้งสองวัฏภาคมีความเข้มข้นเท่ากัน นั้นคือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในทั้งสองวัฏภาค

2.8 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัด

2.8.1 ระยะเวลาในการสกัด

เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสกัด โดยสารในของแข็งจะแพร่เข้าสู่ของเหลวระยะเวลาตั้งแต่เริ่มสัมผัสกันของของเหลวจนถึงความเข้มข้นทั้งสองสถานะมีความเข้มข้นเข้าสู่จุดสมดุล ซึ่งถ้าเวลาน้อยกว่าระยะที่เข้าสู่จุดสมดุลจะสกัดสาระสำคัญได้น้อยลง

2.8.2 ขนาดอนุภาคของแข็ง

เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสกัด โดยที่ขนาดของอนุภาคเล็กจะทำให้พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสารมากขึ้นและระยะทางของตัวทำละลายที่อยู่ภายในของแข็งจะแพร่กระจายออกสู่ตัวทำละลายได้ดี ซึ่งมีผลให้สกัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.8.3 ชนิดตัวทำละลาย

ตัวทำละลายมีผลต่อการสกัด โดยในการสกัดให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม ตัวทำละลายที่ดีควรมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ละลายสารที่เราต้องการสกัดได้ดีพอไม่ระเหยง่ายหรือยากจนเกินไป ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่เราต้องการสกัด ไม่เป็นพิษและราคาไม่แพงมากนัก ในการเลือกตัวทำละลายอาศัยหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

ตัวทำละลายมีคุณสมบัติความมีขั้วคล้ายคลึงกัน และ ละลายสารที่ต้องการออกมามากที่สุดในขณะที่ละลายสารที่ไม่ต้องการออกมาน้อยที่สุด ตัวทำละลายที่นิยมใช้ได้แก่

(1) คลอโรฟอร์ม เป็นตัวทำละลายที่ดี แต่มีการละลายสารที่ต้องการออกมาได้น้อย สามารถเกิดอีมัลชั่น (Emulsion) ได้ง่าย ถ้าใช้สารสกัดสารซึ่งเป็นด่างแก่อาจเกิดปฏิกิริยาดีคอมโพส (Decompose) ให้กรดเกลือ

(2) อีเทอร์ มีอำนาจในการละลายน้อยกว่าคลอโรฟอร์ม แต่ละลายสารที่ต้องการออกมาได้ดีกว่าคลอโรฟอร์ม ข้อเสียคือ ระเหยง่าย ระเบิดง่าย เกิดออกซิไดซ์ได้ง่ายและดูดน้ำมาก

(3) เฮกเซน เหมาะสำหรับพวกสารที่ไม่มีขั้วมักใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับกำจัดไขมันจากสมุนไพรข้อดีคือ ราคาถูก

(4) แอลกอฮอล์ที่ใช้มาก คือ เมทานอลและเอทานอล เป็นตัวทำละลายที่มีวัตถุประสงค์กว้างๆ (All purpose solvent) เนื่องจากมีอำนาจในการละลายกว้างมากและยังใช้ทำลายเอนไซม์ในพืช

2.8.4 **อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด**

กระบวนการสกัดทั่วไปจะกระทำที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการละลายของตัวทำละลายที่อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นได้ดีกว่า จึงทำให้ความเข้มข้นของตัวทำละลายในส่วนที่สกัดสูงขึ้น อัตราการชะละลายจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนืดของของเหลวลดลงและการแพร่ของตัวทำละลายสูงกว่าค่าที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้ได้สารที่ไม่ต้องการถูกสกัดออกมามากเกินไป หรือ ตัวทำละลายอาจสูญเสียไปมาก ดังนั้นจึงต้องอาศัยการพิจารณาความเหมาะสม

2.8.5 **การปั่นกวน**

การกวนเป็นการเพิ่มการแพร่ในภาวะปั่นป่วน ทำให้เพิ่มการเคลื่อนที่ของอนุภาคและสารละลาย ช่วยป้องกันการตกตะกอน และการเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับพื้นผิว

2.8.6 **อัตราการป้อนตัวทำละลาย**

ในการสกัดแบบต่อเนื่องการป้อนตัวทำละลายจะส่งผลต่อการสกัด เนื่องจากการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นมากเมื่อความแตกต่างความเข้มข้นของสารในบริเวณตัวทำละลายกับบริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคมีค่ามาก เมื่อป้อนตัวทำละลายใหม่แบบต่อเนื่องจะทำให้การถ่ายเทมวลสารโดยการพาเกิดขึ้นได้มากกว่าการสกัดแบบกะ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนมากเกินไปอาจทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทมวลสารที่มาก ดังนั้นควรเลือกใช้อัตราการป้อนที่เหมาะสม

2.9 **งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัด**

2.9.1 **ผลของความเข้มข้นสารละลายเอทานอลต่อการสกัด**

Roastango และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการสกัดไอโซฟลาโวนอยด์จากถั่วเหลืองด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ โดยใช้เทคนิคการสกัดอัลตร้าซาวด์ พบว่า อัตราส่วนของน้ำในเอทานอลของตัวทำละลายจะส่งผลต่อปริมาณฟีนอลิกที่สกัดได้ เมื่อปริมาณน้ำสูงกว่าร้อยละ 60 (ปริมาตร/ปริมาตร) จะทำให้ได้ปริมาณฟีนอลิกที่ลดลงแต่เมื่อให้อัตราส่วนน้ำอยู่ที่ร้อยละ 30-40 (ปริมาตร/ปริมาตร) จะทำให้ได้ปริมาณฟีนอลิกเพิ่มขึ้น

Jokic และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาการเลือกใช้ตัวทำละลายในการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดโพลีฟีนอลจากถั่วเหลือง โดยแปรผันสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 60 70 และ 80 (ปริมาตร/ปริมาตร) ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย 0.459 นาโนเมตร อัตราส่วนตัวทำละลายต่อน้ำหนักแห้ง 20 มิลลิลิตรต่อกรัม และใช้อุณหภูมิในการสกัดอยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวทำละลายที่เหมาะสมคือ สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการสกัด 120 นาที ผลได้โพลีฟีนอลิกมีค่าเท่ากับ 4.322 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

2.9.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อการสกัด

Durling และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญและน้ำมันหอมระเหยในใบเสดแห้ง โดยแปรผันตัวแปรต่างๆคือ ขนาดของอนุภาคที่ 1-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 22-63 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการสกัด 1-6 ชั่วโมง อัตราส่วนตัวทำละลายต่อใบเสจ 6:1-18:1 มิลลิลิตรต่อกรัม, และความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 27-100 (ปริมาตร/ปริมาตร) พบว่า ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการสกัด คือ 2 มิลลิเมตร เป็นขนาดอนุภาคที่เหมาะสม แม้ว่าขนาดอนุภาค 1 มิลลิเมตร จะเป็นขนาดอนุภาคที่สกัดน้ำมันหอมระเหยออกมาได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การสกัดจะเกิดขึ้นได้ยากเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กเกินไป ส่งผลให้เกิดปัญหาของฝุ่นและความร้อนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบด อีกทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินไปอาจไปอุดตันแผ่นกรองในเครื่องสกัด ทำให้การไหลของตัวทำละลายช้าลง

Giao และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจาก *Agrimonia eupatoria, Salvia ep* และ*Stureja Montana* ตัวทำละลายน้ำ โดยแปรผันตัวแปรต่างๆ คือ ขนาดอนุภาคคือ น้อยกว่า 0.22 0.2-0.25 0.25-0.3 และ มากกว่า 0.3 มิลลิเมตร ที่เวลาการสกัด 0-15 นาที พบว่า สารต้านอนุมูลอิสระจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาการสกัดเพิ่มขึ้นและลดขนาดอนุภาคพืชลง เนื่องจากเวลาในการสัมผัสกันระหว่างตัวทำละลายกับสมุนไพรมีมากขึ้น ขนาดอนุภาคที่เล็กลงจะส่งผลต่อการสกัด โดยที่เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลายตามกฎของฟิกซ์ ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการสกัดคือ น้อยกว่า 0.22 มิลลิเมตร

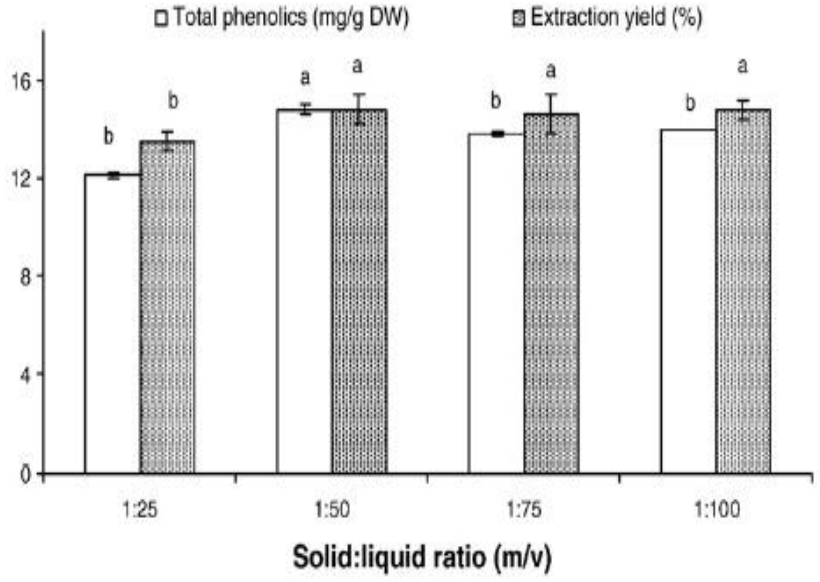
2.9.3 ผลของอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งที่มีผลต่อการสกัด

Cacace และ Mazza (2002) ได้ศึกษาการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากแบล็กเคอแรนซ์ในถังกวน โดยแปรผันตัวแปรต่างๆ คือ ตัวทำละลายเอทานอล และ น้ำผสมกับก๊าซซัลเฟอร์, อุณหภูมิ 6-74 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 6:1-60:1 มิลลิลิตรต่อกรัม พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งสูงขึ้น จะส่งผลให้ผลได้สารประกอบฟีนอลิกมีค่าสูงขึ้นทั้งในการสกัดที่ใช้ตัวทำละลายเอทานอลและน้ำผสมกับก๊าซซัลเฟอร์ เนื่องจากเป็นการเพิ่มค่าการละลายให้มีค่ามากขึ้นและทำให้การสัมผัสกันระหว่างตัวทำละลายกับของแข็งทำได้ดีมากยิ่งขึ้น

Ho และคณะ (2008) ได้ศึกษาการสกัดสารลิกแนนจากเมล็กแฟลกซ์โดยใช้เครื่องสกัดแบบฟิกเบด โดยแปรผันตัวแปรต่างๆ คือ อัตราการป้อนตัวทำละลายที่ 0.6 2 4 6 และ 7.4 มิลลิลิตรต่อนาที, ความสูงของเบดที่ 2.2 7 14 21 และ 25 เซนติเมตร และอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งเป็น 12:1 39:1 77:1 115:1 และ 142:1 มิลลิลิตรต่อกรัม พบว่า ตัวแปรที่เหมาะสมใน

การสกัดคือ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 0.6-2 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนความสูงเบดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์มีค่าเท่ากับ 20-25 และ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 77-150 มิลลิลิตรต่อกรัม จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง จะทำให้สกัดสารลิกนินได้มากขึ้นก็ตาม แต่ก็ทำให้ได้สารละลายเจือจาง ทำให้ต้องเพิ่มต้นทุนในการแยกสารต่อไป ดังนั้นจึงควรทดลองหาชนิดของตัวทำละลายหรือตัวทำละลายผสมที่เหมาะสม จะดีกว่าเพิ่มอัตราส่วนตัวทำละลาย ต่อของแข็ง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการสกัดที่ใช้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งน้อยเกินไป ทำให้ได้สารละลายที่ภาวะอิ่มตัว ส่งผลให้ไม่สามารถสกัดต่อไปได้อีก จึงควรหลีกเลี่ยงภาวะเช่นนี้

Prasad และคณะ (2009) ได้ศึกษาปัจจัยของการสกัดฟีนอลิกและสารต้านอนุมูลอิสระจากเปลือกลำไยที่ความดันสูงโดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ คือ เอทานอล เมทานอล และ น้ำ ทำการแปรผันตัวแปรคือ อัตราส่วนของแข็งต่อตัวทำละลาย 1:25 1:50 1:75 และ 1:100 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ความดัน 200 300 400 และ 500 เมกะปาสคาล และ อุณหภูมิ 30 50 และ70 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดคือ 50 เปอร์เซ็นต์เอทานอล ภายใต้ความดัน 500 มิลลิปาสคาล อัตราส่วนของของแข็งต่อตัวทำละลายอยู่ที่ 1:50 ถึงแม้ว่าอัตราส่วนของของแข็งต่อตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้นจะเพิ่มผลได้ของการสกัด แต่ไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณฟีนอลิกที่เพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 2.8

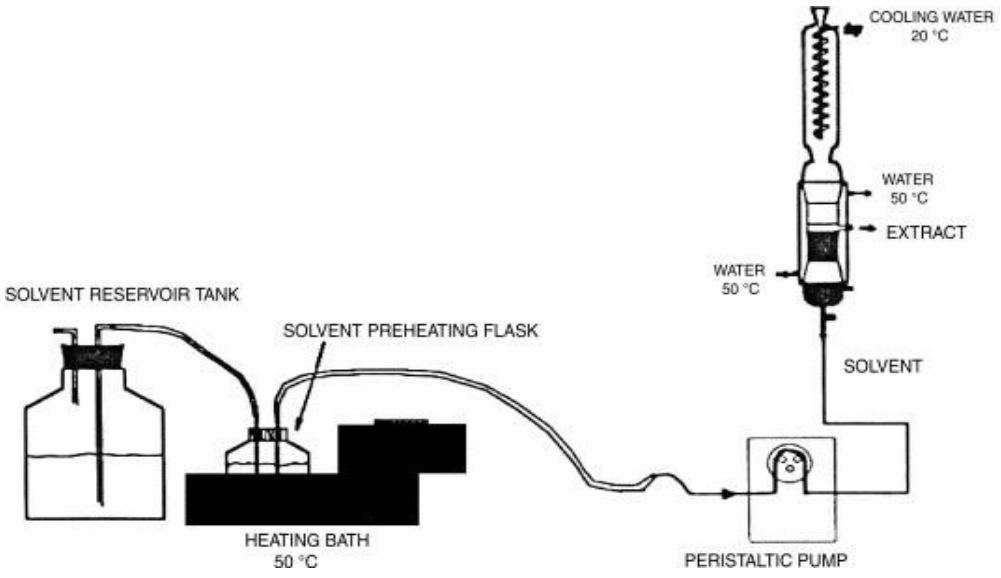


รูปที่ 2.8 ผลของอัตราส่วนตัวทำลายต่อของแข็งในการสกัดฟีนอลิกจากเปลือกลำไย

2.9.4 ผลของอัตราการป้อนตัวทำละลายต่อการสกัด

Nieh และ คณะ (1991) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราการป้อนต่อการสกัดน้ำมันจากถั่วเหลือง พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัวทำละลาย จะส่งผลให้อัตราการสกัดน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น

Pinelo และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทมวลของการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจากกากองุ่นแบบต่อเนื่อง ทำการสกัดในเครื่องสกัดแบบ immersion extractor แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยแปรผันตัวแปร อัตราการป้อนของสารละลายเอทานอล 2-3 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 5.5 3 และ 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณของแข็งที่ใช้ในการสกัด 2.5 5 และ 7.5 กรัม เก็บตัวอย่างทุกๆช่วงเวลา 30 นาที ทำการวัดค่าสารประกอบฟีนอลิก ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu method วัดค่าสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่า ตัวแปรที่เหมาะสมในการให้ได้สารสกัดฟีนอลิกและสารต้านอนุมูลอิสระความเข้มข้นสูง คือ ขนาดอนุภาค น้อยกว่า 5.5 มิลลิเมตร, ปริมาณของแข็งที่ใช้ในการสกัด 2.5 กรัม, อัตราการป้อนตัวทำละลาย 2 มิลลิลิตรต่อนาที ถึงแม้ว่าอัตราการป้อนตัวทำละลายที่สูง จะเป็นการเพิ่มความแตกต่างความเข้มข้นระหว่างของแข็งกับตัวทำละลายที่ทำให้ค่าผลได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม แต่เวลาที่ใช้ในการสัมผัสกับตัวทำละลาย (Residence time) จะส่งผลมากกว่าความแตกต่างความเข้มข้นของทั้งสองบริเวณในอัตราการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.9 เครื่องสกัดแบบ immersion extractor

2.9.5 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัด

Sun และคณะ (2002) ได้รายงานการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากผลไม้ชนิดต่างๆ เมื่อมีการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่า อุณหภูมิสูงจะช่วยเพิ่มการแพร่ของสารกลุ่มโพลี่แซคคา-ไรด์บนผนังเซลล์พืช (Cell wall) ให้เกิดการกระจายไปสู่ตัวทำละลายและช่วยลด integrity ของผนังเซลล์พืชลง ทำให้ตัวทำละลายสามารถเข้าถึงสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้น

Cacace และคณะ (2003) ได้รายงานถึงอิทธิพลของอุณหภูมิในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากแบล็กเคอร์เรนท์ จะส่งผลต่อการแพร่ของตัวทำละลายภายในอนุภาคแบล็กเคอร์เรนท์ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่จะแปรผันตามอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่ามากและสามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นตามลำดับ

Yang และคณะ (2009) ได้ทำการทดลองสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากเปลือกมะขามป้อมที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนืด (Viscosity) ของตัวทำละลายลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพิ่มขึ้น รวมทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่และค่าการละลายของสารประกอบฟีนอลิกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้การสกัดดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงเกินไป จะทำให้มีการสูญเสียปริมาณของตัวทำละลายส่งผลให้มีค่าผลได้ที่ลดลง

นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารประกอบฟีนอลิกซึ่งมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิ จึงอาจส่งผลให้เกิดการเสียสภาพของสารประกอบฟีนอลิกได้เช่นกัน

บทที่ 3
อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 เครื่องผสมสารละลาย (Vortex) G-560E, Scientific Industries, America

3.1.2 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (U V- Spectrophotometer)

UV-2300-600, Shimadzu, Japan

3.1.3 เครื่องคัดแยกขนาด (Sieve shaker)

3.1.4 Water bath Shaker XY-80, TAITEC, Japan

3.1.5 ปั๊มแบบ Peristatic (Peristatic Pump) Watson Marlow, 505U, Englandland

3.1.6 ตู้อบ (Hot Air Oven) ULM 500, Memmert, Germany

3.1.6 เครื่องสกัดแบบแพคเบด

3.1.7 กระดาษกรองเบอร์ 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร (whatman No.1)

3.1.8 บีกเกอร์

3.1.9 กระบอกตวง

3.1.10 ไมโครปิเปต

3.1.11 ขวดรูปชมพู่

3.1.12 หลอดทดลอง

3.2 เคมีภัณฑ์

3.2.1 เอทานอลร้อยละ 95 (V/V) (May & Baker, British)

3.2.2 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) (May & Baker, British)

3.2.3 ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO)

3.2.4 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (May & Baker, British)

3.2.5 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) (May & Baker, British)

3.2.6 Folin-ciocalteu phenol reagent (Merch, Germany)

3.2.7 กรดแกลลิก (Gallic acid) (Merch, Germany)

3.2.8 น้ำกลั่น

3.3 สมุนไพรที่ใช้ในการทดลอง

สำมะงา (ซื้อจากร้านเจ้กรมเป๋อ, กรุงเทพ)

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบในการสกัด

นำสมุนไพรสำมะงามาทำความสะอาดและอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในตู้อบ จากนั้นทำการบดให้ละเอียด หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการบดมาเข้าเครื่องคัดแยกขนาดเพื่อคัดให้ได้ขนาดต่างๆ คือ น้อยกว่า 75 180-300 300-600 600-850 และ มากกว่า 850 ไมโครเมตร

3.4.2 การศึกษาภาวะในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาแบบกะ

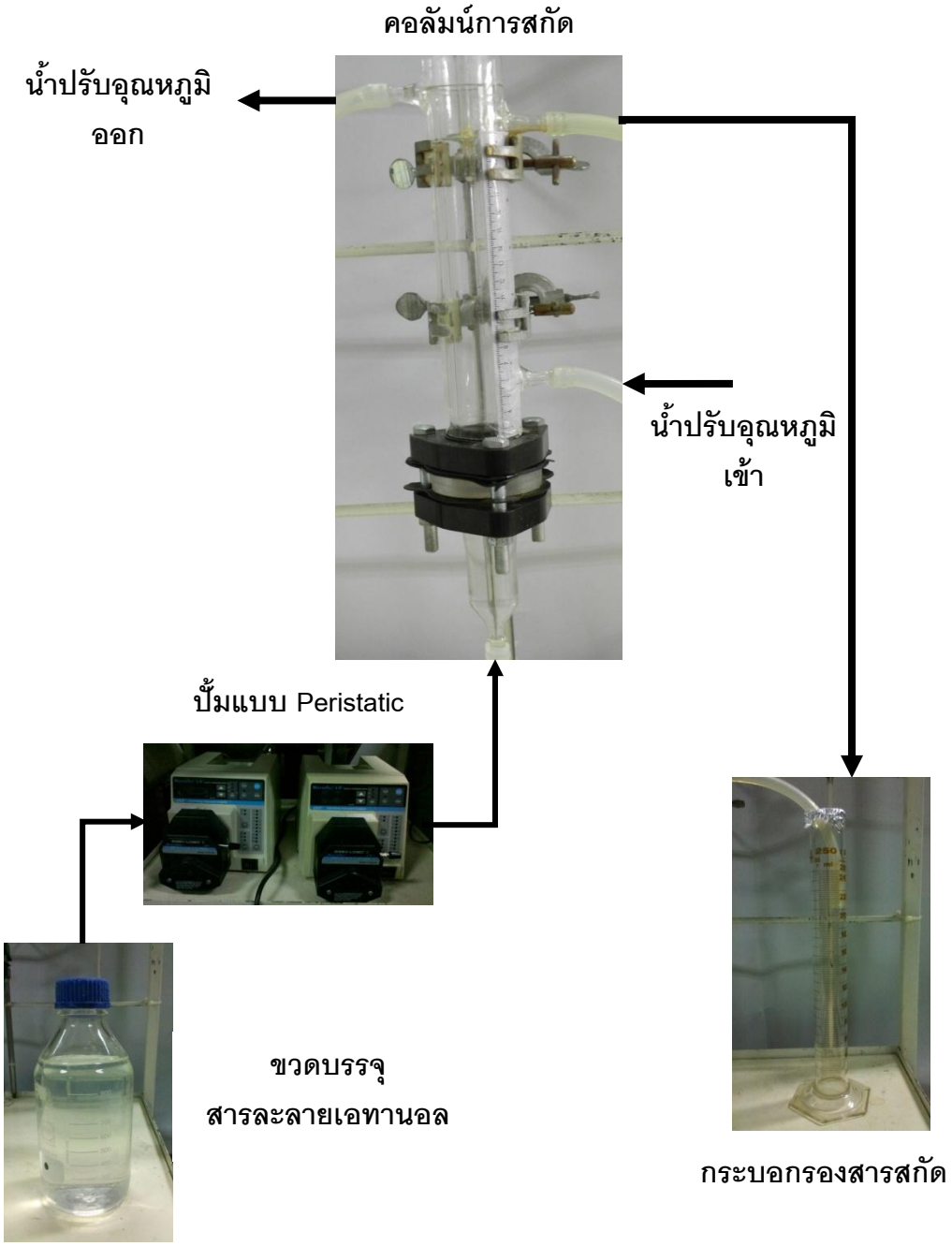
นำสำมะงาแห้งขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร หนัก 1 กรัม ใส่ในหลอดทดลองที่มีสารละลายเอทานอล ตามความเข้มข้นที่กำหนด ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และผสมเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสมสารละลาย (Vortex) จากนั้นนำไปใส่ลงในเครื่องเขย่าปรับอุณหภูมิ (water bath shaker) ที่มีการปรับอุณหภูมิไว้ที่ค่าต่างๆ และมีอัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลา 5 10 15 30 60 120 และ 240 นาที จากนั้นนำมากรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์1 นำของเหลวส่วนที่กรองได้มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิก

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลร้อยละ 30 50 60 และ 95 (ปริมาตร / ปริมาตร), อุณหภูมิในการสกัดที่ 50 60 และ 75 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง โดยดำเนินการทดลองแบบ 4×3 ทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้ในรูปของผลได้สารประกอบฟีนอลิก

3.4.3 การศึกษาภาวะในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาในเครื่องสกัดแบบแพคเบด

ชุดเครื่องสกัดแบบแพคเบดประกอบด้วย คอลัมน์แก้วที่มีน้ำปรับอุณหภูมิ (Water Jacket) เพื่อควบคุมอุณหภูมิในการสกัด สายนำสารละลาย ปั้มที่ควบคุมความเร็วในการป้อนสารละลาย ขวดบรรจุสารละลายเอทานอล และกระบอกรองสารสกัด ดังรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินการ คือ นำสำมะงาที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ มาบรรจุลงในคอลัมน์สกัดหลังจากนั้นเติมตัวทำละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม (จากผลการทดลองของข้อ 3.4.2) แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นป้อนสารละลายเอทานอลเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ ด้วยอัตราเร็วค่าต่างๆ และเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลาจดบันทึกค่า และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิก

ในการทดลองนี้จะศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสกัด ได้แก่ ขนาดอนุภาคของสำมะงา 180-300 300-600 600-850 และ มากกว่า 850 ไมโครเมตร และอัตราความเร็วของการป้อนสารละลายที่ 4, 12, 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที โดยดำเนินการทดลองแบบ 4×4 ทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้ในรูปของผลได้สารประกอบฟีนอลิก



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องสกัดแบบแพคเบด

3.4.4 การวิเคราะห์หาความเข้นข้นของสารประกอบฟีนอลิก

การวัดค่าความเข้นข้นของสารประกอบฟีนอลิก จะเป็นการวัดค่าความเข้นข้นของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds) วิเคราะห์ตามวิธี Folin Ciocalteau micro method (Waterhouse, 2002) โดยนำตัวอย่างสารสกัดที่กรองได้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 1.58 มิลลิลิตร และ Folin-ciocalteu phenol reagent ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ผสมเข้าด้วยกันและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 8 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาตร 300 ไมโครลิตร ลงไปผสมเข้าด้วยกัน และปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร โดยค่าการดูดกลืนแสงที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิกเพื่อหาค่าความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิก

3.4.4.1 การสร้างกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก

การสร้างกราฟมาตรฐานกรดแกลลิกทำได้โดยเตรียมกรดแกลลิก 5 กรัมผสมกับเอทานอลร้อยละ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร) 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำสารละลายดังกล่าวมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในปริมาตร 1 2 5 10 และ 100 มิลลิลิตรจะได้สารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่มีความเข้มข้น 50 100 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (สารที่เตรียมจะเก็บไว้ได้นาน 2 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) สารละลายมาตรฐานแกลลิกที่เตรียมได้ จะทำการวัดค่าความเข้มข้นฟีนอลิกตามการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4 โดยตัวอย่างสารสกัดจะใช้สารละลายมาตรฐานแกลลิกแทน

3.4.4.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชั่งสารโซเดียมคลอไรด์ 200 กรัมนำมาผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 800 มิลลิลิตรนำไปต้มให้ละลายได้ดียิ่งขึ้น และตั้งทิ้งไว้ให้เย็น กรองด้วยกระดาษกรองหลังจากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง

บทที่ 4
ผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาโดยกระบวนการแบบกะและโดยการสกัดแบบแพคเบด ในกระบวนการแบบกะจะศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ต่อผลได้สารประกอบฟีนอลิก (yield) ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายเอทานอล อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด และอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง หลังจากนั้นจะนำภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากกระบวนการแบบกะไปประยุกต์ใช้กับการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาโดยใช้เครื่องสกัดแบบแพคเบดที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย และขนาดอนุภาคสำมะงาต่างๆ กัน

4.1 ผลการทดลองแบบกะ

4.1.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายเอทานอลต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก

ทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที โดยแปรผันความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 30 50 70 และ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 เมื่อทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา โดยใช้สารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ที่ทุกความเข้มข้นสารละลายเอทานอล ผลได้สารประกอบฟีนอลิก จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 5 นาทีแรก หลังจากนั้นผลได้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามเวลาจนกระทั่งคงที่ ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า ในการสกัดแบบกะ เมื่ออนุภาคสำมะงาแห้งอยู่ในภาวะที่แช่อยู่ในสารละลายเอทานอล สารประกอบฟีนอลิกที่ชั้นผิวของอนุภาคจะเกิดการถ่ายโอนมวลมาที่ชั้นของเหลวที่อยู่รอบๆ อนุภาคของแข็งอย่างรวดเร็วที่ช่วงเวลาแรกๆ เนื่องจากมีความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) มาก หลังจากนั้นตัวทำละลายจะแพร่เข้าสู่บริเวณด้านในของอนุภาค โดยตัวทำละลายจะละลาย (Solubilize) สารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ภายในอนุภาค และแพร่ย้อนกลับออกมาที่สารละลายภายนอกอนุภาค ซึ่งส่งผลให้ผลได้สารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจาก อัตราการแพร่เป็นขั้นตอนควบคุมการสกัดสารประกอบฟีนอลิก (Rate-limiting step) ต่อมาเมื่อสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในอนุภาคถูกสกัด และส่งออกมายังสารละลายรอบๆ อนุภาค (Bulk solution) จนเกือบหมดหรือ อาจเหลือปริมาณสารประกอบฟีนอลิกน้อยภายในอนุภาค ทำให้ไม่

สามารถที่จะสกัดออกมาได้อีก จึงส่งผลให้ผลได้สารประกอบฟีนอลิกมีค่าคงที่ เนื่องจากเข้าใกล้จุดสมดุล (Jokic และคณะ, 2010)

เมื่อเปรียบเทียบค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกที่เวลา 240 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าที่ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) จะให้ผลได้สารประกอบฟีนอลิกมากที่สุด เท่ากับ 10.96 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง และที่ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 70 30 และ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร) จะให้ผลได้สารประกอบฟีนอลิกลดลงเป็น 8.32 7.25 และ 4.56 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้งตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นสารลายเอทานอลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาแห้ง สามารถอธิบายได้ว่า เอทานอลและน้ำมีสมบัติการละลายใกล้เคียงกัน เป็นสารที่มีขั้วเหมือนกัน โดยเอทานอลเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ แต่น้ำเป็นตัวทำละลายอนินทรีย์ และสารประกอบฟีนอลิกเป็นกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดที่มีส่วนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่และโปรตีนเป็นสารอินทรีย์ จึงละลายได้ดีกว่าในเอทานอล อย่างไรก็ดีในโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกจะมีหมู่ไฮดรอกซีล (-OH Group) อยู่เป็นจำนวนมาก มีสมบัติเป็นสารที่ชอบน้ำ ทำให้มีส่วนที่มีขั้วมากเช่นกัน เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่า ความเข้มข้นของเอทานอลมีผลต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกมาก ดังนั้น ถ้าใช้สารละลายที่มีเอทานอลต่ำเกินไปหรือเข้มข้นมากเกินไป จะทำให้เกิดความแตกต่างของสภาพขั้ว (Polarity) ระหว่างตัวถูกละลาย และตัวทำละลายที่ใช้มากเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดมีค่าลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นสารละลายเอทานอลที่นำมาสกัด ควรมีสภาพขั้วที่ใกล้เคียงกับสารประกอบฟีนอลิกที่ต้องการสกัด จากผลการทดลองที่ได้พบว่า การใช้ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) จะทำให้สกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาได้มากที่สุด การใช้ความเข้มข้นที่สูงกว่านี้ จะมีผลให้ประสิทธิภาพการสกัดลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ เช่นกัน

Dixon และPavia (1995) ได้รายงานว่า สารประกอบฟีนอลิกส่วนใหญ่จะอยู่ในเซลล์แวคคิวโอ (Cell vacuoles) ของพืช ในขณะที่สารจำพวก ลิกนิน ฟลาโวนอยด์ และสารโพลี่ฟีนอลที่ไม่สามารถละลายได้ (Insoluble polyphenols) มักอยู่ในส่วนของผนังเซลล์เพื่อสร้างพันธะไฮโดรเจนและพันธะไฮโดรโฟบิค (Hydrophobic) กับสารโปรตีน โพลีแซคคาไรด์ และ น้ำ สารละลายเอทานอลที่เจือจาง สามารถเข้าไปถึงภายในเซลล์ของพืชได้ดีกว่า ส่วนสารละลายที่มีเอทานอลความ

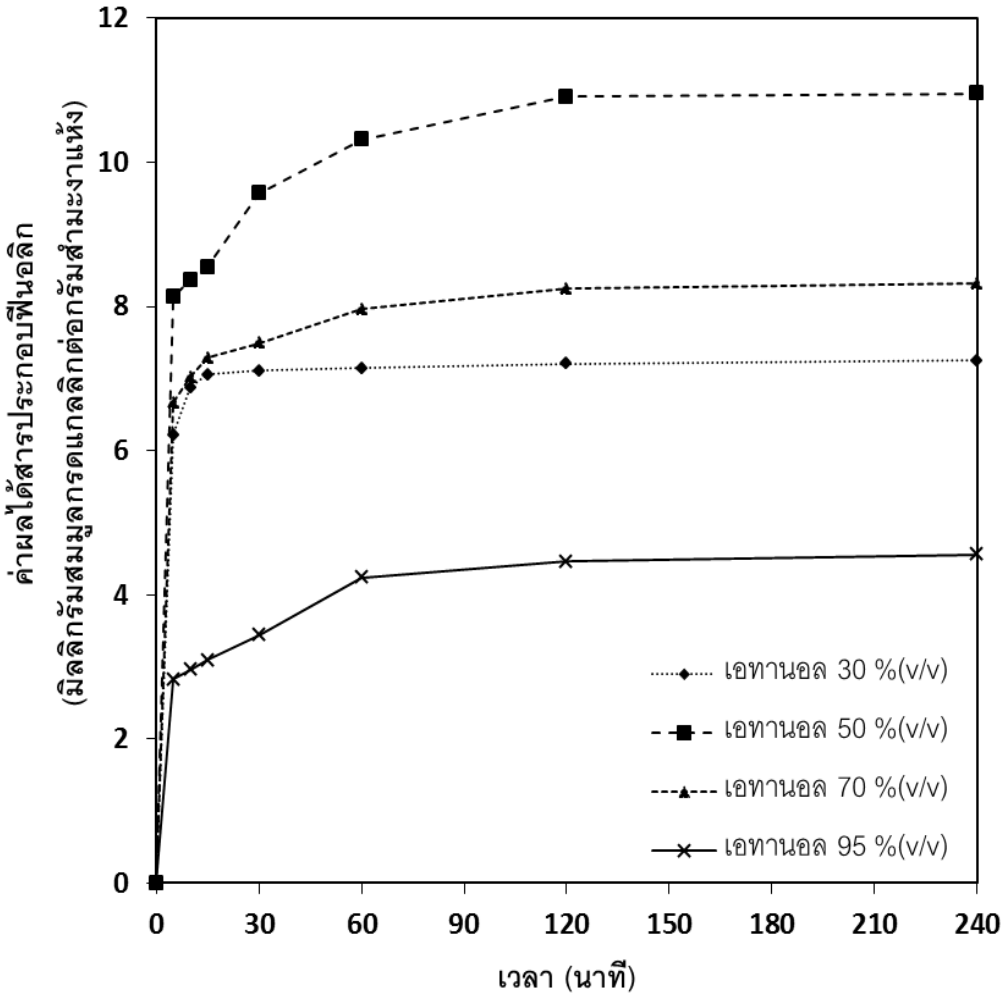
เข้มข้นสูง จะก่อให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีน (Protein denaturation) ทำให้เกิดการยับยั้งการละลายของสารประกอบฟีนอลิก ส่งผลให้ผลได้สารประกอบฟีนอลิกลดลง

Lapornik และคณะ (2005) ได้รายงานถึงการเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล ส่งผลให้เกิดลดประสิทธิภาพของการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากผลไม้ในตระกูลเบอรี่ คือ แบล็กเคอร์เรนท์ และเรดเคอร์เรนท์ พบว่า มีค่าลดลง เนื่องจากน้ำมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ (Polyphenol Oxidase, PPO) ที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก ในขณะที่เอทานอลมีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้

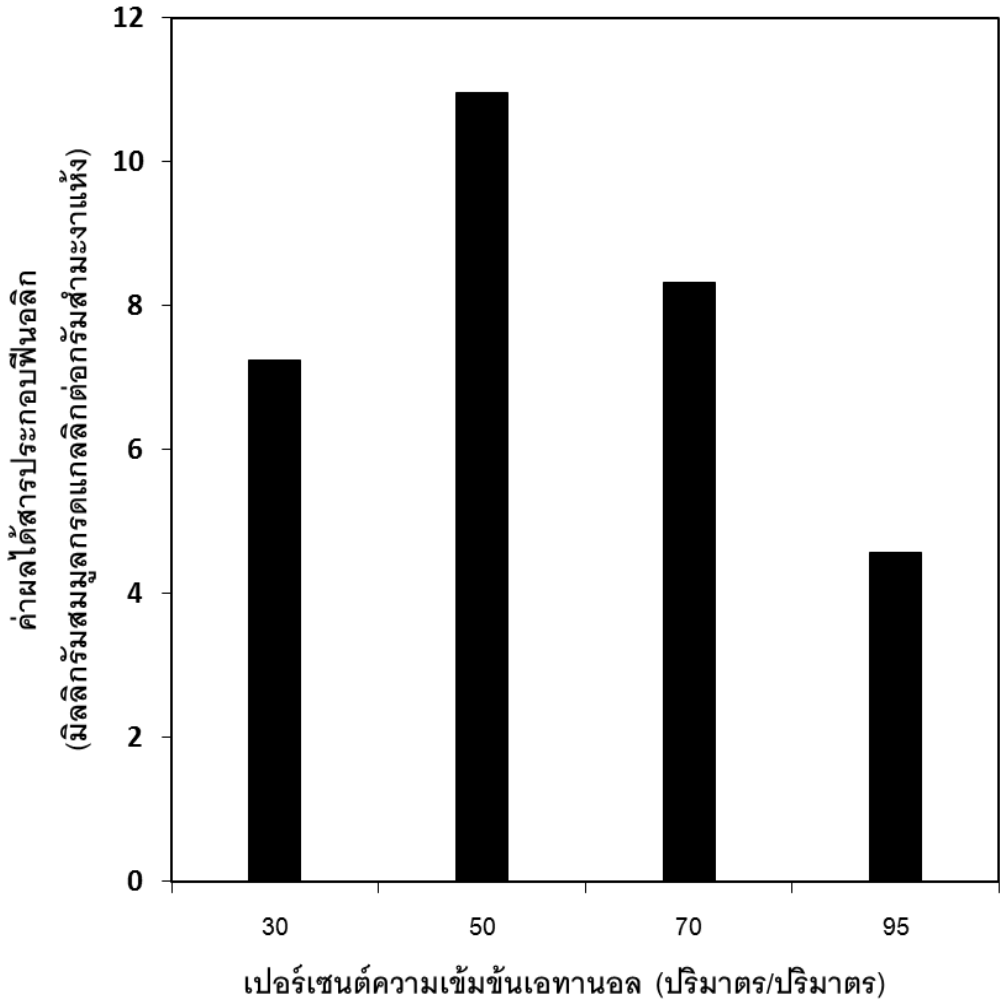
Kim และคณะ (2007) กล่าวว่า สามารถอธิบายผลของความเป็นขั้ว จากความสามารถในการละลายของตัวทำละลาย โดยศึกษาการเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการสกัดสารโพลีฟีนอลจากใบมัลเบอรี่ พบว่า เมื่อใช้ตัวทำละลายผสมจะส่งผลต่อสภาพความเป็นขั้วในการสกัด ซึ่งสภาพขั้วของสารโพลีฟีนอลจะมีค่าอยู่ระหว่างเอทานอลกับน้ำ ดังนั้นเมื่อผสมตัวทำละลายเอทานอลกับน้ำจะส่งผลให้สภาพความเป็นขั้วของตัวทำละลายผสมมีค่าใกล้เคียงกับสภาพความเป็นขั้วของสารประกอบโพลีฟีนอล ทำให้การสกัดจะเกิดได้ดีขึ้น

Spigno และคณะ (2007) ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายเอทานอลในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากกากองุ่น พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 30-60 (ปริมาตร/ปริมาตร) ส่วนความเข้มข้นสารละลายเอทานอลมากกว่าร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) จะส่งผลทำให้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกมีค่าลดลง

Jokic และคณะ (2010) ได้รายงานว่าสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากถั่วเหลือง โดยทำให้ได้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสูงสุด



รูปที่ 4.1 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที เมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 30 50 70 และ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร)



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นเอทานอลต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และที่เวลาการสกัด 240 นาที เมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 30 50 70 และ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร)

4.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก

ทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที โดยแปรผันอุณหภูมิ 50 60 และ 75 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

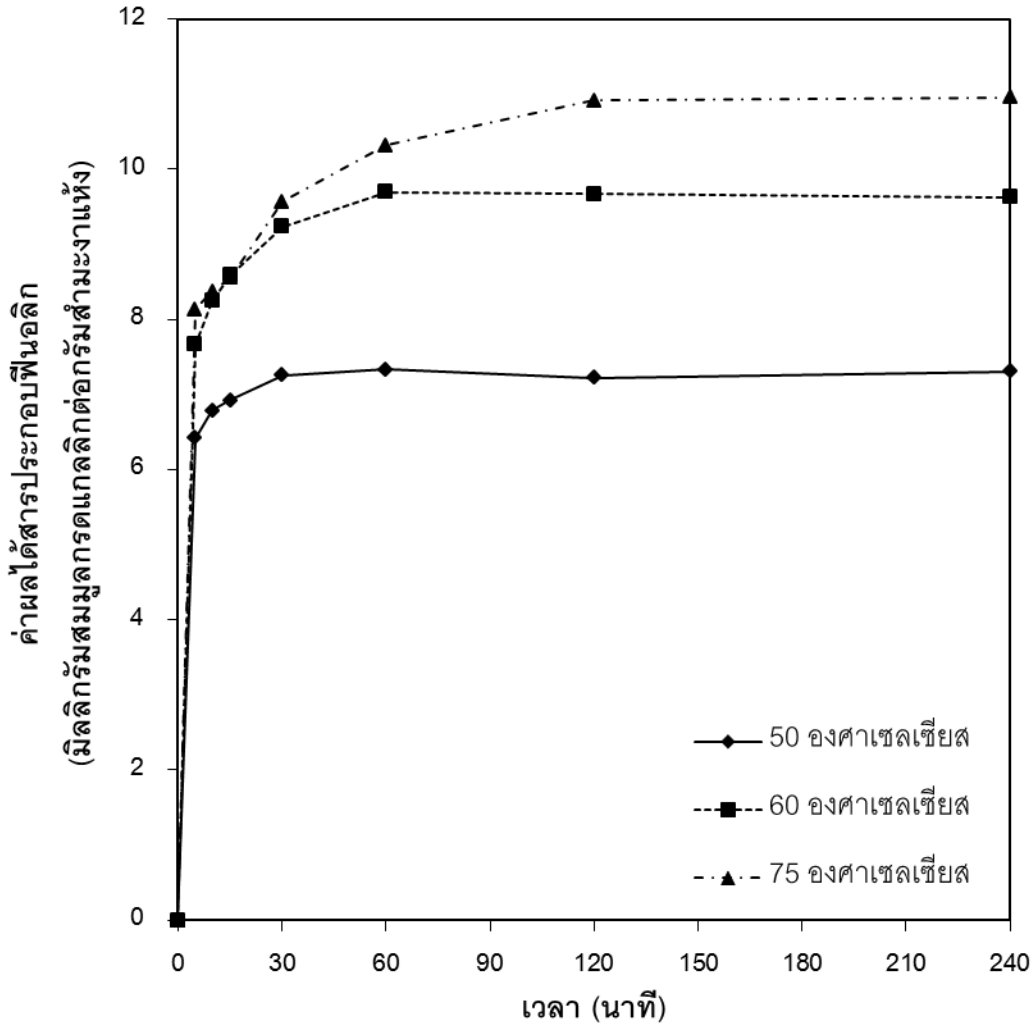
จากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า ที่ทุกอุณหภูมิของการทดลอง ผลได้สารประกอบฟีนอลิก จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรกๆ หลังจากนั้นผลได้จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ ผลได้ตามเวลามีแนวโน้มเหมือนการทดลองข้อ 4.1.1 จึงอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน ในรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลได้จากการสกัดที่เวลา 240 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 50 60 และ 75 องศาเซลเซียส ให้ผลได้สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 7.30 9.63 และ 10.97 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความหนืด (Viscosity) ของตัวทำละลายลดลง ทำให้สารละลายมีการปั่นป่วนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งยังส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) และค่าการละลาย (Solubility) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวถูกละลายแพร่กระจายสู่สารละลายได้สูงขึ้น ทำให้การสกัดสารประกอบฟีนอลิกมีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา

Sun และคณะ (2002) ได้รายงานการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากผลไม้ชนิดต่างๆจำนวน 17 ชนิด เมื่อมีการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่า อุณหภูมิสูงจะช่วยเพิ่มการแพร่ของสารกลุ่มโพลี่แซคคาไรด์บนผนังเซลล์พืช (Cell wall) ให้เกิดการกระจายไปสู่ตัวทำละลาย และช่วยลด integrity ของผนังเซลล์พืชลง ทำให้ตัวทำละลายเข้าถึงสารประกอบฟีนอลิกได้เพิ่มขึ้น

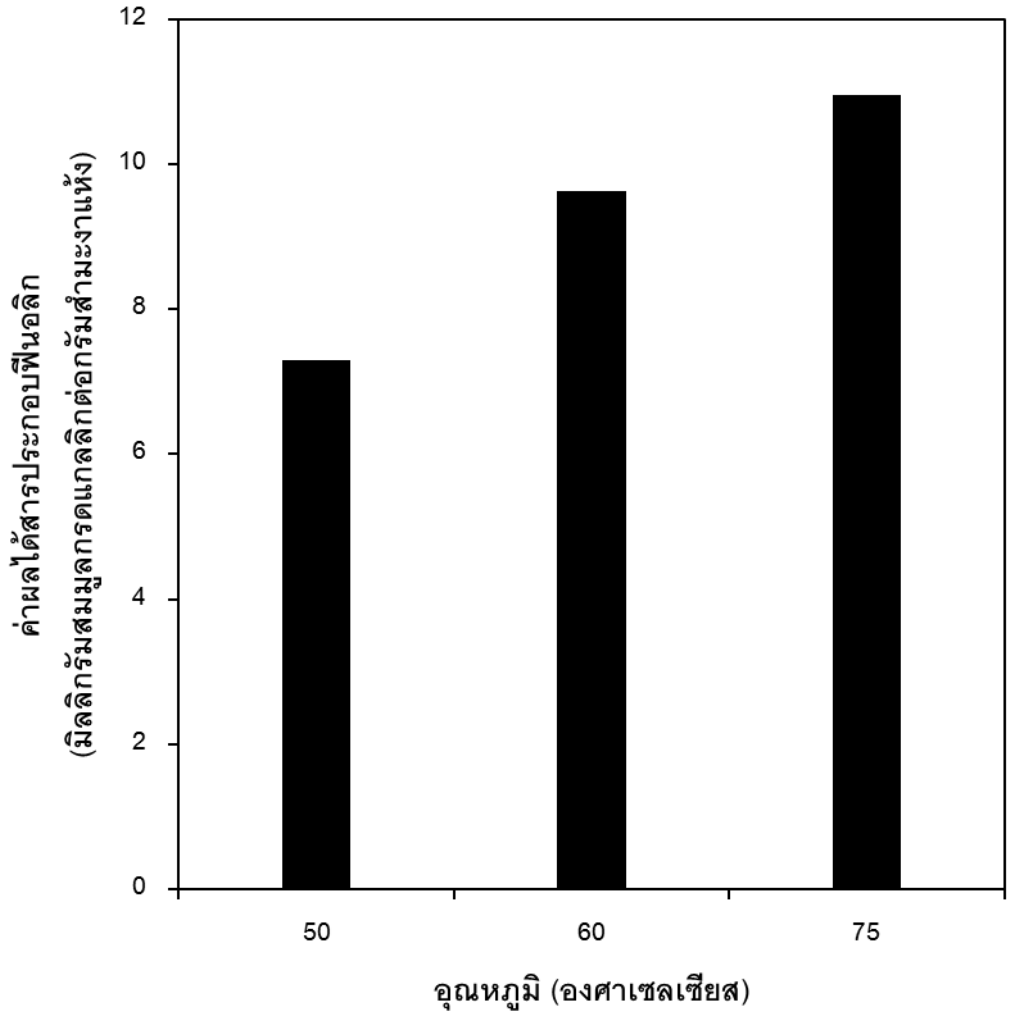
Cacace และคณะ (2003) ได้รายงานถึงอิทธิพลของอุณหภูมิในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากพืชสายพันธุ์แบล็กเคอร์เรนท์ ซึ่งเป็นพืชตระกูลเบอรี่ จะส่งผลต่อการแพร่ของตัวทำละลายภายในอนุภาค เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่จะแปรผันตามอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่ามากและสามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Yang และคณะ (2009) ได้ทำการทดลองสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากเปลือกมะขามป้อมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนืด(Viscosity) ของตัวทำละลายลดลง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่และค่าการละลายของสารประกอบฟีนอลิกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้การสกัดดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงเกินไป จะทำให้มีการสูญเสียปริมาณของตัวทำละลายส่งผลให้มีค่าผลได้ที่ลดลง นอกจากนี้

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารประกอบฟีนอลิกซึ่งมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิ จึงอาจส่งผลให้เกิดการเสียสภาพของสารประกอบฟีนอลิกได้เช่นกัน



รูปที่ 4.3 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที เมื่อทำการแปรผันอุณหภูมิ 50 60 และ 75 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) และที่เวลาการสกัด 240 นาที เมื่อทำการแปรผันอุณหภูมิ 50 60 และ 75 องศาเซลเซียส

4.1.3 ผลของอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก

ทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที โดยแปรผันอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งเป็น 10: 1 15:1 และ 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

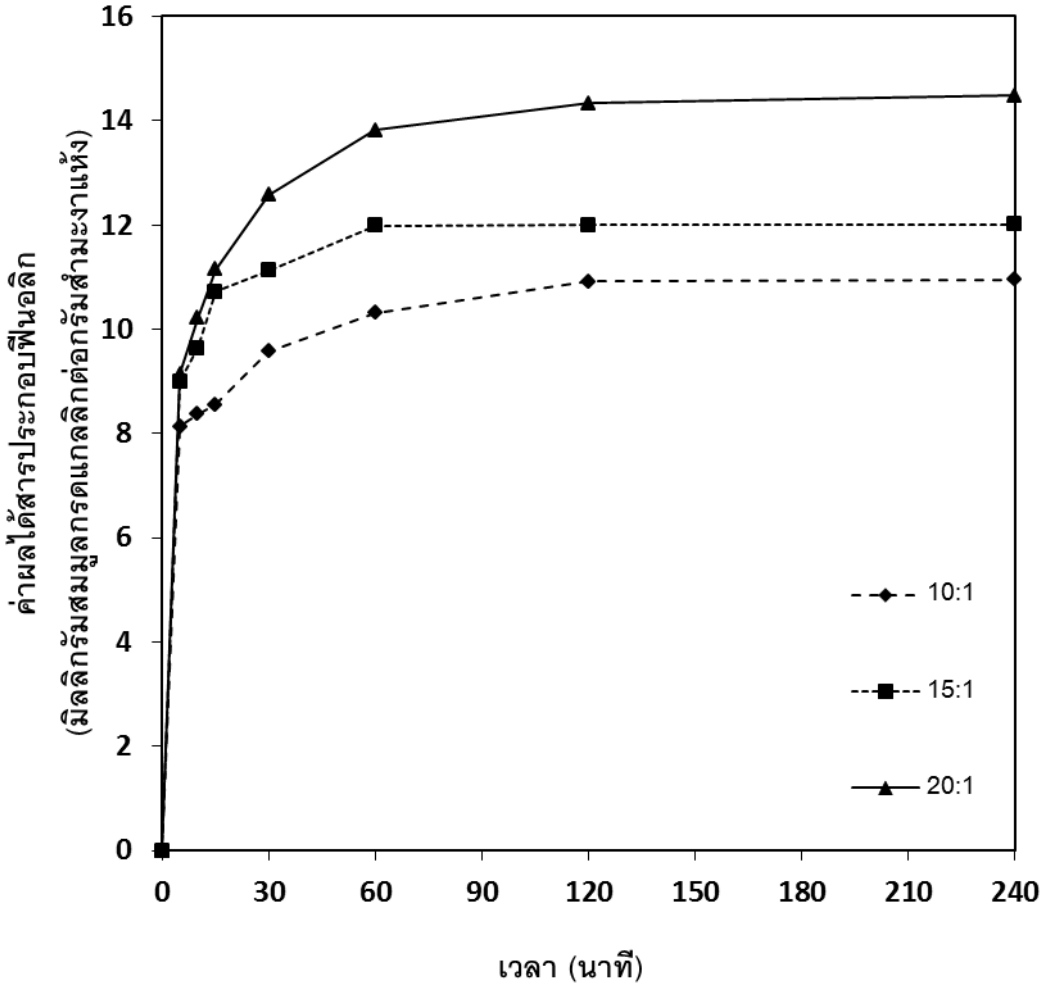
จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า ที่ทุกอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง ผลได้สารประกอบฟีนอลิกจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรกๆ หลังจากนั้นผลได้สารประกอบฟีนอลิกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างช้าๆ จนกระทั่งคงที่ โดยมีแนวโน้มเหมือนการทดลองที่ 4.1.1 และ 4.1.2 จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลได้สารประกอบฟีนอลิกที่เวลา 240 นาที พบว่าที่อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 15:1 และ 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) จะได้ผลได้สารประกอบฟีนอลิก เท่ากับ 10.96 12.01 และ 14.48 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง ตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง ทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกที่บริเวณผิวอนุภาคสำมะงาและที่ชั้นของเหลวสารละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถสกัดสารได้เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยต่อไปนี้

Ho และคณะ (2008) ได้รายงานว่า ถึงแม้ว่าค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง แต่ก็ทำให้ได้สารละลายเจือจาง ทำให้ต้องเพิ่มต้นทุนในการแยกสารต่อไป ดังนั้นจึงควรทดลองหาชนิดของตัวทำละลายหรือตัวทำละลายผสมที่เหมาะสม จะดีกว่าเพิ่มอัตราส่วนตัวทำละลาย ต่อของแข็ง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการสกัดที่ใช้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งน้อยเกินไป ทำให้ได้สารละลายที่ภาวะอิ่มตัว ส่งผลให้ไม่สามารถสกัดต่อไปได้อีก จึงควรหลีกเลี่ยงภาวะเช่นนี้

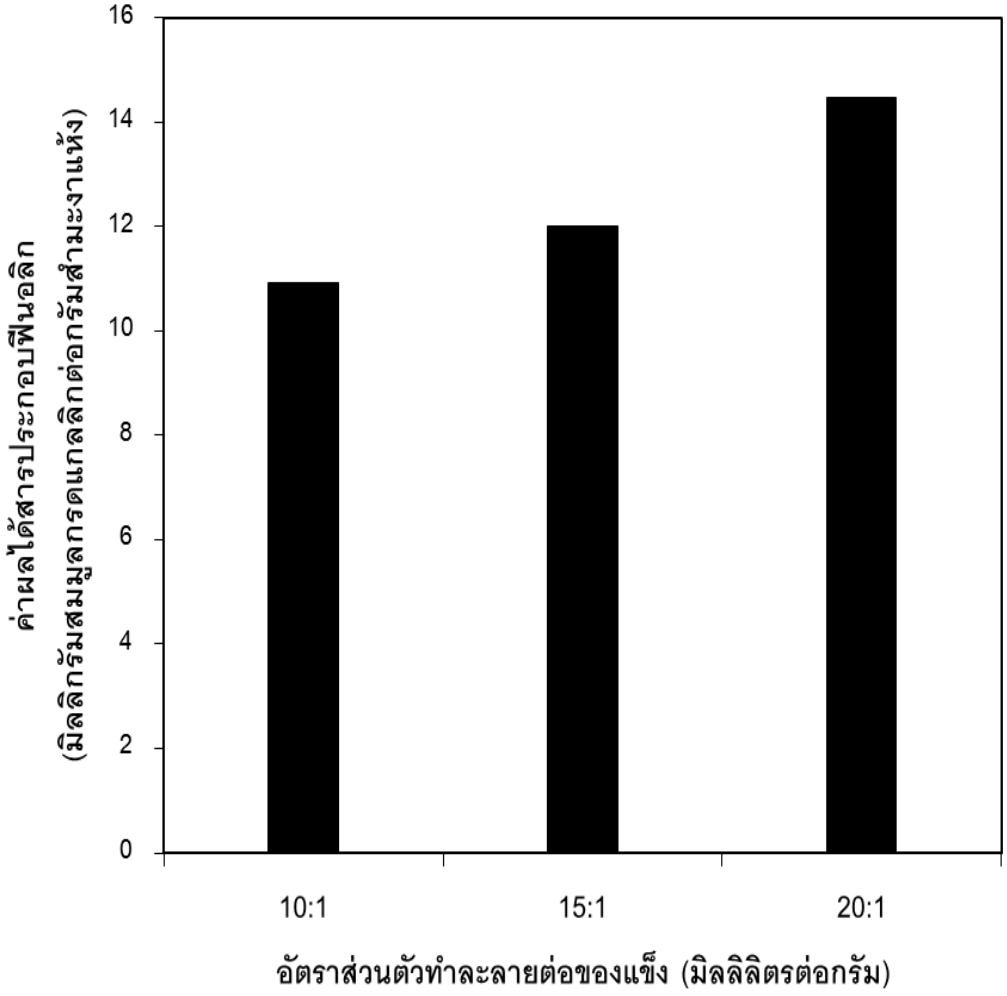
Prasad และคณะ (2009) ได้รายงานว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอัตราส่วนของของแข็งต่อตัวทำละลายของการสกัดสารประกอบฟีนอลิก และสารต้านอนุมูลอิสระจากเปลือกลำไย จะทำให้ค่าผลได้ของสารสกัดทั้งสองเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าอัตราส่วนของแข็งต่อตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้นจะเพิ่มผลได้ของการสกัด แต่ถ้าเพิ่มอัตราส่วนที่มากเกินไป จะไม่ส่งผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองข้างต้น จะได้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งที่เหมาะสม คือ 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) และเมื่อพิจารณาผลการทดลองแบบกะทั้งหมดที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ คือ ความเข้มข้นสารละลายเอทานอล อุณหภูมิ และอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง พบว่า ความเข้มข้นเอทานอล และอุณหภูมิจะส่งผลต่อค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกเป็น

อย่างมาก เมื่อเทียบกับอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง โดยภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดแบบกะ คือ การสกัดอนุภาคสำมะงา ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) ดังนั้นจึงจะนำภาวะดังกล่าวไปใช้ในการทดลองด้วยเครื่องสกัดแบบแพคเบดต่อไป



รูปที่ 4.5 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที เมื่อทำการแปรผันอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งเป็น 10:1 (-◆-), 15:1 (-■-) และ 20:1 (—▲—) (มิลลิลิตรต่อกรัม)

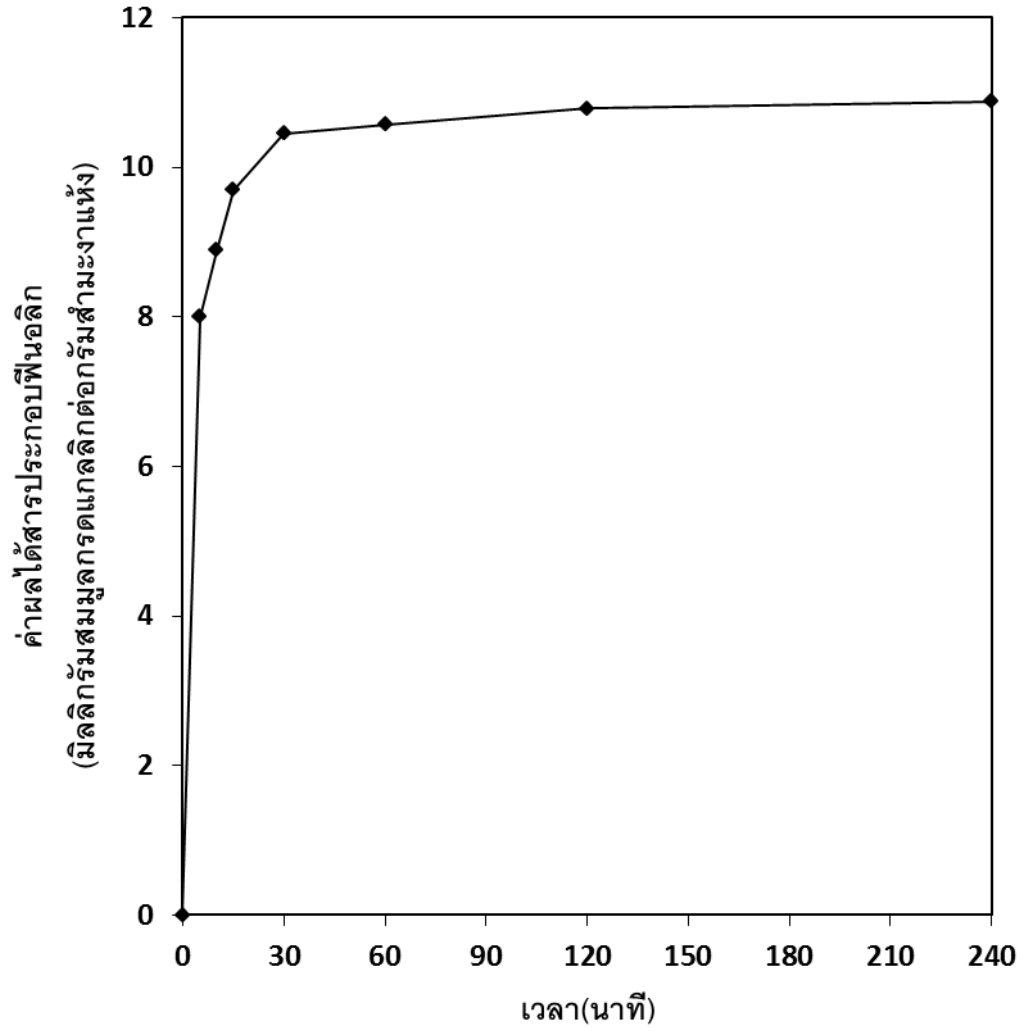


รูปที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และที่เวลาการสกัด 240 นาที เมื่อทำการแปรผันอัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็งเป็น 10:1,15:1 และ 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)

4.1.4 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกในการสกัดสำมะงาขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร

ขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการสกัดแบบกะจะมีขนาดเล็ก คือ น้อยกว่า 75 ไมโครเมตร เมื่อนำมาทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด พบว่า อนุภาคมีขนาดเล็กมากเกินไป ทำให้ไม่สามารถควบคุมการสกัดให้คงที่ได้ เนื่องจากความดันลด (Pressure drop) ภายในคอลัมน์มีค่าสูงมาก เกิดปัญหาเบดของอนุภาคสำมะงาที่ใส่ในคอลัมน์มีการยกตัวสูงขึ้น ทำให้เกิดการอุดตันของแผ่นกั้นเบด ทำให้สกัดสารประกอบฟีนอลิกได้ลดลง ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการสกัดที่ขนาดอนุภาคเดียวกันกับการทดลองแบบเพคเบด จึงทำการคัดเลือกขนาดอนุภาคสำมะงา 180-300 ไมโครเมตร มาทดลองสกัดแบบกะที่ภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองแบบกะที่ผ่านมา คือ ทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 พบว่า การสกัดที่ภาวะนี้จะได้ลักษณะเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา การเข้าสู่จุดสมดุลจะอยู่ที่เวลา 30 นาทีของการสกัด ได้ผลได้สารประกอบฟีนอลิก มีค่าเท่ากับ 10.45 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง เมื่อสิ้นสุดการสกัดที่เวลา 240 นาที จะได้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก มีค่าเท่ากับ 10.88 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง จากผลการทดลองที่ได้จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกที่ได้จากการสกัดด้วยเครื่องสกัดแบบแพคเบด



รูปที่ 4.7 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาค180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 20:1 (มิลลิลิตรต่อนาที) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัด 0-240 นาที

4.2 การทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด

จากการสกัดแบบกะ ภาวะในการสกัดที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นสารละลายเอทานอล ร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) และ อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส โดยจะนำภาวะดังกล่าวมาใช้ในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกด้วยเครื่องสกัดแบบแพคเบด ทำการแปรผันภาวะต่างๆที่ใช้ในการสกัด ได้แก่ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดของอนุภาคสำมะงา 180-300 300-600 600-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร ระยะเวลาการสกัด 0-180 นาที

4.2.1 ผลของอัตราการป้อนตัวทำละลายต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิก

ทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาด้วยเครื่องสกัดแบบแพคเบด ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการสกัด 0-180 นาที โดยแปรผันอัตราการป้อนตัวทำละลายเป็น 4 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ (ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number) เท่ากับ 0.20 0.61 0.91 และ 1.32 ตามลำดับ) ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10

ผลการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากอนุภาคสำมะงาในคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า อัตราการสกัดเริ่มต้น (Initial extraction rate) เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการป้อนตัวทำละลาย เมื่อพิจารณาผลได้สารประกอบฟีนอลิกตามเวลา พบว่า จากการที่มีการแช่ผงสำมะงาในตัวทำละลาย 15 นาที ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกในเบดจึงมีค่ามาก เมื่อเริ่มป้อนตัวทำละลายผ่านเบดจึงเป็นการชะ (Washing) สารประกอบฟีนอลิกออกจากเบด (รูปที่4.9) ในขั้นตอนนี้ตัวควบคุมการสกัดคือ การพา (Convection) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัวทำละลาย จะเกิดแรงเฉือนเอาชั้นฟิล์มที่อยู่รอบอนุภาคออก (Liquid film)ให้บางลง ทำให้การถ่ายโอนสารประกอบฟีนอลิกบริเวณผิวอนุภาคสำมะงากับชั้นของตัวทำละลายเกิดได้ดีขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าทุกเส้นกราฟเปลี่ยนจากเส้นตรงเป็นเส้นโค้งตามเวลา ซึ่งอธิบายได้ว่า หลังจากชะสารประกอบฟีนอลิกออกจากเบดแล้ว อัตราการสกัดจะขึ้นอยู่กับการแพร่ของสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในอนุภาค ขั้นตอนนี้จะถูกควบคุมโดย การแพร่ (Diffusion) ซึ่งช้ามาก

ในช่วงท้ายของการทดลอง พบว่า ที่อัตราการป้อนตัวทำละลายต่างๆ สามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้เพิ่มขึ้นไม่มากนักจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล ผลได้มีค่าคงที่ ผลได้สารประกอบฟีนอลิกจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งของแต่ละอัตราการป้อน ที่อัตราการป้อนตัวทำละลายเป็น 4 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที จะใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่แตกต่างกัน คือ 90, 90, 60 และ 30 นาที ตามลำดับ เนื่องจากเวลาที่ตัวทำละลายผ่านคอลัมน์ (Resident time) ขึ้นอยู่กับอัตราการ

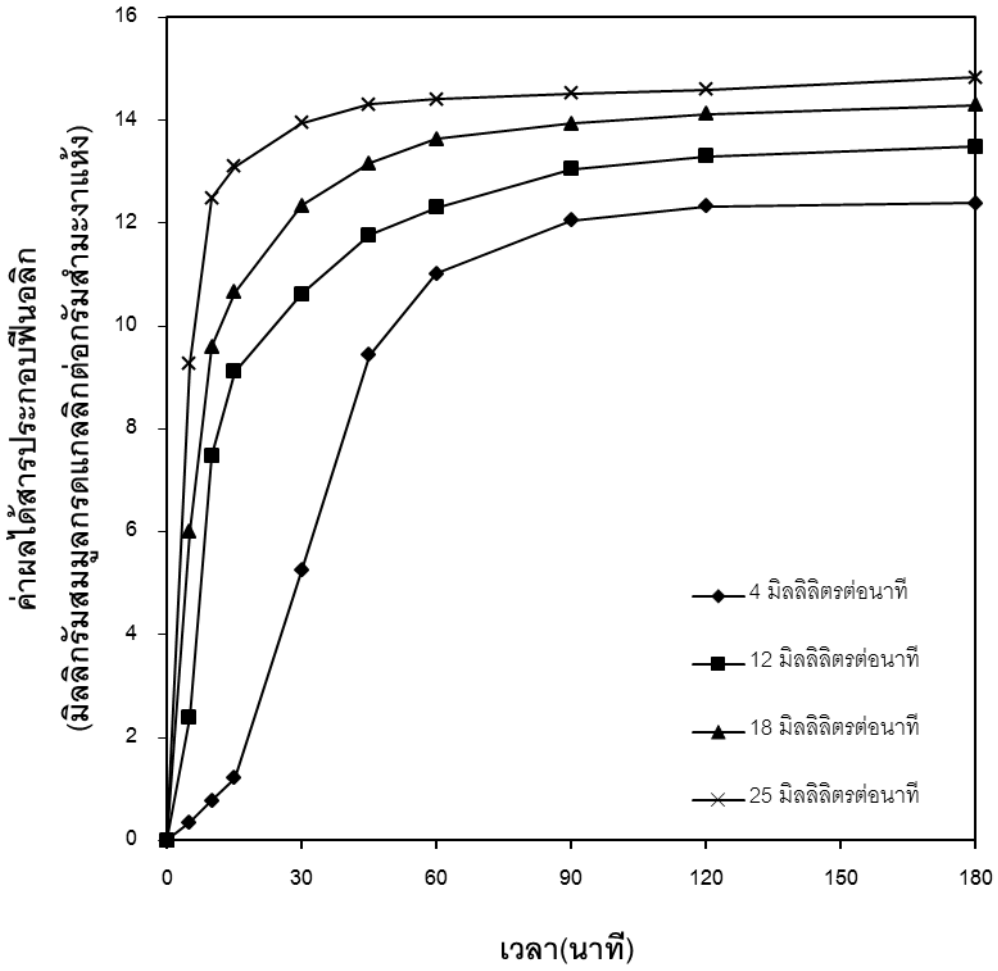
ป้อนตัวทำละลาย (ตารางที่ 4.1) จะเห็นได้ว่า การเพิ่มอัตราการป้อนสูงขึ้น จะมีผลทำให้เวลาในการเข้าสู่สมดุลจะเกิดได้เร็วขึ้น หรือใช้เวลาน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกที่เวลา 180 นาที แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัวทำละลาย จะส่งผลให้ผลได้สารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 12.39 13.49 14.29 และ 14.83 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง ตามลำดับ

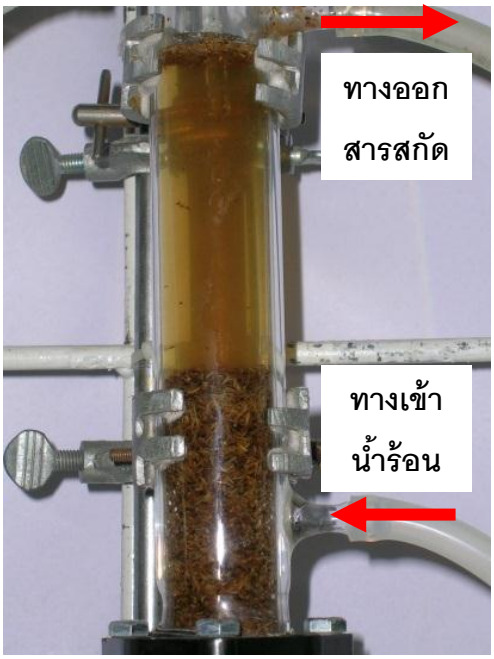
ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Nieh และคณะ, (1991) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของอัตราการป้อนต่อการสกัดน้ำมันจากถั่วเหลือง พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัวทำละลาย จะส่งผลให้อัตราการสกัดน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาภาวะการสกัดด้วยอัตราการป้อนตัวทำละลายค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่า ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นอัตราการป้อนตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา เนื่องจากให้อัตราการสกัดเริ่มต้นสูงสุด

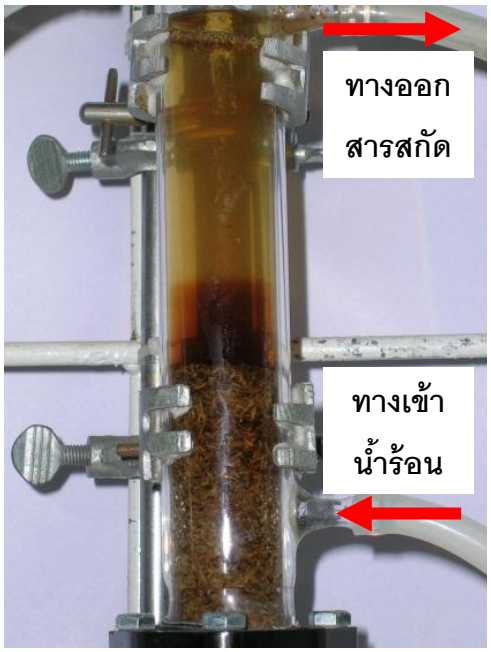
เนื่องจากขนาดอนุภาคเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการแพร่ภายในอนุภาค ดังนั้นการทดลองต่อไปจะทำการแปรผันขนาดอนุภาค โดยการแปรผันขนาดอนุภาคเป็น 180-300
300-600 600-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) และอุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา



รูปที่ 4.8 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ขนาดอนุภาค180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิการสกัด 75 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการสกัด 0-180 นาที โดยแปรผันอัตราการป้อนตัวทำละลายเป็น 4 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที



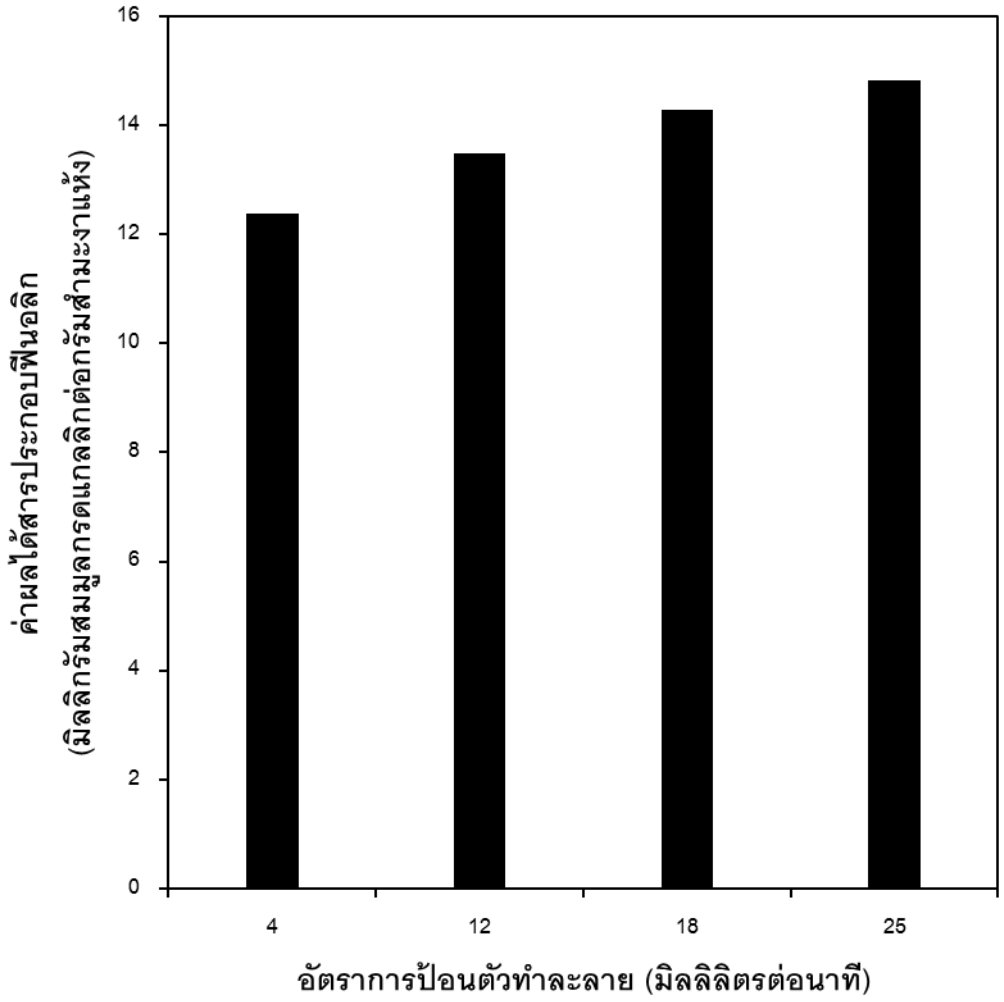
(ก) ก่อนการป้อนตัวทำละลาย



(ข) หลังการป้อนตัวทำละลาย 5 นาที

(ค) หลังการป้อนตัวทำละลาย 30 นาที

รูปที่ 4.9 การเคลื่อนที่ของสารประกอบฟีนอลิกภายในคอลัมน์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 มิลลิลิตรต่อนาที และ ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ที่เวลาการสกัด (ก) ก่อนการป้อนตัวทำละลาย (ข) หลังการป้อนตัวทำละลาย 5 นาที (ค) หลังการป้อนตัวทำละลาย 30 นาที



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราการป้อนตัวทำละลายต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส และที่เวลาการสกัด 180 นาที เมื่อทำการแปรผันอัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.1 ค่า resident time ที่อัตราการป้อนต่างๆ ในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

อัตราการป้อนตัวทำละลาย (มิลลิลิตรต่อนาที)	Resident time (นาที)
4	22.42
12	7.47
18	4.98
25	3.59

4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา

ทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการสกัด 0-180 นาที โดยแปรผันขนาดอนุภาคสำมะงา 180-300 300-600 600-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.11 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13

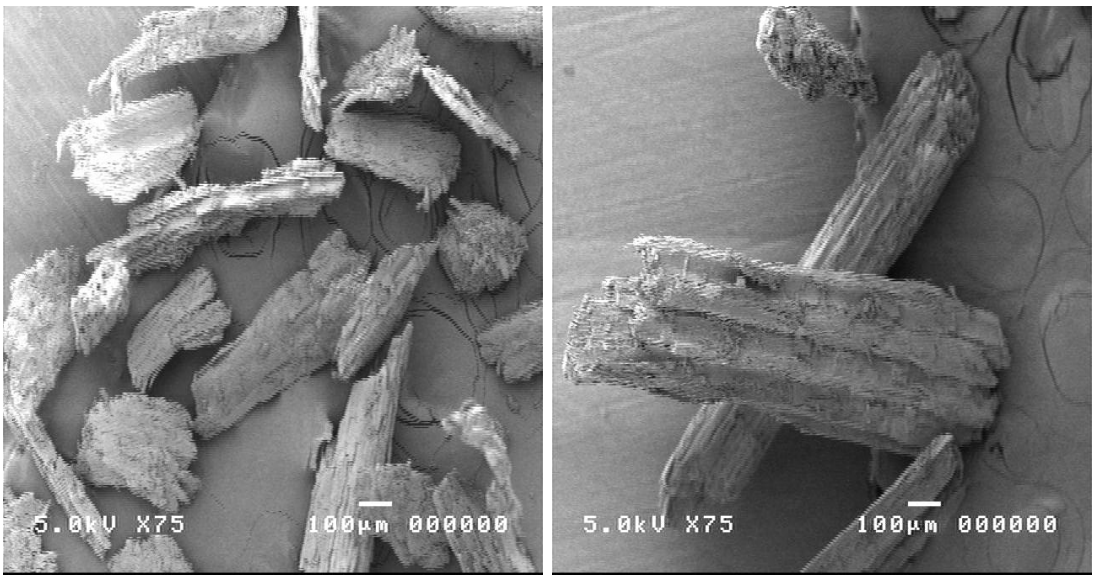
จากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ในช่วง 15 นาทีแรก อัตราการสกัดเริ่มต้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดลดลง เนื่องจากการลดขนาดอนุภาคจะช่วยให้การแพร่เกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกมากขึ้น หลังจากนั้นที่ทุกๆขนาดอนุภาคการสกัดจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ซึ่งไม่สามารถสกัดได้ต่อไป

จากรูปที่ 4.13 พบว่า ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร มีค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุดเท่ากับ 14.83 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง รองลงมาคือ ขนาดอนุภาค 300-600 600-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 13.64 12.81 และ 11.86 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง ตามลำดับ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้

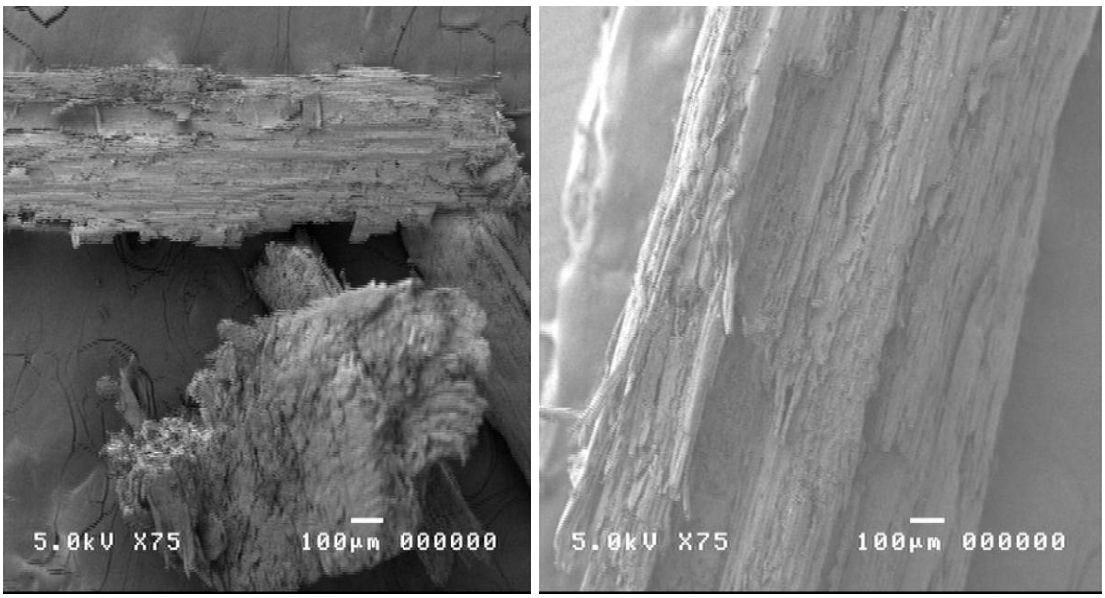
Duling และคณะ (2005) ซึ่งได้รายงานถึงอิทธิพลของขนาดอนุภาคในการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากใบเสจ พบว่า เมื่อขนาดของอนุภาคมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้การสกัดน้ำมันหอมระเหยมีค่าลดลง เนื่องจากการถ่ายโอนโดยการแพร่ของตัวทำละลายเข้าไปภายในอนุภาคและการแพร่ของตัวถูกละลายออกจากอนุภาค โดยขั้นตอนการแพร่ดังกล่าว จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมการถ่าย

โอนมวลในกระบวนการสกัดทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่า ได้เลือกใช้ขนาดอนุภาค 2 มิลลิเมตร เป็นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมแม้ว่าอนุภาค 1 มิลลิเมตร เป็นขนาดอนุภาคที่สกัดน้ำมันหอมระเหยออกมาได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามการสกัดจะเกิดขึ้นได้ยากเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กเกินไปส่งผลให้เกิดปัญหาของฝุ่น และความร้อนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบด อีกทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินไปอาจไปอุดตันแผ่นกรองในเครื่องสกัด ทำให้การไหลของตัวทำละลายช้าลง

Giao และคณะ (2009) ซึ่งได้รายงานถึงอิทธิพลของขนาดอนุภาคในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจาก *Agrimonia eupatoria, Salvia ep และStureja Montana* พบว่า สารต้านอนุมูลอิสระจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาการสกัดเพิ่มขึ้นและลดขนาดอนุภาคพืชลง เนื่องจากเวลาในการสัมผัสกันระหว่างตัวทำละลายกับสมุนไพรมีมากขึ้น ขนาดอนุภาคที่เล็กลงจะส่งผลต่อการสกัด โดยที่เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลายตามกฎของฟิกซ์

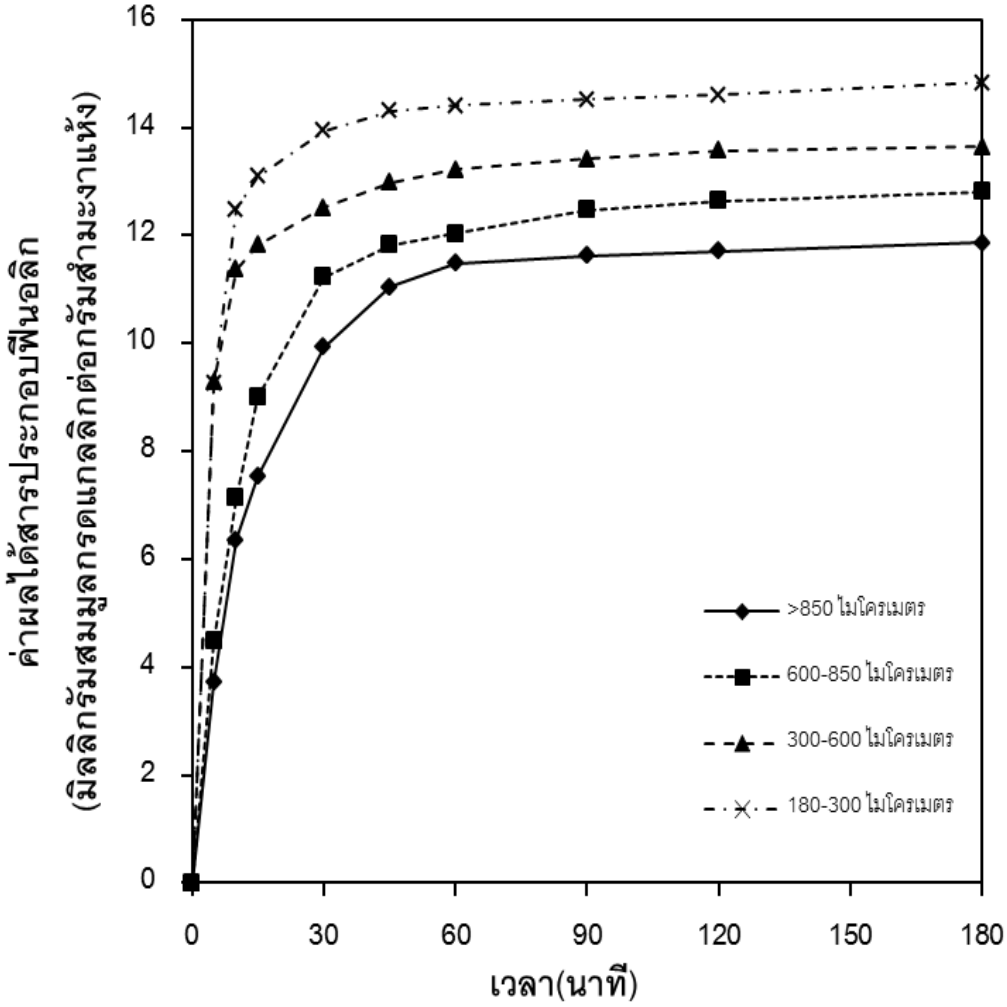


(ก) 180-300 ไมโครเมตร (ข) 300-600 ไมโครเมตร

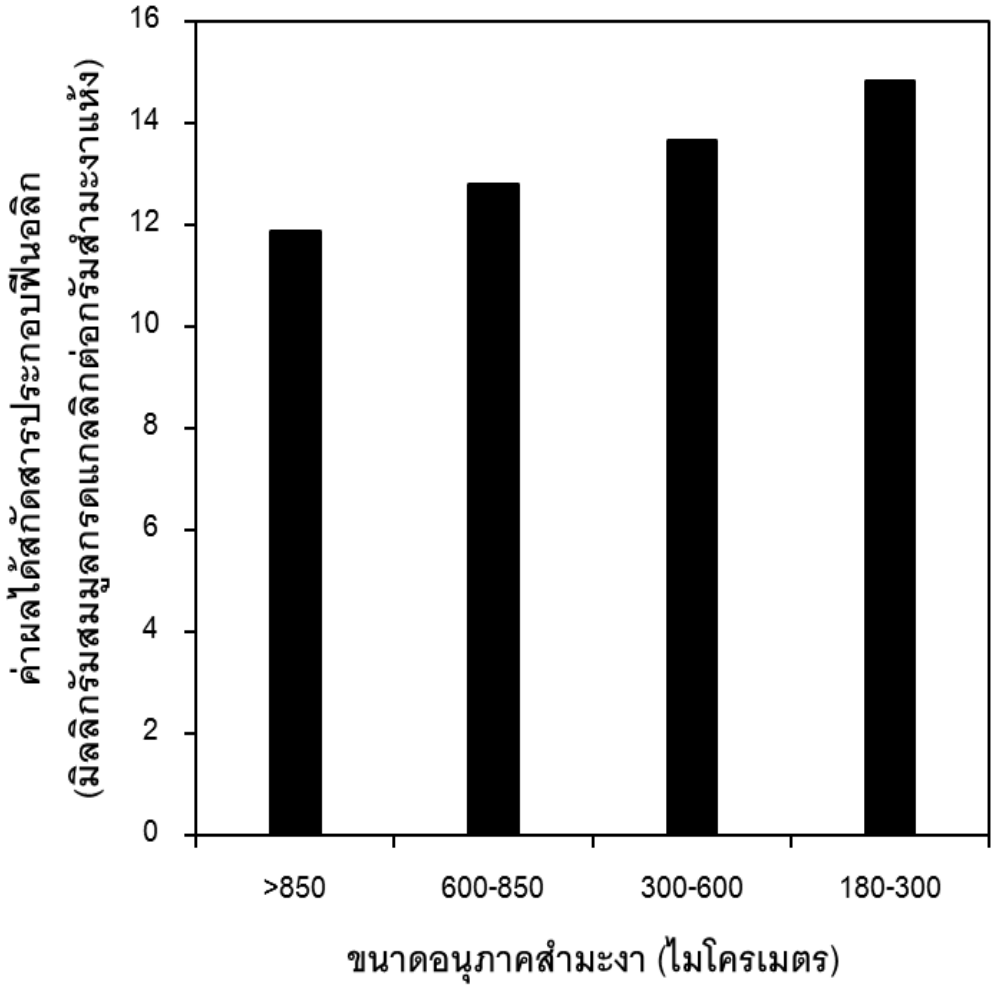


(ค) 600-850 ไมโครเมตร (ง) มากกว่า 850 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายอนุภาคสำมะงาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามขนาดอนุภาคต่างๆ (ก) 180-300 ไมโครเมตร (ข) 300-600 ไมโครเมตร (ค) 600-850 ไมโครเมตร (ง) มากกว่า 850 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.12 ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกจากการสกัดสำมะงา ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการสกัด 0-180 นาที โดยแปรผันขนาดอนุภาคสำมะงา 180-300 300-600 600-850 และ มากกว่า 850 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.13 ผลของขนาดอนุภาค ต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที และที่เวลาการสกัด 180 นาที เมื่อทำการแปรผันขนาดอนุภาคสำมะงา 180-300 300-600 600-850 และ มากกว่า 850 ไมโครเมตร

4.3 การเปรียบเทียบผลได้สารประกอบฟีนอลิกในการสกัดแบบกะและเครื่องสกัดแบบแพคเบด

ในการสกัดทั้งสองแบบ จะพิจารณาภาวะที่เหมาะสม คือ สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิในกาสกัด 75 องศาเซลเซียส และ ขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ทำการเปรียบเทียบผลได้สารประกอบฟีนอลิกที่เท่ากันของการสกัดแบบกะ (10.45 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง) กับแบบแพคเบดที่อัตราการป้อนต่างๆ โดยจะพิจารณา ความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้ ปริมาตรที่ได้จากการสกัด และ เวลาที่ใช้ในการสกัด แสดงค่าต่างๆดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้ ปริมาตรที่ได้จากการสกัด และ เวลาที่ใช้ในการสกัด ในการสกัดแบบกะและแบบแพคเบด ที่ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 10.45 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง

เงื่อนไขการสกัด	เวลาที่ใช้ในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่ได้ในการสกัด (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
แบบกะ	30	155	0.674
อัตราการป้อน 12 มิลลิลิตรต่อนาที	28.29	344.45	0.303
อัตราการป้อน 18 มิลลิลิตรต่อนาที	14	253.82	0.412
อัตราการป้อน 25 มิลลิลิตรต่อนาที	6.83	171.75	0.608

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ในกรณีการสกัดแบบแพคเบด เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มสูงขึ้นความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้ปริมาตรสารสกัดน้อยลง เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดแรงเฉือนเอาชั้นฟิล์มที่อยู่รอบอนุภาคออก (Liquid film) ให้บางลง ทำให้การถ่ายโอนสารประกอบฟีนอลิกบริเวณผิวอนุภาคสำมะงากับชั้นของตัวทำละลายเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่ได้มีค่ามากขึ้นอีก เมื่อพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการ

สกัดจะพบว่า ที่อัตราการป้อนตัวทำละลายสูง จะใช้เวลาในการสกัดที่น้อยลง หรือ เวลาที่เข้าสู่สมดุลจะเกิดได้เร็ว เมื่อเปรียบเทียบการสกัดแบบกะกับแบบแพคเบดโดยพิจารณาจากผลได้เท่ากัน พบว่า ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้จากแพคเบดมีค่าต่ำกว่าแบบกะเล็กน้อย แม้ว่าการสกัดแบบแพคเบดจะได้ความเข้มข้นที่น้อยกว่า แต่มีข้อดีคือ ใช้เวลาในการสกัดเร็วกว่าแบบกะ 8.17 นาที (แบบแพคเบดใช้เวลาสกัดทั้งสิ้น 21.83 นาที รวมเวลาที่แช่ผงสำมะงา 15 นาทีแล้ว) ทำให้การสกัดแบบแพคเบดจึงมีประสิทธิภาพการสกัดดีกว่าแบบกะ

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเปรียบเทียบการสกัดแบบกะกับแบบแพคเบด โดยพิจารณาจากเวลาที่เริ่มเข้าสู่สมดุลที่อัตราการป้อนตัวทำละลายต่างๆกัน (จุดเปลี่ยนโค้งจากกราฟรูปที่ 4.8) พบว่า อัตราการป้อนตัวทำละลาย 12 18 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่ 90 60 และ 30 นาที ตามลำดับ โดยให้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก ปริมาตรที่ต้องใช้ในการสกัดและความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิก แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าผลได้และความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่เวลาการสกัดเข้าสู่สมดุล ที่อัตราการป้อนตัวทำละลายต่างๆ

อัตราการป้อนตัวทำละลาย (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลาเข้าสู่สมดุล (นาที)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
12	90	13.047	1084	0.120
18	60	13.637	1096	0.124
25	30	13.944	748	0.186
แบบกะ	30	10.45	155	0.674

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาที่เวลาเข้าสู่สมดุลของแต่ละอัตราการป้อนตัวทำละลายและแบบกะ พบว่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัวทำละลายสูงขึ้น และมีค่ามากกว่าแบบกะที่ทุกอัตราการป้อนตัวทำละลาย ในขณะที่ความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่ได้จากแบบแพคเบดมีค่าต่ำกว่าแบบกะประมาณ 3.6 เท่า ดังนั้น ในการเปรียบเทียบจึงต้องพิจารณาค่าใช้จ่ายในการแยกสารประกอบฟีนอลิกออกจากตัวทำละลายควบคู่ไป

4.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusivity) ของการสกัดสารประกอบฟีนอลิก

โดยทั่วๆไปขั้นตอนการสกัดสารสำคัญออกจากอนุภาคโดยใช้ตัวทำละลาย มีการอ้างถึงแบบจำลองต่างๆในงานวิจัยซึ่งล้วนกล่าวถึงการถ่ายโอนมวลภายในอนุภาค (Internal mass transfer) (Aguilera และ Stanley, 1999) และมีการพิสูจน์ว่า การแพร่ภายในอนุภาค เป็นขั้นตอนควบคุมของกระบวนการสกัด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่คำนวณจากข้อมูลการทดลอง (Seikova และ Simeonov, 2003)

ในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา จะกำหนดให้ ขั้นตอนการแพร่ภายในอนุภาคสำมะงา เป็นขั้นตอนที่ถูกควบคุมในขั้นตอนการสกัด การแพร่ภายในอนุภาคจะขึ้นกับระยะทางในการแพร่ ตามความเป็นจริงของแข็งที่มีรูพรุน จะมีรูอยู่กระจัดกระจายมากมายที่ตัวทำละลายสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ ทำให้ระยะทางยาวขึ้นและคำนวณได้ยาก ดังนั้น เพื่อให้คำนวณได้ง่ายขึ้นจะกำหนดให้ระยะทางการแพร่ คิดเฉพาะการแพร่ตามแนวแกนรัศมี ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ใช้สมการ 3.7 โดยพลอตกราฟ ระหว่างค่า lnY กับเวลา ค่าความชันที่ได้จะมีค่าเท่ากับ ($\pi^2 D_{eff} / r^2$) จากข้อมูลการทดลองในแบบกะและแบบแพคเบด ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.4

จากตารางที่ 4.4 พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ภายในอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนตัวทำละลายสูงขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยมีค่าสูงสุดอยู่ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าเท่ากับ 23.6×10^{-13} ตารางเมตรต่อวินาที ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยจากการทดลองแบบกะมีค่าเท่ากับ 1.64×10^{-13} ตารางเมตรต่อวินาที โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่คำนวณได้มาจากข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส มีสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) เป็นตัวทำละลาย เมื่อเปรียบเทียบกันงานวิจัยอื่นๆ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Pinelo, Sineiro และ Nunez (2006) ได้รายงานค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในการสกัด

สารประกอบฟีนอลิกจากกากองุ่นด้วยตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 60 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ระหว่าง 1.33×10^{-13}- 10.55×10^{-13} ตารางเมตรต่อวินาที และ มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Nei และ คณะ (2008) ที่ทำการศึกษาการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากถั่วเหลืองด้วยตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 55 (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าอยู่ระหว่าง 15.45×10^{-13}- 25.50×10^{-13} ตารางเมตรต่อวินาที

นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการป้อนตัวทำละลายสูงขึ้นในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guerrero, Torres, และ Nunez (2008) ได้รายงานถึงอิทธิพลของการเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายเอทานอลร้อยละ 60 ที่ส่งผลต่อการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากกากองุ่นเขียว ส่วน Cacaze และ Mazza (2003) ได้ศึกษาถึงการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ เมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายเอทานอลร้อยละ 60 (ปริมาตร/ปริมาตร) เมื่อทำการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากพืชแบล็กเคอเรนท์

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เมื่อแปรผันขนาดอนุภาคและอัตราการป้อนตัวทำละลายของการสกัดในเครื่องแพคเบดและการสกัดแบบกะที่ภาวะเหมาะสมคือ สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) และอุณหภูมิการสกัด 75 องศาเซลเซียส

อัตราการป้อนตัวทำละลาย (มิลลิลิตรต่อนาที)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ $\times10^{13}$ (ตารางเมตรต่อวินาที)					
	น้อยกว่า 75 ไมโครเมตร	180-300 ไมโครเมตร	300-600 ไมโครเมตร	600-850 ไมโครเมตร	มากกว่า 850 ไมโครเมตร	เฉลี่ย
4	-	2.41	6.42	6.00	3.97	4.70
12	-	3.82	8.99	8.22	6.41	6.86
18	-	6.38	11.60	11.50	11.00	10.10
25	-	21.00	16.00	28.40	29.00	23.60
แบบกะ	0.88	2.41	-	-	-	1.64

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การสกัดแบบกะสำหรับอนุภาคสำมะงาที่น้อยกว่า 75 ไมโครเมตร เมื่อทำการแปรผันปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายเอทานอล อุณหภูมิในการสกัด อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง สามารถสรุปได้ว่า

ตัวทำละลายที่เหมาะสมที่ให้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกมากที่สุดคือ สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) เนื่องจากมีสภาพการเป็นขั้วที่เหมาะสมต่อในการละลายสารประกอบฟีนอลิกที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากและอยู่ในเซลล์พืช

การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดสารประกอบฟีนอลิก มีผลช่วยให้การสกัดสารประกอบฟีนอลิกมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากทำให้เกิดการเพิ่มค่าการละลาย และอัตราการแพร่ของตัวทำละลาย โดยอุณหภูมิในการสกัดที่เหมาะสม คือ 75 องศาเซลเซียส

ส่วนการสกัดโดยการเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง จะให้ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากจะเป็นการเพิ่มแรงขับ (Driving force) ซึ่งเกิดจากแตกต่างความเข้มข้นบริเวณผิวอนุภาคและของเหลวที่อยู่รอบๆอนุภาค โดยอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็งในการสกัดที่เหมาะสม คือ 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)

ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงาแบบกะ คือ สำมะงาขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 20:1 (มิลลิลิตรต่อนาที) และที่เวลาการสกัด 240 นาที มีค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 14.48 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง

2. การสกัดในเครื่องสกัดแบบแพคเบดเมื่อทำการแปรผันปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการป้อนตัวทำละลาย, ขนาดอนุภาคสำมะงา สามารถสรุปได้ว่า

การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนตัวทำละลาย มีผลทำให้อัตราการสกัดเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัวทำละลาย จะเกิดแรงเฉือนเอาชั้นฟิล์มที่อยู่รอบอนุภาคออกให้บางลง ทำให้การถ่ายโอนสารประกอบฟีนอลิกบริเวณอนุภาคสำมะงากับชั้นของตัวทำละลายเกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้อัตราการป้อนตัวทำละลายที่สูงขึ้น ยังมีผลทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลเกิดได้เร็วขึ้น หรือใช้เวลาน้อยลง โดยอัตราการป้อนตัวทำละลายที่เหมาะสม คือ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

การลดขนาดอนุภาคสำมะงา มีผลทำให้อัตราการสกัดเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดขนาดอนุภาคจะทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคกับตัวทำละลายมาก และทั้งยังเป็นการลดระยะทางที่ตัวทำละลายจะแพร่ในอนุภาคของแข็งจึงช่วยให้เกิดการแพร่ได้เร็วขึ้นส่งผลให้ได้ค่าผลได้เพิ่มขึ้น แต่การใช้อนุภาคที่เล็กเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาของฝุ่นและความร้อนที่เกิดขึ้นในการบด อีกทั้งอาจไปอุดตันแผ่นกรองในเครื่องสกัด ทำให้การไหลของตัวทำละลายช้าลง ขนาดอนุภาคสำมะงาที่เหมาะสมในการสกัดคือ 180-300 ไมโครเมตร

ภาวะที่เหมาะสมของการสกัดในเครื่องสกัดแบบแพคเบด คือ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที สำมะงาขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิในการสกัด 75 องศาเซลเซียส และที่เวลาการสกัด 180 นาที มีค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 14.83 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง

3. เมื่อเปรียบเทียบค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกที่เท่ากันคือ (10.45 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง) จากการสกัดแบบกะและการสกัดในเครื่องสกัดแบบแพคแพคเบด ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า แม้ว่าความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้จากแบบแพคเบดมีค่าต่ำกว่าแบบกะเล็กน้อย แต่ใช้เวลาในการสกัดที่สั้นกว่าแบบกะ 8.17 นาที จึงถือว่าการสกัดแบบแพคเบดมีประสิทธิภาพการสกัดดีกว่าการสกัดแบบกะ

4. สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนตัวทำละลายสูงขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยมีค่าสูงสุดอยู่ มีค่าเท่ากับ 23.6×10^{-13} ตารางเมตรต่อวินาที ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยจากการทดลองแบบกะมีค่าเท่ากับ 1.64×10^{-13} ตารางเมตรต่อวินาที จากข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร)

5.2 ข้อเสนอแนวทางการปรับปรุง

1. ในการสกัดแบบกะควรที่จะทำในทุกๆขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการสกัดในเครื่องสกัดแบบแพคเบดเพื่อเปรียบเทียบค่าผลได้ของการสกัดทั้งสองแบบ

2. ในการสกัดแบบแพคเบด เนื่องจากในการทดลองความสูงระหว่างเหนือเบดกับทางออกสารสกัดมีค่ามาก ทำให้สารสกัดที่ออกมาในช่วงเวลาแรกที่ได้คือ ตัวทำละลายที่อยู่เหนือเบด ซึ่งจะทำให้ได้ความเข้มข้นสารสกัดที่น้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้น ในการปรับปรุงควรที่จะออกแบบให้ความสูงเหนือเบดกับทางออกของสารสกัดห่างกันเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ได้สารสกัดบริเวณเบดออกมาได้มากในช่วงแรก ทำให้ได้ความเข้มข้นสูงขึ้น

รายการอ้างอิง

Achari, B., Chaudhuri, C., Saha, C. R., Dutta, P. K., and Pakrashi, S. C. A clerodane diterpene and other constituents of *Clerodendron inerme*. Phytochemistry 29 (1990): 3671–3673.

Aguilera, J. M., Stanley, D. W. Microstructure and mass transfer solid-liquid extraction. Microstructural principles of food processing and engineering 2 (1999): 90-95.

Ahmed, S.M., Chander, H., and Pereira, J. Insecticidal potential and biological activity of Indian indigenous plants against *Musca domestica*. International Pesticide Control 23 (1981): 170–175.

Amirtharaj, R. V., and Saravanan, R. V. In vitro antioxidant activity of chloroform extract of aerial parts of *Clerodendrum inerme (L) gareth*. Journal of Pharmacy Research 3 (2010): 2709-271.

Anitha, R., and Kannan, P. Antifungal activity of *Clerodendrum inerme* (L). and *Clerodendrum phlomidis* (L). Turkey Journal of Biology 30 (2006): 139-142.

Avani, K., Harish, P., and Neetha, S. Ex situ conservation method for Clerodendrum inerme: A medicinal plant of India. African Journal of Biotechnology 5 (2005): 415-418.

Bravo L. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. Nutrition Reserch 56 (1998): 317–33.

Cacace, J. E., and Mazza, G. Mass transfer process during extraction of phenolic compounds from milled berries. Journal of Food Engineering 59 (2003): 379–389.

Calis, I., Hosny, M., Yuruker, A., Wright, A. D., and Sticher, O. Inerminosides A and B, two novel complex iridoid glycosides from *Clerodendrum inerme*. Journal of Natural Products 57 (1994): 494–500.

Chahal, J. K., Sarin, R., and Malwal, M. Efficacy of *Clerodendrum inerme* L. (garden quinine) against some human pathogenic strains. Journal of Pharma and Bio Sciences 1 (2010): 219-223.

Dai, J., and Mumper, R. J. Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. Molecules 15 (2010): 7313-7352.

Dixon, R. A., and Pavia, N. L. Stress-induced phenylpropanoid metabolism. Plant Cell 7 (1995): 1085-1097.

Durling, N. E., Catchpole, O. J., Grey, J. B., Webby, R. F., Mitchell, K. A., Foo, L. Y., and Perry, N. B. Extraction of phenolics and essential oil from dried sage (*Salvia officinalis*) using ethanol–water mixtures. Food Chemistry 101 (2007): 1417–1424.

El-Shamy, A. M., El-Shabrawy, A. R., and El-Fiki, N. Phytochemical study of *Clerodendron inerme L*. growing in Egypt. Zagazig Journal of Pharmaceutical Science 5 (1996): 49-53.

Fauvel, M. T., Gleye, J., and Andary, C. Verbascoside: a constituent of *Clerodendrum inerme*. Journal of Natural Products 57 (1989): 494–500.

Geankoplis, C. J. Transport processes and separation process principles 4th edition. New Jersey: Pearson Education (2003): 840-871.

Gebbinck, E. A. K., Jansen, B. J. M., and Groot, A. D. Insect antifeedant activity of clerodane diterpenes and related model compounds. Phytochemistry 61 (2002): 737-770.

Giao, M. S., Pereira, C. I., Fonseca, C. A., Pintado, M. E., and Malcata, F. X. Effect of particle size upon the extent of extraction of antioxidant power from the plants *Agrimonia eupatoria, Salvia sp*. and *Satureja Montana*. Food Chemistry 117 (2009): 412–416.

Guessan, K. N., Zirihi, G. N., and Mea, A. Hypotensive effect of aqueous extract of *Clerodendrum inerme* leaves on the arterial pressure of rabbits. International Journal of Pharmaceutical and biomedical research 1 (2010): 73-77.

Gurudeeban, S., Satyarani, K., Ramanathan, T., Umamaheswari, G., and Shanmugapriya, R. Antioxidant and radical scavenging effect of *Clerodendrum ineme* (L.). World Journal of Fish and Marine Sciences 2 (2010): 66-69.

Harborne, J. B., Baxter, H., and Moss, G. P. Phytochemical dictionary: Handbook of bioactive compounds from plants. 2nd edition London: Taylor & Francis (1999).

Heim, K. E., Tagliaferro, A. R., and Bobilya, D. J. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. Journal of Nutritional Biochemistry 13 (2002): 572–584.

Ho, C. H. L., Cacace, J. E. and Mazza, G. Mass transfer during pressurized low polarity water extraction of lignans from flaxseed meal. Journal of Food Engineering 89 (2008): 64-71.

Jokic, S., Velic, D., Bilic, M., Kojic, A. B., Planninic, M., and Tomas. S. Modeling of the process of solid-liquid extraction of total polyphenol from soybean. Czech Journal of Food Science 3 (2010): 206-212.

Khan A. V. Ethnobotanical studies on plants with medicinal and anti-bacterial properties. PhD Thesis, Aligarh Muslim University, Aligarh (2002): 1-293.

Lapornik, B., Prošek, M., and Golc Wondra, A. Comparison of extracts prepared from plant by-products using different solvent and extraction time. Journal of Food Engineering 71 (2005): 214–222.

Martins, S., Mussatto, S. I., Avila, M. J., Saenz, J. M., Aguilar, C. N., and Teixeira, J. A. Bioactive phenolic compounds: Production and extraction by solid-state fermentation: A review. Biotechnology Advance 29 (2011): 365-373.

Masuda, T., Yonemori, S., Oyama, Y., Takeda, Y., Tanaka, T., Andoh, T., Shinohara, A., and

Nakata, M. Evaluation of the antioxidant activity of environmental plants: Activity of the leaf extracts from Seashore plants. Journal of Agriculture Food Chemistry 47 (1999): 1749-1754.

Michalowicz, J., and Duda, W. Phenol-source and toxicity. Polish Journal of environmental Science 16 (2007): 347-362.

Naczk, M and Shahidi, F. Phenolics in food and nutraceuticals: Sources, applications and health effects. Journal of Chromatography 1054 (2004): 95-111.

Nieh, C. D., and Snyder, H. E. Solvent extraction of oil from soybean flour extraction rate, a countercurrent extraction system, and oil quality. Journal of the American Oil Chemists' Society 68 (1991): 246-249.

Pereira, J., and Gurudutt, K.N. Growth inhibition of Musca domestica L. and Culex quinquefasciatus (Say) by (levo)-3-epicaryoptin isolated from leaves of *Clerodendron inerme (Gaertn) (Verbenaceae)*. Journal of Chemistry Ecology 16 (1990): 2297–2306.

Pandey, R., Verma, R. K., Singh, S. C., and Gupta, M. M. 4a-Methyl-24b-ethyl-5a-cholesta-14, 25-dien-3b-ol and 24b-ethylcholesta-5, 9(11), 22E-trien-3b-ol, sterols from *Clerodendrum inerme.* Phytochemistry 63 (2003): 415–420.

Pandy, P. Pentadecanoic acid-β-D- glucoside from Clerodermdrum inerme. India Journal of Chemistry 45 (2006): 2161-2163.

Pinelo, M., Sineiro, J., and Nunez, M. J. Mass transfer during continuous solid-liquid extraction of antioxidant from grape byproducts. Journal of food engineering 77 (2005): 57-63.

Prasad, K. N., Yang, E., Yi, C., Zhao, M., and Jiang, Y. Effects of high pressure extraction on the extraction yield, total phenolic content and antioxidant activity of longan fruit pericarp. Food Science and Emerging Technologies 10 (2009): 155–159.

Ravikumar, S., Selvan, G.P. and Anitha, N. Antimicrobial activity of medicinal plants along Kanyakumari coast, Tamil Nadu, India. African Journal of Basic & Applied Sciences 2 (2010): 153-157.

Rice-Evans, C. and Miller, N. J. Antioxidants-the case for fruit and vegetables in the diet. Journal of Agriculture Food Chemistry 97 (1995): 35-40.

Rostango, M. A., Plama, M. and Barroso, C. G. Pressurized liquid extraction of isoflavones from soybeans. Analytica Chimica Acta 81 (2004): 200-208.

Schwartzberg, H. G. Mathematical analysis of solubilization kinetics and diffusion in foods. Journal of Food Science 40 (1972): 211–213.

Seikova, I., and Simeonov, E. Determibation of solid deformation effect on the effective diffusivity during extraction from plants. Separation Science and Technology 38 (2003): 3713-3729.

Shivastava, N., and Patel, T. *Clerodendrum* and healthcare: overview. Medical and Aromatic Plant Science and Biotechnology 1 (2007): 142-150.

Spencer, G. F., and Flippen-Anderson, J. L. Isolation and X-ray structure determination of a neolignan from *Clerodendron inerme* seeds. Phytochemistry 20 (1981): 2757–2759.

Spigno, G., Tramelli, L.,and De-Faveri, D. M. Effects of extraction time, temperature and solvent on concentration and antioxidant activity of grape marc phenolics. Journal of Food Engineering 81 (2007): 200–208.

Sun, J., Chu, Y. F., Wu, X., and Liu, R. H. Antioxidant and antiproliferative activities of fruits. J. Agric. Food Chem 50 (2002): 7449-7454.

Uddin, S.J., Grice, I.D., and Tirologo, E. Cytotoxic effects of bangladeshi medicinal plant extracts. Bioorganic & Medicinal Journal 20 (2009): 1-7.

Upmanyu, G., Tanu, M., Gupta, M., Gupta A. K., Sushma, A., and Dhakar, R. C. Acute toxicity and diuretic studies of leaves of *Clerodendrum inerme*. Journal of Pharmacy Reserch 4 (2011): 1431-1432.

Vendantham, T.N.C., Subramanian, S.S., and Harborne, J.B. 40-Methylscutellarein and pectolinarigenin from Clerodendron inerme. Phytochemistry. 16 (1977): 294.

Yang, Z. Y., Liu, K., Yang, C., Zhong, G., and Guangxi, J. Optimum extraction Process of polyphenols from the bark of Phyllanthus emblica L. based on the response surface methodology. Journal of separation science 6 (2006): 41–42.

Yankanchi, S. R., and Gadache, A. H. Grain protectant efficacy of certain plant extracts against rice weevil, Sitophilus oryzae L. (Coleoptera: Curculionidae). Journal of Biopesticides 3 (2010): 511–513.

Yankanchi., S.R., and Koli, S.A. Anti-inflammatory and Analgesic activity of mature leaves methanol extract of *Clerodendrum inerme* L. (Gaertn). Journal of Pharmacy Science & Research 2 (2010): 782-785.

พร้อมจิตร ศรลัมพ์ และคณะ สารานุกรมสมุนไพร เล่ม 1 สมุนไพรสวนสิรีรุกขชาติ. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเภสัชพฤกษศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2543.

ภาคผนวก

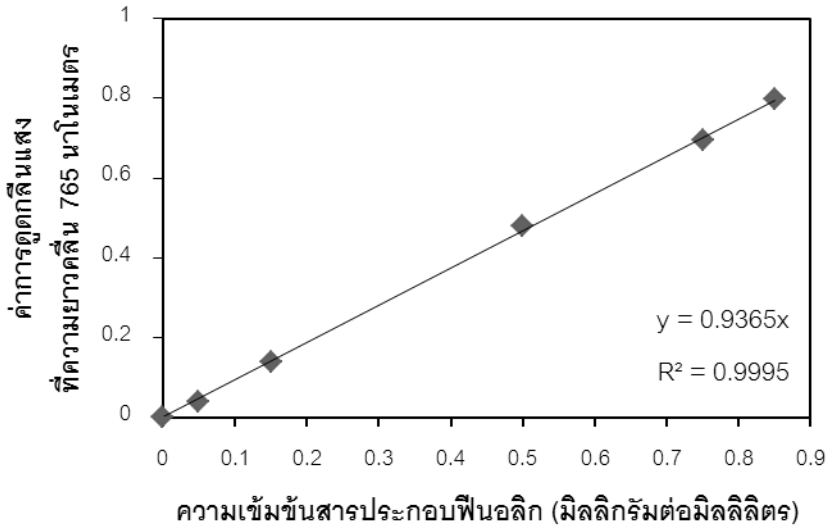
ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์หาความเข้นข้นของสารประกอบฟีนอลิก

การวัดค่าความเข้นข้นของสารประกอบฟีนอลิกจะเป็นการวัดค่าความเข้นข้นของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds) วิเคราะห์ตามวิธี Folin Ciocalteau micro method (Waterhouse, 2002) โดยนำตัวอย่างสารสกัดที่กรองได้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 1.58 มิลลิลิตร และ Folin-ciocalteu phenol reagent ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ผสมเข้าด้วยกันและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 8 นาที หลังจากนั้นเติมโซเดียมคลอไรด์ปริมาตร 300 ไมโครลิตร ลงไปผสมเข้าด้วยกันและทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร โดยค่าการดูดกลืนแสงที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิกเพื่อหาค่าความเข้มข้นฟีนอลิกทั้งหมดที่ได้ในหน่วยมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

2. การสร้างกราฟมาตรฐานสารประกอบฟีนอลิก

การสร้างกราฟมาตรฐานสารประกอบฟีนอลิก จะใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบ ทำได้โดยเตรียมกรดแกลลิก 5 กรัมผสมกับเอทานอล 95 เปอร์เซนต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) 10 มิลลิลิตรและทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตรด้วยขวดปรับปริมาตร หลังจากนั้นนำสารละลายดังกล่าวมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในปริมาตร 1, 2, 5, 10 และ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่มีความเข้มข้น 50, 100, 250, 500 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (สารที่เตรียมจะเก็บไว้ได้นาน 2 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) สารละลายมาตรฐานแกลลิกที่เตรียมได้ จะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงตามวิธีข้างต้น ที่ความเข้มข้นกรดแกลลิกต่างๆ เมื่อทราบค่าความเข้มข้นของกรดแกลลิกและค่าการดูดกลืนแสงนั้นมาพลอตกราฟ จะได้กราฟมาตรฐานฟีนอลิกแสดงดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสารประกอบฟีนอลิก

3. การหาค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก

ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก สามารถหาได้จากค่าความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิก โดยนำมาแทนสูตรดังต่อไปนี้

$$C = c\,(V_2+V_3)\,(V_1/V_2) / M$$

โดยที่ C คือ ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก
(มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
c คือ ความเข้มข้นสารสกัดฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลแกลลิกต่อมิลลิลิตร)
V_1 คือ ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)
V_2 คือ ปริมาตรที่ดึงมาเจือจาง (มิลลิลิตร)
V_3 คือ ปริมาตรที่เติมเพื่อเจือจาง (มิลลิลิตร)
M คือ น้ำหนักสำมะงาแห้งที่ใช้ในการสกัด (กรัม)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลทางการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)

ตัวทำละลาย (ปริมาตร/ปริมาตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
เอทานอล ร้อยละ 30	5	5.6	0.179	5.000
	10	5.8	0.183	5.317
	15	6.4	0.183	5.867
	30	6.0	0.199	5.959
	60	5.8	0.211	6.120
	120	5.8	0.217	6.286
	240	6.0	0.215	6.446
เอทานอล ร้อยละ 50	5	6.0	0.214	6.417
	10	6.0	0.226	6.790
	15	6.2	0.223	6.927
	30	6.2	0.234	7.253
	60	6.0	0.244	7.334
	120	6.2	0.233	7.223
	240	6.0	0.244	7.305
เอทานอล ร้อยละ 70	5	5.2	0.202	5.264
	10	5.4	0.212	5.724
	15	5.8	0.222	6.452
	30	6.2	0.223	6.927
	60	6.0	0.234	7.019
	120	6.0	0.237	7.105
	240	6.2	0.230	7.134

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) (ต่อ)

ตัวทำละลาย (ปริมาตร/ปริมาตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
เอทานอลร้อยละ 95	5	5.4	0.100	2.707
	10	5.0	0.113	2.817
	15	4.8	0.128	3.071
	30	5.0	0.126	3.151
	60	5.6	0.117	3.262
	120	5.6	0.120	3.369
	240	5.2	0.123	3.203

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)

ตัวทำละลาย (ปริมาตร/ปริมาตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
เอทานอล ร้อยละ 30	5	5.4	0.095	5.155
	10	5.8	0.098	5.658
	15	5.6	0.107	5.992
	30	5.4	0.112	6.061
	60	5.2	0.254	6.600
	120	5.2	0.267	6.955
	240	5.0	0.278	6.950
เอทานอล ร้อยละ 50	5	5.8	0.132	7.666
	10	6.0	0.137	8.245
	15	6.2	0.138	8.585
	30	6.2	0.149	9.235
	60	6.0	0.323	9.693
	120	5.8	0.334	9.674
	240	6.0	0.321	9.630
เอทานอล ร้อยละ 70	5	5.2	0.105	5.455
	10	5.0	0.120	5.979
	15	6.2	0.116	6.309
	30	5.6	0.143	6.755
	60	5.2	0.300	7.800
	120	5.4	0.296	7.987
	240	5.2	0.304	7.909

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนตัวทำละลายต่อของแข็ง 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) (ต่อ)

ตัวทำละลาย (ปริมาตร/ปริมาตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
เอทานอล ร้อยละ 95	5	5.0	0.056	2.780
	10	5.0	0.058	2.885
	15	5.0	0.060	2.990
	30	4.8	0.066	3.172
	60	5.6	0.174	4.005
	120	5.0	0.173	4.154
	240	5.6	0.167	4.196

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนการสกัด 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)

ตัวทำละลาย (ปริมาตร/ปริมาตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักสำมะงาแห้ง)
เอทานอล ร้อยละ 30	5	5.6	0.111	6.219
	10	5.8	0.119	6.875
	15	5.6	0.126	7.056
	30	5.2	0.137	7.107
	60	6.0	0.238	7.144
	120	6.0	0.240	7.208
	240	5.8	0.250	7.246

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนการสกัด 10:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม) (ต่อ)

ตัวทำละลาย (ปริมาตร/ปริมาตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักสำมะงาแห้ง)
เอทานอล ร้อยละ 50	5	5.6	0.232	8.132
	10	5.8	0.149	8.372
	15	5.6	0.153	8.551
	30	5.2	0.145	9.572
	60	6.0	0.344	10.315
	120	6.0	0.365	10.956
	240	5.6	0.390	10.913
เอทานอล ร้อยละ 70	5	6.0	0.117	6.633
	10	6.0	0.117	7.015
	15	6.2	0.118	7.282
	30	5.8	0.129	7.494
	60	5.2	0.306	7.961
	120	5.2	0.317	8.248
	240	5.2	0.320	8.320
เอทานอล ร้อยละ 95	5	5.0	0.057	2.829
	10	5.0	0.059	2.961
	15	4.8	0.065	3.097
	30	5.4	0.064	3.437
	60	5.0	0.170	4.243
	120	5.0	0.179	4.464
	240	4.8	0.190	4.561

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองแบบกะที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส, ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนการสกัด 15:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)

ตัวทำละลาย (ปริมาตร/ปริมาตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมน้ำหนักสำมะงาแห้ง)
เอทานอลร้อยละ 50	5	15.4	0.155	8.993
	10	15.2	0.169	9.640
	15	15.5	0.184	10.721
	30	15	0.197	11.129
	60	15.2	0.210	11.987
	120	14	0.228	11.995
	240	14.5	0.220	12.007

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองแบบกะ ที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส, ขนาดอนุภาคสำมะงาน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร อัตราส่วนการสกัด 20:1 (มิลลิลิตรต่อกรัม)

ตัวทำละลาย (ปริมาตร/ปริมาตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมน้ำหนักสำมะงาแห้ง)
เอทานอลร้อยละ 50	5	15	0.122	9.144
	10	16	0.128	10.212
	15	15.5	0.144	11.151
	30	16	0.157	12.580
	60	15.5	0.178	13.815
	120	15.5	0.185	14.333
	240	15.5	0.187	14.481

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอล ร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสะสม (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
180-300	5	19	0.182	0.345	0.345
	10	20	0.213	0.425	0.771
	15	21	0.211	0.443	1.214
	30	60	0.673	4.037	5.250
	45	61	0.687	4.192	9.442
	60	60	0.264	1.584	11.026
	90	119	0.087	1.033	12.059
	120	120	0.023	0.271	12.330
	180	239	0.003	0.061	12.391
	คอลัมน์	61	0.004	0.025	
300-600	5	18	0.123	0.222	0.222
	10	16	0.136	0.217	0.439
	15	18	0.374	0.674	1.113
	30	53	0.865	4.584	5.696
	45	53	0.655	3.473	9.169
	60	54	0.258	1.392	10.562
	90	115	0.056	0.644	11.205
	120	116	0.014	0.167	11.372
	180	238	0.003	0.061	11.433
	คอลัมน์	59	0.003	0.015	

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอล ร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 มิลลิลิตรต่อนาที (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสะสม (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
600-850	5	16	0.402	0.643	0.643
	10	17	0.341	0.580	1.223
	15	17	0.418	0.711	1.934
	30	53	0.562	2.978	4.911
	45	52	0.325	1.690	6.602
	60	54	0.197	1.062	7.664
	90	110	0.065	0.712	8.376
	120	111	0.024	0.262	8.638
	180	222	0.004	0.091	8.729
	คอลัมน์	69	0.003	0.018	
มากกว่า 850	5	18	0.158	0.285	0.285
	10	19	0.184	0.349	0.634
	15	19	0.357	0.679	1.313
	30	58	0.522	3.026	4.339
	45	57	0.191	1.086	5.425
	60	60	0.142	0.850	6.276
	90	120	0.073	0.881	7.157
	120	118	0.040	0.467	7.624
	180	239	0.005	0.110	7.734
	คอลัมน์	62	0.003	0.016	

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอล ร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 12 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสะสม (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
180-300	5	62	0.386	2.394	2.394
	10	61	0.834	5.088	7.482
	15	62	0.263	1.633	9.115
	30	180	0.084	1.507	10.622
	45	179	0.064	1.149	11.771
	60	180	0.030	0.536	12.307
	90	360	0.021	0.740	13.047
	120	360	0.007	0.259	13.306
	180	720	0.003	0.185	13.491
	คอลัมน์	59	0.004	0.021	
300-600	5	62	0.486	3.015	3.015
	10	62	0.677	4.197	7.212
	15	60	0.293	1.756	8.968
	30	180	0.088	1.581	10.549
	45	178	0.030	0.539	11.088
	60	178	0.015	0.274	11.363
	90	358	0.011	0.404	11.767
	120	720	0.005	0.333	12.100
	180	720	0.003	0.185	12.285
	คอลัมน์	69	0.002	0.011	

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอล ร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 12 มิลลิลิตรต่อนาที (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสะสม (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
600-850	5	60	0.388	2.329	2.329
	10	60	0.261	1.565	3.895
	15	59	0.219	1.291	5.186
	30	180	0.105	1.895	7.081
	45	181	0.038	0.688	7.768
	60	182	0.027	0.495	8.264
	90	365	0.014	0.525	8.789
	120	362	0.008	0.297	9.086
	180	722	0.003	0.185	9.272
	คอลัมน์	69	0.004	0.025	
มากกว่า 850	5	59	0.081	0.951	0.951
	10	59	0.157	1.854	2.806
	15	60	0.104	1.245	4.051
	30	174	0.059	2.037	6.088
	45	175	0.034	1.204	7.292
	60	176	0.005	0.181	7.473
	90	342	0.003	0.176	7.649
	120	684	0.002	0.281	7.930
	180	685	0.001	0.141	8.070
	คอลัมน์	77	0.081	0.016	

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 18 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสะสม (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
180-300	5	91	0.643	6.010	6.010
	10	90	0.389	3.591	9.601
	15	91	0.114	1.061	10.662
	30	272	0.060	1.676	12.338
	45	272	0.030	0.824	13.163
	60	280	0.017	0.475	13.637
	90	540	0.006	0.305	13.942
	120	520	0.004	0.187	14.129
	180	1080	0.002	0.166	14.295
	คอลัมน์	59	0.002	0.009	
300-600	5	92	0.570	5.381	5.381
	10	91	0.384	3.589	8.971
	15	90	0.151	1.396	10.366
	30	273	0.052	1.458	11.825
	45	272	0.015	0.419	12.244
	60	272	0.007	0.182	12.425
	90	545	0.004	0.196	12.621
	120	538	0.002	0.111	12.732
	180	1069	0.001	0.110	12.841
	คอลัมน์	69	0.001	0.007	

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 18 มิลลิลิตรต่อนาที (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสะสม (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
600-850	5	92	0.353	3.336	3.336
	10	91	0.217	2.024	5.359
	15	92	0.124	1.167	6.526
	30	270	0.051	1.400	7.927
	45	275	0.030	0.849	8.775
	60	270	0.016	0.430	9.205
	90	540	0.009	0.499	9.705
	120	538	0.005	0.249	9.953
	180	1082	0.002	0.222	10.175
	คอลัมน์	69	0.002	0.011	
>850	5	90	0.155	2.866	2.866
	10	90	0.107	1.978	4.844
	15	86	0.066	1.166	6.010
	30	235	0.054	1.291	7.301
	45	236	0.037	0.885	8.186
	60	235	0.013	0.314	8.500
	90	470	0.004	0.193	8.693
	120	468	0.004	0.192	8.885
	180	1075	0.002	0.166	9.051
	คอลัมน์	73	0.002	0.011	

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอล ร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสะสม (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
180-300	5	126	0.736	9.273	9.273
	10	125	0.257	3.216	12.489
	15	122	0.050	0.608	13.097
	30	375	0.023	0.847	13.944
	45	375	0.010	0.366	14.310
	60	375	0.003	0.096	14.406
	90	750	0.002	0.116	14.522
	120	750	0.001	0.077	14.599
	180	1500	0.002	0.231	14.830
	คอลัมน์	59	0.002	0.009	
300-600	5	126	0.742	9.276	9.276
	10	126	0.166	2.090	11.366
	15	127	0.035	0.450	11.816
	30	375	0.018	0.693	12.510
	45	375	0.012	0.462	12.972
	60	375	0.007	0.250	13.222
	90	545	0.004	0.196	13.418
	120	720	0.002	0.148	13.566
	180	720	0.001	0.074	13.640
	คอลัมน์	69	0.001	0.007	

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลองในเครื่องสกัดแบบแพคเบด ที่ภาวะการทดลอง สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (ปริมาตร/ปริมาตร) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	เวลาในการสกัด (นาที)	ปริมาตรที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารสกัด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิก (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)	ค่าผลได้สารประกอบฟีนอลิกสะสม (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิดต่อกรัมสำมะงาแห้ง)
600-850	5	125	0.358	4.474	4.474
	10	125	0.213	2.658	7.132
	15	124	0.150	1.859	8.992
	30	369	0.061	2.236	11.228
	45	371	0.016	0.591	11.818
	60	371	0.006	0.210	12.028
	90	540	0.008	0.444	12.472
	120	540	0.003	0.166	12.638
	180	1082	0.002	0.167	12.805
	คอลัมน์	59	0.002	0.009	
>850	5	125	0.298	3.723	3.723
	10	125	0.211	2.632	6.355
	15	124	0.095	1.178	7.533
	30	374	0.064	2.401	9.934
	45	375	0.030	1.117	11.051
	60	376	0.011	0.425	11.476
	90	751	0.002	0.154	11.630
	120	749	0.001	0.077	11.707
	180	1500	0.001	0.154	11.861
	คอลัมน์	61	0.001	0.006	

ภาคผนวก ค

การหาค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ และ ค่า resident time

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number) สามารถหาได้จากสมการ

$$Re_p = \frac{D_p v\, \rho}{(1-\varepsilon)\mu} \qquad \text{(ค-1)}$$

โดยที่ Re_p คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

D_p คือ equivalent spherical diameter of the particle

v คือ superficial velocity, v = Q/A

ρ คือ ความหนาแน่นของไหล (สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (V/V) ที่อุณหภูมิ 75 ˚C)

μ คือ ความหนืดของไหล (สารละลายเอทานอลร้อยละ 50 (V/V) ที่อุณหภูมิ 75 ˚C)

ε คือ สัดส่วนช่องว่าง (void fraction)

ค่า resident time หาได้จากสมการ

$$residence\ time = \frac{V}{Q} \qquad \text{(ค-2)}$$

โดยที่ Residence time คือ เวลาที่ตัวทำละลายไหลผ่านคอลัมน์ (นาที)

V คือ ปริมาตรที่อยู่ภายในคอลัมน์ (มิลลิลิตร)

Q คือ อัตราการป้อนตัวทำละลาย (มิลลิลิตรต่อนาที)

ตารางที่ ค-1 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 4 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ความสูงเบด (เซนติเมตร)	ความเร็วในการไหล (เซนติเมตรต่อนาที)	สัดส่วนของว่างในเบด	ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์
มากกว่า 850	0.70	0.88	0.69	1.27
600-850	0.40	0.88	0.60	0.73
300-600	0.30	0.88	0.55	0.43
180-300	0.15	0.88	0.5	0.20

ตารางที่ ค-2 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 12 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ความสูงเบด (เซนติเมตร)	ความเร็วในการไหล (เซนติเมตรต่อนาที)	สัดส่วนของว่างในเบด	ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์
มากกว่า 850	0.70	2.65	0.69	3.81
600-850	0.40	2.65	0.60	2.20
300-600	0.30	2.65	0.55	1.29
180-300	0.15	2.65	0.50	0.61

ตารางที่ ค-3 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 18 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ความสูงเบด (เซนติเมตร)	ความเร็วในการไหล (เซนติเมตรต่อนาที)	สัดส่วนของว่างในเบด	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
มากกว่า 850	0.70	3.98	0.69	5.71
600-850	0.40	3.98	0.60	3.30
300-600	0.30	3.98	0.55	1.94
180-300	0.15	3.98	0.50	0.91

ตารางที่ ค-4 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ความสูงเบด (เซนติเมตร)	ความเร็วในการไหล (เซนติเมตรต่อนาที)	สัดส่วนของว่าง ในเบด	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
มากกว่า 850	0.70	5.52	0.69	7.93
600-850	0.40	5.52	0.62	4.83
300-600	0.30	5.52	0.55	2.70
180-300	0.15	5.52	0.52	1.32

ตารางที่ ค-5 ค่า residence time ที่อัตราการป้อน 4 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ปริมาตรในเบด	residence time ในเบด (นาที)	ปริมาตรเหนือเบด (มิลลิลิตร)	residence time เหนือเบด (นาที)	residence time รวม (นาที)
มากกว่า 850	24	6.0	81.01	20.25	26.25
600-850	22	5.5	75.58	18.89	24.39
300-600	22	5.5	70.15	17.54	23.04
180-300	20	5.0	69.70	17.42	22.42

ตารางที่ ค-6 ค่า residence time ที่อัตราการป้อน 12 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ปริมาตรในเบด	residence time ในเบด (นาที)	ปริมาตรเหนือเบด (มิลลิลิตร)	residence time เหนือเบด (นาที)	residence time รวม (นาที)
มากกว่า 850	24	2.00	81.01	6.75	8.75
600-850	22	1.83	75.58	6.30	8.13
300-600	22	1.83	70.15	5.85	7.68
180-300	20	1.67	69.70	5.81	7.47

ตารางที่ ค-7 ค่า residence time ที่อัตราการป้อน 18 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ปริมาตรในเบด	residence time ในเบด (นาที)	ปริมาตรเหนือเบด (มิลลิลิตร)	residence time เหนือเบด (นาที)	residence time รวม (นาที)
มากกว่า 850	24	1.33	81.01	4.50	5.83
600-850	22	1.22	75.58	4.20	5.42
300-600	22	1.22	70.15	3.90	5.12
180-300	20	1.11	69.70	3.87	4.98

ตารางที่ ค-8 ค่า residence time ที่อัตราการป้อน 25 มิลลิลิตรต่อนาที

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ปริมาตรในเบด	residence time ในเบด (นาที)	ปริมาตรเหนือเบด (มิลลิลิตร)	residence time เหนือเบด (นาที)	residence time รวม (นาที)
มากกว่า 850	24	0.96	81.01	3.24	4.20
600-850	22	0.88	75.58	3.02	3.90
300-600	22	0.88	70.15	2.81	3.69
180-300	20	0.8	69.70	2.79	3.59

ภาคผนวก ง
การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusivity)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusivity)

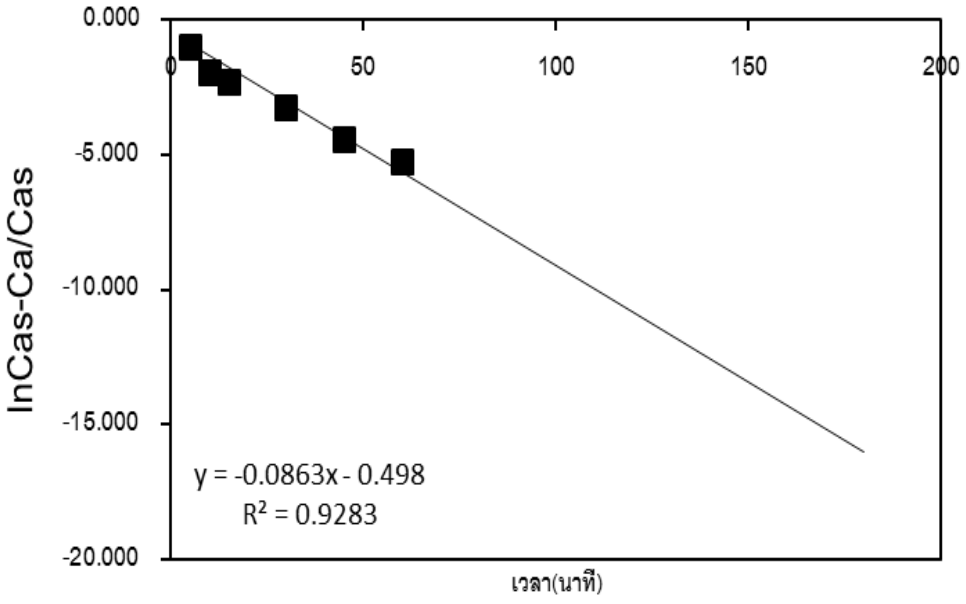
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล หรือ D_{eff} สำหรับการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากสำมะงา หาได้จากสมการ 3.7

$$lnY = ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{X^2} t \qquad (3.7)$$

จากความสัมพันธ์สมการข้างต้น จะทำการพลอตกราฟระหว่างค่า lnY กับเวลา ค่าความชันที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $\pi^2 D_{eff} / X^2$ โดยที่ ค่า X คือ รัศมีของอนุภาค (cm), ค่า $Y = (C_{AS}-C_A)/C_{AS}$

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร ค่าความชันมีค่าเท่ากับ -0.0863 , ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 21.0×10^{13} ตารางเมตรต่อวินาที



รูปที่ ง-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า lnY กับ เวลา ที่อัตราการป้อนตัวทำละลาย 25 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาค 180-300 ไมโครเมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปิยะพงศ์ กิตติสารธรรม เกิดเมื่อวันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2531 ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนทวีธาภิเศก จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ.2548 หลังจากนั้นได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปี พ.ศ. 2553 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2553

ประวัติผลงาน Piyapong Kittisaratham and Chutimon Satirapipathkul. Effect of solvent, temperature and solvent-to-solid ratio on total phenolic compounds of *Clerodendrum inerme*. The 4th AUN/SEED-Net Regional Conference on Biotechnology: EMERGING BIOTECHNOLOGY FOR GREEN ENGINEERING.