



การสกัดพรีไบโอติกส์จากเปลือกด้านในและเมล็ดขุ่นด้วยกระบวนการแบบต่อเนื่อง

**Continuous Extraction of Prebiotics from Inner Rinds of Jackfruit
and Jackfruit Seeds**

วีระพงศ์ พรสมิทธิกุล

Veeraphong Bhornsmithikun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Chemical Engineering

Prince of Songkla University

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสกัดฟีนอลโอดีคส์จากเปลือกด้านในและเมล็ดขนุนด้วยกระบวนการ
แบบต่อเนื่อง
ผู้เขียน นายวีระพงศ์ พรสมิทธิกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราม แยมแสงสังข์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราม แยมแสงสังข์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชญานุช แสงวิเชียร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสกัดฟริไบโอติกส์จากเปลือกด้านในและเมล็ดขนุนด้วยกระบวนการแบบต่อเนื่อง
ผู้เขียน	นายวิระพงศ์ พรสมทิติกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

ปัจจุบันฟริไบโอติกส์เป็นอาหารเพื่อสุขภาพที่นิยมในประเทศที่พัฒนาแล้วเป็นอย่างมาก เช่น อเมริกา ญี่ปุ่น และหลายประเทศของยุโรป การผลิตฟริไบโอติกส์เชิงการค้าในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นวิธีการสังเคราะห์ การสกัดฟริไบโอติกส์จากพืชโดยตรงมีน้อยโดยเฉพาะในประเทศไทย เนื่องจากขาดแคลนอุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัด กระบวนการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจัดสร้างเครื่องสกัดแบบต่อเนื่อง ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดส่วนต่าง ๆ ของขนุน โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ชุด ได้แก่ การสกัดเปลือกด้านในขนุนด้วยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก การสกัดเมล็ดขนุนด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก และการสกัดเมล็ดขนุนด้วยเครื่องแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง โดยปัจจัยที่ศึกษาในชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก ประกอบด้วยผลของอุณหภูมิ (30, 50, 60°C) ระยะเวลาสกัด (15, 30, 60 นาที) ชนิดตัวทำละลาย (น้ำกลั่นและเอทานอล 95%) และความชื้นในวัตถุดิบ (วัตถุดิบสดและวัตถุดิบแห้ง) พิจารณาผลได้ของการสกัดและปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (น้ำตาลนอนรีดิวิซ์เป็นกลุ่มที่ไม่ใช่อัลดีไฮด์และคีโตน ซึ่งคาดว่าเป็นฟริไบโอติกส์) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ การสกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 50°C ระยะเวลาสกัด 15 นาที สัดส่วนระหว่างน้ำกลั่นกับเปลือกด้านในขนุนอบแห้ง 15:1 (v/w) เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นเอทานอล 95% จะสกัดได้ดีกว่าน้ำกลั่นและการสกัดวัตถุดิบสดจะดีกว่าวัตถุดิบแห้ง แต่ผลจากงานวิจัยคู่ขนานทำให้ทราบว่า การสกัดเมล็ดขนุนด้วยเอทานอล 50% จะได้ปริมาณฟริไบโอติกส์ที่สูงกว่า ในการทดลองด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็กจึงทำการสกัดเมล็ดขนุนด้วยเอทานอล 50% โดยออกแบบสภาวะการทดลองด้วยเทคนิค RSM เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ (40-60°C) เวลาสกัด (15-45 นาที) และสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ (6:1-10:1 v/w) พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสกัด 15 นาที อุณหภูมิ 60°C และสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ 10:1 (v/w) ซึ่งจากแบบจำลอง RSM ที่ได้ สารสกัดจะมีค่าน้ำตาลนอนรีดิวิซ์สูงสุด

491.70 mg/g extract จากนั้นนำสภาวะดังกล่าวมาศึกษาการสกัดด้วยเครื่องแบบต่อเนื่องขนาด โรงงาน-จำลอง โดยเครื่องสกัดมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ถังสกัดขนาด 70 ลิตร จำนวน 3 หน่วย ที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวกลางจากถังให้ความร้อนขนาด 88 ลิตร สารละลายที่สกัดได้ถูกบีบจากถัง สกัดสู่ถังระเหยขนาด 200 ลิตร เพื่อระเหยในถังสุญญากาศขนาดใหญ่ 60 ลิตร จนเหลือปริมาณ น้อย และส่วนที่เหลือทำการระเหยต่อด้วยถังระเหยสุญญากาศขนาดเล็ก 7 ลิตร ตัวทำละลายจะ ถูกควบแน่นในถังควบแน่นขนาด 50 ลิตร พบว่าผลได้เฉลี่ยจากการสกัดเท่ากับ 20.25 g/100 g วัตถุดิบแห้ง และมีค่าปริมาณน้ำตาลอนรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 350-500 mg/g extract การเพิ่มจำนวนรอบในการสกัดจะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้น แต่การสกัดสเตจที่ 1 มีผลได้เพียง 1.26 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ซึ่งมีค่าไม่สูงนัก ดังนั้นการสกัดจำนวน 3 รอบจึงเพียงพอ

Thesis Title	Continuous Extraction of Prebiotics from Inner Rinds of Jackfruit and Jackfruit Seeds
Author	Mr.Veeraphong Bhornsmithikun
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2008

ABSTRACT

Currently, prebiotics are functional foods with health-promoting properties that are used in many developed countries, such as the United States, Japan, and those in the EU. Now, the synthesis method is the most commercial production method. There are only a few direct extractions of natural oligosaccharides from plants in Thailand due to the lack of extraction device. Continuous counter-current extraction is a high effective method. This research aims to design and construct the continuous extractor and study the optimum conditions of prebiotics extraction from parts of jackfruit. The experiments are divided into three-sets; the lab-scale batch extraction of prebiotics from inner rind of jackfruit, the lab-scale continuous extraction of prebiotics from jackfruit seed and the pilot scale continuous extraction of prebiotics from jackfruit seed. The parameters in lab-scale batch extraction are temperatures (30, 50, 60°C), extraction times (15, 30, 60 min), solvent types (DI water and 95% ethanol) and moisture content (fresh and dried jackfruit). The extraction efficiency was based on the extraction yield and the amount of non-reducing sugar (non-reducing sugars are neither aldehyde nor ketone, which are referred to be prebiotics). The optimum condition was the extraction with DI water at 50°C for 15 minutes at liquid to solid ratio (L/S ratio) of 15:1 w/v. Use of 95% ethanol was better than DI water and use of fresh jackfruit was better than dried jackfruit. From the parallel study, extraction of jackfruit seeds with 50% ethanol yielded higher amount of prebiotics. Then, jackfruit seeds were extracted with 50% ethanol in the lab-scale continuous extraction and RSM technique was applied for experimental design to study the effects of temperatures (40-60°C), extraction times (15-45 min), L/S ratios (6:1-10:1 v/w). The mathematical model of extracted non-reducing sugar was developed base on the experimental results.

The optimum condition was the extraction time of 15 min at 60°C and L/S ratio 10:1 (v/w), which gave the maximum extracted non-reducing sugar of 491.70 mg/g extract from RSM modeling. This optimum condition was applied for pilot scale continuous extraction. The pilot scale continuous extractor composes of three 70-L extraction tanks, which controlling the temperature by medium from 88-L heating tank. The extracted solution was pumped from extractor to storage tank. After that, extracted solution was pumped to large evaporation tank (60 L) and evaporated until there was a small amount, and then the residue was pumped to the small evaporator (7 L). The solvent was condensed using 50-L condenser. The average extraction yield of 20.25 g/100 g dried raw material was obtained and the non-reducing sugar was 350-500 mg/g extract. Increasing the number of runs can raise the extraction yield, however at the first stage the yield was only 1.26 g/ 100 g dried raw material. Therefore, the extraction runs of 3 should be enough.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(16)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
2. ตรวจสอบเอกสาร	4
2.1 ฟังก์ชันนัลฟูคส์	4
2.2 โปริไบโอติกส์	5
2.3 ฟรีไบโอติกส์	6
2.3.1 คุณสมบัติของฟรีไบโอติกส์	7
2.3.2 ประเภทของฟรีไบโอติกส์	7
2.3.3 บทบาทและความสำคัญของฟรีไบโอติกส์ในระบบทางเดินอาหาร	8
2.4 เส้นใยอาหารและโอลิโกแซคคาไรด์	10
2.4.1 ประโยชน์ของโอลิโกแซคคาไรด์	11
2.5 กระบวนการสกัด	12
2.5.1 กระบวนการชะละลาย	12
2.5.2 กระบวนการชะละลายของสารเชิงชีวภาพ	12
2.5.3 การเตรียมของแข็งสำหรับชะละลายของสารจากพืชและสัตว์	12
2.5.4 การชะละลายแบบการกวนของแข็ง	13
2.5.5 การชะละลายพหุสเตรจแบบไหลสวนทาง	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2.6	พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพล	14
2.6.1	ระยะเวลาในการสกัด	14
2.6.2	ขนาดอนุภาคของของแข็ง	14
2.6.3	ชนิดตัวทำละลาย	15
2.6.4	อุณหภูมิในการสกัด	15
2.6.5	วัตถุดิบสดและวัตถุดิบแห้ง	16
2.7	ขบวนการ	16
2.8	หลักการออกแบบชุดสกัดแบบต่อเนื่อง	18
2.8.1	การออกแบบขนาดถัง	19
2.8.2	การออกแบบถังระเหยสุญญากาศ	20
2.8.3	การออกแบบเครื่องควบแน่น	22
2.8.4	การออกแบบถังให้ความร้อน	27
2.9	วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง	28
2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
3	วิธีการวิจัย	37
3.1	วัสดุและอุปกรณ์	37
3.1.1	วัตถุดิบ	37
3.1.2	สารเคมี	38
3.1.3	อุปกรณ์	38
3.2	วิธีการทดลอง	42
3.2.1	การศึกษาสภาวะในการสกัดโดยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก	42
3.2.2	การศึกษาการสกัดเมล็ดขุ่นโดยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก	43
3.2.3	การสกัดเมล็ดขุ่นด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง	45
3.3	วิธีการวิเคราะห์	49
3.3.1	การหาความชื้น	49
3.3.2	การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด	49

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล	50
4. ผลและวิจารณ์	51
4.1 การสกัดโดยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก	51
4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการสกัดเปลือกด้านในขนุน	51
4.1.2 ผลของระยะเวลาในการสกัดที่มีผลต่อการสกัดเปลือกด้านในขนุน	52
4.1.3 ผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบที่มีผลต่อการสกัดเปลือกด้านในขนุน	54
4.1.4 ผลของชนิดตัวทำละลายและความเข้มข้นของวัตถุดิบที่มีผลต่อการสกัดเปลือกด้านในขนุน	55
4.2 การสกัดโดยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก	57
4.3 การสกัดโดยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง	64
5. สรุป	71
5.1 ข้อสรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	79
ก. วิธีการวิเคราะห์	80
ข. ข้อมูลดิบ	82
ค. การออกแบบชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง	89
ง. วิธีการดำเนินการสกัดด้วยชุดสกัดแบบต่อเนื่อง	97
ประวัติผู้เขียน	109

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ตัวอย่างของสารที่จัดเป็นพืงชั้นนัลฟูดส์	4
2-2 จุลินทรีย์ที่ชนิดต่าง ๆ ที่จัดเป็นโพรไบโอติกส์	6
2-3 องค์ประกอบของขนุนแก่ ชังขนุนและเมล็ดขนุนคิบ	18
3-1 แสดงผลการคัดเลือกชนิดพืช เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดสารพรีไบโอติกส์	37
3-2 แสดงหน้าที่และการทำงานของถังและอุปกรณ์การสกัดของชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง	40
3-3 สภาวะการทดลองโดยการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-behnken design เพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิ เวลาสกัด และสัดส่วนตัวทำละลายต่อ เมล็ดขนุน โดยมีเอทานอล 50% (v/v) เป็นตัวทำละลาย ในการสกัดพรีไบโอติกส์จากเมล็ดขนุนด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก	44
3-4 การออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิค RSM เพื่อศึกษาผลของตัวแปร (อุณหภูมิ เวลาสกัด และสัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขนุน โดยมีเอทานอล 50% (v/v) เป็นตัวทำละลาย) ในการสกัดพรีไบโอติกส์จากเมล็ดขนุนด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก	45
4-1 ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพรีไบโอติกส์จากเมล็ดขนุนด้วยเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องโดยชุดทดลองขนาดเล็ก	58
4-2 ข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมของตัวทำละลาย	66
4-3 ข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมวัตถุดิบ	69
ข-1 ผลของระยะเวลา สกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที ในการสกัดโดยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก	82
ข-2 ผลของระยะเวลาในการสกัด สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และอุณหภูมิในการสกัด 60°C โดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น	82
ข-3 ผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ อุณหภูมิ 60°C และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที โดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น	83

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
ข-4	ผลของความชื้นของเปลือกขนุน (เปลือกขนุนสดและเปลือกขนุนอบแห้ง) และตัวทำละลาย (น้ำกลั่นและเอทานอล 95% (v/v)) ใช้เปลือกขนุนสด 200 กรัม และตัวทำละลาย 400 mL สกัดที่อุณหภูมิ 60°C และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที	83
ข-5	ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดฟิโบริโอบีโอติคส์จากเมล็ดขนุนบดด้วยเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องโดยชุดทดลองขนาดเล็ก	84
ข-6	ข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองของการสกัดน้ำตาลนอร์อิควิซจากเมล็ดขนุน	85
ข-7	ANOVA ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของสภาวะดำเนินการที่มีต่อการสกัดน้ำตาลนอร์อิควิซจากเมล็ดขนุน	85
ข-8	ข้อมูลแสดงผลของการสกัดแบบต่อเนื่องจากเมล็ดขนุนบดตามภาพประกอบ 3 4	85
ข-9	ตารางระยะเวลาการดำเนินการในแต่ละขั้นตอนการสกัด	87
ค-1	แสดงปริมาตรและจำนวนถังของชุดสกัดแบบต่อเนื่อง	96
ง-1	ผู้ควบคุมในส่วนสกัด	97
ง-2	ผู้ควบคุมในส่วนระเหยตัวทำละลาย	104

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2-1 การชะละลายไหลสวนทางแบบเครื่องตกลม	13
2-2 แผนภูมิกระบวนการชะละลายพหุสเทจแบบไหลสวนทาง	14
2-3 ลักษณะของขนุน	17
2-4 การจัดวางท่อแบบ In-line triangular pitch	25
2-5 แผ่นขวางแนวการไหล ชนิด Segmental แบบ Up-and-down	27
2-6 จุดของการออกแบบบ็อกซ์-เบ้หันเคน	30
2-7 ชุดสกัด Glycyrrhizic acid จากชะเอม	31
2-8 เกรเดียนท์ของความเข้มข้นของ Glycyrrhizic acid ในชั้นวางเงื่อนไข	31
2-9 แผนผังทิศทางการไหลของกระบวนการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง	32
2-10 ชุดสกัดคาเฟอีนจากกาแฟ	33
2-11 อุปกรณ์ในการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องที่ใช้สกัดเพคตินจาก เมล็ดทานตะวัน	33
2-12 การสกัดโปรตีนจากข้าวโพดบดด้วยอนุกรมแบบกะ 7 ถึงต่อกัน	35
3-1 ภาพวาด 3 มิติของชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง	39
3-2 ส่วนสกัดของชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง	41
3-3 ส่วนระเหยของชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง	41
3-4 ขั้นตอนของกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง	48
4-1 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของสารสกัด โดยใช้สัดส่วนระหว่างน้ำกลั่นกับ เปลือกขนุนอบแห้ง 10:1 (v/w) และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที	52
4-2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาล โดยใช้สัดส่วนระหว่างน้ำกลั่นกับ เปลือกขนุนอบแห้ง 10:1 (v/w) และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที	52
4-3 ผลของระยะเวลาในการสกัดต่อผลได้ของสารสกัด โดยใช้สัดส่วนระหว่าง น้ำกลั่นกับเปลือกขนุนอบแห้ง 10:1 (v/w) สกัดที่อุณหภูมิ 60°C	53
4-4 ผลของระยะเวลาในการสกัดต่อปริมาณน้ำตาล โดยใช้สัดส่วนระหว่าง น้ำกลั่นกับเปลือกขนุนอบแห้ง 10:1 (v/w) สกัดที่อุณหภูมิ 60°C	53

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-5 ผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับเปลือกขมุนอบแห้งต่อผลได้ของสารสกัด โดยมีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย สกัดที่อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาในการสกัด 120 นาที	54
4-6 ผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับเปลือกขมุนอบแห้งต่อปริมาณน้ำตาล โดยมีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย สกัดที่อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาในการสกัด 120 นาที	55
4-7 ผลของความชื้นของเปลือกขมุนอบแห้งต่อผลได้ของสารสกัด (เปลือกขมุนสดและเปลือกขมุนอบแห้ง) โดยสกัดด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล 95% (v/v) ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 120 นาที	56
4-8 ผลของความชื้นของเปลือกขมุนต่อปริมาณน้ำตาล (เปลือกขมุนสดและเปลือกขมุนอบแห้ง) โดยสกัดด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล 95% (v/v) ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 120 นาที	56
4-9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์จากการสกัดแบบต่อเนื่องด้วยชุดทดลองขนาดเล็กระหว่างข้อมูลจากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ด้วยโปรแกรม Essential regression	59
4-10 กราฟพื้นผิวแสดงปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ในตัวอย่างสารสกัด จากอิทธิพลระหว่างเวลาสกัดและอุณหภูมิ โดยใช้สัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขมุน 8:1 (v/w)	62
4-11 กราฟโครงร่างแสดงปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ในตัวอย่างสารสกัด จากอิทธิพลระหว่างเวลาสกัดและอุณหภูมิ โดยใช้สัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขมุน 8:1 (v/w)	62
4-12 กราฟพื้นผิวแสดงปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ในตัวอย่างสารสกัด จากอิทธิพลระหว่างสัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขมุนและอุณหภูมิ โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% (v/v)	63
4-13 กราฟโครงร่างแสดงปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ในตัวอย่างสารสกัด จากอิทธิพลสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อเมล็ดขมุนและอุณหภูมิ โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% (v/v)	63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
ก-1 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ในตัวอย่าง	80
ก-2 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด	81
ง-1 Control box I (Extractor phase)	102
ง-2 Control box I for auto-transfer solvent (Extractor phase)	103
ง-3 Control box II (Evaporator phase)	107
ง-4 Control box II for auto-transfer solvent (Evaporator phase)	108

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

%	= เปอร์เซนต์
°C	= องศาเซลเซียส
cm.	= เซนติเมตร
g/100 g วัตถุดิบแห้ง	= กรัมต่อ 100 กรัมวัตถุดิบ หมายถึง ร้อยละน้ำหนักสารที่สกัดได้ต่อ น้ำหนักวัตถุดิบแห้งเริ่มต้นก่อนการสกัด
K	= องศาเคลวิน
kg/h	= กิโลกรัมต่อชั่วโมง
kJ/kg	= กิโลจูลต่อกิโลกรัม
kJ/kg-K	= กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน
kW	= กิโลวัตต์
L/S ratio	= สัดส่วนของเหลวต่อของแข็ง
m ²	= ตารางเมตร
mg/g extracted	= มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมสารสกัด หมายถึง ปริมาณน้ำตาลใน 1 กรัมสารสกัด
mL	= มิลลิลิตร
mm.	= มิลลิเมตร
MPa	= 1×10^6 Pa
N/mm ²	= นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
rpm	= รอบต่อนาที
RSM	= วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology)
sCFA	= กรดไขมันสายสั้น (Short chain fatty acid)
v/v	= ปริมาตรต่อปริมาตร
v/w	= ปริมาตรต่อน้ำหนัก
W/m ² -°C	= วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส
w/w	= น้ำหนักต่อน้ำหนัก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำสั้นเรื่อง

มนุษย์ทุกคนจะเจริญเติบโตและดำรงชีวิตอยู่ได้ จำเป็นต้องมีอาหารครบปริมาณที่ร่างกายต้องการ ซึ่งประกอบด้วยอาหารหลัก 5 หมู่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และเกลือแร่ นอกจากนี้สารอื่นที่มีบทบาทสำคัญต่อร่างกาย คือ โยอาหาร ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ย่อยและดูดซึมในระบบทางเดินอาหาร แต่มีผลทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดต่ำอยู่เสมอไม่หิวง่าย ลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวานและโรคหัวใจ (Orafiti, 2005) ลดปัญหาเกี่ยวกับโรคอ้วนและไขมันในเลือดสูง

โปรไบโอติกส์เป็นจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ แต่จุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ไม่สามารถทนต่ออิทธิพลของกรดจากกระเพาะอาหารและเอนไซม์ในลำไส้เล็ก ซึ่งทำให้จุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ตาย ดังนั้นการรับประทานจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์เข้าสู่ร่างกายโดยตรงจะเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ในร่างกายได้น้อย แนวทางแก้ปัญหานี้หนึ่ง นั่นคือ การรับประทานสารอาหารที่จุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ใช้เพื่อเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน เรียกว่า 프리ไบโอติกส์ โดยฟรีไบโอติกส์เป็นสารอาหารที่ไม่ย่อยและดูดซึมในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีกลุ่มโมโนแซคคาไรด์ตั้งแต่ 3 หน่วยขึ้นไป ได้แก่ โอลิโกแซคคาไรด์และโพลีแซคคาไรด์ ตัวอย่างเช่น โปรไบโอติกส์กลุ่มไบฟิโดแบคทีเรีย (*Bifidobacteria*) สามารถใช้ฟรีไบโอติกส์ชนิดฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ (Fructooligosaccharide (FOS)) เป็นชั้นเตรตเพื่อเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน (Simmering และ Blaut, 2001)

ในปี 2550 มีผลิตภัณฑ์อาหารที่เติมสารมีคุณสมบัติฟรีไบโอติกส์มากกว่า 400 ชนิด บริษัทที่ผลิตมากกว่า 20 บริษัท และยอดขายในยุโรปมีมูลค่า 87 ล้านดอลลาร์ อนาคตในปี 2553 คาดว่ามีมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็น 179.7 ล้านดอลลาร์ (<http://www.frost.com/>) ซึ่งอุตสาหกรรมอาหารที่เติมฟรีไบโอติกส์มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารที่เติมฟรีไบโอติกส์มีความหลากหลายมากขึ้น (http://www.fao.org/ag/agn/agns/files/Prebiotics_Tech_Meeting_Report.pdf) ฟรีไบโอติกส์ในรูปแบบซูลูมีขายราคา 700 ยูโรต่กิโลกรัม อาหารที่เติมฟรีไบโอติกส์ในยุโรป อเมริกา และเอเชีย มียอดขายสิ้นค้ารวม 25,000 ล้านดอลลาร์ และมียอดขายเพิ่มขึ้นกว่า 6% ต่อปี (<http://www.ingredientsdirectory.com/>)

ในเชิงพาณิชย์การสกัดฟรีไบโอติคส์จากวัตถุดิบทางการเกษตร ในถึงสกัดด้วยตัวทำละลายที่ให้ความร้อนและมีการกวน เมื่อเปรียบเทียบวิธีการสกัดด้วยการสกัดแบบกะการสกัดแบบกะซ้ำสองรอบ การสกัดด้วยไมโครเวฟ การสกัดด้วยอัลตราโซนิก การสกัดด้วยซอกเล็ด การสกัดที่อุณหภูมิห้องและการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง พบว่าวิธีการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องจะให้ค่าผลได้ของการสกัดสูงสุด อีกทั้ง ประหยัดเวลา พลังงานและตัวทำละลาย (Wang และคณะ, 1998) แต่เครื่องสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องยังไม่มีผลิตในประเทศไทย หากนำเข้าจากต่างประเทศก็มีราคาสูง ดังนั้นการพัฒนาเครื่องสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องที่เหมาะสมกับวัตถุดิบทางการเกษตรในประเทศไทยและศึกษากระบวนการผลิตที่เหมาะสม

วิธีการหนึ่งในการผลิตฟรีไบโอติคส์เป็นการสกัดโพลิโกแซคคาไรด์จากพืชโดยตรง ซึ่งจากรายงานความก้าวหน้าโครงการการสกัดสารฟรีไบโอติคส์จากพืช (2550) จากการสกัดเมล็ดขนุนด้วยเอทานอล 50% (v/v) ได้สารสกัดที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โปรไบโอติคส์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของฟรีไบโอติคส์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เมล็ดขนุนเป็นวัตถุดิบ ซึ่งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณของเหลือทิ้งของพืชเกษตร

ขนุนเป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งสามารถบริโภคโดยตรงในรูปของเนื้อขวงสดหรือนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เช่น ขนุนในน้ำเชื่อม กระป๋อง ขนุนอบแห้ง ขนุนทอด ขนุนทอดสุญญากาศ ขนุนกวน ขนุนแช่อิ่ม แยมขนุน ขนุนอบกรอบ รวมทั้งใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ใช้ปรุงแต่งไอศกรีมและฟรุตคอกเทล เป็นต้น (อมรรัตน์, 2544) จากสถิติการปลูกขนุนหนึ่งในปี 2546 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกขนุน 289,286 ไร่ ผลผลิตรวม 828,611 ตัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2546) ทำให้มีเมล็ดขนุนเหลือทิ้งถึง 120,000 ตัน และเมล็ดขนุนดิบมีคุณค่าทางอาหารไม่น้อยกว่าส่วนเนื้อขวงของขนุน

งานวิจัยนี้เน้นการออกแบบและจัดสร้างเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องเพื่อสกัดฟรีไบโอติคส์จากพืชทางการเกษตร โคนเครื่องสกัดสามารถสกัดวัตถุดิบได้รวม 10 กิโลกรัม และได้ทำการศึกษาการทดลองสกัดสารฟรีไบโอติคส์จากเมล็ดขนุน โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% (v/v) จากการศึกษาจะข้อมูลพื้นฐานซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาตู้โรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- (1) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดฟรีไบโอติกส์ด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก
- (2) ออกแบบและจัดสร้างเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง
- (3) ศึกษากระบวนการใช้เครื่องสกัดที่จัดสร้าง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) ทราบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากเปลือกด้านในขุ่นแบบกะด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก
- (2) ทราบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากเมล็ดขุ่นแบบต่อเนื่องด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก
- (3) ได้เครื่องสกัดแบบต่อเนื่องสำหรับการวิจัยและการเรียนการสอนระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษา
- (4) เป็นแนวทางวิจัยสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากเมล็ดขุ่นแบบต่อเนื่อง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- (1) พืชวัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ ส่วนที่เหลือทิ้งของพืชเกษตร ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจขุ่น โดยได้เลือกทดลอง เปลือกด้านในและเมล็ดขุ่น
- (2) ตัวทำละลาย ได้เลือกใช้ตัวทำละลายที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย โดยเลือกน้ำกลั่นเอทานอล 50% (v/v) และเอทานอล 95% (v/v)
- (3) ออกแบบและจัดสร้างเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองที่สามารถรองรับวัตถุดิบได้ 10 กิโลกรัม

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ฟังก์ชันนัลฟู๊ดส์ (Functional foods)

ปีนมณี (2547) กล่าวว่าฟังก์ชันนัลฟู๊ดส์เป็นอาหารที่มนุษย์บริโภคเข้าไปแล้วให้ประโยชน์หรือคุณสมบัติอื่น ๆ ต่อสุขภาพนอกเหนือจากคุณค่าทางโภชนาการพื้นฐาน คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามินและเกลือแร่ ซึ่งสมบัติพิเศษที่ได้รับนี้มีประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค ส่วนใหญ่เป็นการช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรค เช่น ช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือด ลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคกระดูกพรุน (Osteoporosis) (Bender, 1999) มีผลต่อการป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง โรคอ้วน โรคเบาหวาน ตลอดจนมีผลต่อการเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้กับร่างกายอาหารหลายชนิดที่จัดเป็นฟังก์ชันนัลฟู๊ดส์และพบได้ในชีวิตประจำวันมีมากมายหลายประเภท เช่น โปรไบโอติกส์ 프리ไบโอติกส์ ธัญพืช เส้นใยอาหาร ตลอดจนสารเคมีพืชหรือที่เรียกว่าไฟโตเคมีคัล (Phytochemicals) หลายชนิด ดังนั้นคำว่าฟังก์ชันนัลฟู๊ดส์จึงรวมถึงกลุ่มของสารอาหารตามหลักโภชนาการและกลุ่มที่ไม่จัดเป็นสารอาหาร เช่น สารไฟโตเคมีคัล สารต้านออกซิเดชัน ตัวอย่างของกลุ่มอาหารที่จัดเป็นฟังก์ชันนัลฟู๊ดส์แสดงดังตาราง 2-1

ตาราง 2-1 ตัวอย่างของสารที่จัดเป็นฟังก์ชันนัลฟู๊ดส์ (Holm, 2003)

ฟังก์ชันนัลฟู๊ดส์	ตัวอย่าง
โปรไบโอติกส์	แบคทีเรียกรดแลคติก บีฟิโดแบคทีเรีย
ฟรีไบโอติกส์	เส้นใยอาหาร โอลิโกแซคคาไรด์
วิตามิน	วิตามินบี 6 วิตามินบี 12 วิตามินดี และวิตามินเค
แร่ธาตุ	แคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี
สารต้านออกซิเดชัน	วิตามินอี วิตามินซี แคโรทีนอยด์ ฟลาโวนอยด์ โพลีฟีนอล
โปรตีน เปปไทด์และกรดอะมิโน	ไทรเปปไทด์จากโปรตีนในนม
ลิปิด	โอเมกาทรี
ไฟโตเคมีคัล	ไฟโตสเตอรอล เบต้า-กลูแคน ไอโซฟลาโวน ลิกแนน

ในยุโรปมีตลาดผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพเจริญเติบโตมากขึ้น มียอดขายผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นสองเท่าระหว่างปี 2543 ถึง 2548 และมีมูลค่ารวม 8 พันล้านยูโร ในปี 2553 คาดว่าจะมีมูลค่ารวมมากกว่า 10 พันล้านยูโร โดยประชากรวัยชราในยุโรปมีเงินเก็บเพิ่มขึ้น มีความตระหนักและสนใจรับประทานอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น ส่งผลให้สุขภาพดีและลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคภัยไข้เจ็บ ซึ่งเป็นเหตุผลให้เพิ่มความต้องการและพัฒนาอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น (<http://www.ingredientsdirectory.com/reports/report2.pdf>)

2.2 โพรไบโอติกส์ (Probiotics)

ปีนมณี (2547) กล่าวว่าโพรไบโอติกส์เป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ซึ่งพบได้ในบริเวณลำไส้ที่เรียกว่า Gastrointestinal tract (GI) และยังรวมถึงจุลินทรีย์ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอาหารในรูปที่มีชีวิต อาหารประเภทโพรไบโอติกส์โดยทั่วไปมีส่วนผสมของจุลินทรีย์หนึ่งชนิดหรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้ต้องได้รับการศึกษาและตรวจสอบอย่างแน่ชัดแล้วว่าไม่มีผลเสียต่อสุขภาพของผู้บริโภค จุลินทรีย์ที่เป็นโพรไบโอติกส์ส่วนใหญ่ ได้แก่ แบคทีเรียหลายสายพันธุ์ เช่น แลคโตบาซิลลัส (*Lactobacillus*) เมื่อมนุษย์บริโภคเข้าไปแล้วจะเป็นตัวช่วยควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ที่ร่างกายไม่ต้องการให้อยู่ในปริมาณที่ไม่ก่อให้เกิดโรค หรือก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ให้แก่ร่างกายได้ เชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ส่วนใหญ่ได้รับการบริโภคอาหารที่มีส่วนประกอบของโพรไบโอติกส์ เช่น ผลิตภัณฑ์นมหมัก ชนิดต่าง ๆ แหนมสด แบคทีเรียที่เป็นโพรไบโอติกส์มีคุณสมบัติปกป้องร่างกายไม่ให้เกิดอันตรายจากเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคและยังสามารถผลิตเอนไซม์มาย่อยสารอาหารบางประเภทที่ระบบการย่อยในร่างกายมนุษย์ไม่สามารถย่อยได้ให้เป็นสารที่มีประโยชน์และร่างกายดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติกส์แสดงดังตาราง 2-2

ตาราง 2-2 จุลินทรีย์ที่ชนิดต่าง ๆ ที่จัดเป็นโปรไบโอติกส์ (ปิ่นมณี, 2547)

ชนิดของจุลินทรีย์	ประโยชน์ต่อสุขภาพ
<i>Lactobacillus Acidophilus</i>	มีผลต่อระบบการย่อยอาหาร บรรเทาอาการท้องเสียและท้องผูก ที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย เพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้กับร่างกายโดยการผลิตแบคทีเรียโอซินช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรค เช่น ลดระดับคอเลสเตอรอล ลดเชื้อก่อโรคนำไส้ใหญ่ และป้องกันมะเร็ง
<i>Lactobacillus Casei</i>	
<i>Lactobacillus Immunitus</i>	
<i>Lactobacillus Plantarum</i>	
<i>Lactobacillus Lactis</i>	
<i>Bifidobacterium Lactis</i>	
<i>Bifidobacterium Lonhum</i>	

2.3 โปรไบโอติกส์ (Prebiotics)

โปรไบโอติกส์เป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ถูกย่อยและไม่ถูกดูดซึมในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก แต่แบคทีเรียบางกลุ่มที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่สามารถหมักสารอาหารเหล่านั้น เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและมีผลต่อการส่งเสริมสุขภาพให้ดีขึ้น เช่น จุลินทรีย์กลุ่ม *Bifidobacterium*, *Lactobacillus* และ *Eubacterium* (Cummings และคณะ, 2001) และบางชนิดมีตำแหน่งจำเพาะสำหรับจุลินทรีย์ที่ก่อเกิดโรค (Pathogenic bacteria) เช่น *Salmonella* และ *E.coli* ซึ่งต่อมากจะถูกกำจัดออกจากระบบทางเดินอาหารไปกับอุจจาระ อาหารที่มีสมบัติเป็นโปรไบโอติกส์ ได้แก่ ธัญพืช ผัก ผลไม้ ตัวอย่างของโปรไบโอติกส์ที่มนุษย์ควรได้รับเป็นประจำจากอาหารที่บริโภคคือ เส้นใยอาหาร (Dietary fiber) ซึ่งเป็นคำที่ใช้เรียกกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากพืช

ผลิตภัณฑ์ของโปรไบโอติกส์ในกลุ่ม โอลิโกแซคคาไรด์จะสามารถผลิตได้จากหนึ่งในสามกระบวนการทั่วไปนี้ (Grizard และ Barthelemy, 1999) คือ

- (1) การสกัดโอลิโกแซคคาไรด์จากพืชโดยตรง
- (2) การควบคุมการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) จากโพลีแซคคาไรด์
- (3) การสังเคราะห์ด้วยเอนไซม์โดยใช้ Hydrolases และ/หรือ Glycosyl transferases จากพืชหรือแหล่งกำเนิดของจุลินทรีย์ (L'Hocine และคณะ, 2000)

2.3.1 คุณสมบัติของพรีไบโอติกส์

(1) สามารถเคลื่อนไปถึงลำไส้ใหญ่ได้โดยไม่ถูกย่อยและไม่ถูกดูดซึมในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก (Manning, 2004; Kolida และคณะ, 2002)

(2) สามารถที่จะเกิดการหมักในลำไส้ใหญ่โดยแบคทีเรียที่มีประโยชน์ เช่น *Bifidobacterium* และ *Lactobacillus* (Manning, 2004; Kolida และคณะ, 2002)

(3) ต้องไปส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียที่มีประโยชน์ในทางเดินอาหาร เช่น *Bifidobacterium* และ *Lactobacillus* เป็นต้น และไม่ส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียที่ก่อโรค เช่น *Clostridium perfringens* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคในลำไส้ได้ (Gibson และคณะ, 1995; Kolida และคณะ, 2002)

สารอาหารที่มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกส์นั้นต้องสามารถทนต่อการย่อยของกรดและเอนไซม์ในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก สามารถเคลื่อนที่ไปจนถึงลำไส้ใหญ่ได้โดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงและไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็ก เพื่อใช้เป็นอาหารให้กับจุลินทรีย์ประจำถิ่น (Microflora) ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ ซึ่งสามารถใช้สารเหล่านี้ในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน (Manning, 2004) และส่งผลให้สุขภาพของมนุษย์ดีขึ้น

2.3.2 ประเภทของพรีไบโอติกส์

เฉลิมขวัญและมัลลิกา (2548) ได้รวบรวมประเภทของพรีไบโอติกส์ ซึ่งต้องมีคุณสมบัติอย่างน้อย 3 ประการ สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

(1) Alcohol sugar จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีดัชนีการสังเคราะห์โพลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) เพียง 1-2 ตัว ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้เช่น Maltitol, Sorbitol, Isomalt, Xylitol เป็นต้น ในบางครั้งจะเรียกว่า POLYOLS สามารถเป็นสารให้ความหวานได้ โดยมีความหวานประมาณ 3 ใน 4 หรือครึ่งหนึ่งของน้ำตาลทั่วไป และยังคงจับได้ช้าในลำไส้เล็กเมื่อเทียบกับน้ำตาล จึงทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วย

(2) Resistant starch จัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ซึ่งจะไม่ถูกดูดซับในลำไส้เล็ก ประกอบด้วย Amylase และ Amylopectin พืชส่วนใหญ่จะมี Amylase อยู่ประมาณ 20-25%

(3) Non-starch polysaccharides เป็นสารที่ได้จากพืช เช่น Pectin, Cellulose, Hemicellulose, Guar และ Xylan

(4) Inulin เป็นสารพอลิแซคคาไรด์ที่พืชเก็บไว้เป็นอาหาร พบในพืชมากกว่า 36,000 ชนิด เช่น Chicory root เห็ด หัวหอม หัวกระเทียม กล้วย เป็นต้น

(5) Sugar and oligosaccharides สำหรับพรีไบโอติกส์ในกลุ่มนี้ จัดเป็น Short-chain polysaccharide ประกอบด้วยน้ำตาลตั้งแต่ 2-20 หน่วย ตัวอย่างเช่น Raffinose, Stachyose, Fructooligosaccharides (FOS) นอกจากนี้ยังมี Lactose, Lactulose, Galactooligosaccharides (GOS), Soybean oligosaccharide, Lactosucrose, Isomalto-oligosaccharide, Gluco-oligosaccharide, Xylo-oligosaccharide และ Palatinose ที่สามารถจัดเป็นพรีไบโอติกส์

(6) Mucin glycoproteins ถูกสร้างโดย Goblet cells ที่อยู่ในเยื่อบุผิวลำไส้และเป็นสารตั้งต้นหลักสำหรับการหมักในลำไส้

(7) Related mucopolysaccharides เช่น Chondroitin sulphate, Heparin, Pancreatic และ Bacterial secretions ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารที่มีไว้สำหรับจุลินทรีย์ในลำไส้

(8) Protein and peptides สารเหล่านี้สร้างขึ้นในอาหาร สร้างโดยการหลั่งของตับอ่อนหรือสร้างโดยแบคทีเรีย แต่จะมีปริมาณน้อยกว่าพวกคาร์โบไฮเดรต

2.3.3 บทบาทและความสำคัญของพรีไบโอติกส์ในระบบทางเดินอาหาร

สารที่มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกส์ไม่ได้ไปมีผลต่อสุขภาพแต่จะใช้เป็นซัพสเตรทในกระบวนการหมักในลำไส้ใหญ่ โดยไปส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ ซึ่งแต่ละสายพันธุ์มีความสามารถใช้พรีไบโอติกส์และผลิตเมตาบอไลต์ที่ได้แตกต่างกัน สารประกอบที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นจากการย่อยและหมักพรีไบโอติกส์ ได้แก่ กรดไขมันสายสั้น (Short chain fatty acid, sCFA) สารยับยั้งแบคทีเรียที่ก่อโรค โดยเฉพาะ sCFA ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการหมักสารอาหารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ จะมีปริมาณ 40-60% (กรัม sCFA/100 กรัมสัฟเฟรต) ในแต่ละวันจะผลิตออกมาประมาณ 300-500 มิลลิโมล ประกอบด้วย อะซิเตท โพรพิโอเนท และบิวเทอเรท (Cumplings และ Englyst, 1995)

2.3.3.1 การยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค

สารที่มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกส์สามารถไปยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ก่อโรค โดยไปกระตุ้นการเจริญของแบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* และ *Bifidobacteria* ให้มีการสร้างกรดเพิ่มขึ้น เช่น กรดไขมันสายสั้น ซึ่งมีผลให้พีเอชในลำไส้ลดลง ส่งผลให้เกิดภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียก่อโรค (Buddington และคณะ, 2002)

2.3.3.2 การป้องกันการเกิดมะเร็งในลำไส้ใหญ่

ลำไส้ใหญ่เป็นแหล่งสะสมของเสียและเป็นแหล่งรวมของจุลินทรีย์ต่าง ๆ หลายชนิด ดังนั้นมีโอกาสการเกิดโรคต่าง ๆ โดยเฉพาะโรคมะเร็งได้มากกว่าในทางเดินอาหารส่วนอื่น

พบว่าบริเวณลำไส้ใหญ่มีโอกาสเป็นมะเร็งมากกว่าลำไส้เล็ก 100 เท่า ซึ่งมีการศึกษาพบว่า สารพรีไบโอติกสามารถป้องกันการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้ (Buddington และคณะ, 1996) การหมักสารพรีไบโอติกส์ของแบคทีเรียหลายชนิดที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ โดยการเปลี่ยนแปลง กระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ให้เป็นไปในแนวทางที่จะลดการเกิดสารที่ ส่งผลเสียต่อร่างกายและส่งเสริมแบคทีเรียแลคติกผลิตสารที่สามารถยับยั้งแบคทีเรียที่จะผลิต สารก่อมะเร็งได้และผลผลิตที่ได้จากการหมักมีผลต่อกลไกการป้องกันการเกิดมะเร็ง (Wijnands, 1999)

2.3.3.3 เพิ่มการดูดซึมแร่ธาตุ

กระบวนการหมักสารพรีไบโอติกส์ภายในลำไส้ใหญ่สามารถเพิ่มการดูดซึมของ สารอาหารและแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี และเหล็ก (Scholz-Ahrens และ คณะ, 2001)

2.3.3.4 ลดระดับคอเลสเตอรอล

การลดระดับคอเลสเตอรอลด้วยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ *L.acidophilus* ซึ่งช่วย สลายและยับยั้งการดูดซึมของคอเลสเตอรอลผ่านผนังลำไส้ โดย

(1) ไปลดการดูดซึมคอเลสเตอรอลสารกลุ่ม แพคติน กัวกัม (Guar gum) และ β -glucan ที่มีเส้นใยสูงจะสามารถลดการดูดซึมคอเลสเตอรอลได้ โดยลักษณะเหนียวหนืดของ เส้นใยจะไปเคลือบผนังลำไส้ทำให้ความสามารถในการดูดซึมคอเลสเตอรอลลดลง

(2) กระบวนการหมักสารพรีไบโอติกส์ในลำไส้ใหญ่จะเกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น กรดไขมันสายสั้น พบว่าโพรพิโอเนตสามารถไปลดการสังเคราะห์คอเลสเตอรอลในเซลล์ตับได้

(3) เพิ่มการขับถ่ายเกลือน้ำดี (Bile acid) ซึ่งเกลือน้ำดีเป็นตัวช่วยละลายไขมัน ทำให้การดูดซึมไขมันและคอเลสเตอรอลเพิ่มขึ้น (Conway, 2001)

2.3.3.5 ช่วยลดความดันโลหิต

ในการศึกษาผู้ป่วยที่รับประทานพรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์เป็นเวลา 5 สัปดาห์ พบว่าความดันโลหิตลดลงเฉลี่ย 6 มิลลิเมตรปรอท และยังพบว่าความดันโลหิตแปรผันกับจำนวน ของ *Bifidobacteria* ในลำไส้อีกด้วย (Tomomatsu, 1994)

2.3.3.6 ช่วยเพิ่มวิตามินบางชนิด

กระบวนการหมักสารพรีไบโอติกส์โดยจุลินทรีย์กลุ่ม *Bifidobacteria* พบว่า สามารถผลิตวิตามิน B₁, B₂, B₆, B₁₂, nicotinic acid และ Folic acid เพิ่มขึ้น (Conway, 2001)

2.3.3.7 ช่วยลดปริมาณสารพิษและเอนไซม์ที่เป็นพิษจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรีย

แบคทีเรียที่เจริญอยู่ในร่างกายมนุษย์สามารถที่จะสร้างสารพิษจากกระบวนการเมตาบอลิซึม สารกลุ่มโปรตีนซึ่งเป็นการหมักแบบ Protolytic ดังนั้นมีการศึกษาผลของโอลิโกแซคคาไรด์ทั้งในระดับสัตว์ทดลอง (*In vivo*) และห้องปฏิบัติการ (*In vitro*) พบว่าการใช้โอลิโกแซคคาไรด์แก์จุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารจะช่วยลดปริมาณสารพิษและเอนไซม์ที่เป็นโทษลงประมาณ 44.6% และ 40.9% (Tomomatsu, 1994)

2.3.3.8 ช่วยลดอาการท้องผูก

กรดไขมันที่ผลิตโดย *Bifidobacteria* จะช่วยกระตุ้นการบีบตัวของลำไส้และเพิ่มความชื้นของอุจจาระ ทำให้อุจจาระนิ่มขึ้นขับถ่ายได้ง่าย ซึ่งสารพรีไบโอติกส์สามารถเสริมการผลิตกรดไขมันสายสั้นในจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ได้ (Tomomatsu, 1994)

2.4 เส้นใยอาหาร (Fiber) และโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide)

เส้นใยอาหารเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่เอนไซม์ในร่างกายไม่สามารถย่อยได้ เส้นใยอาหารไม่มีสารอาหารและไม่ให้พลังงาน แต่มีบทบาทสำคัญต่อภาวะโภชนาการและสุขภาพของมนุษย์ (ควงจันทร์, 2545) เส้นใยอาหารแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (Water soluble) เส้นใยอาหารชนิดนี้จะสามารถรวมกับน้ำในปริมาณมากเกิดการกระจายในโครงสร้างที่อัดแน่นและสามารถแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า โดยมีคุณสมบัติในการลดระดับน้ำตาลและคอเลสเตอรอลในกระแสเลือด รวมถึงการจับพิษจากโลหะบางชนิดได้ แหล่งเส้นใยอาหารชนิดที่ละลายน้ำได้ตัวอย่างเช่น รำข้าวโอ๊ต ถั่วเมล็ดแห้ง ข้าวบาร์เลย์ ขนมปังที่ทำจากข้าวโอ๊ต ผักใบเขียว และผลไม้เกือบทุกชนิด จัดเป็นแหล่งอาหารที่ดีของเส้นใยอาหารชนิดละลายน้ำได้

เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Water insoluble) เส้นใยอาหารชนิดนี้ไม่สามารถรวมกับน้ำได้ มีบทบาทสำคัญในการช่วยดูดซับสารก่อมะเร็ง ป้องกันการดูดซึมน้ำตาลเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ป่วยโรคเบาหวาน ป้องกันอาการท้องผูก และช่วยป้องกันการเกิดโรคนิวไนไต แหล่งเส้นใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำ เช่น ลิกนิน (Lignin) พบในข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ตและรำ เซลลูโลส (Cellulose) พบในผลไม้และถั่วเปลือกแข็ง เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) พบใน หัวบุก เป็นต้น

2.4.1 ประโยชน์ของโอลิโกแซคคาไรด์

ประโยชน์ของเส้นใยอาหารที่สำคัญ การเข้าใจถึงบทบาทและหน้าที่ที่สำคัญของเส้นใยอาหารเป็นแนวทางหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภคสนใจบริโภคเส้นใยอาหารกันมากขึ้น (ปีนมณี, 2547) กล่าวได้ดังนี้

(1) เส้นใยอาหารกับการลำเลียงในลำไส้ใหญ่ สำหรับผู้ที่มีปัญหาเรื่องระบบขับถ่ายสามารถแก้ไขได้ด้วยการบริโภคอาหารประเภทเส้นใย ทั้งเส้นใยชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น เส้นใยจากรำข้าวสาลีและเซลลูโลสซึ่งเป็นเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำแต่สามารถอุ้มน้ำได้ดี มีผลต่อการเพิ่มมวลของอุจจาระ ช่วยทำให้อุจจาระอ่อนนุ่มและเคลื่อนตัวได้เร็ว ลดระยะเวลาในการขับถ่ายเส้นใยจากธัญพืชจะมีผลต่อการเพิ่มมวลอุจจาระได้มากกว่าเส้นใยจากผลไม้ ส่วนเส้นใยประเภทละลายน้ำ เช่น เพคตินจะไม่มีผลต่อการขับถ่ายเพราะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในลำไส้

(2) เส้นใยอาหารกับโรคมะเร็งการศึกษาเกี่ยวกับการบริโภคอาหารที่มีเส้นใยและองค์ประกอบอื่น ๆ กับการเกิดมะเร็งในลำไส้ของสตรีที่มีอายุสูงกว่า 60 ปี พบว่า การบริโภคเส้นใยจากผลไม้ช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งมากกว่าเส้นใยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น เส้นใยจากธัญพืช เส้นใยจากผัก โดยมีเหตุผลสนับสนุนว่าเส้นใยจากผลไม้มีสารอาหารที่ร่างกายต้องการในปริมาณเล็กน้อย (Micronutrients) ที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น วิตามินอี วิตามินซี และเบต้าแคโรทีน ซึ่งสารเหล่านี้พบอยู่ร่วมกับเส้นใยอาหาร และเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงช่วยป้องกันการเกิดมะเร็งได้

(3) เส้นใยอาหารกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของร่างกาย ในระบบเมแทบอลิซึมของไขมัน เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำมีผลต่อการลดระดับคอเลสเตอรอลทั้งหมด และลดปริมาณของไลโปโปรตีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (LDL) ในเลือด พบว่าการดูดซึมกรดเกลือของเส้นใยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเมแทบอลิซึมของคอเลสเตอรอล ทำให้เกิดการสูญเสียคอเลสเตอรอลออกจากร่างกาย โดยขั้นแรกเพิ่มการขับกรดเกลือทำให้การสังเคราะห์กรดเกลือจากคอเลสเตอรอลเพิ่มขึ้น จากนั้นกรดเกลือที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในลำไส้จะเกิดเป็นไมเซลล์ ซึ่งไมเซลล์จะไปยับยั้งการดูดซึมไขมันและคอเลสเตอรอล นอกจากนั้นแบคทีเรียที่อยู่ในลำไส้จะย่อยเส้นใยอาหารได้เป็นกรดไขมันสายสั้น ซึ่งมีคุณสมบัติในการยับยั้งการสังเคราะห์คอเลสเตอรอลได้ ส่วนเส้นใยมีผลต่อการยับยั้งการดูดซึมธาตุเหล็กและสังกะสีเนื่องจากเส้นใยมีองค์ประกอบของไฟเตต (Phytate) อยู่ด้วย ดังนั้นแนวทางแก้ปัญหาในส่วนนี้ทำได้โดยกำจัดไฟเตตออกจากเส้นใยอาหารในระหว่างกระบวนการแปรรูป ซึ่งจะช่วยให้ร่างกายมีการดูดซึมธาตุเหล็ก สังกะสี และแคลเซียมไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

2.5 กระบวนการสกัด

2.5.1 กระบวนการชะละลาย (Leaching) หรือการสกัดของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid extraction)

สารอินทรีย์ อนินทรีย์ และสารเชิงชีวภาพ (Biological) มักอยู่ในรูปสารผสม โดยมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันในของแข็ง ในการแยกตัวละลายที่ต้องการหรือแยกส่วนประกอบตัวละลายที่ไม่ต้องการจากเฟสของแข็ง ของแข็งถูกนำมาสัมผัสกับเฟสของเหลว เฟสทั้งสองจะสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดและตัวละลายตัวเดียวหรือหลายตัวสามารถที่จะแพร่จากเฟสของแข็งไปสู่เฟสของเหลว ซึ่งจะเกิดการแยกของส่วนประกอบในของแข็งตั้งต้น กระบวนการนี้เรียกการชะละลายของแข็ง-ของเหลวหรือการชะละลาย ในการชะละลายเมื่อส่วนประกอบไม่ต้องการถูกดึงออกจากของแข็งด้วยน้ำ กระบวนการนี้เรียกว่าการล้าง (Washing) โดยในงานวิจัยนี้จะชะละลายของสารเชิงชีวภาพ (ชาคริต, 2544)

2.5.2 กระบวนการชะละลายของสารเชิงชีวภาพ

ในอุตสาหกรรมกระบวนการอาหารและชีวภาพนั้น ผลผลิตหลายชนิดถูกแยกจากโครงสร้างธรรมชาติตั้งต้นด้วยการชะละลายของเหลว-ของแข็ง กระบวนการที่สำคัญ คือ การชะละลายน้ำตาลจากชูการ์บีท (Sugar beets) ด้วยน้ำร้อน ในกระบวนการผลิตน้ำมันพืช ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เฮกเซน อะซีโตน และอีเทอร์ ถูกใช้ในการสกัดน้ำมันจากถั่ว ถั่วเหลือง เมล็ดละหุ่ง เมล็ดทานตะวัน เมล็ดฝ้าย (Tung meal) และตับปลา (Halibut) ในอุตสาหกรรมเภสัชกรรม ผลผลิตที่แตกต่างกันหลายชนิดได้จากการชะละลายราก ใบ และต้นของพืช ในการผลิตกาแฟ เมล็ดกาแฟคั่วถูกชะละลายด้วยน้ำ ชะละลายได้ถูกผลิตโดยการชะละลายใบชาด้วยน้ำ แทนนินถูกแยกจากเปลือกไม้ด้วยการชะละลายด้วยน้ำ (ชาคริต, 2544)

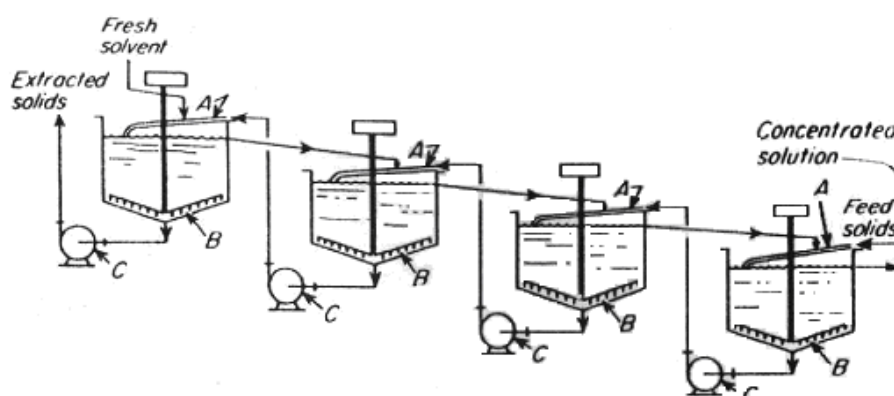
2.5.3 การเตรียมของแข็งสำหรับชะละลายของสารจากพืชและสัตว์

สารเชิงชีวภาพมีโครงสร้างแบบเซลล์และส่วนที่ละลายได้มักพบภายในเซลล์ อัตราของการชะละลายอาจค่อนข้างช้า เพราะผนังเซลล์มีความต้านทานต่อการแพร่ อย่างไรก็ตาม การบดสารเชิงชีวภาพให้มีขนาดเล็ก ให้เซลล์เปิดออกจะไม่ทำในเชิงปฏิบัติชูการ์บีท ถูกตัดเป็นรูปชิ้นในรูปถิ่ม (Wedge-shaped) ในการชะละลายเพื่อที่ลดระยะทางของการแพร่ของน้ำไปถึงแต่ละเซลล์ เซลล์ของชูการ์บีทยังอยู่ติดกันและน้ำตาลจะแพร่ผ่านผนังเซลล์แบบซึมผ่านได้บางส่วน (Semipermeable)

ในการชะละลายผลผลิตเชิงเกษตรกรรมจากใบ ต้น และราก การอบแห้งวัตถุดิบก่อนการสกัดจะช่วยให้ผนังเซลล์แตก ดังนั้นตัวทำละลายสามารถละลายตัวละลายได้โดยตรงผนังเซลล์ของถั่วเหลืองและเมล็ดพืชหลายชนิดส่วนมากจะแตกเมื่อลดขนาดจนเหลือ 0.1-0.5 mm โดยการบด (Rolling) หรือทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ (Flaking) เซลล์จะมีขนาดเล็กลงแต่ผนังเซลล์แตกออกทำให้ตัวทำละลายเข้าถึงน้ำมันพืชได้ง่าย (ชาคริต, 2544)

2.5.4 การชะละลายแบบการกวนของแข็ง

เมื่อของแข็งถูกบดจนได้ขนาด 200 Mesh (0.074 mm.) มันจะแขวนลอยในเครื่องกวน การชะละลายไหลสวนทางต่อเนื่องสามารถดำเนินการ โดยใช้เครื่องกวนหลายเครื่องต่อเป็นอนุกรมกับถังตกจม (Settling tank) หรือถังตกตะกอน (Thickener) ระหว่างแต่ละเครื่องกวนแสดงดังภาพประกอบ 2-1 (ชาคริต, 2544)

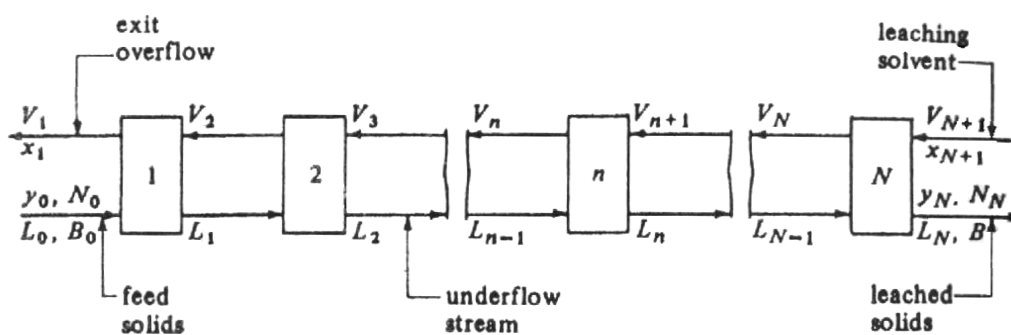


ภาพประกอบ 2-1 การชะละลายไหลสวนทางแบบเครื่องตกจม (ชาคริต, 2544)

บางครั้งเครื่องตกตะกอนถูกใช้รวมกันเป็นอุปกรณ์เครื่องกวนและเครื่องตกจม ดังภาพประกอบ 2-2 ในระบบสเตจที่ไหลสวนทางนี้ตัวทำละลายใหม่สดเข้าที่สเตจแรกของเครื่องตกจม ของเหลวใสจากการตกจมไหลออกจากสเตจหนึ่งไปยังอีกสเตจหนึ่ง ของแข็งป้อนเข้าที่สเตจสุดท้ายซึ่งจะสัมผัสกับตัวทำละลายที่ออกจากสเตจก่อนหน้านั้น และเข้าสู่เครื่องตกจม Rake หมุนแบบช้า ๆ ทำให้ของแข็งเคลื่อนเข้าสู่ทางออกทางด้านล่างของแข็งและของเหลวบางส่วนถูกสูบเป็นสเลอรีไปยังถัดไป หากเวลาการสัมผัสยังไม่เพียงพอเครื่องผสมจะถูกติดตั้งเพิ่มในระหว่างเครื่องตกจมแต่ละเครื่อง

2.5.5 การชะละลายพหุสเทจแบบไหลสวนทาง

สเทจอุดมคติถูกให้หมายเลขในทิศทางการไหลของของแข็งหรือกระแส Underflow เฟสตัวทำละลาย (C) ตัวละลาย (A) หรือเฟส V หรือเฟสของเหลวที่ไหลผ่านอย่างต่อเนื่องจากสเทจสู่สเทจสวนทางกับเฟสของแข็ง และละลายตัวละลายในระหว่างที่เคลื่อนผ่านไป ภาพประกอบ 2-2 เฟสสเลอรี (L) ประกอบด้วยของแข็งเนื้อละเอียดและของเหลว A และ C จะเป็นกระแส Underflow ไหลต่อเนื่องจากแต่ละสเทจ สังเกตว่าองค์ประกอบของเฟส V แทนด้วย x และองค์ประกอบของเฟส L แทนด้วย y ซึ่งตรงกันข้ามกับการสกัดของเหลว-ของเหลว (ชาคริต, 2544)



ภาพประกอบ 2-2 แผนภูมิกระบวนการชะละลายพหุสเทจแบบไหลสวนทาง (ชาคริต, 2544)

2.6 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายโอนมวลของตัวละลาย ได้แก่

2.6.1 ระยะเวลาในการสกัด

ระยะเวลาในการสกัดเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสกัด โดยสารในของแข็งจะแพร่เข้าสู่ของเหลว ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มสัมผัสกันของของแข็งและของเหลวจนถึงความเข้มข้นทั้งสองสถานะมีความเข้มข้นเข้าสู่จุดสมดุล ซึ่งถ้าเวลาน้อยกว่าระยะเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลจะสกัดสารสำคัญได้น้อยลง หรือหากเวลามากเกินไปก็ไม่ทำให้ได้สารสำคัญมากกว่าจุดสมดุล

2.6.2 ขนาดอนุภาคของของแข็ง

ขนาดของอนุภาคเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสกัด โดยที่ขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสารมีมากขึ้นและระยะทางของตัวถูกละลายที่อยู่ภายในของของแข็งจะแพร่กระจายออกสู่ตัวทำละลายได้ดี ซึ่งมีผลให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (วาสนา, 2534)

2.6.3 ชนิดตัวทำละลาย (Solvent)

ตัวทำละลายมีผลต่อการสกัด โดยในการสกัดให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับ การคัดเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม ตัวทำละลายที่ดีควรมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ละลายสารที่เราต้องการสกัดได้ดีพอ ไม่ระเหยง่ายหรือยากเกินไป ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่เราต้องการสกัด ไม่เป็นพิษและราคาพอสมควร (นันทวัน, 2534) ในการเลือกตัวทำละลายเราอาศัยหลักเกณฑ์ต่อไปนี้ คือ

- (1) ตัวละลายและตัวทำละลายมีคุณสมบัติความมีขั้วคล้ายคลึงกัน
- (2) ละลายสารที่ต้องการออกมามากที่สุดในขณะที่ละลายสารที่ไม่ต้องการออกมาน้อยที่สุด (Selectivity)

ตัวทำละลายอาจจะจัดเรียงตามลำดับความมีขั้วจากน้อยไปมาก (Polarity index) ได้ ดังนี้ ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride) เบนซีน (Benzene) อีเทอร์ (Ether) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) อะซีโตน (Acetone) เอทิลอะซิเตต (Ethylacetate) เอทานอล (Ethanol) เมทานอล (Methanol) น้ำ กรดและเบส

ตัวทำละลายที่ใช้มาก ๆ ได้แก่

- (1) คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายที่ดี แต่มีละลายสารที่ต้องการออกมาได้น้อย เกิดอิมัลชัน (Emulsion) ง่าย ถ้าใช้สกัดสารซึ่งเป็นด่างแอมโมเนียอาจเกิดปฏิกิริยาดีคอมโพส (Decompose) ให้กรดเกลือ
- (2) อีเทอร์มีอำนาจในการละลายน้อยกว่าคลอโรฟอร์ม แต่มีละลายสารที่ต้องการออกมาได้ดีกว่าคลอโรฟอร์ม ข้อเสียคือระเหยง่าย ระบิดง่าย เกิดออกซิไดซ์ได้ง่ายและดูดน้ำได้มาก
- (3) เฮกเซนเหมาะสำหรับพวกสารที่ไม่มีขั้วมักใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับกำจัดไขมันจากสมุนไพร ข้อดีคือราคาถูก
- (4) แอลกอฮอล์ที่ใช้มากคือเมทานอลและเอทานอล เป็นตัวทำละลายที่มีวัตถุประสงค์อย่างกว้าง ๆ (All purpose solvent) เนื่องจากมีอำนาจในการละลายกว้างมากและยังใช้ทำละลายเอมไซม์ในพืชด้วย

2.6.4 อุณหภูมิในการสกัด (Temperature)

กระบวนการสกัดทั่วไปจะกระทำที่อุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากการละลายของตัวทำละลายที่อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นได้ดีกว่า จึงทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนที่สกัดได้สูงขึ้น อัตราการชะละลายจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนืดของของเหลวลดลงและการแพร่ของตัวละลายและตัวทำละลายสูงกว่าค่าที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงในการผลิตผลิตภัณฑ์ธรรมชาติบางชนิด เช่น กาแฟ และชูการ์บีท จะทำให้วัสดุที่ไม่ต้องการออกมาระหว่าง

การสักรัดมากเกินไปและเกิดการเสื่อมเสียทางเคมีของผลิตภัณฑ์ อันเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิสูง อาจไม่สามารถทำได้เนื่องจากการสูญเสียตัวทำละลายมากเกินไปและด้วยเหตุผลทางด้าน ความปลอดภัย ดังนั้นจึงต้องอาศัยการพิจารณาความเหมาะสมในหลาย ๆ ประการในการเลือก อุณหภูมิ

2.6.5 วัตถุประสงค์และวัตถุประสงค์แห่ง

โดยทั่วไปแล้วการสักรัดจะได้ผลดีเมื่อเราสามารถสกัดสารจากพืชสด (นันทวัน, 2534; วีระ, 2546) โดยการนำเอาพืชสดที่เก็บมาคั้นกับแอลกอฮอล์เพื่อฆ่าเอนไซม์เสียก่อนเป็น การป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากนั้นจึงนำไปทำการสักรัดหรือเก็บพืชสดมาแช่แอลกอฮอล์ ระหว่างที่ยังไม่ได้ทำการสักรัด แต่วิธีเหล่านี้ไม่สะดวกและไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้อง นำเอาตัวอย่างพืชสดมาทำให้แห้งเสียก่อน วิธีทำให้แห้งโดยยังคงคุณภาพของสมุนไพรจะ ทำให้แห้งโดยวิธีที่เร็วและใช้อุณหภูมิต่ำ ๆ เพราะอุณหภูมิที่สูงจะทำให้สารสำคัญสลายหรือ เปลี่ยนแปลงไปได้ทำให้แห้งอาจทำได้โดย

(1) อบแห้งด้วยลมร้อน (Air drying) ซึ่งเป็นการทำให้แห้งในอากาศอาจจะเป็น การทำให้แห้งในที่ร่ม (Shade drying) หรือตากแดด (Sun drying)

(2) แหล่งความร้อนเทียม (Artificial heat) เป็นการทำให้แห้งโดยใช้ความร้อนจาก พลังงานอื่น เช่น ไฟฟ้า ได้แก่ การทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบ ซึ่งจะมีการควบคุมอากาศที่ผ่านเข้าออก และอุณหภูมิ วิธีนี้จะดีกว่าวิธีแรกที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้แน่นอน

2.7 ขนุน (Jackfruit)

ขนุนมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Artocarpus Heterophyllus, Lamk.* อยู่ในตระกูล Moraceae มีลักษณะดังภาพประกอบ 2-3 ขนุนเป็นไม้ผลยืนต้นขนาดใหญ่ ปลูกง่าย เติบโตเร็ว ขนุน ไม่ค่อยมีโรคและแมลงรบกวน ต้นขนุนสามารถปลูกได้ในดินทั่วไปและปลูกได้ทุกภาคของ ประเทศไทย ผลขนุนมีขนาดใหญ่ รูปกลมหรือกลมยาว เปลือกมีหนามแหลมสั้นรอบผล เนื้อขนุน เป็นที่นิยมรับประทานกันทั่วไป เนื้อมีลักษณะเป็นขวงมีเมล็ดอยู่ข้างใน มีทั้งเนื้อชนิดหนา เนื้อบาง เนื้อแห้งกรอบ และเนื้อละเอียดของเนื้อแตกต่างกันไปแล้วแต่พันธุ์ แม้ว่าขนุนจะ ไม่ใช่ไม้ผลที่มี กำเนิดในประเทศไทย แต่ก็นำมาปลูกกันนานจนกลายเป็นพันธุ์ไม้ผล พื้นเมืองของไทยไป ขนุนที่ นิยมปลูกกันทั่วไปไปอยู่มี 2 ประเภท คือ ขนุนหนัง และขนุนละมุด

(1) ขนุนหนัง มีลักษณะเนื้อขวงแห้งกรอบ สีเหลืองทอง สีจำปา ขวงโต เนื้อแน่น หวาน กรอบ นิยมปลูกกันโดยทั่วไป ขนุนหนังมีอยู่หลายพันธุ์ เช่น จำปา ตาบัว ฟ้าถล่ม เป็นต้น

(2) ขนุนละมุด มีลักษณะเนื้อขวงเป็ยก และเหนียว เนื้อค่อนข้างบาง ขวงเล็ก รสหวาน มีกลิ่นหอม ขนุนพันธุ์นี้ไม่ค่อยนิยมปลูกกันมากนัก อีกพวกหนึ่ง ซึ่งนิยมปลูกกันมากทางภาคใต้ของประเทศไทยคือ จำปาคะ ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายขนุน ผลเล็กยาวเรียวยาวคล้ายผลพริก เปลือกบาง เนื้อและ รสหวาน กลิ่นหอม การปลูกและการดูแลรักษาปฏิบัติเช่นเดียวกับการปลูกขนุน



ภาพประกอบ 2-3 ลักษณะของขนุน

ต้นขนุนที่ปลูกด้วยกิ่งตอน กิ่งทาบ จะออกดอกและผลประมาณปีที่ 3-4 หลังจากปลูก ส่วนการปลูกด้วยเมล็ดจะให้ผลประมาณปีที่ 4-6 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการบำรุงรักษาต้นด้วย ปกติจะออกผลปี ละสองครั้ง คือครั้งแรกราวเดือน ธันวาคม มกราคม และครั้งที่สองราวเดือน เมษายน พฤษภาคม และมีบางต้นที่ให้ผลตลอดปีก็มี สำหรับผลผลิตนั้น แล้วแต่ขนาดของต้น เช่น ต้นอายุ 10 ปีขึ้นไป จะมีผลประมาณ 40-50 ผลต่อปีแหล่งปลูกที่สำคัญได้แก่ ชลบุรี ระยอง ปราจีนบุรี ประจวบคีรีขันธ์ สงขลา กาญจนบุรี เพชรบุรี นครราชสีมา เป็นต้น

จากสถิติการปลูกขนุนหนึ่งในปี 2546 ประเทศไทยมีการปลูกกระจายอยู่ทั่วทุกภาคคิดเป็นพื้นที่ทั้งหมด 289,286 ไร่ ผลผลิตรวม 828,611 ตัน และมีราคาเฉลี่ย 6.68 บาทต่อกิโลกรัม (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2546)

ขนุนเป็นที่นิยมบริโภคทั่วไปทั้งในและต่างประเทศ ผลขนุนสามารถบริโภคได้ทั้งผลดิบและสุก โดยที่ผลดิบหรือผลอ่อนนำไปประกอบอาหารได้ สำหรับผลสุกจะรับประทานส่วนของเนื้อขวงสดหรือนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เช่น ขนุนในน้ำเชื่อม กระป๋อง ขนุนอบแห้ง ขนุนกวน น้ำขนุนหวานเข้มข้น เครื่องดื่มน้ำขนุนชนิดผงและเม็ด ขนุนแผ่นบาง แยมขนุน ขนุนทอด ขนุนอบกรอบ รวมทั้งใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ไอศกรีมกระทิรวมมิตรและฟรุ้ตคอกเทล เป็นต้น ส่วนเมล็ดขนุนต้มใส่เกลือรับประทานเป็นอาหารว่างหรือทำแป้งจากเมล็ดขนุน กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ (2527) ได้รวบรวมองค์ประกอบ

ในส่วนต่าง ๆ ของผลขนุน มีรายละเอียดดังตาราง 2-3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมล็ดขนุนดิบมีคุณค่าทางอาหารไม่น้อยกว่าส่วนของเนื้อมง

ตาราง 2-3 องค์ประกอบของขนุนแก่ ขั้วขนุนและเมล็ดขนุนดิบ (กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ, 2527)

องค์ประกอบ	ขนุนแก่	ขั้วขนุน	เมล็ดขนุนดิบ
ความชื้น (ร้อยละ)	72.90	66.60	60.70
ไขมัน (ร้อยละ)	0.30	0.00	0.20
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	23.70	29.20	30.60
ใยอาหาร (ร้อยละ)	0.90	1.80	1.60
โปรตีน (ร้อยละ)	1.70	1.40	5.50
พลังงานความร้อน (kcal/100g)	94.00	122.00	146.00
แคลเซียม (mg/100g)	27.00	21.00	0.00
ฟอสฟอรัส (mg/100g)	38.00	13.00	105.00
เหล็ก (mg/100g)	0.60	0.20	2.90
วิตามินบี 1 (mg/100g)	0.09	0.08	1.74
วิตามินบี 2 (mg/100g)	0.11	0.15	0.02
วิตามินซี (mg/100g)	9.00	13.00	3.25
ไนอาซิน (mg/100g)	0.70	-	24.00
วิตามินเอ (หน่วยสากล IU)	392.00	-	22.00

2.8 หลักการออกแบบชุดสกัดแบบต่อเนื่อง

อุปกรณ์ในการสกัดพืชเกษตรขึ้นอยู่กับขนาดของการดำเนินการและชนิดของการสกัด ซึ่งการออกแบบชุดสกัดแบบต่อเนื่องจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนชุดสกัด (Extractor) และส่วนชุดระเหยตัวทำละลายแบบสุญญากาศ (Vacuum evaporator) โดยมีหลักการออกแบบพื้นฐานดังต่อไปนี้

2.8.1 การออกแบบขนาดถัง

ถังที่ใช้ในอุตสาหกรรม มีรูปร่างต่าง ๆ กัน ที่นิยมใช้กันมาก คือใช้ถังกลมเป็นถังเก็บวัตถุดิบหรือผลผลิต ส่วนถังทรงกระบอกอาจใช้เป็นที่ถังเก็บ ถังปฏิกรณ์ คอลัมน์ (Column) หรือหอสูง (Tower) ทั้งนี้ขึ้นกับความดันในการใช้งาน ถังสกัดที่ใช้เป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งใน

การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของตัวถังมีได้หลายค่า สำหรับความจุเดียวกัน การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่เหมาะสมนี้ เป็นการคำนวณแบบซ้ำแล้วซ้ำอีก (Iteration) เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมและเสียค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างต่ำสุด เนื่องจากการคำนวณหาความหนาของถัง ซึ่งสามารถใช้งานได้ตามอุณหภูมิและความดันที่กำหนด ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังด้วย มีขั้นตอนคำนวณคร่าว ๆ (สุธรรม, 2548) ดังนี้

- (1) กำหนดอุณหภูมิ ความดัน ความจุ และหาข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของของไหล
- (2) เลือกวัสดุ วิธีการเชื่อมต่อ และกำหนดชนิดของฝาถัง
- (3) กำหนดค่าความเค้นในการออกแบบ
- (4) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตัวถัง
- (5) คำนวณความยาวของตัวถังตามความจุของตัวถัง
- (6) กำหนดค่าความหนาของตัวถังและฝาถัง
- (7) ประมาณค่าปริมาณวัสดุที่ใช้
- (8) ประเมินราคาถังที่สร้างขึ้นตามรายละเอียดที่กำหนด และใช้วัสดุที่เลือกใน

การจัดสร้าง

- (9) ใช้เงื่อนไขด้านค่าใช้จ่าย เพื่อให้ได้รายละเอียดเฉพาะของถังที่เหมาะสมที่สุด

ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

ขั้นตอนการกำหนดความหนาของถังบรรยากาศ

(1) กำหนดค่าอุณหภูมิในการออกแบบ (Design temperature, T_{des}) กรณีใช้งานตั้งแต่อุณหภูมิห้องขึ้นไปกำหนดจากค่าอุณหภูมิบวก 30°C หรือกรณีใช้งานตั้งแต่อุณหภูมิลงมา ใช้ค่าอุณหภูมิต่ำสำหรับสุดที่เป็นไปได้

(2) กำหนดค่าความดันในการออกแบบ (Design pressure, P_{des}) โดยใช้ค่าสูงสุดจาก

กรณีที่ 1 เมื่อมีข้อมูลของความดันสูงสุดที่เป็นไปได้ (Maximum pressure, P_{max}) กำหนดจากค่าความดันที่ตั้งไว้ที่อุปกรณ์ควบคุม โดยเผื่อสำรองไว้ประมาณ 5-10%

กรณีที่ 2 เมื่อมีข้อมูลเฉพาะความดันใช้งานปกติ (Normal operation pressure, P_n) เพื่อสำรองไว้ประมาณ 10-25% แล้วแต่ว่าความดันใช้งานปกติความเบี่ยงเบน (Fluctuation) มากน้อยเพียงใด

กำหนดวัสดุ ในอุตสาหกรรมอาหารจะใช้เหล็กปลอดสนิม (Stainless steel) หรือ อลูมิเนียม ซึ่งเลือกเหล็กปลอดสนิม

(3) เลือกวิธีการเชื่อมต่อกำหนดค่าประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ (Joint efficiency, f) ซึ่งเลือกแบบ Double melted butt joint ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสายตา มีค่า f เท่ากับ 0.75

(4) กำหนดค่าความเค้นในการออกแบบ (Design stress, S_{des}) โดยกำหนดจากค่าที่ต่ำสุดจากกรณีต่าง ๆ ดังสมการ 2-1

$$\begin{aligned} S_{des} &= \frac{1}{4} S_{ultimate} * f \\ S_{des} &= \frac{5}{8} S_{yield} * f \\ S_{des} &= S_{plate} * f \end{aligned} \quad (2-1)$$

(5) เลือกชนิดของฝาถัง เลือกใช้ฝาถังแบน ชนิดฝาถัง Gasket (Full)

$$t = C_p D_e \sqrt{\frac{P_{des}}{S_{des}}} \quad (2-2)$$

$$C_p = 0.40$$

D_e = เส้นผ่านศูนย์กลางของวงร่อนสกรู

(6) กำหนดความหนาต่ำสุดที่ปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน

รวมความหนาของตัวถังและค่าความหนาตัวถังที่คำนวณได้ กับความหนาที่ชดเชยการกัดกร่อน (Corrosion allowance, C) อัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ควรอยู่ระหว่าง 0.025-1.25 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งเหล็กไร้สนิมเป็นวัสดุที่มีราคาการกัดกร่อนต่ำจึงใช้ค่า C เท่ากับ 1 mm.

(7) กำหนดความหนาของตัวถังและฝาถังในการจัดสร้าง

ตรวจสอบความหนาของตัวถังและฝาถังที่กำหนด กับความหนาของโลหะแผ่นที่ใช้ในการสร้างที่มีจำหน่าย (Available thickness, t_a) โดยใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับความหนาของตัวถังและฝาถังที่กำหนดในทางสูง

2.8.2 การออกแบบถังระเหยสุญญากาศ

การออกแบบถังสุญญากาศมีขั้นตอนพื้นฐาน (สุธรรม, 2548) ดังนี้

(1) กำหนดค่าอุณหภูมิในการออกแบบ (Design temperature, T_{des}) กรณีใช้งานตั้งแต่อุณหภูมิห้องขึ้นไปกำหนดจากค่าอุณหภูมิมวก 30

(2) กำหนดความดันในการออกแบบ ในระบบสุญญากาศจะใช้ความดันในการออกแบบตามความดันภายนอกตัวถัง

(3) เลือกวัสดุในงานอาหารใช้เป็น Stainless steel 304 ชนิดฝาถังเป็นรูปไข่ และเลือกวิธีการเชื่อมต่อนแบบ Double melted butt joint ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสายตา

(4) หาข้อมูลโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) และสัดส่วนพัวซอง (Poisson's ratio, V) ของวัสดุที่เลือก หากเป็นไปได้ควรกำหนดเป็นค่าที่อุณหภูมิในการออกแบบ โดยโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (E) คือสัดส่วนระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ของวัสดุในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรง และสัดส่วนพัวซอง V คือสัดส่วนระหว่างความเครียดในแนวที่ตั้งฉากกับแรง (Lateral strain) กับความเครียดในแนวเดียวกับแรง (Axial strain) ซึ่งสำหรับ Stainless steel นั้น ค่า $E = 19700 \text{ N/mm}^2$ และค่า $V = 0.32$ (Perry handbook, table 28.18)

(5) กำหนดความหนาของตัวถังทรงกระบอก โดยกำหนดความหนาดั้งเดิม (Initial thickness, t_i) เท่ากับ 3 mm กำหนดความหนาในการทดสอบ, t_{test} จากความหนาดั้งเดิมและความหนาขนาดเซกการกักร่อน (C) 1 mm โดย $t_{\text{test}} = t_i - C = 2 \text{ mm}$

(6) คำนวณความยาววิกฤติ (Critical length, L_c) จากความหนาในการทดสอบจากสมการ

$$L_c = 1.14(1 - V^2)^{\frac{1}{4}} D_o \left(\frac{D_o}{t_{\text{test}}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

โดยกำหนดให้ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน D_i มีค่าเป็น 300 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก D_o มีค่าเท่ากับ $D_i + 2C = 306 \text{ mm}$ ดังนั้น $L_c = 4201.362 \text{ mm}$

(7) กำหนดความยาวตัวถังที่ใช้ในการคำนวณ (Adjusted vessel length, L') จากสมการ

$$L' = L + \frac{2h}{3}$$

เมื่อ h คือความสูงของฝาถังมีค่าเท่ากับ $D_i/4$ ดังนั้น $L' = 550 \text{ mm}$

เปรียบเทียบ L' กับ L_c เพื่อหาค่าความดันวิกฤติ P_c

เมื่อ $L_c > L'$ จะได้ว่า

$$P_c \approx 2.80 \left(\frac{D_o}{t_{\text{test}}} \right)^{-2.5} \left(\frac{L'}{D_o} \right)^{-1} = 1.06 \text{ MPa}$$

(8) คำนวณความดันภายนอกถังที่ยอมรับได้ (Allowable pressure, P_a) จากความดันวิกฤติที่คำนวณได้ และสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (Safety factor, S_F) ซึ่งในกรณีนี้ถึงสัญญาภาคนิยมใช้ $S_F = 4$

$$P_a = \frac{P_c}{4} = 0.265 \text{ MPa}$$

(9) ตรวจสอบความดันภายนอกถังที่ยอมรับได้ กับความดันภายนอกถังในการออกแบบ (P_{des})

โดยค่าของ P_a จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ P_{des} ซึ่งจากการคำนวณพบว่า $P_a \geq P_{des}$ ดังนั้นกำหนดค่าความหนาตั้งต้นเป็นความหนาที่ใช้ในการจัดสร้าง (t)

ถังระเหยขนาดใหญ่มีฝาถังรูปโค้ง ใช้ฮีตเตอร์แบบรัดท่อ 2 อัน รัศรอบตัวถังระเหยจากภายนอก มีปี่เพื่อหมุนเวียนและฉีดฝอยเพื่อเพิ่มอัตราการระเหย ส่วนถังระเหยขนาดเล็กมีฝาถังแบบโค้งและใช้ฮีตเตอร์แบบรัดท่อ 2 อัน เช่นเดียวกัน

2.8.3 การออกแบบเครื่องควบแน่น

ทั่วไปปัญหาหลักในการออกแบบเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่สองประการ ประการแรก คือการคำนวณหาสมรรถนะของเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้ออกแบบสร้างไว้แล้ว ประการที่สอง คือการออกแบบกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ของเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน จากข้อมูลความต้องการของกระบวนการหรือหน่วย โดยแบ่งวิธีการออกแบบออกเป็นสองระดับ ระดับแรกเป็นการออกแบบอย่างรวบรัด โดยใช้ความรู้พื้นฐานจากการถ่ายโอนและคุณความร้อน ระดับที่สอง เป็นการให้รายละเอียดสำหรับเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นการคำนวณในลักษณะการทำซ้ำ (Iterative) (สุธรรม, 2548)

ชนิดของเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนอาจแบ่งได้เป็นชนิดต่าง ๆ ตามลักษณะของการออกแบบ ซึ่งการออกแบบเครื่องควบแน่นสำหรับเครื่องสกัดนี้ ใช้แบบท่อและเปลือก (Shell & tube heat exchanger) ซึ่งประกอบด้วยตัว Shell เป็นรูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ ภายในบรรจุท่อขนาดเล็กไว้จำนวนมาก ท่อเหล่านี้จัดเรียงไว้อย่างเป็นระเบียบด้วยแผ่นยึดท่อ (Tube sheet) โดยแบ่งเป็นประเภทย่อย ๆ ตามมาตรฐานของ TEMA (Tubular exchanger manufacturer association) เป็น 4 แบบ คือ Fixed tube sheet, Floating head, U-tube หรือ U-bend และ Kettle ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงด้านราคา งานที่ใช้และข้อจำกัดต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ทำการควบแน่นไอของเอทานอล 50% (v/v) ที่อุณหภูมิไม่เกิน 100°C (อุณหภูมิทั้งสองไม่เกิน 100°C) ในการจัดสร้างจึงเลือกเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน Shell & tube แบบ Fixed tube sheet

การออกแบบระดับแรก (Level 1) เพื่อใช้กำหนดชนิดของเครื่องมือแลกเปลี่ยน ความร้อน ความต้องการความร้อน รวมทั้งกำหนดพื้นที่ถ่ายโอนความร้อนอย่างคร่าว ๆ เพื่อใช้ในการประเมินราคาหรือใช้เป็นค่าตั้งต้นในการกำหนดรายละเอียดของเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับการออกแบบระดับสูงต่อไป

เลือกชนิดเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม และสอดคล้องกับความต้องการของงาน

(1) กำหนดอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer rate, Q) หรือภาระทางความร้อน (Heat duty, Q)

$$Q = \left(\frac{1000}{3600} \right) W_p C_p |T_1 - T_2| + \left(\frac{1000}{3600} \right) W_p \lambda \quad (2-3)$$

(2) ใช้สมการดุลความร้อน (Heat balance)

$$W_p C_p (T_2 - T_1) = W_s C_s (t_1 - t_2) + W_s \lambda \quad (2-4)$$

(3) หาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (Logarithmic mean temperature difference, LMTD)

$$LMTD = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln \left(\frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2} \right)} \quad (2-5)$$

(4) กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้อุณหภูมิ (Temperature correction factor, F_T) ซึ่งเป็นดัชนีบอกความเบี่ยงเบนจากกระบวนการถ่ายโอนความร้อนแบบสวนทาง โดยการออกแบบระดับนี้ ใช้ค่า $F_T = 0.8$

(5) กำหนดค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (Mean temperature difference, ΔT_{mean})

$$\Delta T_{mean} = F_T \cdot LMTD \quad (2-6)$$

(6) ประมาณหรือกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U)

(7) ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ของตะกรัน (Fouling factor หรือ Fouling resistance, r_p) ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อใช้งาน (Service heat transfer coefficient, $U_{service}$) จากสมการ

$$\frac{1}{U_{service}} \approx \frac{1}{U} + r_p + r_{fs}$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{U_{service}} \approx \frac{1}{U} + \frac{1}{U_{fp}} + \frac{1}{U_{fs}} \quad (2-7)$$

(8) ประมาณค่าพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนเบื้องต้น (Preliminary heat transfer area, A_p)

$$A_p = \frac{Q}{U_{service} \cdot \Delta T_{mean}} \quad (2-8)$$

พื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนเบื้องต้นที่ได้ อาจใช้ข้อมูลพื้นฐานในการจัดหาหรือประมาณราคาเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน รวมทั้งใช้เป็นค่าตั้งต้นในการกำหนดรายละเอียดของเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป

การกำหนดรายละเอียดของเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Shell & tube

การกำหนดรายละเอียดของเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Shell & tube เป็นกรออกแบบในระดับสอง (Level II)

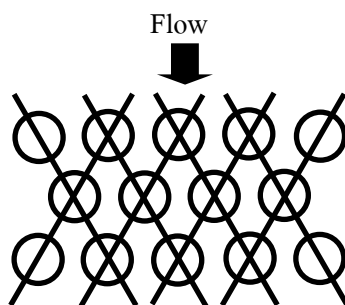
(1) กำหนดสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อใช้งาน และพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนเบื้องต้น

(2) กำหนดลักษณะการไหลของของไหล (Fluid designation) ในงานวิจัยนี้ให้น้ำหล่อเย็นอยู่ในท่อ (Tube side fluid) และไอจากสารละลายเอทานอล 50% อยู่ในตัวถัง (Shell side fluid)

(3) กำหนดแบบของเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งใช้ Fixed tube sheet

(4) กำหนดขนาดท่อ การจัดเรียงท่อ วัสดุที่ใช้ทำท่อ และการจัดวางท่อ คือ ลักษณะของการจัดเรียงท่อบน Tube sheet ซึ่งได้ใช้แบบ In-line triangular pitch ดังภาพประกอบ 2-4

ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดท่อและระยะระหว่างท่อที่ใช้ในการออกแบบ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (Tube outside diameter, d_o) ระยะระหว่างท่อ (Tube pitch, P_T) ซึ่งเป็นระยะระหว่างศูนย์กลาง-ศูนย์กลางของท่อที่อยู่ติดกันและช่องว่างระหว่างท่อ (Tube clearance, C')



ภาพประกอบ 2-4 การจัดวางท่อแบบ In-line triangular pitch (สุธรรม, 2548)

เมื่อกำหนดขนาดและเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อแล้ว คำนวณค่าความหนาต่ำสุดของท่อที่ปลอดภัย (t_m) จากสมการที่ 2-10

$$t_m = \frac{d_0}{2.3} \left(\frac{P_s}{S_s} + \frac{1}{30} \right) + C \quad (2-10)$$

P_s คือ ความดันที่ใช้งานที่ปลอดภัย (Safe working pressure)

S_s คือ ค่าความเค้นตามแนวเส้นท่อที่ปลอดภัย (Safe working stress)

(5) กำหนดจำนวน Tube Pass (Number of tube pass, n_{TP}) และจำนวน Shell pass (Number of shell pass, n_{SP})

จำนวน Tube pass คือ จำนวนแนวทางการไหลไปมาของของไหลในท่อ

จำนวน Shell pass คือ จำนวนแนวทางการไหลไปมาของของไหลในตัวถัง

(6) ค่าของสัมประสิทธิ์ปรับแก้อุณหภูมิ (F_T)

สัดส่วนผลต่างอุณหภูมิของของไหล (R)

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (2-11)$$

ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ (S)

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (2-12)$$

สมการที่นำเสนอโดย Blackwell และ Haydu (1981)

เมื่อ $R \neq 1$

$$X = \frac{1 - \left(\frac{RS - 1}{s - 1} \right)^{1/n_p}}{R - \left(\frac{RS - 1}{S - 1} \right)^{1/n_p}} \quad (2-13)$$

$$F_T = \left[\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \right] \frac{\ln \left(\frac{1 - X}{1 - RX} \right)}{\ln \left(\frac{2/X - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{2/X - 1 - R - \sqrt{R^2 + 1}} \right)} \quad (2-14)$$

โดยค่า F_T ไม่น้อยกว่า 0.8 หรือในกรณีที่จำเป็น ค่าต่ำสุดของ F_T ไม่ต่ำกว่า 0.75

(7) คำนวณค่าของผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (ΔT_{mean}) ใหม่ จากสมการ

$$\Delta T_{mean} = F_T \cdot LMTD \quad (2-15)$$

(8) ปรับแก้ค่าของพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนเบื้องต้น (A_p) ใหม่ จาก

$$A_p = \frac{Q}{U_{service} \Delta T_{mean}} \quad (2-16)$$

(9) กำหนดความยาวท่อ (Tube length, L_T)

ค่าความยาวท่อแนะนำตั้งต้น คือ 4000 mm. ปรับเพิ่มหรือลดคราวละ 250 หรือ 500 mm.

(10) ประมาณค่าความยาวประสิทธิภาพของท่อ (Effective tube length, L_{eff})

$$L_{eff} = L_T - 75 \text{ mm.} \quad (2-17)$$

(11) กำหนดขนาดระบุของตัวถัง (Shell nominal diameter, D) ตามจำนวนท่อการจัดเรียงท่อบน Tube sheet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และระยะระหว่างท่อ

การประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลุ่มท่อ (Tube bundle diameter, D_b) จากสมการ

$$D_b = d_0 \left(\frac{n_T}{K} \right)^{1/n} \quad (2-18)$$

(12) ค่าคงที่สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางกลุ่มท่อ จำนวน Tube pass 1 และจัดเรียงท่อแบบสามเหลี่ยม จะได้ค่าคงที่

K เท่ากับ 0.319

N เท่ากับ 2.142

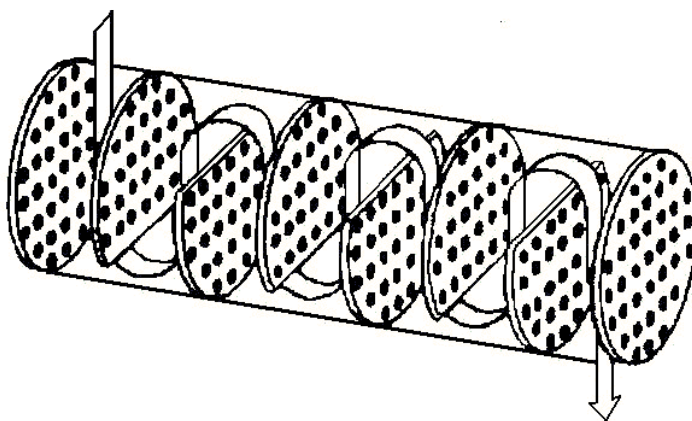
(13) ระยะขอบในตั้วถัง (Bundle clearance, C_b) ตามลักษณะของตั้วถัง Fixed tube sheet

$$C_b = 8 + 0.01D_b \quad (2-19)$$

ตรวจสอบสัดส่วนระหว่างความยาวท่อ (L_T) กับขนาดตั้วถังที่เหมาะสม ควรอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 8 แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่จำเป็นมากนัก ถ้ามีเงื่อนไขอื่นที่สำคัญกว่ามาเป็นตัวกำหนด

(14) กำหนดรายละเอียดของแผ่นขวางการไหลในตั้วถัง (Baffles)

แผ่นขวางการไหลในตั้วถัง คือแผ่นโลหะบาง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในตั้วถัง เพื่อบังคับแนวการไหลของของไหลในตั้วถัง ให้ตัดขวางท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และหมุนวนไปมาในตั้วถัง การติดตั้งและการกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่น ชนิดแผ่นตั้วขวาง Segmental แบบ Up-and-down ดังภาพประกอบ 2-5 มีร้อยละการตัด (Percent baffle cut, P_{BC}) มีค่าตั้งต้นร้อยละการตัด 25 และระยะระหว่างแผ่นตัดขวาง (Baffle spacing, P_B) ซึ่งปกติมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 เท่า ถึง 1.0 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในตั้วถังและไม่น้อยกว่า 50 mm. ค่าตั้งต้นที่กำหนด คือ ค่าที่สูงกว่าระหว่าง 0.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางในตั้วถัง และระยะ 50 mm.



ภาพประกอบ 2-5 แผ่นขวางแนวการไหล ชนิด Segmental แบบ Up-and-down (สุธรรม, 2548)

2.8.4 การออกแบบถังให้ความร้อน

การออกแบบถังบรรยากาศมีขั้นตอนพื้นฐาน ดังนี้ ถังให้ความร้อนเป็นถังสำหรับต้มน้ำมันหรือตัวกลาง ในควบคุมอุณหภูมิของตัวทำละลายในถังสกัดทั้งสาม จึงจัดสร้างถังรูปทรงกระบอกและมีฝาถังแบบแบน ให้ความร้อนตัวกลางในถังให้ความร้อนด้วยคอยล์ความร้อน

(Heating coil) ขนาด 10 kW และปั๊มตัวกลางผ่านท่อทองแดงที่ขดไว้ในถังสี่เหลี่ยม (สุพรรณ, 2548)

2.9 วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา เพิ่มประสิทธิภาพและหาสภาวะที่เหมาะสม ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักคณิตศาสตร์และสถิติ ใช้หลักการเหล่านี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดยประกอบขึ้นจากผลตัวแปรอิสระ ซึ่งอาจมีตัวแปรเดียวหรือหลายตัวแปร ในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรอิสระจากการทดลองมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปผลตอบสนองของพื้นผิวตอบสนอง โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับข้อมูลดิบแสดงดังสมการ 2-20

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-20)$$

โดยที่ Y คือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น

f คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบสนอง

x_1, x_2, \dots, x_n คือ ตัวแปรอิสระ

n คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแหล่งต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถ

รวบรวมไว้ใน f ได้ โดยก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด มีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM มีขั้นตอน ดังนี้

การกำหนดตัวแปรที่จะศึกษาประกอบด้วยตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งกระบวนการทางเคมีและชีวเคมีที่มีผลกระทบจากตัวแปรต่าง ๆ มากมาย เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ความจำเป็นที่เลือกตัวแปรบางตัวที่มีผลกระทบโดยตรง ในการทดลองมีความสำคัญที่ระบุตัวแปรอิสระ จะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนาระดับความสำคัญของตัวแปรได้ เพราะจะเกี่ยวข้องต่อความสำเร็จในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยตรง

ผลการทดลองของตัวแปรอิสระแสดงในการพล็อตพื้นผิว (Surface plot) และมีการพล็อตแบบโครงร่าง (Contour plot) โดยการพล็อตแบบโครงร่างจะแสดงรูปร่างและตำแหน่งของการพล็อตพื้นผิวได้แม่นยำขึ้น การ Regression analysis แบบจำลองของสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ดังสมการที่ 2-21 โดยค่า Y เป็นตัวแปรตาม A_0, A_1, A_{ii} และ A_{ij} เป็น

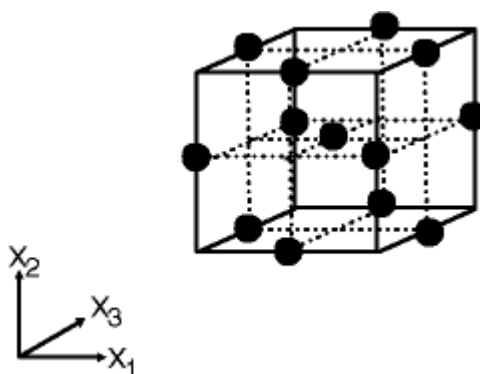
ค่าสัมประสิทธิ์แบบจุดตัด (Intercept) สัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear) สัมประสิทธิ์กำลังสอง (Quadratic) และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน (Interaction) ตามลำดับ ขณะที่ X_i และ X_j เป็นตัวแปรอิสระ ($i \neq j$)

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 3 ตัวแปร

$$Y = \sum A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i X_i + \sum_{i=1}^3 A_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 A_{ij} X_i X_j \quad (2-21)$$

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีประโยชน์มากเมื่อเปรียบเทียบกับ การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีดั้งเดิม ได้แก่ การออกแบบด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีจำนวนชุดการทดลองน้อยกว่าวิธีดั้งเดิม ซึ่งแบบดั้งเดิมจะมีจำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ แต่วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีความเป็นไปได้ที่เจอผลกระทบภายใน (Interactive effect) จากตัวแปรอิสระจากกระบวนการทางชีวเคมี ในสมการอย่างง่ายของวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองจะเพิ่มความเข้าใจผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่าง ๆ จากสมการพบว่า มีผลตอบสนองสอดคล้องกับการทดลองของตัวแปรอิสระต่าง ๆ จึงกล่าวได้ว่าเทคนิค RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์มากต่อการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทางชีวเคมีและกระบวนการทางเคมี

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบสามระดับเพื่อฟิตพื้นผิวผลตอบสนอง สร้างขึ้นจากการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริสุทธิ์ ผลการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการจำนวนการทดลองที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบจะแสดงเป็น (0, -1 และ 1) การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ ดังภาพประกอบ 2-6 และไม่ได้รวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากจุดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-level combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพของกระบวนการ



ภาพประกอบ 2-6 จุดของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะในการทดลองด้วยแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-behnken design) และทำการแปลงรหัสตัวแปรอิสระ (Code variables) ตามตัวแปรเดิมได้ดังสมการ 2-22

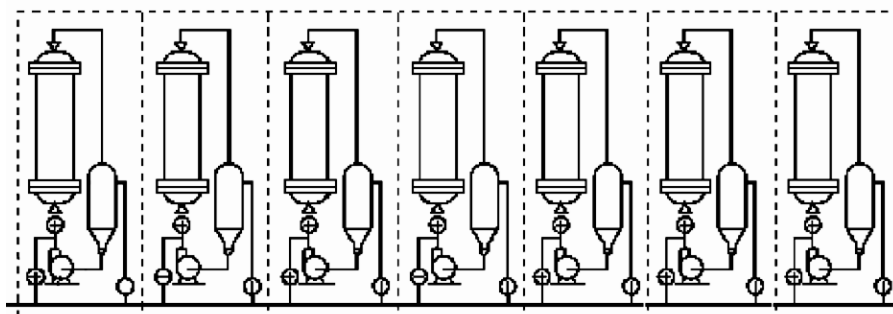
$$X = \left(\frac{x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \right) \quad (2-22)$$

โดยที่	X	คือ Code variable
	x	คือ ตัวแปรอิสระ
	x_{\min}	คือ ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ
	x_{\max}	คือ ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

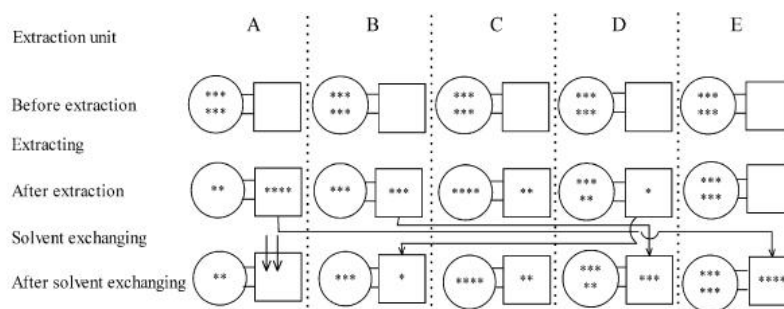
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ (1998) ทำการศึกษาการสกัด Glycyrrhizic acid จากชะเอมด้วยเทคนิคการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังสกัดจำนวน 5 ถัง ประกอบด้วยหน่วยสกัด 7 หน่วย แต่ละหน่วยมี ถังสกัด ถังตัวทำละลาย และปั๊ม แสดงดังภาพประกอบ 2-7 กระบวนการสกัดจะแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรก คือ ขั้นวางเงื่อนไข (Conditioning stage) แสดงดังภาพประกอบ 2-8 โดยปั๊มสารสกัดจากหน่วย A จะถ่ายโอนไปสู่หน่วย E แล้วปั๊มสารสกัดจากหน่วย B จะถ่ายไปสู่หน่วย D และเติมตัวทำละลายใหม่ในหน่วย A ซึ่งวัตถุดิบและตัวทำละลายจะใช้สัญลักษณ์วงกลม (○) และสี่เหลี่ยม (□) ตามลำดับ ขณะที่จำนวนสัญลักษณ์ดอกจัน (*) ภายในวงกลม

หรือสีเหลืองจะแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ Glycyrrhizic acid ในวัตถุดิบหรือตัวทำละลาย การย้ายตัวทำละลายทั้งหมดมีทิศทางตามลูกศร ขณะที่วัตถุดิบและตัวทำละลายที่ปล่อยออกหรือเติมเข้าใช้สัญลักษณ์ (↓) ตามด้วย ขั้นที่สอง คือ ขั้นตอนการสกัด (Extraction stage) แสดงดังภาพประกอบ 2-9 เป็นการย้ายวัตถุดิบและการย้ายตัวทำละลายในแต่ละขั้นตอนของการสกัดแบบต่อเนื่อง กระบวนการ 1-5 (Process 1-5) เป็นการดำเนินการสกัดรอบแรก ส่วนรอบที่ 2 จะมีการดำเนินการซ้ำในกระบวนการ 1-5 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการสกัดจาก 60 นาที เป็น 90 นาที จะได้ผลได้เพิ่มขึ้น และการใช้ 5 ชั้นจะได้ผลได้สูงกว่า 3 ชั้น การสกัดถึงเดียวซ้ำ 2 รอบ จะให้ผลได้สูงกว่าการสกัดแบบต่อเนื่อง 2 ชั้น แต่จะต้องใช้ตัวทำละลายเพิ่มขึ้นสองเท่าทำให้ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทำสารสกัดให้เข้มข้นขึ้นและกระบวนการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องจะให้ปริมาณสารที่สกัดได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยวิธีการสกัดขั้นเดียว การสกัดด้วยไมโครเวฟ การสกัดด้วยอุลตราโซนิก การสกัดด้วยชอกเล็ดและการสกัดที่อุณหภูมิห้อง ผลแสดงกระบวนการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องที่ให้ค่าผลได้ของการสกัด Glycyrrhizic acid สูงสุด ประหยัดเวลา พลังงานและตัวทำละลาย ซึ่งวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สุดในเวลาที่สั้นที่สุดกับค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดจะเป็นเทคโนโลยีในอุดมคติ กระบวนการสกัด

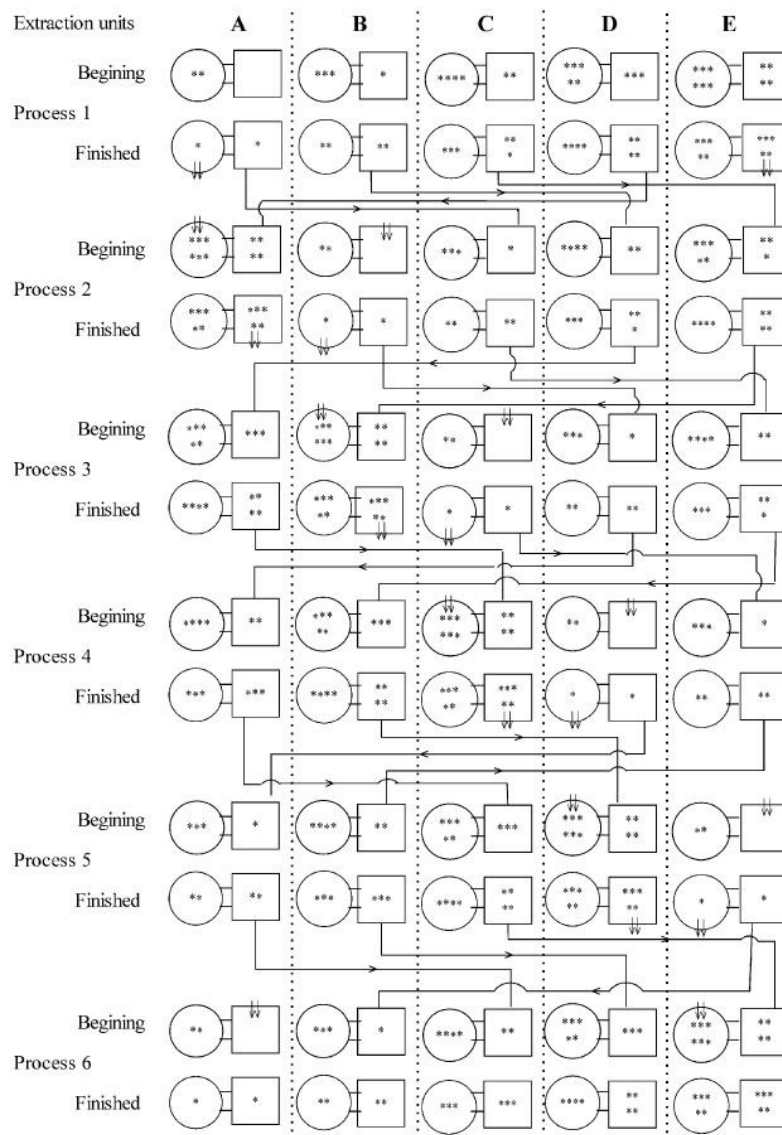


ภาพประกอบ 2-7 ชุดสกัด Glycyrrhizic acid จากชะเอม (Wang และคณะ, 1998)



ภาพประกอบ 2-8 เกรเดียนท์ (Gradient) ของความเข้มข้นของ Glycyrrhizic acid

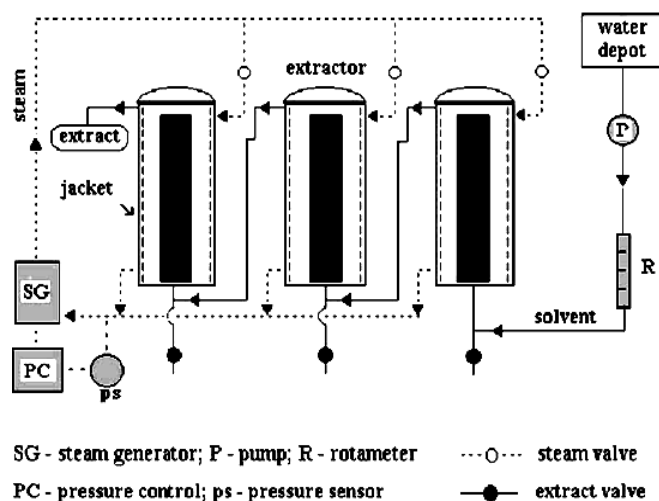
ในขั้นวางเงื่อนไข (Conditioning stage) (Wang และคณะ, 1998)



ภาพประกอบ 2-9 แผนผังทิศทางการไหลของกระบวนการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง
จำนวน 5 ขั้นตอน (Wang และคณะ, 1998)

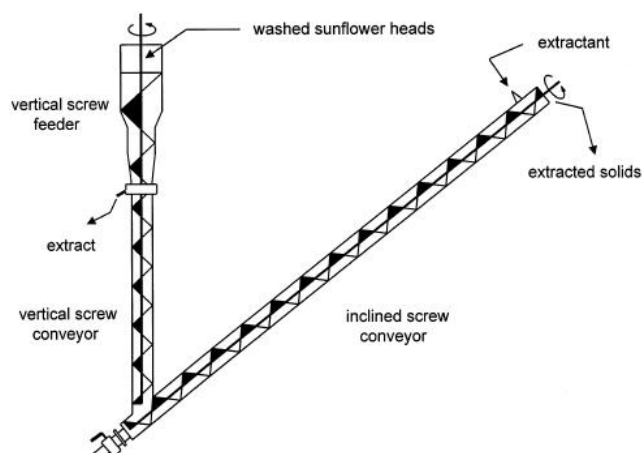
Senol และ Aydin (2006) ศึกษาการสกัดคาเฟอีนจากกากชาด้วยน้ำร้อนโดยใช้
ถังสกัดต่อแบบอนุกรม 3 ถัง และ 5 ถัง รวมทั้งอุปกรณ์ควบคุม ดังภาพประกอบ 2-10 โดยถังสกัด
ใช้น้ำเป็นตัวกลางให้ความร้อน เลือกตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสกัดเป็นน้ำร้อนและ
คลอโรฟอร์ม ลักษณะเด่นนี้เป็นประสิทธิภาพการสกัดของจำนวนถังสกัดจะใกล้เคียงกับจำนวน
สเตจของการชะละลาย จากการเติมตัวทำละลายให้ไหลสั้น ดังนั้นระยะเวลาการสกัดรวมหรือกล่าว
ได้ว่าเป็นอัตราการไหลโดยใช้ที่ 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 และ 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการสกัด

กาแฟอินทรีย์คั่วโรฟอร์มใน 3 ถึงจะมากกว่าการสกัดด้วยน้ำร้อนใน 5 ถึง แต่ความเหมาะสมการใช้ตัวทำละลาย โดยถ้ามีคั่วโรฟอร์มคั่วจะเป็นพิษและคั่วโรฟอร์มมีราคาสูง



ภาพประกอบ 2-10 ชุดสกัดกาแฟจากกากชา (Senol และ Aydin, 2006)

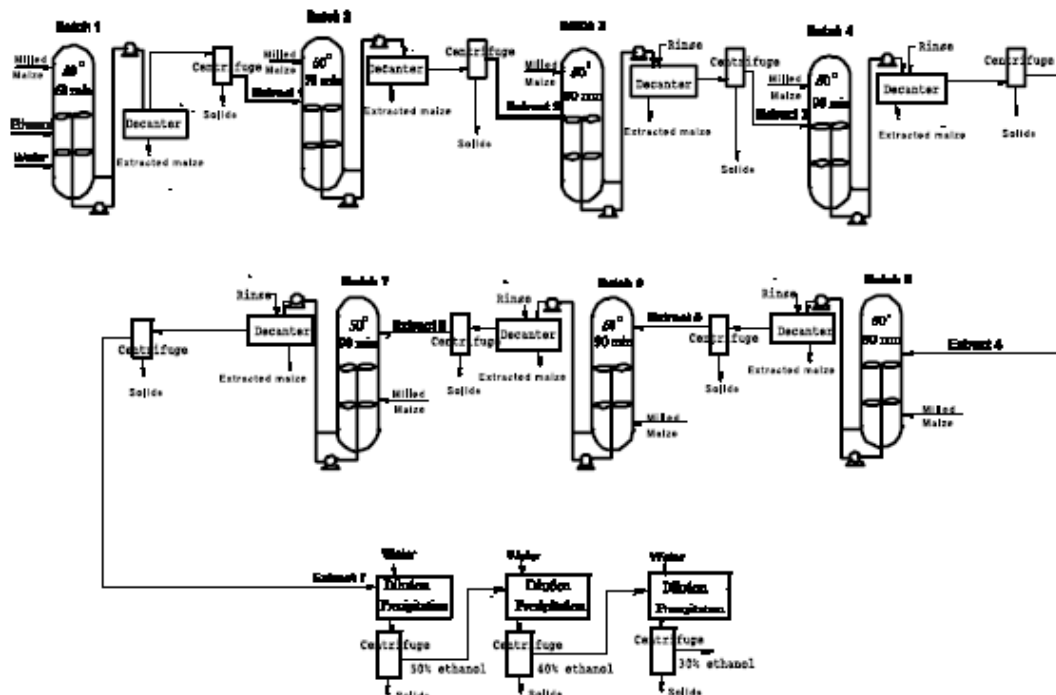
Wiesenborn และคณะ (1998) ได้ศึกษาการสกัดเพคตินจากเมล็ดทานตะวันด้วย Screw-conveyor ดังภาพประกอบ 2-11 ประกอบด้วย Screw-conveyor ที่ตั้งตรงและเอียง 45° และมีบอลลวลวดด้านล่างสำหรับปล่อยสารและทำความสะอาดเครื่องสกัด พบว่าสภาวะที่ได้ปริมาณเพคตินสูงสุดที่ pH 2-3.5 ที่สัดส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S ratio) เท่ากับ 32:1 (v/w) และสัดส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 30-45 ที่ pH เท่ากับ 2.3 ซึ่งการสกัดแบบต่อเนื่องจะให้ผลได้สูงกว่าแบบกะมากกว่า 100% ด้วยการใช้น้ำทำละลายที่น้อยกว่าด้วยขนาดเครื่องที่เล็กกว่าแบบกะ



ภาพประกอบ 2-11 อุปกรณ์ในการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่องที่ใช้สกัดเพคตินจากเมล็ดทานตะวัน (Wiesenborn และคณะ, 1996)

ยรรยงและคณะ (2547) ศึกษาการสกัดสารสำคัญจากฟ้าทะลายโจรด้วย แอลกอฮอล์ 95% (v/v) ในถังเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 50 ลิตร มีใบกวนแบบพิกซ์เบลด์เทอร์ไบน์ เข้าทางด้านข้างถัง ทำให้มีการกวนแบบที่ให้ทิศทางการไหลตามแนวแกน (Axial flow) โดยทำการทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในของเหลว ใช้สัดส่วนตัวทำละลายต่อฟ้าทะลายโจรบดแห้งที่ 10:1 (v/w) ความเร็วใบกวน 560, 840 และ 1,120 รอบต่อนาที และมุมในการกวน 10, 15 และ 20 องศา พบว่า ทุกความเร็วการกวนมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ มุมที่ดีที่สุด คือ 15 องศา และเวลาการสกัดถึงจุดสมดุลที่ 4 ชั่วโมง

Dickey และคณะ (2002) ศึกษาการสกัดโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำจากข้าวโพดบดด้วย เครื่องสกัดที่ต่อแบบอนุกรม โดยใช้สารละลายเอทานอลที่ให้ความร้อนและกวนผสม ภายหลัง การสกัดแต่ละอนุกรมจะผ่านการเซ็นทริฟิวซ์เพื่อแยกข้าวโพดและตัวทำละลาย ดังภาพประกอบ 2-12 ในการเลือกราคาของตัวทำละลายและการนำกลับมาใช้ใหม่ เพราะข้าวโพดมีโปรตีน ปริมาณต่ำหลังการสกัดหลายรอบและขนาดอนุภาคเล็ก แพรกชั้นของโปรตีนมีเพียง 0.05 ส่วนหลัง การสกัดมีแพรกชั้นของโปรตีนน้อยกว่า 0.015 ในการเพิ่มความเข้มข้นโปรตีนด้วยการใช้ ตัวทำละลายเดิมที่แยกแล้วมาสกัดข้าวโพดบดใหม่ซ้ำ ในชุดสกัดที่ต่อแบบอนุกรมจะสามารถใช้ในการ สกัดไหล-สวนทางแบบต่อเนื่องที่กล่าวถึงขนาดเชิงการค้า ทำละลายที่ผ่านการใช้งานจะสูญเสีย ตัวทำละลายไปกับอนุภาคที่ผ่านการสกัดและการลดความจุตัวทำละลายจะเหมาะการเพิ่มตัวละลาย หรือให้ของแข็งมีความเข้มข้นต่ำ โดยพิจารณาถึงองค์ประกอบและผลได้จากการสกัดไหลสวน- ทางแบบต่อเนื่องที่มีค่าสูงกว่าแบบกะ ซึ่งปริมาณโปรตีนในสารละลายจะมีไม่เกิน 2%



ภาพประกอบ 2-12 การสกัดโปรตีนจากข้าวโพดบดด้วยอนุกรมแบบกะ 7 ถึงต่อกัน

(Dickey และคณะ, 2002)

Lingyun และคณะ (2006) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดอินนูลินจากเยรูซาเล็มอะติโชค (Jerusalem artichoke) ซึ่งเป็นพืชที่มีอยู่ทั่วไปในตอนเหนือของประเทศจีนและเยรูซาเล็มอะติโชคมีปริมาณอินนูลิน 14-19% โดยศึกษาผลของพีเอช (pH) เวลา อุณหภูมิ และสัดส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิว-ผลตอบสนอง พบว่าให้ค่าผลได้ที่สูงที่สุด คือ 83.6% ด้วยพีเอชเป็นกลาง 20 นาที อุณหภูมิ 76.65°C และสัดส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง 10.56:1 (v/w) และทำการเปรียบเทียบวิธีการสกัดโดยพิจารณาเวลาและความเหมาะสม การสกัดแบบใช้คลื่นอุลโซนิกโดยอ้อม (Indirect sonication) ดีที่สุดเมื่อเทียบกับจากวิธีแบบถ่ายโอนความร้อนและการสกัดแบบใช้คลื่นอุลโซนิกโดยตรง (Direct sonication)

Wu และคณะ (2007) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ด Boat-fruited sterculia seed ด้วยเทคนิค RSM เพื่อออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ พีเอช เวลาสกัดและสัดส่วนของน้ำต่อเมล็ด ที่มีอิทธิพลต่อผลได้ ความบริสุทธิ์และความหนืดของพอลิแซคคาไรด์ เป้าหมายหลักของเทคนิค RSM เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลที่ให้ผลตัวแปรตามสูงสุด ซึ่งค่าตัวแปรที่เหมาะสมจะได้จากสมการ โดยสามารถพิจารณาได้หลายตัวแปร จากเทคนิค RSM ได้สภาวะที่ดีที่สุด คือ

อุณหภูมิ 60-65°C เวลา 2.3-3.1 ชั่วโมง พีเอช 7 และสัดส่วนน้ำต่อเมล็ด 75:1 (v/w) จากการทดลองสามารถทำนายโมเดลและมีสารสกัดที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม คือ คาร์โบไฮเดรต 58.2% โปรตีน 20% ความชื้น 9% และเถ้า 4.5% โดยพอลิแซคคาไรด์ประกอบด้วยกลูโคส 22.6% แรมโนส (Rhamnose) 10.0% อะราบินโนส (Arabinose) 7.9% กาแลคโตส (Galactose) 5.0% ไซโลส (Xylose) 0.8% และกรดกาแลคทูโรนิก (Galacturonic acid) 11.8%

Xiaoli และคณะ (2008) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์จากเมล็ดชิกพี (Chickpea seeds) ที่สกัดน้ำมันออกแล้ว ที่สภาวะที่ดีที่สุดทำการสกัดด้วยเอทานอล 50% (v/v) ที่สัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดชิกพี 10:1 (v/w) ที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 30 นาที โดยผลได้ของการสกัดเป็นกาแลคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (α -galactooligosaccharides) ซึ่งจะเป็นราฟฟินโนส (Raffinose) สเตชโยส (Stachyose) เวอร์เบสโคส (Verbascose) และไกลโคไซด์ (Glycoside) โดยกาแลคโตโอลิโกแซคคาไรด์ใช้เป็นพรีไบโอติกส์

Kim และคณะ (2003) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์จากถั่วเหลืองที่สกัดน้ำมันออกแล้ว สภาวะที่ดีที่สุดทำการสกัดด้วยสัดส่วนน้ำต่อถั่วเหลือง 5:1 (v/w) อุณหภูมิ 50°C ด้วยกระบวนการที่มีการกวน การเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยการใช้เอทานอล 10% (v/v) ให้ผลสกัดที่ดีกว่าน้ำกลั่น การทำให้ได้โอลิโกแซคคาไรด์บริสุทธิ์ด้วยอุลตราฟิльтраชัน (Ultra filtration) ซึ่งจะขจัดโปรตีนมากกว่า 90% ออกจากสารสกัด และเหลือฟรุกโตส ซูโครส ราฟฟินโนส และสเตชโยส เท่ากับ 38.6%, 51.4%, 54.2% และ 52.6% ตามลำดับ

Ekvall และคณะ (2006) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์ในกลุ่มราฟฟินโนสจากถั่ว (*Pisum sativum L.*) การสกัดด้วยเอทานอล 50% (v/v) จะมีผลได้เป็นสองเท่าจากการสกัดด้วยเอทานอล 80% (v/v) ราฟฟินโนสมี 3 ตัวคือ ราฟฟินโนส สเตชโยสและเวอร์เบสโคส การสกัดที่อุณหภูมิห้องและที่จุดเดือดจะให้ผลได้ที่เท่ากัน ระยะเวลาสกัด 30 นาที

Cai และคณะ (2007) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพอลิแซคคาไรด์จาก *Opuntia milpa alta* โดยศึกษาผลของเวลา อุณหภูมิ และสัดส่วนน้ำต่อวัตถุดิบ ด้วยเทคนิค RSM ผลได้ที่สูงที่สุดจากตัวแปรที่รวมกัน ที่อุณหภูมิ 86.1°C เวลา 3.61 ชั่วโมง และสัดส่วนน้ำต่อวัตถุดิบ 3.72:1 (v/w)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบ

รายงานความก้าวหน้าโครงการการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากพืช (2550) ได้ศึกษาการคัดเลือกวัตถุดิบจากพืช 32 ชนิด โดยพิจารณาจากปริมาณของ Indigestible polysaccharide ในสารสกัด ซึ่งพืชที่มี Indigestible polysaccharide ในสารสกัดสูงสุด 10 ชนิดแสดงดังตาราง 3-1 จากนั้นศึกษาการส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ 3 ชนิด ได้แก่ *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum* และ *Bifidobacterium bifidum* ด้วยการเติมตัวอย่างสารสกัดของพืชในปริมาณที่เท่ากัน

ตาราง 3-1 แสดงผลการคัดเลือกชนิดพืช เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดสารฟรีไบโอติกส์ (รายงานความก้าวหน้าโครงการการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากพืช, 2550)

ลำดับ	พืช	ส่วนสกัด	ตัวทำละลายที่ใช้สกัด % (v/v)	Indigestible polysaccharide in extract %(w/w)	Indigestible polysaccharide (mg/g extract)
1	ลูกตาล	เปลือก	เอทานอล 95%	70.58	705.80
2	ขนุน	เปลือก	เอทานอล 95%	69.81	698.08
3	ขนุน	เนื้อ	เอทานอล 95%	60.58	605.76
4	เงาะ	เนื้อ	เอทานอล 50%	56.68	566.83
5	จำปาอะ	เนื้อ	เอทานอล 95%	54.26	542.56
6	มะพร้าวอ่อน	เนื้อ	น้ำเย็น	51.39	513.87
7	กระเจียบเขียว	ฝัก	เอทานอล 50%	46.07	460.73
8	จาวตาล	จาวตาล	เอทานอล 50%	40.99	409.85
9	ขนุน	เมล็ด	เอทานอล 50%	40.34	403.44
10	ลูกตาล	เนื้อ	เอทานอล 95%	33.49	334.87

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณ Indigestible polysaccharide พบว่าเปลือกกลูคตาล และเปลือกด้านในขนุนมีปริมาณสูงสุด ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาการสกัดเปลือกด้านในและเมล็ดขนุน โดยเป็นขนุนพันธุ์ทองประเสริฐจากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ที่มีแหล่งขายอยู่ใกล้มหาวิทยาลัย โดยจะมีงานวิจัยที่ศึกษาการสกัดเปลือกกลูคตาลโดยนักศึกษาคณะอื่นควบคู่กัน

3.1.2 สารเคมี

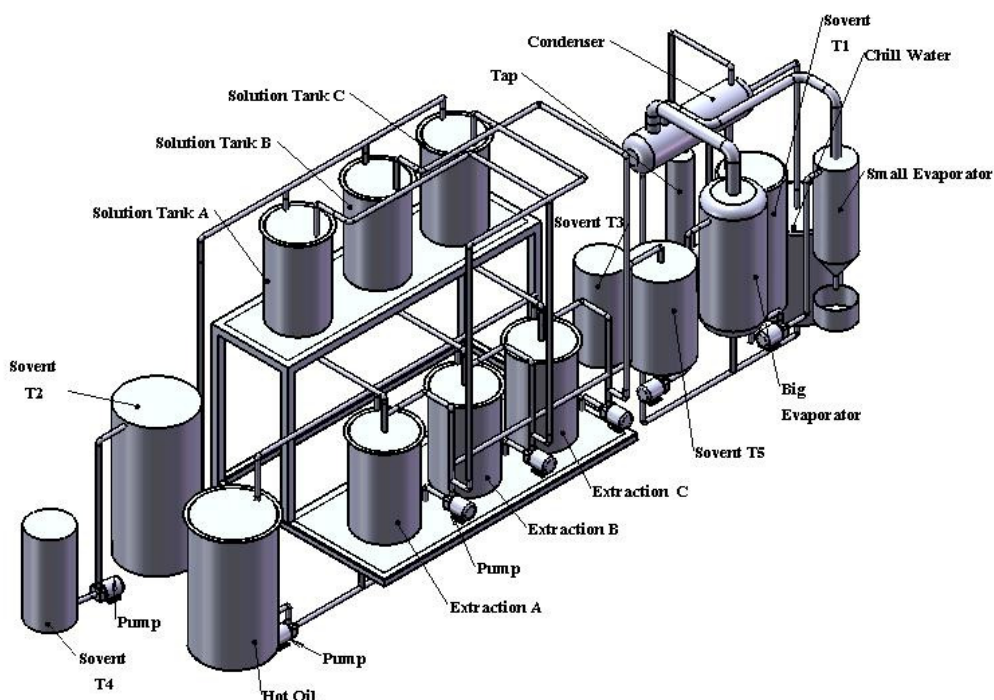
- (1) เอทานอล 95% (v/v) C_2H_5OH (Commercial Grade,)
- (2) Phenol (AR. grade, Fisher Scientific)
- (3) Conc.sulfuric acid (AR. grade, Merck)
- (4) Dinitrosalicylic acid (AR. grade, Fruka)
- (5) Sodium sulfite (AR. grade, Merck)
- (6) Sodium hydroxide (AR. grade, Merck)
- (7) Sodium potassium tartrate (AR. grade, Merck)
- (8) D-glucose (AR. grade, A^{lex} finechem)

3.1.3 อุปกรณ์

- (1) ตู้อบลมร้อน
- (2) เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง
- (3) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- (4) ไมโครปิเปต (ขนาด 100-1000 ไมโครลิตร)
- (5) ไมโครปิเปต (ขนาด 10-100 ไมโครลิตร)
- (6) Multichannels pipet (ขนาด 20-200 ไมโครลิตร)
- (7) เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (Rotary vacuum evaporator)
- (8) เครื่องระเหยเยือกแข็งสุญญากาศ (Vacuum freeze dry)
- (9) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
- (10) ชุดสกัดแบบต่อเนื่อง
- (11) Microplate reader
- (12) ชุดสกัดแบบกะขนาดเล็ก ประกอบด้วยบีกเกอร์ขนาด 600 mL ควบคุมอุณหภูมิด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิและกวนผสมด้วยใบกวนด้วยความเร็วรอบ 250 rpm

(13) ชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดเล็กประกอบด้วยถังสกัดสเตนเลสขนาด 250 mL จำนวน 3 ถัง และบีกเกอร์ขนาด 600 mL จำนวน 3 ใบ ควบคุมอุณหภูมิด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่มีการเขย่าเพื่อให้ผสมกันได้ดีขึ้น

(14) ชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนสกัดแบบต่อเนื่องและส่วนระเหยแบบสูญญากาศ โดยส่วนสกัดแบบต่อเนื่องมีส่วนประกอบคือ ถังสกัด 3 ถัง ถังพักสารละลาย 3 ถัง ถังตัวกลางให้ความร้อน 1 ถัง ถังตัวทำละลายใหม่ 1 ถัง ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วและปั๊มจากตู้ควบคุม (Control box) และส่วนระเหยแบบสูญญากาศมีส่วนประกอบคือ ถังพักสารละลาย 1 ถัง ถังระเหยใหญ่ 1 ถัง ถังระเหยเล็ก 1 ถัง คอนเดนเซอร์ (Condenser) 1 ถัง และถังเก็บตัวทำละลายหลังระเหย 2 ถัง ดังแสดงในภาพประกอบ 3-1 ซึ่งมีส่วนตัวเครื่องสกัดจริงดังภาพประกอบ 3-2 ส่วนระเหยของเครื่องสกัดแสดงดังภาพประกอบ 3-3 รายละเอียดหน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังตาราง 3-2



ภาพประกอบ 3-1 ภาพวาด 3 มิติของชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง

ตาราง 3-2 แสดงหน้าที่และการทำงานของถังและอุปกรณ์การสกัดของชุดสกัด
แบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง

ถังและอุปกรณ์การสกัด	หน้าที่และการทำงาน
Solvent T ₄	ถังสำหรับเติมตัวทำละลายใหม่เพิ่มเติมเมื่อตัวทำละลายในถัง Solvent T ₂ มีระดับต่ำ (ต่ำกว่าระดับ level control)
Solvent T ₂	ถังตัวทำละลายใหม่ ก่อนเติมตัวทำละลายในถัง Solution tank
Hot oil	ถังตัวกลางความร้อน โดยมีฮีตเตอร์ให้ความร้อนแก่ตัวกลาง ก่อนป้อนตัวกลางเพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังสกัด
Extraction A	ถังสกัดในชุดต่อเนื่อง
Extraction B	ถังสกัดในชุดต่อเนื่อง
Extraction C	ถังสกัดในชุดต่อเนื่อง
Solution tank A	ถังพักการย้ายตัวทำละลายในชุดต่อเนื่อง ก่อนปล่อยตัวทำละลายลงสู่ Extraction A
Solution tank B	ถังพักการย้ายตัวทำละลายในชุดต่อเนื่อง ก่อนปล่อยตัวทำละลายลงสู่ Extraction B
Solution tank C	ถังพักการย้ายตัวทำละลายในชุดต่อเนื่อง ก่อนปล่อยตัวทำละลายลงสู่ Extraction C
Solvent T ₅	ถังพักสารละลายที่ผ่านการสกัดแบบต่อเนื่อง ก่อนทำการระเหยใน Big evaporator
Solvent T ₃	ถังรองรับตัวทำละลายเพิ่มเติมจากถัง Solvent T ₁
Big evaporator	ถังระเหยตัวทำละลาย เมื่อสารละลายในถังเหลือน้อยจะป้อนไปสู่ Small evaporator
Small evaporator	ถังระเหยตัวทำละลาย หลังระเหยได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวข้นเหนียว
Condenser	ใช้ควบแน่นตัวทำละลายต่อเข้ากับ Big evaporator และ Small evaporator
Solvent T ₁	รองรับตัวทำละลายหลังการควบแน่น
Tap	อุปกรณ์สำหรับดักไอตัวทำละลาย เพื่อลดตัวทำละลายที่จะเข้าป้อนสู่สุญญากาศ
Chill water	ถังน้ำหล่อเย็น



ภาพประกอบ 3-2 ส่วนสกัดของชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง



ภาพประกอบ 3-3 ส่วนระเหยของชุดสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การศึกษาสภาวะในการสกัดโดยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก

การเตรียมเปลือกขุ่นด้วยการนำเปลือกด้านในขุ่นมาล้างทำความสะอาดแล้ว หั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบลมร้อน จากนั้นนำเปลือกขุ่นอบแห้งที่ได้ใส่ถุงปิดมิดชิดและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4\pm 2^{\circ}\text{C}$

เติมตัวทำละลายลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ที่ใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ อุณหภูมิให้อุณหภูมิตามที่กำหนด เทเปลือกขุ่นลงในบีกเกอร์ แล้วทำการกวนด้วยความเร็วรอบ 250 rpm ทำการสกัดจนครบระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นนำสารที่สกัดได้ไปแยกกากตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงและระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน จากนั้นทำเป็นผงด้วยวิธีการทำแห้งเยือกแข็งสุญญากาศ เก็บสารที่ได้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดที่อุณหภูมิ 4°C จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล

ศึกษาตัวแปรที่มีผลในการสกัด ได้แก่ อุณหภูมิ สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับเปลือกขุ่นอบแห้ง ระยะเวลาในการสกัด ความชื้นของเปลือกขุ่น และชนิดของตัวทำละลาย โดยดำเนินการทดลองดังนี้

(1) การศึกษาผลของอุณหภูมิ ทำการสกัดที่ $30, 50$ และ 60°C โดยใช้เปลือกขุ่นอบแห้ง 20 กรัม สกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที

(2) การศึกษาผลของระยะเวลาในการสกัด ทำการสกัดที่ 15, 30 และ 60 นาที โดยใช้เปลือกขุ่นอบแห้ง 20 กรัม สกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และอุณหภูมิในการสกัด 60°C

(3) การศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ ทำการสกัดที่ 8:1, 10:1 และ 15:1 (v/w) โดยใช้เปลือกขุ่นอบแห้ง 20 กรัม สกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น อุณหภูมิ 60°C และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที

(4) การศึกษาผลของความชื้นของเปลือกขุ่น (เปลือกขุ่นสดและเปลือกขุ่นอบแห้ง) และตัวทำละลาย (น้ำกลั่นและเอทานอล 95% (v/v)) โดยใช้เปลือกขุ่นสด 200 กรัม (เปลือกขุ่นสดมีความชื้นเท่ากับ $88\pm 2\%$ และนำเปลือกขุ่นสดน้ำหนักดังกล่าวไปอบแห้งจะมีความชื้นเท่ากับ $9\pm 1\%$) และตัวทำละลาย 400 mL สกัดที่อุณหภูมิ 60°C และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที

3.2.2 การศึกษาการสกัดเมล็ดขนุนโดยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก

การเตรียมเมล็ดขนุนบดด้วยการนำเมล็ดขนุนมาล้างทำความสะอาด แล้วอบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดที่แห้งไปบดและแยกขนาดวัตถุบดอยู่ในช่วง 1.0-2.0 mm. ซึ่งสามารถวัดความชื้นได้ 56.10% จากนั้นนำเมล็ดขนุนบดใส่ในถุงปิดมิดชิดและเก็บรักษาในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C

ชุดทดลองขนาดเล็กประกอบด้วยหน่วยสกัดจำนวน 3 ชุด แต่ละหน่วยสกัดมีรูปแบบเดียวกันและขนาดเท่ากัน โดยประกอบด้วยถังสกัด ถังพักสารละลาย โดยมีขั้นตอนการดำเนินการ คือ เติมตัวทำละลายลงในถังสกัดขนาด 250 mL ใส่เมล็ดขนุนจำนวน 20 กรัม ในแต่ละหน่วยสกัด แล้วนำภาชนะใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีอุปกรณ์เขย่า ทำการสกัดจนครบระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปแยกตะกอนด้วยกระดาษกรอง (Whatman Ltd. No.1) และลดปริมาตรตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (Rotary vacuum evaporator) แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณน้ำตาล

ศึกษาการทดลองสกัดสารฟิโอบิติกส์จากเมล็ดขนุนบดละเอียดด้วยตัวทำละลายคือ เอทานอล 50% (v/v) ในตัวแปรที่สนใจ อุณหภูมิ เวลาสกัด และสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อเมล็ดขนุน โดยออกแบบการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีการ Response surface methodology (RSM) แบบ Box-behnken design (3 ระดับ) ในการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ (Non-reducing sugar) โดยนำค่าค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระทั้งสามตัวแปรแทนลงในสมการ 2-22 ซึ่งมีสภาวะการทดลองจำนวน 15 ชุด แสดงค่า Code variable ดังตาราง 3-3 และชุดสภาวะการทดลองแสดงดังตาราง 3-4 จากนั้นวิเคราะห์ผลของตัวแปรตามแบบจำลองสมการกำลังสอง (Full quadratic model) มีสมการทั่วไปตามสมการ 2-21

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 3 ตัวแปร

$$Y = \sum A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i X_i + \sum_{i=1}^3 A_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 A_{ij} X_i X_j \quad (2-21)$$

โดยที่	X_1	คือ อุณหภูมิ (°C)
	X_2	คือ เวลาสกัด (min)
	X_3	คือ สัดส่วนเอทานอลต่อเมล็ดขนุน (v/w)

ตาราง 3-3 สภาวะการทดลองโดยการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-behnken design เพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิ เวลาสกัด และสัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขนุน โดยมีเอทานอล 50% (v/v) เป็นตัวทำละลาย ในการสกัดฟรีไบโอติกส์จากเมล็ดขนุนด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก

การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาสกัด (min)	สัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขนุน(v/w)
1	1	-1	0
2	0	1	1
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	-1	-1
6	-1	1	0
7	-1	-1	0
8	0	-1	1
9	-1	0	1
10	0	0	0
11	1	0	1
12	-1	0	-1
13	0	1	-1
14	1	0	-1
15	1	1	0
Min-Max value	40-60	15-45	6-10

$$X = \left(\frac{X - \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2}}{\frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}} \right) \quad (2-22)$$

โดยที่ X คือ Code variable
x คือ ตัวแปรอิสระ
 x_{\min} คือ ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ
 x_{\max} คือ ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

ตาราง 3-4 การออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิค RSM เพื่อศึกษาผลของตัวแปร (อุณหภูมิ เวลาสกัด และสัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขมิ้น โดยมีเอทานอล 50% (v/v) เป็นตัวทำละลาย) ในการสกัดฟีนอลิกจากเมล็ดขมิ้นด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก

การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาสกัด (min)	สัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขมิ้น(v/w)
1	60	15	8
2	50	45	10
3	50	30	8
4	50	30	8
5	50	15	6
6	40	45	8
7	40	15	8
8	50	15	10
9	40	30	10
10	50	30	8
11	60	30	10
12	40	30	6
13	50	45	6
14	60	30	6
15	60	45	8

3.2.3 การสกัดเมล็ดขมิ้นด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง

Wang และคณะ (1998) ได้ทำการสกัด Glycyrrhizic acid จากชะเอม โดยมีหน่วยสกัด 5 หน่วย พบว่าในทฤษฎีการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง เมื่อการสกัด 5 หน่วย จะให้ผลได้สารสกัด 98.4% ส่วนการสกัดให้ผลได้ของสารสกัด 93.3% ซึ่งจำนวนหน่วยมีอิทธิพลน้อยต่อผลได้ของสารสกัด Glycyrrhizic acid ดังนั้นในงานวิจัยนี้ใช้ชุดสกัดจำนวน 3 หน่วย ได้แก่ unit A, unit B และ unit C ดังภาพประกอบ 3-4 ซึ่งประกอบด้วยส่วนชุดสกัดและส่วนชุดระเหย ส่วนชุดสกัดแต่ละหน่วยจะมีถังสกัด ถังพักสารละลายและปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal pump) หน่วยสกัดจะดำเนินการด้วยลูปปิดด้วยการปั๊มตัวทำละลายจากถังหนึ่งสู่อีกถังหนึ่ง กวนผสมวัตถุดิบกับ

ตัวทำละลายด้วยการบีบตัวทำละลายจากกันถึงผ่านหัวฉีดด้านบนถึงสกัด โดยวัตถุดิบและตัวทำละลายจะใช้สัญลักษณ์วงกลม (○) และสี่เหลี่ยม (□) ตามลำดับ ขณะที่จำนวนสัญลักษณ์ดอกจันทร์ (*) ภายในวงกลมหรือสี่เหลี่ยมแสดงถึงเกรเดียนความเข้มข้นของสารฟรีไปโอดิกส์ในวัตถุดิบและตัวทำละลาย การย้ายตัวทำละลายทั้งหมดมีทิศทางตามลูกศรใช้สัญลักษณ์ (↓) ขณะที่วัตถุดิบและตัวทำละลายที่ปล่อยออกหรือเติมเข้า

การสกัดเมล็ดขนุนด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง แสดงดังในภาพประกอบ 3-4 โดยตัวทำละลายที่แทนด้วยสัญลักษณ์ (□) ที่ภายในแทนเกรเดียนความเข้มข้นของสารฟรีไปโอดิกส์ในตัวทำละลายด้วยสัญลักษณ์ (*) ในการดำเนินการประกอบด้วยตัวทำละลายใหม่หรือตัวทำละลายที่ไม่ผ่านการสกัด (Fresh solvent แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในว่าง ()) ตัวทำละลายผ่านการสกัด 1 รอบ (หลังผ่าน First stage แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในมี (*)) ตัวทำละลายผ่านการสกัด 2 รอบ (หลังผ่าน Second stage แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในมี (**)) และตัวทำละลายผ่านการสกัด 3 รอบ (หลังผ่าน Third stage แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในมี (***)) และวัตถุดิบที่แทนด้วยสัญลักษณ์ (○) ที่ภายในแทนเกรเดียนความเข้มข้นของสารฟรีไปโอดิกส์ในวัตถุดิบแสดงด้วยสัญลักษณ์ (*) วัตถุดิบที่ยังไม่ผ่านการสกัดหรือวัตถุดิบใหม่ (New raw material แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (***)) วัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 1 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (***)) วัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 2 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (**)) และวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 3 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (*)) โดยการสกัดแบบต่อเนื่องประกอบด้วยตัวทำละลายใหม่ (แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในว่าง) เข้าสกัดวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 2 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี **) หลังสกัดจะได้วัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 3 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี *) ซึ่งวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 3 รอบ จะทำการเปลี่ยนวัตถุดิบใหม่เพื่อสกัดในแบบต่อเนื่อง จากนั้นตัวทำละลายดังกล่าวเป็นตัวทำละลายผ่านการสกัด 1 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในมี *) จะเข้าสกัดวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 1 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี ***) และสุดท้ายตัวทำละลายผ่านการสกัด 2 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ภายในมี **) จะเข้าสกัดวัตถุดิบใหม่ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี ****) ซึ่งตัวทำละลายหลังจากสกัดรอบนี้เป็นตัวทำละลายเข้มข้น (แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ภายในมี ***) จะได้สารที่สกัดได้จากนั้นทำการบีบไปสู่ถังระเหยเพื่อลดปริมาณตัวทำละลายต่อไป

ในการสกัดจะแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนวางเงื่อนไข (Conditioning stage) และขั้นตอนการสกัด (Extraction stage) โดยขั้นตอนวางเงื่อนไขประกอบด้วย Pre-process 1 และ Pre-process 2 ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อเตรียมสภาวะการสกัดให้มีความเข้มข้นของวัตถุดิบและตัวทำละลายเป็นการสกัดแบบต่อเนื่อง เพื่อลดจำนวนรอบในการสกัดเพื่อเข้าสู่จุดสมดุลของแต่ละ

ขั้นตอนการสกัดในกระบวนการแบบต่อเนื่อง ขั้นที่สอง คือ ขั้นตอนการสกัด (Extraction stage) ที่แสดงการย้ายวัตถุดิบและการไหลตัวทำละลายในแต่ละขั้นตอน การไหลของตัวทำละลายจะมีทิศทางตาม $A \rightarrow C$, $C \rightarrow B$ และ $B \rightarrow A$ กระบวนการ 1-3 (Process 1- Process 3) จะเป็นการดำเนินการสกัดรูปแรก ตัวอย่างเช่น ใน Process 1 มีลำดับการดำเนินการ คือ บีบตัวทำละลายจากหน่วย C (ถังสกัด C) ไปสู่อหน่วย B (ถังพักตัวทำละลาย B) จากนั้นบีบตัวทำละลายจากหน่วย A (ถังสกัด A) ไปสู่อหน่วย C (ถังพักตัวทำละลาย C) และเติมตัวทำละลายใหม่ในหน่วย A จากนั้นเปลี่ยนวัตถุดิบในหน่วย C เป็นต้น ส่วนรูปที่ 2 จะมีการดำเนินการซ้ำในกระบวนการ 1-3 ในแต่ละกระบวนการสกัดจะมีขั้นตอนย่อย (i) – (iv) ดังนี้

Pre-process 1: (i) ป้อนตัวทำละลายใหม่ในถังสกัด A ถังสกัด B ถังสกัด C และป้อนวัตถุดิบในถัง C (ii) ทำการสกัด (iii) ย้ายตัวทำละลายตามทิศทางของถังสกัด C \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย B, ถังสกัด B \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย A และ ถังสกัด A \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย C

Pre-process 2: (i) ทำการสกัด (ii) ย้ายตัวทำละลายเข้มข้นจากถังสกัด B ไปถึงรอระเหยและเปลี่ยนวัตถุดิบในถังสกัด C (iii) ย้ายตัวทำละลายตามทิศทางของถังสกัด C \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย B, และ ถังสกัด A \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย C (iv) เติมตัวทำละลายใหม่ในถังสกัด A

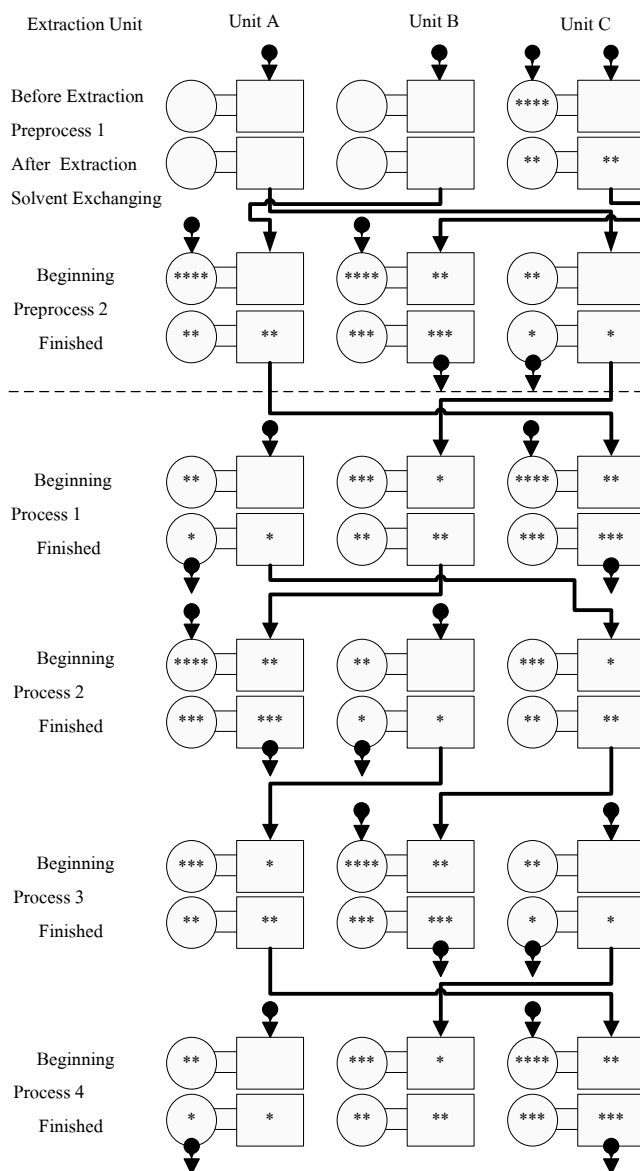
Process 1: (i) ทำการสกัด (ii) ย้ายตัวทำละลายเข้มข้นจากถังสกัด C ไปถึงรอระเหยและเปลี่ยนวัตถุดิบในถังสกัด A (iii) ย้ายตัวทำละลายตามทิศทางของถังสกัด B \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย A และ ถังสกัด A \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย C (iv) เติมตัวทำละลายใหม่ในถังสกัด B

Process 2: (i) ทำการสกัด (ii) ย้ายตัวทำละลายเข้มข้นจากถังสกัด A ไปถึงรอระเหยและเปลี่ยนวัตถุดิบในถังสกัด B (iii) ย้ายตัวทำละลายตามทิศทางของถังสกัด B \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย A และ ถังสกัด C \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย B (iv) เติมตัวทำละลายใหม่ในถังสกัด C

Process 3: (i) ทำการสกัด (ii) ย้ายตัวทำละลายเข้มข้นจากถังสกัด B ไปถึงรอระเหยและเปลี่ยนวัตถุดิบในถังสกัด C (iii) ย้ายตัวทำละลายตามทิศทางของถังสกัด C \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย B และ ถังสกัด A \Rightarrow ถังพักตัวทำละลาย C (iv) เติมตัวทำละลายใหม่ในถังสกัด A

Process 4: ขั้นตอนย่อยเช่นเดียวกับ Process 1

ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องจะเริ่มด้วย Pre-process 1, Pre-process 2 จากนั้นทำการสกัดใน 3 Process ซ้ำ คือ ใน Process 1, Process 2 และ Process 3



- วัตถุดิบ มีสัญลักษณ์ภายใน (****) วัตถุดิบใหม่ (***) วัตถุดิบผ่านการสกัด 1 ครั้ง (**) วัตถุดิบผ่านการสกัด 2 ครั้ง (*) วัตถุดิบผ่านการสกัด 3 ครั้ง
- ตัวทำละลาย มีสัญลักษณ์ภายใน () ตัวทำละลายใหม่ (*) ตัวทำละลายที่สกัดแล้ว 1 ครั้ง (**) ตัวทำละลายที่สกัดแล้ว 2 ครั้ง (***) ตัวทำละลายที่สกัดแล้ว 3 ครั้ง

ภาพประกอบ 3-4 ขั้นตอนของกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

การสกัดแบบต่อเนื่องจากเมล็ดขนุนในสถานะการสกัดที่ ระยะเวลาสกัด 60 min อุณหภูมิ 60°C และสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ 10:1 (v/w) โดยได้เตรียมวัตถุดิบและตัวทำละลายจำนวน 7 ชุดการทดลอง ได้ทำการสกัดในชั้นวางเงื่อนไข (Condition stage) ประกอบด้วย Pre-process 1, Pre-process 2 และขั้นตอนการสกัด (Extraction stage) ประกอบด้วย

Process 1, Process 2, Process 3 และ Process 4 เริ่มจากการเตรียมสารละลายเอทานอล 50% (v/v) ปริมาตร 220 ลิตร เติมในถังสารละลายใหม่แล้วป้อนเข้าสู่ถังพักเพื่อเป็นการดวงตัวทำละลาย ทั้งสามถังจากนั้นปล่อยตัวทำละลายเข้าสู่ถังสกัด ใส่วัตถุดิบในถังตะแกรงและเปิดปั๊มหมุนเวียนเพื่อ กวนผสมตัวทำละลายในถังสกัด จับเวลาจนครบตามที่กำหนด แล้วดึงตัวอย่างสารสกัดปริมาตร 250 mL ทำการย้ายตัวทำละลายและวัตถุดิบดังกล่าวประกอบ 3-4 ทำการกรองตัวอย่างที่ได้ด้วย กระดาษกรอง แล้วแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะนำไปหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid content) ส่วนที่สองจะนำไประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (Rotary vacuum evaporator) ก่อนจะทำเป็นของแข็งแห้งด้วยเครื่องทำเยือกแข็งแบบสุญญากาศ (Freeze dry) และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในของแข็ง

3.3 วิธีการวิเคราะห์

3.3.1 การหาความชื้น

นำวัตถุดิบน้ำหนัก 10 กรัม ใสในกระป๋องหาความชื้น (Moisture can) ทำการ ชั่งน้ำหนักก่อนอบ แล้วอบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงจากนั้นนำมาใส่ในโถดูดความชื้น (Decicator) เป็นเวลา 15 นาที จนเย็น ทำการชั่งน้ำหนักหลังอบ แล้วทำการอบซ้ำทุก ๆ 30 นาที จนน้ำหนักคงที่

3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid)

ทำการชั่งน้ำหนักด้วยกระเบื้อง โดยนำด้วยกระเบื้องมาอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้ว มาใส่โถดูดความชื้น 15 นาที ก่อนมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบซ้ำอีก 30 นาที และใส่ โถดูดความชื้น 15 นาที จนน้ำหนักคงที่

เติมตัวอย่างปริมาตร 10 mL ลงในถ้วยกระเบื้อง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น จากนั้น นำไประเหยตัวทำละลายออกด้วยการวางถ้วยกระเบื้องบนช่องภาคของอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 95°C จนตัวอย่างแห้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วมาใส่โถดูดความชื้น 15 นาที ก่อนมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบซ้ำอีก 30 นาที และใส่โถดูดความชื้น 15 นาที จนน้ำหนัก คงที่ เพื่อชั่งน้ำหนักหลังอบ จากนั้นทำการคำนวณผลได้ (Yield) เป็นร้อยละน้ำหนักสารที่สกัดได้ ต่อน้ำหนักวัตถุดิบแห้งก่อนการสกัด

3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar analysis) ตามวิธี Modified phenol sulfuric method (Dubois และคณะ, 1956) แสดงถึงปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด ได้แก่ โมโนแซคคาไรด์ ไดแซคคาไรด์ โอลิโกแซคคาไรด์และโพลีแซคคาไรด์ อาจมีโครงสร้างเป็นวงแหวนหรือลักษณะการจัดเรียงต่าง ๆ กัน โดยวัดในหน่วยที่เล็กที่สุด คือ โมโนแซคคาไรด์ ด้วยการย่อยด้วยกรดแก่ เช่น ซัลฟูริกเข้มข้น เป็นต้น

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar analysis) ตามวิธี Modified dinitrosalicylic acid method (Miller, 1959; Robertson และคณะ, 2001) น้ำตาลรีดิวซ์เป็นกลุ่มของอัลดีไฮด์และคีโตน ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl group) $-C=O$ โดยอัลดีไฮด์มีสูตรทั่วไป คือ $R-CHO$ และคีโตนมีสูตรทั่วไป คือ $R-CO-R$ จะมีหมู่ anomeric- α หรือ $\beta-OH$ อิสระที่มีคุณสมบัติในการรีดิวซ์สารอื่นได้ ได้แก่ น้ำตาลในกลุ่มโมโนแซคคาไรด์ทั้งหมดและไดแซคคาไรด์ (มอลโตส แลคโตส ทรีฮาโลส (Trehalose) และเซลโลบิโอส (Cellobiose)) หรือน้ำตาลอื่น ๆ (เช่น อะราบินโนส เป็นต้น)

คำนวณหาปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (Non-reducing sugar) เป็นน้ำตาลที่ไม่มีสมบัติการรีดิวซ์ ซึ่งไม่มีหมู่ของมีหมู่ anomeric- α หรือ $\beta-OH$ อิสระ โดยเป็นน้ำตาลนอกเหนือจากกลุ่มของอัลดีไฮด์และคีโตน ได้แก่ น้ำตาลซูโครส น้ำตาลในกลุ่มโอลิโกแซคคาไรด์และโพลีแซคคาไรด์ โดยนำปริมาณน้ำตาลทั้งหมดหักลบด้วยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ดังสมการ 3-1

สมการหาปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์

$$\text{Non-reducing sugar} = \text{Total sugar} - \text{Reducing sugar} \quad (3-1)$$

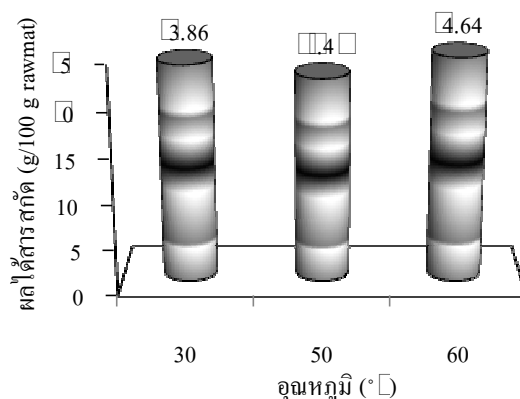
บทที่ 4

ผลและวิจารณ์

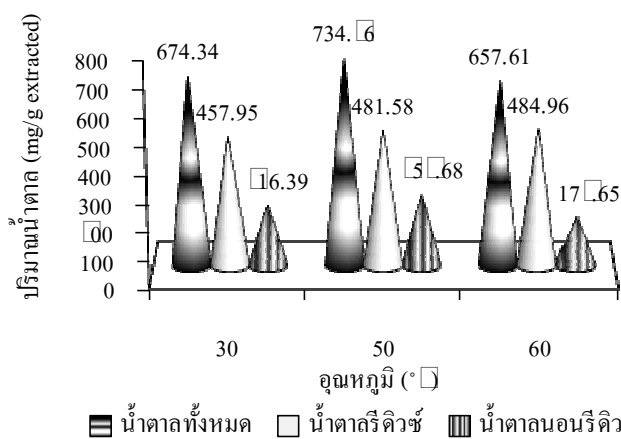
4.1 การสกัดโดยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก

4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการสกัดเปลือกด้านในขุ่น

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลได้ของการสกัดและปริมาณน้ำตาล-นอนรีดิวซ์ โดยการทดลองได้ใช้เปลือกขุ่นอบแห้ง 10 กรัม สกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และระยะเวลาในการสกัด 10 นาที จากภาพประกอบ 4-1 แสดงผลได้ของการสกัดหรือน้ำหนักสารที่สกัดได้ต่อน้ำหนักวัตถุดิบฐานแห้ง พบว่าที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 60°C ผลได้ของการสกัดมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 3.86, 4.4 และ 4.64 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (น้ำตาลนอนรีดิวซ์เป็นกลุ่มที่ไม่ใช่อัลดีไฮด์และคีโตน ซึ่งคาดว่าเป็นฟรีไบโอติกส์) จากภาพประกอบ 4-2 แสดงปริมาณน้ำตาลในสารสกัดที่น้ำหนักตัวอย่างเท่ากัน พบว่าที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 60°C มีน้ำตาลนอนรีดิวซ์ 16.39, 5.68 และ 17.65 mg/g extracted น้ำตาลนอนรีดิวซ์มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์จากถั่วเหลืองแบบแช่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 5°C เป็น 50°C การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์เพิ่มขึ้น เพราะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราไฮเดรชัน (Hydration rate constant) และลดระยะเวลาในการสกัดเพื่อให้เข้าสู่จุดสมดุล (Nissreen และคณะ, 1997) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 50°C สารสกัดมีปริมาณโอลิโกแซคคาไรด์ลดลง เพราะเปลือกขุ่นมีโปรตีนที่ละลายได้ดีในน้ำร้อน (Heat-denatured soluble protein) ที่ล้อมรอบวัตถุดิบดักไม่ให้สารอื่น ๆ ละลายออกมา เช่น โอลิโกแซคคาไรด์ที่ละลายได้ดีในตัวทำละลายดังกล่าว (Kim และคณะ, 2003) ดังนั้นการสกัดฟรีไบโอติกส์จากเปลือกขุ่นควรทำที่อุณหภูมิ 50°C



ภาพประกอบ 4-1 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของสารสกัด โดยใช้สัดส่วนระหว่างน้ำกลั่นกับเปลือกขมูนอบแห้ง 10:1 (v/w) และระยะเวลาในการสกัด 10 นาที

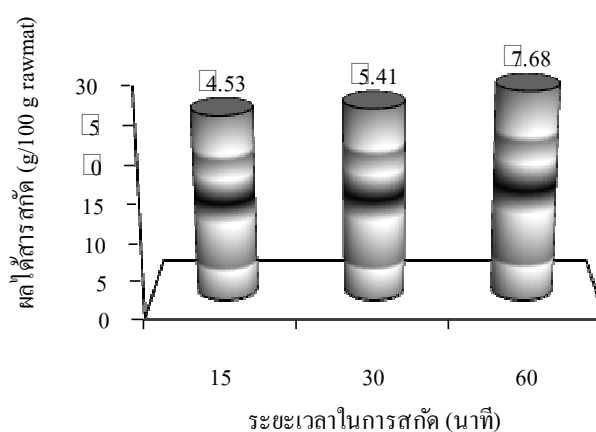


ภาพประกอบ 4-2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาล โดยใช้สัดส่วนระหว่างน้ำกลั่นกับเปลือกขมูนอบแห้ง 10:1 (v/w) และระยะเวลาในการสกัด 10 นาที

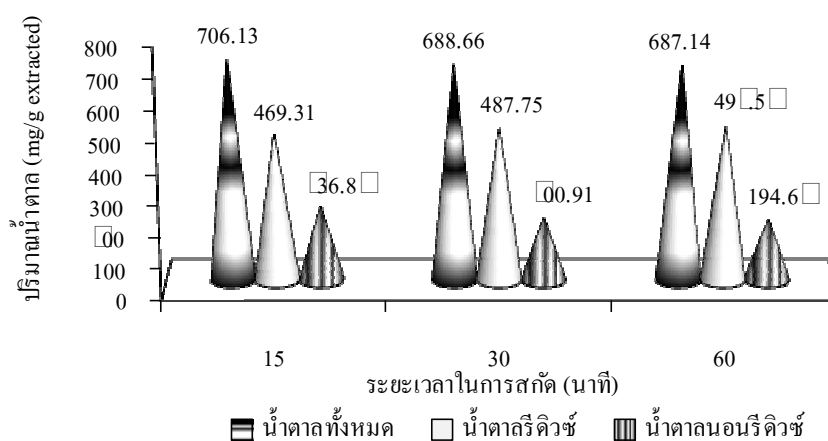
4.1.2 ผลของระยะเวลาในการสกัดที่มีผลต่อการสกัดเปลือกด้านในขมูน

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการสกัดที่มีผลต่อผลได้ของการสกัดและปริมาณน้ำตาลอนรีดิคซ์ โดยการทดลองได้ใช้เปลือกขมูนอบแห้ง 10 กรัม สกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และอุณหภูมิในการสกัด 60°C จากภาพประกอบ 4-3 แสดงผลได้ของการสกัดพบว่าระยะเวลาในการสกัด 15, 30 และ 60 นาที จะให้ผลได้ของสารสกัด 4.53, 5.41 และ 7.68 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะเวลาของการสกัดทำให้ผลได้ของสารสกัดสูงขึ้น ซึ่งในช่วงต้นของการสกัดจะมีอัตราไฮดรอลิซิสที่สูงและค่อยลดลงตามระยะเวลาในการสกัดจนมีการถ่ายโอนมวลเข้าสู่สมดุลระหว่างตัวทำละลายและวัตถุดิบ ซึ่งในการสกัดเปลือกขมูนในระยะเวลา 15 นาที เข้าใกล้จุดสมดุลแล้ว โดยทั่วไปการสกัดที่อุณหภูมิ

สูงจะใช้ระยะเวลาในการสกัดที่น้อยลง (Lee และคณะ, 1987) จากภาพประกอบ 4-4 แสดงปริมาณน้ำตาลในสารสกัดที่น้ำหนักตัวอย่างเท่ากัน พบว่าระยะเวลาในการสกัด 15, 30 และ 60 นาที มีปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ 36.8, 100.91 และ 194.6 mg/g extracted เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่สกัดจะสกัดปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ได้น้อยลง เนื่องจากได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้คาร์โบไฮเดรตเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นปฏิกิริยาในน้ำที่ได้รับความร้อนของคาร์โบไฮเดรต และการเกิดสีน้ำตาล (Browning) ของแป้ง เป็นต้น การเพิ่มระยะเวลาในการสกัดจะทำให้ผลได้ของสารสกัดเพิ่มขึ้น แต่จะได้ปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ลดลง ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการสกัดที่นาน



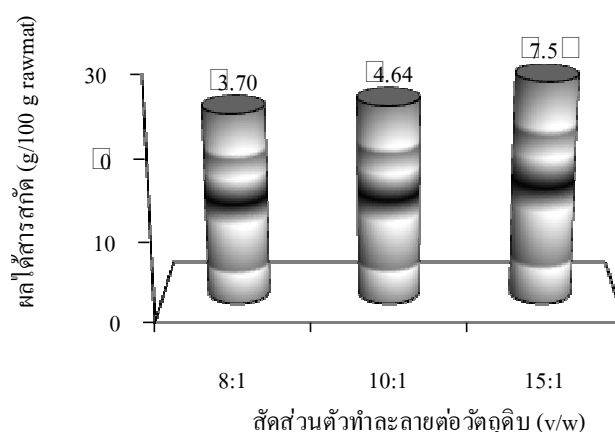
ภาพประกอบ 4-3 ผลของระยะเวลาในการสกัดต่อผลได้ของสารสกัด โดยใช้สัดส่วนระหว่างน้ำกลั่นกับเปลือกขุ่นอบแห้ง 10:1 (v/w) สกัดที่อุณหภูมิ 60°C



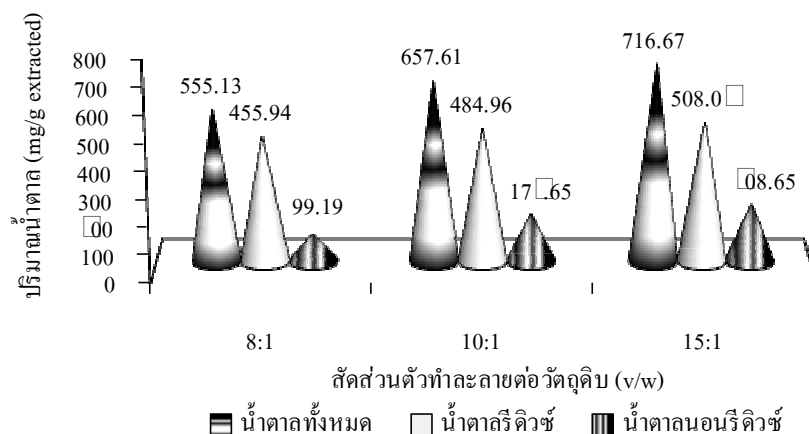
ภาพประกอบ 4-4 ผลของระยะเวลาในการสกัดต่อปริมาณน้ำตาล โดยใช้สัดส่วนระหว่างน้ำกลั่นกับเปลือกขุ่นอบแห้ง 10:1 (v/w) สกัดที่อุณหภูมิ 60°C

4.1.3 ผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบที่มีผลต่อการสกัดเปลือกด้านในขมุน

จากการศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบที่มีผลต่อผลได้ของการสกัดและปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ โดยการทดลองได้ใช้เปลือกขมุนอบแห้ง 10 กรัม สกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น อุณหภูมิ 60°C และระยะเวลาในการสกัด 10 นาที จากภาพประกอบ 4-5 และภาพประกอบ 4-6 ที่สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 8:1, 10:1 และ 15:1 (v/w) มีผลได้ของสารสกัด 3.70, 4.64 และ 7.5 g/100g วัตถุดิบแห้ง และน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ 99.19, 17.65 และ 0.865 mg/g extracted ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบทำให้ผลได้ของสารสกัดและน้ำตาลนอนรีดิวิซ์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การเพิ่มสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบเหมือนการเพิ่มตัวทำละลายที่เดิมลงไปสกัดวัตถุดิบ เนื่องจากการเพิ่มตัวทำละลายในการสกัดจะทำให้ตัวทำละลายในขณะที่ทำการสกัดมีความเข้มข้นลดลง ซึ่งจุดสมดุลในการสกัดจะมีค่าความเข้มข้นต่ำลง ส่งผลให้วัตถุดิบหลังสกัดมีความเข้มข้นลดลงหรือกล่าวได้ว่าสามารถสกัดสารได้เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



ภาพประกอบ 4-5 ผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับเปลือกขมุนอบแห้งต่อผลได้ของสารสกัด โดยมีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย สกัดที่อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาในการสกัด 10 นาที

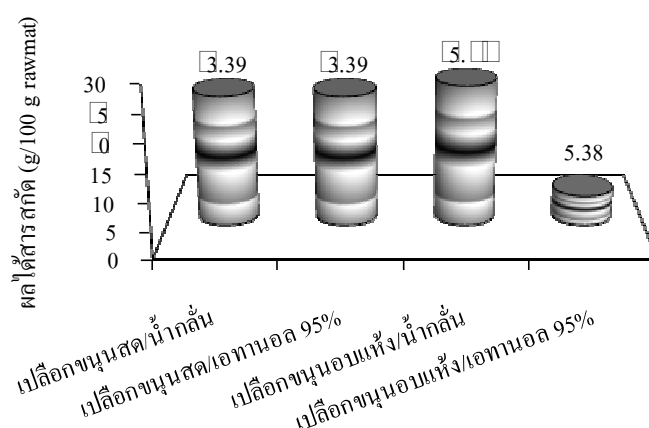


ภาพประกอบ 4-6 ผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับเปลือกขนุนอบแห้งต่อปริมาณน้ำตาล โดยมีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย สกัดที่อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาในการสกัด 10 นาที

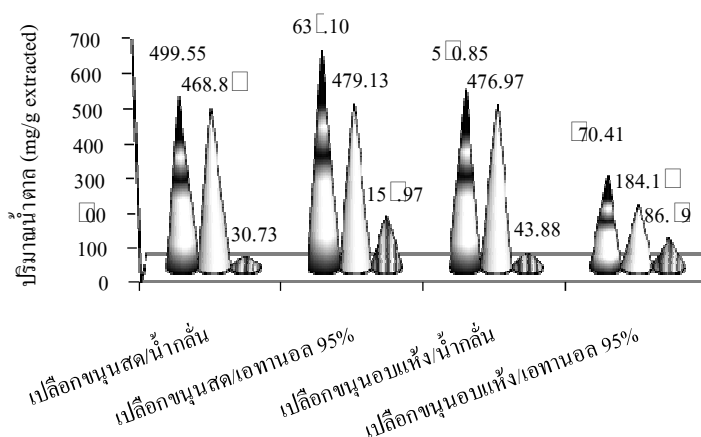
4.1.4 ผลของชนิดตัวทำละลายและความชื้นของวัตถุดิบที่มีผลต่อการสกัดเปลือกด้านในขนุน

จากการศึกษาผลของความชื้นของเปลือกขนุน (เปลือกขนุนสดและเปลือกขนุนอบแห้ง) และตัวทำละลาย (น้ำกลั่นและเอทานอล 95% (v/v)) ที่มีผลต่อผลได้ของการสกัดและปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ โดยการทดลองได้ใช้เปลือกขนุนสด 100 กรัม และตัวทำละลาย 400 mL สกัดที่อุณหภูมิ 60°C และระยะเวลาในการสกัด 10 นาที จากภาพประกอบ 4-7 พบว่าการสกัดเปลือกขนุนอบแห้งด้วยตัวทำละลายที่ต่างกัน คือ น้ำกลั่น และเอทานอล 95% (v/v) มีผลได้ 5.38 และ 5.38 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ซึ่งร้อยละผลได้ของสารสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่นมีค่าสูงกว่าเอทานอล 95% (v/v) เนื่องจากกลไกการสกัดของสารภายในอนุภาคโดยตัวทำละลาย ซึ่งจะเกิดขึ้นตอนกระบวนการ คือ ตัวทำละลายจะต้องถ่ายโอน (แพร่) จากสารละลายตัวทำละลายบัลค์ (Bulk) ไปยังผิวของของแข็ง ต่อมาตัวทำละลายจะต้องแทรกหรือแพร่เข้าสู่ของแข็ง ตัวละลายละลายในตัวทำละลาย จากนั้นตัวละลายจะแพร่ผ่านสารผสมของแข็ง-ตัวทำละลายออกมายังผิวของอนุภาคท้ายสุดตัวทำละลายถูกถ่ายโอนสู่สารละลายบัลค์ แต่เซลล์เปลือกขนุนอบแห้งมีการหดตัวลงในการสกัดจึงต้องให้ตัวทำละลายแพร่เข้าไปในวัตถุดิบก่อนหรือทำให้เปลือกขนุนเกิดการพองตัว โดยการทดลองได้ใช้ตัวทำละลายเอทานอล 95% (v/v) มีกลไกการแพร่เข้าสู่ของแข็งได้น้อยมากแต่น้ำกลั่นจะแพร่เข้าสู่ของแข็งได้ดี น้ำกลั่นจึงให้ร้อยละผลได้ของสารสกัดที่สูงกว่า จากนั้นการสกัดเปลือกขนุนสดด้วยน้ำกลั่นหรือเอทานอล 95% (v/v) มีร้อยละผลได้ 3.39 g/100 g วัตถุดิบแห้ง เท่ากัน เนื่องจากเปลือกขนุนสดไม่ต้องมีขั้นตอนให้วัตถุดิบพองตัว จึงไม่มีปัญหาจากการใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 95% (v/v) จากภาพประกอบ 4-8 ปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์จะสูงสุด

เมื่อสกัดเปลือกขุ่นสดด้วยเอทานอล 95% (v/v) เนื่องจากน้ำกลั่นและเอทานอลความเข้มข้นต่ำเป็น ตัวทำละลายที่เหมาะสมกับการสกัดคาร์โบไฮเดรตสายสั้น ๆ ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมกับ คาร์โบไฮเดรตและสารประกอบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic component) เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ และ โปรตีน เป็นต้น (Xiaoli และคณะ, ๒008) ซึ่งตามทฤษฎีสารมีขั้วละลายในสารที่มีขั้วและสารที่ ไม่มีขั้วละลายในสารที่ไม่มีขั้ว โดยน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วสูง ส่วนเอทานอล 95% (v/v) เป็น ตัวทำละลายที่มีขั้วน้อยกว่าน้ำ เราจึงต้องเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมกับสารที่ต้องการสกัด ดังนั้น การสกัดเปลือกขุ่นสดควรใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 95% (v/v)



ภาพประกอบ 4-7 ผลของความชื้นของเปลือกขุ่นต่อผลได้ของสารสกัด (เปลือกขุ่นสดและ เปลือกขุ่นอบแห้ง) โดยสกัดด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล 95% (v/v) ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



■ น้ำคาลทั้งหมด □ น้ำตาลรีดิวิซ์ ▨ น้ำตาลอนรีดิวิซ์

ภาพประกอบ 4-8 ผลของความชื้นของเปลือกขุ่นต่อปริมาณน้ำตาล (เปลือกขุ่นสดและเปลือก ขุ่นอบแห้ง) โดยสกัดด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล 95% (v/v) ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2 การสกัดโดยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก

ในการสกัดโดยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็กได้เปลี่ยนวัตถุดิบจากเปลือกค่านในขุ่นเป็นเมล็ดขุ่น เนื่องจากเมื่อการทดสอบสารสกัดด้วย HPLC พบว่ามีปริมาณ Indigestible polysaccharide เพียงเล็กน้อย โดยส่วนมากโอลิโกแซคคาไรด์จะถูกสะสมในเมล็ดและหัวใต้ดินของพืช และจะถูกใช้เมื่อต้นอ่อนเริ่มการเจริญเติบโต ซึ่งโอลิโกแซคคาไรด์มีผลต่อระบบทางเดินอาหารหรือมีสมบัติของไฟโบรโอติคส์ (Van loo และคณะ, 1999) ซึ่งการสกัดเมล็ดขุ่นด้วยเอทานอล 50% (v/v) เป็นพืชที่มี Indigestible polysaccharide ในสารสกัด 10 ชนิด ที่มีค่าสูงสุด (รายงานความก้าวหน้าโครงการการสกัดสารไฟโบรโอติคส์จากพืช, 2550) ที่เอทานอล 50% (v/v) เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพในการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์ เนื่องจากสภาพของข้าว ซึ่งเอทานอลความเข้มข้นต่ำ ๆ เป็นตัวทำละลายเหมาะกับการสกัดคาร์โบไฮเดรตสายสั้น ๆ (Xiaoli และคณะ, 2008) และจากการสกัดโดยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็กพบว่าการสกัดวัตถุดิบสดจะให้ผลที่ดีกว่าการสกัดวัตถุดิบที่ผ่านการอบแห้ง ซึ่งในงานวิจัยจึงซื้อตู้แช่แข็ง ที่สามารถเก็บรักษาวัตถุดิบที่อุณหภูมิ -10°C ซึ่งคล้ายคลึงกับการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์กลุ่มราฟฟิโนสตัว (*Pisum sativum L.*) เมื่อเตรียมวัตถุดิบเสร็จจะเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -10°C (Ekvalla และคณะ, 2007) ดังนั้นจึงเลือกวัตถุดิบเป็นเมล็ดขุ่นสดที่ใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% (v/v)

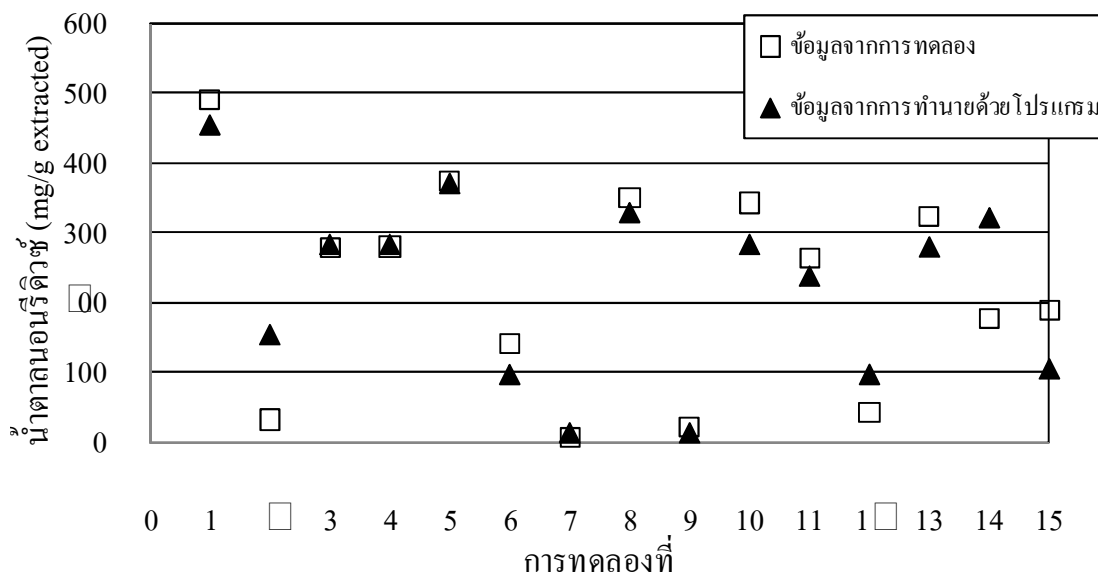
จากการทดลองสกัดแบบต่อเนื่องโดยชุดทดลองขนาดเล็กด้วยการสกัดเมล็ดขุ่นในเอทานอล 50% (v/v) ผลการทดลองแสดงเป็นปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ดังตาราง 4-1 ซึ่งปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์สูงสุดในการทดลองสถานะ คือ สถานะที่ 1 อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาสกัด 15 นาที สัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบเป็น 8:1 (v/w) ซึ่งได้ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ 490.16 mg/g extracted

ตาราง 4-1 ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดฟรีไบโอดีคส์จากเมล็ดขุ่นด้วยเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องโดยชุดทดลองขนาดเล็ก

การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาดำกลั (min)	สัดส่วนเอทานอลต่อเมล็ดขุ่น (v/w)	น้ำตาลอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)
1	60	15	8	490.6
2	50	45	10	35.07
3	50	30	8	80.7
4	50	30	8	81.65
5	50	15	6	375.81
6	40	45	8	143.87
7	40	15	8	9.89
8	50	15	10	350.7
9	40	30	10	4.5
10	50	30	8	343.78
11	60	30	10	65.44
12	40	30	6	44.15
13	50	45	6	33.96
14	60	30	6	178.13
15	60	45	8	189.80

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักการ Analysis of variance (ANOVA) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติของปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ นำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม Essential regression จากสมการ 4-1 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดของปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ พบว่าเมื่อนำค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลองมาพล็อตกราฟจะได้ค่า R^2 (Multiple correlation coefficient) เท่ากับ 0.819 และค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองจริง (Lee และคณะ, 2006) R^2_{Adjust} เท่ากับ 0.719 ซึ่งบอกลถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองส่วนค่า R^2_{Adjust} หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าแต่ละตัวแปรในแบบจำลองที่ได้มีส่วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสกัดทั้งสิ้น จากภาพประกอบ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์จากการสกัด

แบบต่อเนื่องด้วยชุดทดลองขนาดเล็กระหว่างข้อมูลจากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 4-9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์จากการสกัดแบบต่อเนื่องด้วยชุดทดลองขนาดเล็กระหว่างข้อมูลจากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression

สมการ Essential regression ของตัวแปรจากเทคนิค RSM ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์จากเมล็ดขุ่นด้วยเอทานอล 50% (v/v)

$$Y = -4138.1 + 149.26X_1 + 37.36X_2 - 1.163X_1^2 - 0.724X_1X_2 - 0.7X_2X_3 \quad (4-1)$$

เมื่อ Y คือ น้ำตาลอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)

X_1 คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

X_2 คือ เวลาสกัด (min)

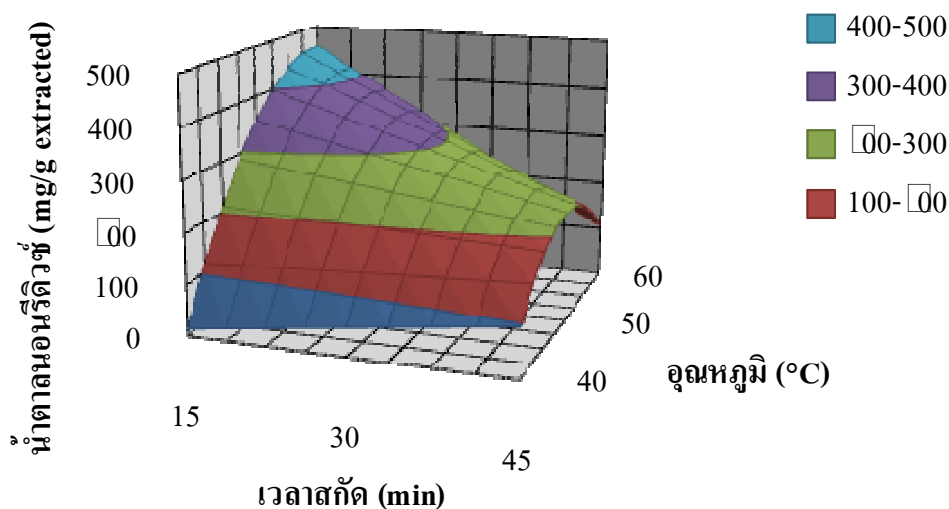
X_3 คือ สัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ (v/w)

จากสมการที่ 4-1 เป็นสมการ Essential regression จากเทคนิค RSM ที่สามารถทำนายผลจากตัวแปรทั้งสามต่อประสิทธิภาพการสกัดของปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ Regression analysis แสดงถึงตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดสารที่คาดว่าเป็นฟิโอบิโอดีคัสจากเมล็ดขุ่นบดด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรที่แสดงถึงอิทธิพลของ

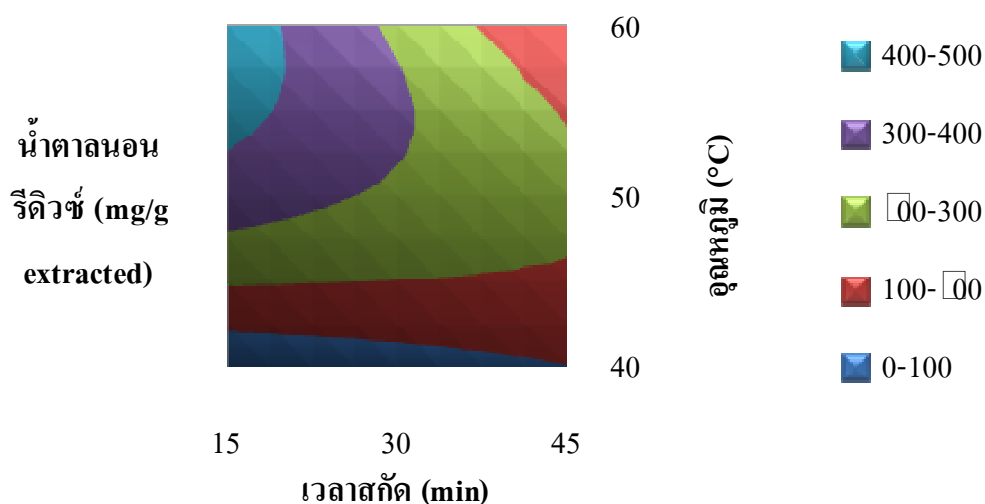
ตัวแปร เนื่องจากระดับแปรผันของตัวแปรที่เข้ารหัส คือ -1 และ 1 หากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งมีค่าสูงกว่าตัวแปรอื่น (ไม่คิดเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายแสดงถึงผลของตัวแปรอิสระจะแปรผันตรงหรือแปรผกผันกับตัวแปรตาม ตามลำดับ) แสดงถึงตัวแปรนั้นมีผลต่อค่า Y สูงกว่าอีกค่าหนึ่ง ซึ่งแบบจำลองของสมการ Essential regression ที่ได้ในรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ที่ประกอบด้วยเทอมผลของตัวแปรเชิงเส้น (X_1 , X_2 และ X_3) เทอมของตัวแปรเชิงซ้อน (X_1X_2 , X_1X_3 และ X_2X_3) เทอมของตัวแปรกำลังสอง (X_1^2 , X_2^2 และ X_3^2) และค่าสัมประสิทธิ์จุดตัด นอกจากนี้การพิจารณาค่า P value ของตัวแปร ในการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลอง โดยเทอมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารที่คาดว่าเป็นฟรีไบโอติกส์จากเมล็ดขนุน อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่า P value ต่ำกว่า 0.05 สามารถพิจารณาค่าของแต่ละเทอมของแบบจำลองตามภาคผนวก ข ซึ่งตัวแปร อุณหภูมิ ระยะเวลาในการสกัด และสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ ในการสกัดมีค่า P value เท่ากับ 0.00569, 0.0087 และ 0.14 ตามลำดับ โดยค่า P value ยิ่งน้อยตัวแปรนั้นจะมีอิทธิพลยิ่งมาก ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดมากที่สุดจากแบบจำลอง ในตัวแปรค่า P value ของสัมประสิทธิ์ต่ำที่สุดและมีค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์สูงที่สุด และสามารถจัดลำดับความสำคัญของตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดน้ำตาลนอร์คิวซ์ คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการสกัด และสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดเป็นตัวแปรที่มีผลอย่างมากต่ออัตราการถ่ายโอนมวล (Mass transfer rate) ของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (Shi และคณะ, 1996) และตัวแปรสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อวัตถุดิบมีผลน้อยต่อกระบวนการสกัด

จากข้อมูลแบบจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ กับประสิทธิภาพในการสกัด ดังสมการที่ 4-1 เป็นสมการถดถอย (Essential regression) สามารถพล็อตกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) และการพล็อตกราฟโครงร่าง (Contour plot) ของความสัมพันธ์ตัวแปรต่าง ๆ เพื่อคาดคะเนสถานะที่เหมาะสม (Triveni และคณะ, 2001) การพล็อตค่าจะพิจารณาได้ครั้งละสองตัวแปร ซึ่งในการศึกษานี้สนใจ 3 ตัวแปร ดังนั้นจะให้ตัวแปรหนึ่งมีค่าคงที่เป็นค่ากลางของตัวแปรแล้วพิจารณาค่าตัวแปรอีกสองตัวที่เหมาะสมได้ กราฟพื้นผิวสามมิติและการพล็อตกราฟโครงร่างจะแบ่งช่วงของผลออกเป็น ส่วน ๆ ตามช่วงของข้อมูล โดยในที่นี้คือแบ่งตามปริมาณการสกัดน้ำตาลนอร์คิวซ์

ผลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ แสดงด้วยกราฟพื้นผิวดังภาพประกอบ 4-10 และกราฟโครงร่างดังภาพประกอบ 4-11 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มระยะเวลาทำให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดที่แทนด้วย X_1 และ X_2 พบว่าสัมประสิทธิ์ของ X_1 และ X_2 มีค่าเป็นบวก แต่เทอมของตัวแปรเชิงซ้อนกับตัวแปรอื่น คือ X_1X_2 และ $X_1^2X_2$ และเทอมตัวแปรกำลังสอง คือ X_1^2 ล้วนมีเครื่องหมายเป็นลบ ทำให้ผลของประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิในการสกัดในช่วงแรก แต่การสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์มีการลดลงในช่วงหลัง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจนถึง 60°C ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์มีการเพิ่ม แสดงดังสีฟ้าในกราฟ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดสูงกว่า 60°C จากการทำนายด้วยเทคนิค RSM ตามสมการที่ 4-1 แนวโน้มการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ลดลง สอดคล้องกับการสกัดถั่วเหลืองแบบแช่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าคงที่ของอัตราไฮเดรชันเพิ่มขึ้น (Hydration rate constant) และลดระยะเวลาในการสกัดเพื่อให้ความเข้มข้นเข้าสู่จุดสมดุล (Nissreen และคณะ, 1997) แต่ที่อุณหภูมิสูงจะสกัดโอลิโกแซคคาไรด์จากถั่วได้น้อยลง เนื่องจากโปรตีนจะละลายห่อหุ้มถั่วเหลือง จึงเกิดกีดกันการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์ (Kim และคณะ, 2003) เหตุการณ์นี้อาจเกิดในการสกัดเมล็ดขนุน เนื่องจากเมล็ดขนุนมีปริมาณโปรตีนที่สูงเช่นกัน และการเพิ่มระยะเวลาทำให้สกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ได้ลดลง แสดงว่าเวลาสกัดที่นานเกินไปไม่ได้ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์จากเมล็ดถั่วชิกพี (Chickpea seed) (Xiaoli และคณะ, 2008)

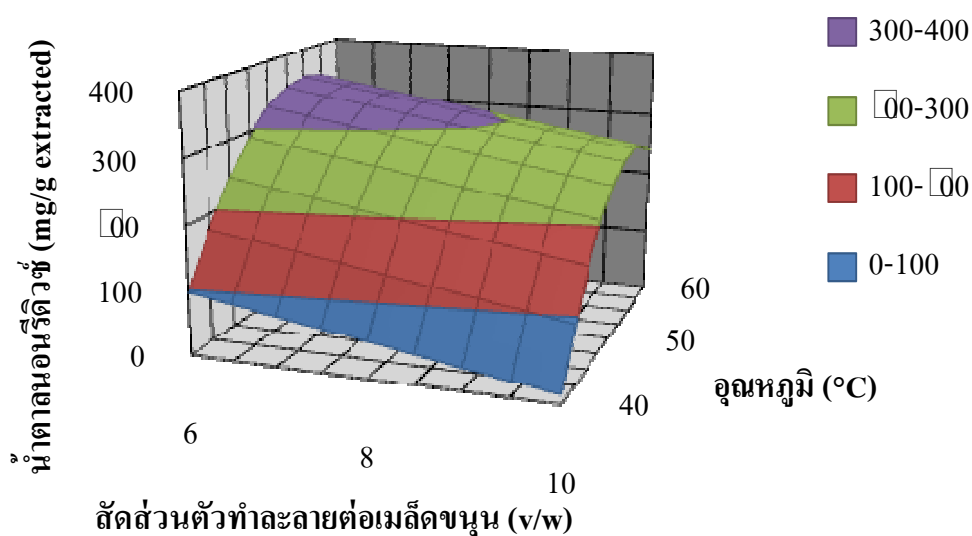


ภาพประกอบ 4-10 กราฟพื้นผิวแสดงปริมาณน้ำตาลอนรีติวซ์ในตัวอย่างสารสกัด จากอิทธิพลระหว่างเวลาสกัดและอุณหภูมิ โดยใช้สัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขบูน 8:1 (v/w)

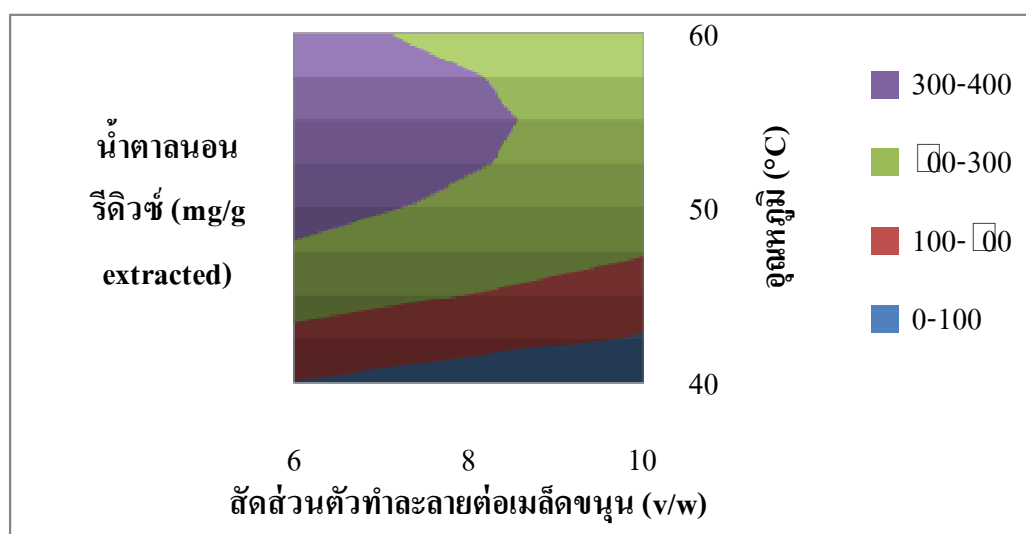


ภาพประกอบ 4-11 กราฟโครงร่างแสดงปริมาณน้ำตาลอนรีติวซ์ในตัวอย่างสารสกัด จากอิทธิพลระหว่างเวลาสกัดและอุณหภูมิ โดยใช้สัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขบูน 8:1 (v/w)

ผลของสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบและอุณหภูมิในการสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลอนรีติวซ์ แสดงด้วยกราฟพื้นผิวดังภาพประกอบ 4-1 □ และกราฟโครงร่างดังภาพประกอบ 4-13 พบว่า เทอมของตัวแปรเชิงซ้อนระหว่างระยะเวลาในการสกัดกับสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ เพราะว่าสัมประสิทธิ์ของ X_2X_3 จะมีค่าเป็นลบและมีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำ การเพิ่มสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบทำให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลอนรีติวซ์ลดลงเล็กน้อย ทำให้ตัวแปรของสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบมีผลน้อยกว่าตัวแปรอื่น ๆ และการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดทำให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลอนรีติวซ์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน



ภาพประกอบ 4-1 กราฟพื้นผิวแสดงปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ในตัวอย่างสารสกัด จากอิทธิพลระหว่างสัดส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดขนุนและอุณหภูมิ โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% (v/v)



ภาพประกอบ 4-13 กราฟโครงร่างแสดงปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ในตัวอย่างสารสกัด จากอิทธิพลสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อเมล็ดขนุนและอุณหภูมิ โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% (v/v)

การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำตาลอนรีดิวิซ์แบบต่อเนื่องด้วย ชุดทดลองขนาดเล็ก เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลอนรีดิวิซ์ได้ผลสูงที่สุดขึ้นอยู่กับ การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) และขอบเขตที่สนใจ แสดงดังตาราง 4- พบว่า รูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายที่เลือกใช้อยู่ในรูปค่าที่มากที่สุด ดังนั้นในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่

ให้ประสิทธิภาพในการสกัดสารที่คาดว่าเป็นฟรีไบโอดีคส์สูงสุด ซึ่งวิธีการแก้สมการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสามารถคำนวณโดยใช้โปรแกรม Excel ภายใต้อสมมติฐานสมการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ในขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดที่ตั้งไว้ ซึ่งผลการคำนวณของสภาวะที่เหมาะสมแบบ Box-behnken design คือ ในสภาวะการสกัดที่ ระยะเวลาสกัด 15 นาที อุณหภูมิ 60°C และสัดส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10:1 (v/w) สารสกัดที่ได้มีปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์สูงสุด 491.70 mg/g extracted ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดอินนูลินจากอาร์ติโชคด้วยเทคนิค RSM แบบ Central composite design โดยใช้สภาวะ คือ ระยะเวลาสกัดนาน 10 นาที อุณหภูมิ 76.65°C และสัดส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10.56:1 (v/w) (Lingyun และคณะ, 2007)

ตาราง 4- ฟังก์ชันเป้าหมายและขอบเขตในการหาสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อหาประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์จากเมล็ดขนุนด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก

Objective function	Max $f(x) = Y$
Subject to	<p>Non-reducing sugar content model</p> $Y = -4138.1 + 149.26X_1 + 37.36X_2 - 1.163X_1^2 - 0.724X_1X_2 - 0.7X_2X_3$ <p>Boundary condition</p> $30 \leq X_1 \leq 100$ $0 \leq X_2$ $\frac{1}{15} \leq X_3 \leq 15$

4.3 การสกัดโดยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง

การจัดสร้างชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองตามการออกแบบตามภาคผนวก ก ทำการทดสอบตัวเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองก่อนลงมือทำการทดลองสกัดจริง และได้ปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์แล้ว ดังนี้

- (1) ข้อต่อต่าง ๆ มีการรั่ว จึงต้องทำการเช็ทที่ละส่วน ซึ่งได้ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว
- (2) ได้เพิ่ม Check Valve ที่ท่อระหว่างถังสกัดกับถังระเหย เพื่อป้องกันแรงดันของปั๊มทำให้ตัวทำละลายไหลย้อนกลับไปถังสกัดอื่น
- (3) ระยะเวลาดำเนินการของแต่ละขั้นตอนการสกัด และอัตราการระเหยของถังระเหยใหญ่และถังระเหยเล็ก ผู้วิจัยได้การจับเวลาดังแสดงตามภาคผนวก ข ในตารางที่ 10

(4) จากสายไฟเดิมของถังระเหยใหญ่และถังระเหยเล็กเป็นสายไฟชนิดไม่ทนความร้อน ทำให้เกิดการหลอมเมื่อมีการใช้งานและส่งผลให้อีตเตอร์รัดท่อเสีย 1 ตัว หลังการทดสอบอัตราการระเหย จึงต้องเปลี่ยนสายไฟชนิดทนความร้อนและเปลี่ยนอีตเตอร์รัดท่อใหม่

(5) มีการรั่วที่ถังระเหยใหญ่และถังระเหยเล็ก จึงได้ขันน็อตทุกตัวให้แน่น และได้ขอคำแนะนำเพิ่มเติมผู้ชำนาญการจากโรงผลิตไบโอดีเซลของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เพื่อช่วยตรวจสอบการทำงานของระบบระเหยแบบสุญญากาศอีกด้วย

(6) สามารถวัดอัตราการระเหยอย่างคร่าว ๆ ของถังระเหยใหญ่ได้ 6 ลิตรต่อชั่วโมง และถังระเหยเล็กได้ 3 ลิตรต่อชั่วโมง

จากการศึกษาการสกัดเมล็ดขนุน โดยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก ซึ่งได้สกัดเมล็ดขนุนด้วยตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% (v/v) ที่สภาวะเหมาะสม คือ อุณหภูมิ 60°C เวลาสกัด 15 นาที และสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ 10:1 (v/w) จากนั้นทำการสกัดด้วยเครื่องสกัดขนาดโรงงานจำลอง แต่มีรายละเอียดปลีกย่อยหลายขั้นตอน จึงต้องใช้เวลากัดเพิ่มมากขึ้นเป็น 60 นาที ดังนั้นการสกัดด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองใช้สภาวะสกัดที่อุณหภูมิ 60°C เวลาสกัด 60 นาที และสัดส่วนตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ 10:1 (v/w)

จากตาราง 4- แสดงข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมของตัวทำละลาย เมื่อพิจารณาในชุดตัวทำละลายที่ 5 พบว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายรอบที่ 1 (Process B) ตัวทำละลายรอบที่ (Process 3-A) และตัวทำละลายรอบที่ 3 (Process 4-) จะให้ปริมาณผลได้ของการสกัดเท่ากับ 1.36, 5.79 และ 0.4 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ตามลำดับ โดยในขั้นตอนการสกัดให้ค่าผลได้ของการสกัดรอบสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 g/100 g วัตถุดิบแห้ง และมีปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์เท่ากับ 350-500 mg/g extracted

จากภาพประกอบ 3-4 ตัวทำละลายใหม่ (แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในว่าง ()) จะเข้าสกัดวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด □ รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (**)) และเข้าสู่สมดุลใหม่ของตัวทำละลายและวัตถุดิบสัญลักษณ์ภายในมี (*) จากนั้นตัวทำละลายดังกล่าวหรือตัวทำละลายผ่านการสกัด 1 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในมี (*)) จะเข้าสกัดวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 1 รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (**)) และเข้าสู่สมดุลใหม่ของตัวทำละลายและวัตถุดิบสัญลักษณ์ภายในมี (**)) และสุดท้ายตัวทำละลายผ่านการสกัด □ รอบ (แทนด้วยสัญลักษณ์ □ ที่ภายในมี (**)) จะเข้าสกัดวัตถุดิบใหม่ (New raw material แทนด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (***)) และเข้าสู่สมดุลใหม่ของตัวทำละลายและวัตถุดิบสัญลักษณ์ภายในมี (***) ซึ่งขั้นตอนในการสกัดแบบต่อเนื่องสามารถสังเกตจากเกรเดียนของความเข้มข้น (Concentration gradients) ที่แทนด้วยสัญลักษณ์ (*) โดยความเข้มข้นของตัวทำละลายจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบในการสกัดที่เพิ่มขึ้น

(แสดงด้วยสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (), (*), (**), และ (***) ที่มีการเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ) พบว่าการเพิ่มจำนวนรอบของการสกัดทำให้ผลได้ของการสกัดเพิ่มขึ้น เพราะตัวทำละลายสัมผัสกับวัตถุดิบจะมีการถ่ายโอนมวลและเข้าสู่สมดุล จากนั้นตัวทำละลายดังกล่าวจะสกัดวัตถุดิบที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นและเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง โดยจากถึงสกัด 3 ถึง หรือกล่าวได้ว่าเป็น 3 สเตจ และต้องมีการเข้าสู่สมดุลจำนวน 3 ครั้ง ส่งผลให้ค่าผลได้ของการสกัดเพิ่มขึ้น

จากตาราง 4-□ เมื่อพิจารณาในชั้นวางเงื่อนไข (ในชุดตัวทำละลายที่ 1 และ □) พบว่ามีผลได้ของการสกัดเฉลี่ยเท่ากับ □.69 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ซึ่งขั้นตอนการสกัดมีผลได้ของการสกัดเฉลี่ยเท่ากับ □0.5 g/100 g วัตถุดิบแห้ง แสดงว่าผลได้ในชั้นวางเงื่อนไขและในขั้นตอนการสกัดมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาเกรเดียนความเข้มข้นดังภาพประกอบ 3-4 โดยชั้นวางเงื่อนไขได้ทำการออกแบบด้วยการพิจารณาจากสัญลักษณ์เกรเดียนของความเข้มข้นที่แทนด้วยสัญลักษณ์ (*) ซึ่งในทางทฤษฎีความเข้มข้นหลังสกัดจะเข้าสู่สมดุลด้วยการแทนด้วยสัญลักษณ์ (*) ที่มีจำนวนเท่ากัน โดยความเข้มข้นของตัวทำละลายหลังสกัดเสร็จสิ้นจะป้อนไปสู่ถังระเหยจะใช้สัญลักษณ์ □ ที่ภายในมี (***) ส่วนความเข้มข้นของกากวัตถุดิบที่ทิ้งไปใช้สัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (*) หากพิจารณาจำนวนรอบการสกัดในชั้นวางเงื่อนไขมีขั้นตอนการสกัดแบบต่อเนื่อง □ รอบ ส่วนในขั้นตอนการสกัดมีขั้นตอนการสกัดแบบต่อเนื่อง 3 รอบ ซึ่งความเข้มข้นของตัวทำละลายที่สกัดเสร็จสิ้นใช้สัญลักษณ์ □ ที่ภายในมี (***) และส่วนความเข้มข้นของกากวัตถุดิบที่ทิ้งไปใช้สัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (*) เช่นเดียวกัน ข้อดีของชั้นวางเงื่อนไขที่ได้ทำการเพิ่มเติมนี้ คือ ลดจำนวนขั้นตอนการสกัดให้เข้าสู่จุดสมดุลในการสกัดแบบต่อเนื่อง (อาจเป็นขั้นตอนของการเริ่มต้นการสกัดแบบต่อเนื่อง (Start up)) เช่น กรณีการหยุดการสกัดเพื่อทำความสะอาดจะต้องเริ่มต้นสกัดใหม่ต้องทำการเริ่มขั้นตอนใหม่ เป็นต้น และทำให้การทำงานของการสกัดมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่ากรณีไม่มีชั้นวางเงื่อนไข

ตาราง 4-□ ข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมของตัวทำละลาย

ชุดตัวทำละลาย	ผลการสกัด		
		Pre-process 1-□	Pre-process □B
1	-		
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	-	11.06	□□.14
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	-	577.50	584.94
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	183.□□	193.□□
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	394.□8	391.7□

ตาราง 4- ข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมของตัวทำละลาย (ต่อ)

ชุดตัวทำละลาย	ผลการสกัด		
		Pre-process A	Process 1-
	-		
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	-	14.39	1.14
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	-	59.36	614.09
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	116.15	181.45
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	413.1	43.64
3	Pre-process B	Process 1-B	Process A
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	35	8.15	0.08
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	560.60	551.08	598.90
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	146.79	149.76	177.77
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	413.8	401.33	41.13
4	Process 1-A	Process B	Process 3-B
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	1.88	6.39	0.4
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	559.77	571.09	533.59
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	99.38	133.38	119.36
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	460.39	437.71	41.4
5	Process B	Process 3-A	Process 4-
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	1.36	5.79	0.4
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	567.0	549.3	559
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	17.6	14.44	191.93
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	435.07	44.89	361.00

ตาราง 4- ข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมของตัวทำละลาย (ต่อ)

ชุดตัวทำละลาย	ผลการสกัด		
6	Process 3-□	Process 4-B	-
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	1.9	6.05	-
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	585.9	561.6	-
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	13.08	143.68	-
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	453.1	417.58	-
7	Process 4-A	-	-
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	1.6	-	-
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	588.14	-	-
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	114.77	-	-
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	473.37	-	-

จากตาราง 4-3 แสดงข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมวัตถุดิบ พบว่าชุดวัตถุดิบที่ 5 จากวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 1 รอบ (Process □-A) วัตถุดิบที่ผ่านการสกัด □รอบ (Process 3-A) และวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 3 รอบ (Process 4-A) มีผลได้ของการสกัดเท่ากับ 0.08, 5.79 และ 1.6 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสัญลักษณ์คือ ความเข้มข้นของวัตถุดิบใหม่ วัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 1 รอบ วัตถุดิบที่ผ่านการสกัด □รอบ และ วัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 3 รอบ สามารถแทนสัญลักษณ์ ○ ที่ภายในมี (***), (**), (*) และ (*) ซึ่งแสดงจำนวนสัญลักษณ์ที่ลดลงตรงข้ามกับจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนรอบในการสกัดทำให้วัตถุดิบที่ผ่านการสกัดมีความเข้มข้นลดลงหรือตัวทำละลายสามารถสกัดสารที่คาดว่าเป็นฟรีไบโอติกส์ได้มากขึ้น ซึ่งทิศทางการไหลของตัวทำละลายจะสวนทางกับวัตถุดิบ ทำให้เกรเดียนความเข้มข้นของวัตถุดิบลดลงตรงข้ามกับจำนวนรอบของการสกัดที่เพิ่มขึ้น และในการสกัดวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 3 รอบ มีค่าผลได้ของสารสกัดเท่ากับ 1.6 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ซึ่งการสกัดเพียง 3 รอบ สามารถให้ค่าผลได้การสกัดที่มีความเข้มข้นต่ำแล้ว ดังนั้นจำนวน 3 สเตจ อาจเพียงพอต่อการสกัด หากมีการเพิ่มจำนวนสเตจทำให้วัตถุดิบที่ผ่านการสกัดสุดท้ายมีความเข้มข้นต่ำกว่านี้ แต่จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างและดำเนินการในกระบวนการสกัด

ในระบบการสกัดแบบต่อเนื่องได้ทำการสกัดทั้งหมด 3 สเตจ ในเทอมวัตถุดิบที่สกัดรอบสุดท้ายมีความเข้มข้นต่ำ (ตัวทำละลายใหม่จะสกัดวัตถุดิบที่ผ่านการสกัดมา รอบ) และในเทอมตัวทำละลายที่สกัดรอบสุดท้ายมีความเข้มข้นสูง (ตัวทำละลายที่ผ่านการสกัด รอบ จะสกัดวัตถุดิบใหม่) ซึ่งเสมือนการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง ทำให้ตัวทำละลายความเข้มข้นต่ำได้สกัดวัตถุดิบความเข้มข้นต่ำ และตัวทำละลายความเข้มข้นสูงได้สกัดวัตถุดิบความเข้มข้นสูง ส่งผลให้สกัดสารที่ต้องการได้มากขึ้น

ตาราง 4-3 ข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมวัตถุดิบ

ชุดวัตถุดิบ	ผลการสกัด		
		Pre-Process 1- <input type="checkbox"/>	Pre-Process <input type="checkbox"/> - <input type="checkbox"/>
1	-		
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	-	11.06	<input type="checkbox"/> 35
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	-	577.50	560.60
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	183. <input type="checkbox"/>	146.79
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	394. <input type="checkbox"/>	413.8 <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	-	Pre-Process <input type="checkbox"/> -A	Process 1-A
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	-	14.39	1.88
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	-	5 <input type="checkbox"/> 9.36	559.77
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	116.15	99.38
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	413. <input type="checkbox"/>	460.39
3	Pre-Process <input type="checkbox"/> -B	Process 1-B	Process <input type="checkbox"/> -B
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 4	8.15	1.36
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	584.94	551.08	56 <input type="checkbox"/> 70
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	193. <input type="checkbox"/>	149.76	1 <input type="checkbox"/> 7.6 <input type="checkbox"/>
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	391.7 <input type="checkbox"/>	401.33	435.07

ตาราง 4-3 ข้อมูลการสกัดแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลองแสดงในเทอมวัตถุดิบ (ต่อ)

ชุดวัตถุดิบ	ผลการสกัด		
	Process 1-□	Process □-□	Process 3-□
4	Process 1-□	Process □-□	Process 3-□
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	□1.14	6.39	1.□9
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	614.09	571.09	585.□9
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	181.45	133.38	13□08
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	43□.64	437.71	453.□1
5	Process □-A	Process 3-A	Process 4-A
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	□0.08	5.79	1.□6
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	598.90	549.3□	588.14
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	177.77	1□4.44	114.77
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	4□1.13	4□4.89	473.37
6	Process 3-B	Process 4-B	-
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	□0.4□	6.05	-
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	533.59	561.□6	-
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	119.36	143.68	-
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	414.□4	417.58	-
7	Process 4-□	-	-
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	□0.□4	-	-
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	55□.9□	-	-
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	191.93	-	-
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	361.00	-	-

บทที่ 5

สรุป

5.1 ข้อสรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเปลือกขุ่น โดยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก สารสกัดจากเปลือกด้านในขุ่นมีส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภท โอลิโกแซคคาไรด์และ โพลีแซคคาไรด์ การพิจารณาผลได้ของการสกัดและปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ (น้ำตาลอนรีดิวิซ์ เป็นกลุ่มที่ไม่ใช่อัลดีไฮด์และคีโตน ซึ่งคาดว่าเป็นฟรีไบโอติกส์) จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ การสกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 50°C ระยะเวลาสกัด 15 นาที สัดส่วนระหว่าง น้ำกลั่นกับเปลือกด้านในขุ่นอบแห้ง 15:1 (v/w) เมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 95% (v/v) จะสกัดได้ดีกว่าน้ำกลั่นและการสกัดวัตถุดิบสดจะดีกว่าวัตถุดิบแห้ง

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเมล็ดขุ่นด้วยชุดทดลองแบบต่อเนื่อง ขนาดเล็กได้เปลี่ยนวัตถุดิบจากเปลือกด้านในขุ่นเป็นเมล็ดขุ่น โดยการสกัดเมล็ดขุ่นด้วย เอทานอล 50% (v/v) เลือกใช้สกัดวัตถุดิบสด และเก็บรักษาวัตถุดิบได้ที่อุณหภูมิ -20°C โดย ออกแบบสภาวะการทดลองด้วยเทคนิค RSM เมื่อพิจารณาผลการสกัดปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด คือ ระยะเวลาสกัด 15 นาที อุณหภูมิ 60°C และสัดส่วน ระหว่างตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ 10:1 (v/w) สามารถจัดลำดับความสำคัญของตัวแปรที่มีผล ต่อการสกัดน้ำตาลอนรีดิวิซ์ คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการสกัด และสัดส่วนระหว่างตัวทำละลาย ต่อวัตถุดิบ ตามลำดับ

ผลการศึกษาการสกัดเมล็ดขุ่นด้วยเครื่องแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง ใน การทดลองในการสกัดเมล็ดขุ่นที่สภาวะ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาสกัด 60 นาที สัดส่วน ระหว่างตัวทำละลายต่อวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และใช้เอทานอล 50% (v/v) เป็นตัวทำละลาย พบว่า ผลได้ของการสกัดเฉลี่ยเท่ากับ 20.25 g/100 g วัตถุดิบแห้ง และมีปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์อยู่ ในช่วง 350-500 mg/g extracted โดยการเพิ่มจำนวนรอบการสกัดทำให้ได้ผลได้ของการสกัด เพิ่มขึ้น เพราะการสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง ทำให้ตัวทำละลายความเข้มข้นต่ำได้สกัดวัตถุดิบ ความเข้มข้นต่ำ และตัวทำละลายความเข้มข้นสูงได้สกัดวัตถุดิบความเข้มข้นสูง ส่งผลให้สกัดสารที่

ต้องการได้มากขึ้น และวัตถุดิบที่ผ่านการสกัด 3 รอบ หรือการสกัดสดแรกมีค่าผลได้ของสารสกัดต่ำ ดังนั้นจำนวน 3 สเตจอาจเพียงพอต่อการสกัดแบบต่อเนื่อง

ผลการศึกษาการสกัดเมล็ดขุ่นด้วยเครื่องแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง ขึ้นวางเงื่อนไขมีผลได้เฉลี่ยเท่ากับ 21.69 g/100 g วัตถุดิบแห้ง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขั้นตอนการสกัดข้อดีของขึ้นวางเงื่อนไขที่ได้ทำการเพิ่มเติมนี้ คือ ลดจำนวนขั้นตอนการสกัดให้เข้าสู่จุดสมดุลในการสกัดแบบต่อเนื่อง และทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

เครื่องสกัดแบบต่อเนื่องประกอบด้วยส่วนสกัดและส่วนระเหยตัวทำละลาย ส่วนสกัดมีถึงสกัดจำนวน 3 ถึง เสมือนระบบที่มีการสกัด 3 สเตจ ส่วนระเหยตัวทำละลายจะใช้สำหรับการนำกลับคืน (Recovery) ของตัวทำละลายที่มีราคาสูงและลดปริมาตรตัวทำละลายให้น้อยลงเพื่อการทำเป็นผลิตภัณฑ์หรือการขนย้ายวัตถุดิบ ในระบบระเหยสุญญากาศทำให้จุดเดือดของตัวทำละลายมีค่าต่ำลงเป็นการลดการเสื่อมสภาพของสารสำคัญจากอุณหภูมิสูง โดยผู้วิจัยได้มีการทดสอบและปรับปรุงตัวเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องเพื่อให้ดำเนินการสกัดได้ดีและสะดวก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) การเพิ่มอุปกรณ์ให้ความร้อนในถังตัวทำละลายใหม่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิได้ดีขึ้น
- (2) ในถังพักสารละลายได้ปรับเปลี่ยนเป็น Timer Control จับเวลาป้อนทำงานเพื่อกำหนดปริมาตรตัวทำละลาย และในถังสกัดได้ปรับเปลี่ยนเป็น level Control ในการตัดกระแสไฟฟ้าให้ป้อนหยุดทำงานเมื่อตัวทำละลายหมดเพื่อไม่ให้ป้อนเสีย
- (3) ระบบป้อนที่เติมตัวทำละลายใหม่ ควรต่อเข้ากับ Timer แบบดิจิตอล ซึ่งสามารถกำหนดเวลาได้แน่นอนเพื่อเติมตัวละลายให้ได้ปริมาณตามต้องการ
- (4) ควรติดตั้งสายดิน เพื่อความปลอดภัย
- (5) ควรวิเคราะห์องค์ประกอบของเมล็ดขุ่น ซึ่งส่วนคาร์โบไฮเดรตและใยอาหารจากใน **Error! Reference source not found.** ซึ่งยังไม่ชัดเจนนัก ซึ่งอาจวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่เป็น ม อ น อ แ ช ค ก า ไ ร ด้ ไคแซคคาไรด์ โอลิโกแซคคาไรด์และพอลิแซคคาไรด์ที่ชัดเจนมากขึ้น
- (6) ในงานวิจัยนี้ได้ควบคุมแหล่งพันธุ์ของวัตถุดิบ ซึ่งทำให้ราคาวัตถุดิบมีราคาสูงขึ้น แต่หากมีการผลิตระดับอุตสาหกรรมอาจหาแหล่งวัตถุดิบที่มีต้นทุนต่ำหรือได้เปล่าจากตลาด

สด กลุ่มชุมชน หรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับขนุน ที่มีเมล็ดขนุนเป็นส่วนเหลือทิ้งเพื่อมาวัตถุดิบ
ในการผลิตได้

(7) เมล็ดขนุนมีส่วนประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และใยอาหาร การผลิตควรมีการลอกเปลือกและแยกโปรตีนออกก่อนทำการสกัด เนื่องจากอาจมีการดูดซับสารที่ต้องการจากเปลือกเมล็ดขนุนและโปรตีนในเมล็ดขนุนจะละลายมาห่อหุ้มวัตถุดิบทำให้ละลายสารโพลิไกลเซอแลคไรด์ได้น้อยลง อีกทั้งสามารถเพิ่มขึ้นขั้นตอนการผลิตอื่นที่เป็น Byproduct ต่อไป

(8) ควรแยกส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ออก ซึ่งอาจสามารถใช้เป็น Byproduct ตัวอย่างเช่น การผลิตเอทานอลจากมอลแอชคาไรด์และไดแซคคาไรด์ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ (ต้มในน้ำร้อน) โดยมอลแอชคาไรด์และไดแซคคาไรด์เป็นส่วนของน้ำตาลรีดิวซ์ เป็นต้น

(9) การเพิ่มชนิดวัตถุดิบทางการเกษตรอื่น ๆ เป็นการเพิ่มความหลากหลายในการเลือกวัตถุดิบ และยังช่วยแก้ปัญหาผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาด โดยอาจทดสอบสกัดสารจากพืชชนิดอื่น ๆ แล้วทดสอบเลี้ยงแบคทีเรียโพรไบโอติกส์

(10) กระบวนการผลิตด้วยเอนไซม์หรือกระบวนการย่อยพอลิแซคคาไรด์ด้วยเอนไซม์เป็นที่น่าสนใจ ซึ่งให้ผลได้สูงในการผลิตโพรไบโอติกส์ ซึ่งอาจเพิ่มขึ้นขั้นตอนการผลิตด้วยเอนไซม์จากกากส่วนเหลือจากการสกัด (ย่อยคาร์โบไฮเดรตสายยาวให้มีสายสั้นลง) ส่งผลให้มีความได้การผลิตที่สูงมากขึ้น

บรรณานุกรม

กรมส่งเสริมการเกษตร. "สถิติการเกษตร ปี 2546." Available online:

<http://www.doae.go.th/data/kasetF.htm> Feb. 28, 2009.

กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ. 2527. ผลิตภัณฑ์ขุ่น. กรุงเทพมหานคร: กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

เฉลิมขวัญ คำคำ และ มัลลิกา ชมนาวัง. 2548. คุณรู้จัก Prebiotics แล้วหรือยัง?. *ว.อาหาร* 35(2): 96-102.

ชาคริต ทองอุไร. 2544. หลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 2. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.

ดวงจันทร์ เสงส์สวัสดิ์. 2545. โยอาหารเพื่อสุขภาพ. *อาหาร* 32(3): 157-159.

นันทวัน บุญยะประภัศร. 2534. ยาและผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาเภสัชวินิจฉัย คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. กรุงเทพฯ.

ปิ่นมณี ขวัญเมือง. 2547. คุณสมบัติของเส้นโยอาหารในการเป็น functional foods. *วารสารจารย์พา* 11(76): 50-54.

ยรรยง สุขคล้าย, ผึ้งผาย พรรณวดี และ สุรพจน์ วงศ์ใหญ่. 2547. การสกัดสารสำคัญจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรโดยใช้ถังกวน. *Engineering Journal Kasetsart* 18(52): 10-18.

วาสนา อ่อนหวาน. 2534. การศึกษาจลนศาสตร์ในการสกัดเพคตินจากเปลือกเสาวรส. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วีระ วีระกุล และ วุฒิชัย ศรีวิกรานต์โยธิน. 2546. การสกัดสารจากมะเขือเทศ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.

รายงานความก้าวหน้าโครงการการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากพืช. 2550. คณะอุตสาหกรรม การเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.

สุธรรม สุขมณี. 2548. การออกแบบวิศวกรรมเคมี. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.

อมรรัตน์ นุชประเสริฐ. 2544. การสกัดและศึกษาสมบัติทางเคมีภาพของแป้งจากเมล็ดขุ่น. สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- Benders , D. A. (1999). "Functional foods." *Benders' Dictionary of Nutritional and Food Technology*, CRC Press, New York, 15.
- Buddington, R. K., Williams, C. H., Chen, and Witherly, S. A. (1996). "Dietary supplement of neosugar alters the faecal flora and decreases activities of some reductive enzymes in human subjects." *Am. J. Clin. Nutr.*, 63, 709-716.
- Cai, W., Gu, X., and Tang, J. (2008). "Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*." *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 403-410.
- Conway, P. L. (2001). "Prebiotics and human health: the state of the art and the future perspectives." *Scand. J. Nutr.*, 45(1), 13-21.
- Cumming, J. H., and Englyst, H. N. (1995). "Gastrointestinal effects of food carbohydrate." *Am. J. Clin. Nutr.*, 61(1), 938S-945S.
- Cumming, J. H., Macfarlane, G. T., and Englyst, H. N. (2001). "Prebiotic digestion and fermentation." *Am. J. Clin. Nutr.*, 73(1), 415S-420S.
- Dickey, L. C., Parris, N., Craig, J. C., and Kurantz, M. J. (2002). "Serial batch extraction of zein from milled maize." *Industrial Crops and Products*, 15(1), 33-42.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., and Smith, F. 1956. Calorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28: 350-356.
- Ekvall, J., Stegmark, R., and Nyman, M. (2007). "Optimization of extraction methods for determination of the raffinose family oligosaccharides in leguminous vine peas (*Pisum sativum* L.) and effects of blanching." *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(1), 13-18.
- Gibson, G. R., and Roberfroid, M. B. (1995). "Dietary modulation of the human colonic microbiota : introduction the concept of prebiotics." *J. Nutri.*, 125(1), 1401-1402.
- Grizard, D., and Barthomeuf, C. (1999). "Enzymatic synthesis and structure determination of NEO-FOS." *Food Biotechnol.*, 13(1), 93-105.
- Holm, F. (2003). "Functional food ingredients cardiovascular health." *Food Group Denmark, Denmark*, 40.

- Kim, S. Kim, W., and Hwang, In K. (2003). "Optimization of the Extraction and Purification of Oligosaccharides from Defatted Soybean Meal." *International Journal of Food Science and Technology*, 38(1), 337-342.
- Kolida, S., Tuohy, K., and Gibson, G. R. (2002). "Prebiotic effects of inulin and oligofructose." *Brit. J. Nutr.*, 87(2), 193-197.
- Korakli, M., and Vogel, R. F. (2006). "Structure/function of homopolysaccharide producing glycosyltransferase and therapeutic potential of their synthesized glycans." *Appl. Microbiol. Biot.* 71(1), 790-803.
- L'Hocine, L., Wang, Z., Jiang, B., and Xu, S. (2000). "Purification and partial characterization of fructosyltransferase and invertase from *Aspergillus niger* AS0023." *Journal of Biotechnology*, 81(1), 73-84.
- Lee, W. C., Yusof, S., Hamid, N. S. A., and Baharin, B. S. (2006). "Optimizing conditions for enzymatic clarification of banana juice using response surface methodology (RSM)." *Journal of Food Engineering*, 73(1), 55-63.
- Lee, Y. H., Jung, H. O., and Rhee, C. O. (1987). "Solids Loss with Water Uptake During Soaking of Soybeans." *Korean Journal of Food Science and Technology*, 19(1), 492-498.
- Lingyun, W., Jianhua, W., Xiaodong, Z., Da, T., Yalin, Y., Chenggang, C., Tianhua, F., and Fan, Z. (2007). "Studies on the extracting technical conditions of inulin from Jerusalem artichoke tubers." *Journal of Food Engineering*, 79(3), 1087-1093.
- Manning, T. S., and Gibson, G. R. (2004). "Prebiotics." *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 18(2), 287-298.
- Miller, G. L. (1959). "Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar." *Analytical Chemistry*, 31(1), 426-428.
- Nissreen, A. G., and Mckenna, B. (1997). "Hydration kinetics of red kidney beans (*phaseolus vulgaris* L.)." *Journal of Food Science*, 62(1), 520-523.
- Orafti. (2005). "Active food scientific monitor." *An Orafti Newsletter*, Nr.
- Robertson, J. A., Ryden, P., Louise Botham, R., Reading, S., Gibson, G., and Ring, S. G. (2001). "Structural Properties of Diet-Derived Polysaccharides and Their Influence on Butyrate Production During Fermentation." *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 34(8), 567-573.

- Scholz-Ahrens, K. E., Schaafsma, G., GHM van der Heuvel, E. and Schrezenmeir, J. (2001). "Effects of prebiotics on mineral metabolism." *Am. J. Clin. Nutr.*, 73(1), 459S-464S.
- Senol, A., and Aydin, A. (2006). "Solid-liquid extraction of caffeine from tea waste using battery type extractor: Process optimization." *Journal of Food Engineering*, 75(4), 565-573.
- Shi, X. Q., Chang, K. C., Schwarz, J. G., Wiesenborn, D. P., and Shih, M. C. (1996). "Optimizing pectin extraction from sunflower heads by alkaline washing." *Bioresource Technology*, 58(3), 291-297.
- Simmering, R., and Blaut, M. (2001). "Pro- and Prebiotics – the tasty guardian angels?." *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 55(1), 19-28.
- Tomomatsu, H. (1994). "Health effects of oligosaccharides." *Food Technol.*, 48(1), 61-65.
- Triveni, R., Shamala, T. R., and Rastori, N. K. (2001). "Optimised production and utilisation of exopolysaccharide from *Agrobacterium radiobacter*." *Process Biochemistry*, 36(8), 787-795.
- Van Loo, J., Cummings, J., Delzenne, N., Englyst, H., Franck, A., Hopkins, M., Kok, N., Macfarlane, G., Newton, D., Quigley, M., Roberfroid, M., Van Vliet, T. and Van den Heuvel, E. (1999) "Functional food properties of non-digestible oligosaccharides: a consensus report from the ENDO project (DGXII AIRII-CT94-1095)." *British Journal of Nutrition*, 53(1), 681-687.
- Wang, Q.-e., Ma, S., Fu, B., Lee, F. S. C., and Wang, X. (2004). "Development of multi-stage countercurrent extraction technology for the extraction of glycyrrhizic acid (GA) from licorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch)." *Biochemical Engineering Journal*, 21(3), 285-292.
- Wiesenborn, D. P., Wang, J., Chang, K. C., and Schwarz, J. G. (1999). "Comparison of continuous and batch processes for pectin extraction from sunflower heads." *Industrial Crops and Products*, 9(3), 171-181.
- Wijnands, M. V. W. (1999). "A comparison of the effects of dietary cellulose and fermentable galacto-oligosaccharides, in rat model of colorectal carcinogenesis: fibre in both high and low fat backgrounds." *Carcinogenesis*. 20(1): 651-656.

- Wu, Y., Cui, S. W., Tang, J., and Gu, X. (2007). "Optimization of extraction process of crude polysaccharides from boat-fruited sterculia seeds by response surface methodology." *Food Chemistry*, 105(4), 1599-1605.
- Xiaoli, X., Liyi, Y., Shuang, H., Wei, L., Yi, S., Hao, M., Jusong, Z., and Xiaoxiong, Z. (2008). "Determination of oligosaccharide contents in 19 cultivars of chickpea (*Cicer arietinum* L) seeds by high performance liquid chromatography." *Food Chemistry*, 111(1), 215-219.
- FAO technical. "Food and Agriculture Organization of the United Nations." Accessed online: http://www.fao.org/ag/agn/agns/files/Prebiotics_Tech_Meeting_Report.pdf Apr. 23, 09.
- Frost & Sullivan Research Service. "European Companion Animal Feed Prebiotics Markets" Accessed online : <http://www.frost.com/> Apr. 23, 09.
- Realtime systems. "The European market for probiotics and prebiotics." Available online: <http://www.ingredientsdirectory.com/reports/report2.pdf> Apr. 23, 09.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

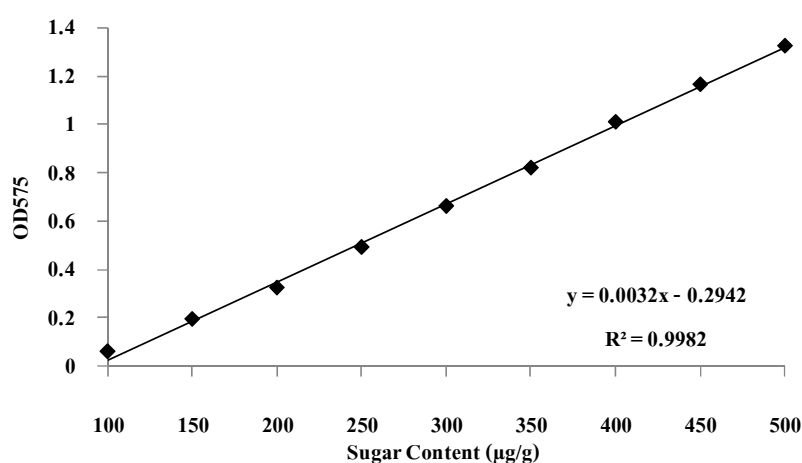
(1) การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี **Modified dinitrosalicylic acid method** (Miller, 1959)

สารเคมี

สารละลาย Dinitrosalicylic acid ประกอบด้วย Dinitrosalicylic acid 1%, Phenol 0.2 %, Sodium sulfite 0.05 %, Sodium hydroxide 1% และ Sodium potassium tartrate 20%

การเตรียมตัวอย่างสารละลายกลูโคสมาตรฐาน

เตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานโดยชั่งน้ำตาลกลูโคส 0.1 กรัม ละลายในขวดปรับปริมาตรเติมน้ำกลั่นให้ครบ 100 mL จากนั้นนำไปเจือจางให้ได้สารละลายมาตรฐานน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 และ 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วทำการทดลองโดยเติมสารละลายกลูโคสแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 100 ไมโครลิตรลงในไมโครไตเตอร์เพลท แล้วเติมสารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิก (D_{NS}) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เขย่าผสมให้เข้ากัน หุ้มไมโครไตเตอร์เพลทด้วยพลาสติกใสและนำไปใส่ในถุงซิปล็อค (Plastic zipper bag) นำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำให้เย็นทันทีและนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate reader เทียบค่าการดูดกลืนแสงด้วยกราฟมาตรฐานของกลูโคส



ภาพประกอบ ก-1 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์
การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ในตัวอย่าง

นำตัวอย่างที่เจือจางเหมาะสมปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในไมโครไตเตอร์เพลท แล้วเติมสารละลายกรดไดโนโตรซาลิไซลิก (DNS) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เขย่าผสมให้เข้ากัน หุ้มไมโครไตเตอร์เพลทด้วยพลาสติกใสและนำไปใส่ในถุงซิปล (Plastic zipper bag) นำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำให้เย็นทันทีและนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate reader เทียบค่าการดูดกลืนแสงด้วยกราฟมาตรฐานของกลูโคส

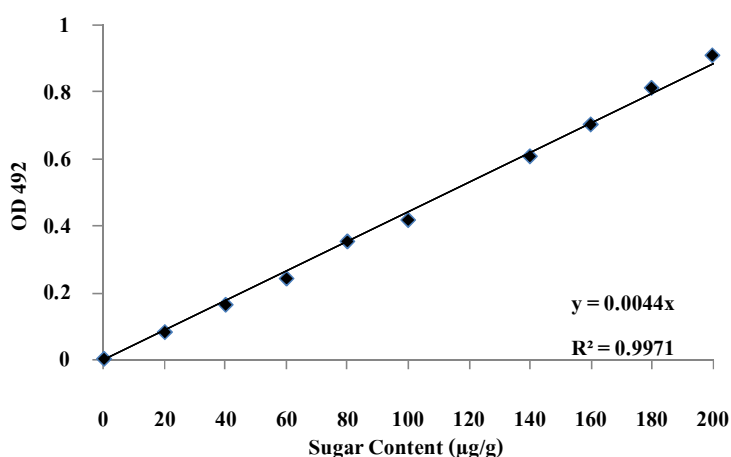
(2) การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) โดยวิธี Modified phenol sulfuric method (Fox และ Robyt, 1991)

สารเคมี

Phenol 5% (w/v) และ Conc.sulfuric acid

การวิเคราะห์น้ำตาลทั้งหมดในตัวอย่าง

เติมตัวอย่างที่เจือจางเหมาะสมปริมาตร 25 ไมโครลิตร ลงในไมโครไตเตอร์เพลท และเติมสารละลาย Phenol 5% (w/v) ปริมาตร 25 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน (ประมาณ 30 วินาที) นำไมโครไตเตอร์เพลทวางบนก้อนน้ำแข็งและเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) ปริมาตร 125 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน (ประมาณ 30 วินาที) หุ้มไมโครไตเตอร์เพลทด้วยพลาสติกใสและนำไปใส่ในถุงซิปล (Plastic zipper bag) นำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำให้เย็นทันทีและนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 492 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate reader เทียบค่าการดูดกลืนแสงด้วยกราฟมาตรฐานของกลูโคส



ภาพประกอบ ก-2 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบ

ตาราง ข-1 ผลของระยะเวลา สกัดด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที ในการสกัดโดยชุดทดลองแบบกะขนาดเล็ก

ระยะเวลาในการสกัด (min)	ผลได้ของสารสกัด (g/100 g วัตถุดิบแห้ง)	น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)
30	23.86	674.34	457.95	216.39
50	22.42	734.26	481.58	252.68
60	24.64	657.61	484.96	172.65

ตาราง ข-2 ผลของระยะเวลาในการสกัด สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ 10:1 (v/w) และอุณหภูมิในการสกัด 60°C โดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น

ระยะเวลาในการสกัด (min)	ผลได้ของสารสกัด (g/100 g วัตถุดิบแห้ง)	น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)
15	24.53	706.13	469.31	236.82
30	25.41	688.66	487.75	200.91
60	27.68	687.14	492.52	194.62

ตาราง ข-3 ผลของสัดส่วนระหว่างตัวทำละลายกับวัตถุดิบ อุณหภูมิ 60°C และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที โดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น

L/S ratio (v/w)	ผลได้ของสารสกัด (g/100 g วัตถุดิบ แห้ง)	น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)
8 : 1	23.70	555.13	455.94	99.19
10 : 1	24.64	657.61	484.96	172.65
15 : 1	27.52	716.67	508.02	208.65

ตาราง ข-4 ผลของความชื้นของเปลือกขมุน (เปลือกขมุนสดและเปลือกขมุนอบแห้ง) และตัวทำละลาย (น้ำกลั่นและเอทานอล 95% (v/v)) ใช้เปลือกขมุนสด 200 กรัม และตัวทำละลาย 400 mL สกัดที่อุณหภูมิ 60°C และระยะเวลาในการสกัด 120 นาที

วัตถุดิบ /ตัวทำละลาย	ผลได้ของสารสกัด (g/100 g วัตถุดิบ แห้ง)	น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	น้ำตาลนอน รีดิวิซ์ (mg/g extracted)
สด/น้ำ	23.39	499.55	468.82	30.73
สด/เอทานอล	23.39	632.10	479.13	152.97
แห้ง/น้ำ	25.22	520.85	476.97	43.88
แห้ง/เอทานอล	5.38	270.41	184.12	86.29

ตาราง ข-5 ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดฟีนีลโอดีคส์จากเมล็ดขนุนบดด้วยเครื่องสกัดแบบต่อเนื่องโดยชุดทดลองขนาดเล็ก

การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาสกัด (min)	สัดส่วนเอทานอล ต่อเมล็ดขนุน (v/w)	น้ำตาลนอริดิวิซ์ (mg/g extracted)
1	60	15	8	490.26
2	50	45	10	35.07
3	50	30	8	280.72
4	50	30	8	281.65
5	50	15	6	375.81
6	40	45	8	143.87
7	40	15	8	9.89
8	50	15	10	350.72
9	40	30	10	24.52
10	50	30	8	343.78
11	60	30	10	265.44
12	40	30	6	44.15
13	50	45	6	323.96
14	60	30	6	178.13
15	60	45	8	189.80

(1) การหาค่าสภาวะดำเนินการที่เหมาะสม

การหาค่าสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลนอริดิวิซ์ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) และขอบเขตที่สนใจ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลนอริดิวิซ์กับตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ในรูปแบบจำลองที่ได้จากสมการ 4.1 สร้างได้จากสมการที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Regression และข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองและข้อมูล ANOVA ของแบบจำลองแสดงดังตาราง 7 และตาราง 8 ตามลำดับ

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1^2 + b_4X_1X_2 + b_5X_2X_3 \quad (\text{ข-1})$$

ตาราง ข-6 ข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองของการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์จากเมล็ดขนุน

		P value	Std error	-95%	95%	t stat	VIF
b_0	-4138.1	0.00395	1077.0	-6574.4	-1701.8	-3.842	
b_1	149.26	0.00569	41.38	55.65	242.87	3.607	223.29
b_2	37.36	0.02287	13.64	6.507	68.21	2.739	54.56
b_3	-1.163	0.01853	0.405	-2.080	-0.246	-2.868	215.29
b_4	-0.724	0.02164	0.261	-1.315	-0.133	-2.773	59.00
b_5	-0.700	0.142	0.435	-1.685	0.284	-1.609	4.556

โดยแบบจำลองที่ได้มีค่า $R^2 = 0.819$ และ $R^2_{\text{Adjust}} = 0.719$

ตาราง ข-7 ANOVA ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของสภาวะดำเนินการที่มีต่อการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์จากเมล็ดขนุน

Source	SS	SS%	MS	F	F Signif	df
Regression	250711	82	50142.3	8.172	0.00367	5
Residual	55222.0	18	6135.8	-	-	9
LOF error	52609.4	17 (95)	7515.6	5.7535	0.156	7
Pure error	2612.5	1 (5)	1306.3	-	-	2
Total	305933	100	-	-	-	14

ตาราง ข-8 ข้อมูลแสดงผลของการสกัดแบบต่อเนื่องจากเมล็ดขนุนบดตาม **Error! Reference source not found.**

ชุดวัตถุดิบ	ผลการสกัด		
Pre-process 1	-	-	Pre-process 1-C
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	-	-	11.06
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	-	-	577.50
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	-	183.22
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	-	-	394.28

ตาราง ข-8 ข้อมูลแสดงผลของการสกัดแบบต่อเนื่องจากเมล็ดขนุนบดตาม **Error! Reference source not found.** (ต่อ)

ชุดวัตถุดิบ	ผลการสกัด		
	Pre-process 2-A	Pre-process 2-B	Pre-process 2-C
Pre-process 2			
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	14.39	22.24	2.35
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	529.36	584.94	560.60
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	116.15	193.22	146.79
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	413.21	391.72	413.82
Process 1	Process 1-A	Process 1-B	Process 1-C
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	1.88	8.15	21.14
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	559.77	551.08	614.09
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	99.38	149.76	181.45
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	460.39	401.33	432.64
Process 2	Process 2-A	Process 2-B	Process 2-C
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	20.08	1.36	6.39
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	598.90	562.70	571.09
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	177.77	127.62	133.38
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	421.13	435.07	437.71
Process 3	Process 3-A	Process 3-B	Process 3-C
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	5.79	20.42	1.29
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	549.32	533.59	585.29
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	124.44	119.36	132.08
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	424.89	414.24	453.21

ตาราง ข-8 ข้อมูลแสดงผลของการสกัดแบบต่อเนื่องจากเมล็ดขนุนบดตาม **Error! Reference source not found.** (ต่อ)

ชุดวัตถุดิบ	ผลการสกัด		
	Process 4-A	Process 4-B	Process 4-C
Process 4			
ผลได้ของสารสกัด (g/100g วัตถุดิบแห้ง)	1.26	6.05	20.24
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g extracted)	588.14	561.26	552.92
น้ำตาลรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	114.77	143.68	191.93
น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (mg/g extracted)	473.37	417.58	361.00

ตาราง ข-9 ตารางระยะเวลาการดำเนินการในแต่ละขั้นตอนการสกัด

ขั้นที่	รายการ	รายละเอียด	เวลา (min)	รวม (min)
Pre-Process 1	ใส่วัตถุดิบ	ถังสกัด C	2	2
	เติมตัวทำละลาย	ถังพัก A*	3	5
		ถังพัก B*	3	8
		ถังพัก C*	3	11
	ปล่อยตัวทำละลายจากถังพักมาถังสกัด	ถัง A, B และ C	5	16
	ทำการสกัด	เปิดปั๊ม A, B และ C**	60	46
เก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรตัวทำละลาย		5	51	
Pre-Process 2	ดั่งสารละลาย	ถังสกัด A ➤ ถังพัก C*	3	54
		ถังสกัด B ➤ ถังพัก A*	3	57
		ถังสกัด C ➤ ถังพัก B*	3	60
	ใส่วัตถุดิบ	ถังสกัด C	2	62
		ถังสกัด A	2	64
	ปล่อยตัวทำละลายจากถังพักมาถังสกัด	ถัง A, B และ C	5	69
	ทำการสกัด	เปิดปั๊ม A, B และ C**	60	99
	เก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรตัวทำละลาย		5	104
Process 1	ดั่งสารละลาย	ถังสกัด B ➤ ถังระเหย*	3	107

	อังกฤษ C ▶ อังกฤษ B*	3	110
--	----------------------	---	-----

ตาราง ข-9 ตารางระยะเวลาการดำเนินการในแต่ละขั้นตอนการสกัด (ต่อ)

ขั้นที่	รายการ	รายละเอียด	เวลา (min)	รวม (min)
Process 1		ถึงสกัด A ➤ ถึงพัก C*	3	113
	ใส่วัตถุดิบ	ถึงสกัด C*	2	115
	เติมตัวทำละลาย	ถึงพัก A	3	118
	ปล่อยตัวทำละลายจากถึงพักมาถึงสกัด	ถึง A, B และ C	5	123
	ทำการสกัด	เปิดปั๊ม A, B และ C**	60	153
	เก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรตัวทำละลาย		5	158
Process 2	ดั่งสารละลาย	ถึงสกัด C ➤ ถึงระเหย*	3	161
		ถึงสกัด A ➤ ถึงพัก C*	3	164
		ถึงสกัด B ➤ ถึงพัก A*	3	167
	เติมตัวทำละลาย	ถึงพัก B*	3	170
	ใส่วัตถุดิบ	ถึงสกัด A	2	172
	ปล่อยตัวทำละลายจากถึงพักมาถึงสกัด	ถึง A, B และ C	5	177
	ทำการสกัด	เปิดปั๊ม A, B และ C**	60	207
	เก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรตัวทำละลาย		5	212
Process 3	ดั่งสารละลาย	ถึงสกัด A ➤ ถึงระเหย*	3	215
		ถึงสกัด B ➤ ถึงพัก A*	3	218
		ถึงสกัด C ➤ ถึงพัก B*	3	221
	เติมตัวทำละลาย	ถึงพัก B*	3	224
	ใส่วัตถุดิบ	ถึงสกัด A	2	226
	ปล่อยตัวทำละลายจากถึงพักมาถึงสกัด	ถึง A, B และ C	5	231
	ทำการสกัด	เปิดปั๊ม A, B และ C**	60	261
	เก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรตัวทำละลาย		5	266

* แสดงขั้นตอนที่สามารถทำพร้อมกันกับขั้นตอนที่มี * ติดกัน

** แสดงระยะเวลาในการสกัดซึ่งขึ้นกับสถานะในการทดลอง

Process 4 จะดำเนินการเช่นเดียวกับ Process 1

เมื่อสกัดครบ Process 4 จะใช้เวลารวม 8 ชั่วโมง 20 นาที

ภาคผนวก ค

การออกแบบชุดทดลองแบบต่อเนื่องขนาดโรงงานจำลอง

การออกแบบถังสกัดและอุปกรณ์อื่น ๆ โดยแยกเป็นชนิดถัง มีรายละเอียด ดังนี้

(1) การออกแบบถังสกัด

การกำหนดความหนาของตัวถังและฝาถังสกัด

ข้อมูลประกอบ

ที่อุณหภูมิไม่เกิน	110 °C	
วัสดุที่เลือกใช้	Stainless steel (304)	
ค่าความเค้นประลัย (Ultimate stress, $S_{ultimate}$)		540 \square/mm^2
ค่าความเค้นคราก (Yield stress, S_{yield})		200 \square/mm^2
ค่าความเค้นโลหะแผ่น (Stress plate, S_{plate})		113 \square/mm^2
การเชื่อมต่อแบบ	Double welded butt joint	
ตรวจสอบรอยเชื่อม	ตรวจพินิจด้วยสายตา	

ข้อมูลขั้นต้น

ความดันใช้งาน	$P = 1 \text{ bar}$ (ความดันบรรยากาศ)
ความดันในการออกแบบ	$P_{des} = 1.25P$ $= 1.25 \times 1 \times 0.102 = 0.1275 \text{ MPa}$
อุณหภูมิใช้งาน	$T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
อุณหภูมิในการออกแบบ	$T_{des} = T + 30 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
ประสิทธิภาพการเชื่อม (Joint efficiency)	$f = 0.75$

ความเค้นในการออกแบบ

S_{des} = ค่าที่ต่ำกว่าจาก

$$S_{des} = \frac{1}{4} S_{ultimate} * f = 101.25 \text{ MPa}$$

$$S_{des} = \frac{5}{8} S_{yield} * f = 93.75 \text{ MPa}$$

$$S_{des} = S_{plate} * f = 84.75 \text{ MPa}$$

ใช้ค่า $S_{des} = 84.75 \text{ MPa}$

ความหนาขดเชยการกัดกร่อน $C = 1 \text{ mm}$

ถังบรรจุรูปทรงกระบอก ฝาถังแบน

กำหนดสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง = 1-2

ความจุของถังสกัด 60 ลิตร

$$\text{ความจุ} \quad V = 0.785 D_i^2 L = 1.1775 D_i^3$$

$$\text{เมื่อใช้ } L/D_i = 1 \quad V = 0.785 D_i^2 L = 0.785 D_i^3$$

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{V}{0.785}} = \sqrt[3]{\frac{0.060}{0.785}} = 0.42$$

$$\text{เมื่อใช้ } L/D_i = 2 \quad V = 0.785 D_i^2 L = 1.57 D_i^3$$

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{V}{1.57}} = \sqrt[3]{\frac{0.060}{1.57}} = 0.34$$

กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D_i = 0.40 \text{ m} = 400 \text{ mm}$

$$V = 0.060 = 0.785 D_i^2 L = 0.785 \times 0.4^2 \times L$$

ความยาวตัวถัง $L = 0.48 \text{ m}$ เลือกใช้ 600 mm

$$L/D_i = 0.060/0.040 = 1.5$$

ส่วนของตัวถัง (Shell)

ความหนาต่ำสุดที่ปลอดภัย (t)

$$0.385 S_{des} = 0.385 \times 84.75 = 32.63 \text{ MPa} > P_{des} = 0.1275 \text{ MPa}$$

$$\text{ผ่านเงื่อนไข ค่า } 0.0385 S_{des} \geq P_{des}$$

ความหนาของตัวถัง

$$t = \frac{P_{des} D_i}{2 S_{des} - 1.2 P_{des}} = 0.301 \text{ mm}$$

ความหนาของตัวถังที่ปลอดภัยตลอดอายุที่ใช้งานเท่ากับ $0.301 + 1 = 1.301 \text{ mm}$

กำหนดเลือกใช้ความหนา (ตามความหนาของโลหะแผ่น) 3 mm

$$\text{พื้นที่ผิวด้านใน } A = 3.1416 D_i L = 3.1416 \times 0.4 \times 0.6 = 0.7540 \text{ m}^2$$

$$\text{ปริมาตรเนื้อเหล็กชั้นต่ำที่ใช้ } V_{mat} = 0.003 \times 0.7540 = 0.00226 \text{ m}^3$$

ส่วนของฝาถัง (Head)

ความหนาต่ำสุดที่ปลอดภัย (t)

$$t = C_p D_e \sqrt{\frac{P_{des}}{S_{des}}} = 6.206 \text{ mm}$$

กำหนดความหนาของฝาถังที่ปลอดภัยเป็นเลขจำนวนเต็มคือ 7 mm

ดังนั้นถังสกัดประกอบด้วยถังใบนอกทำด้วยสแตนเลส สตีล หนา 3 mm. มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 cm. สูง 60 cm. ให้ความร้อนโดยใช้ตัวกลางความร้อนผ่านขดลวดทองแดงจากด้านล่างของถังสกัดและออกทางด้านบน และมีระบบกวน (Circulate) ด้วยปั๊มตัวทำละลายจากก้นถังมาฉีดฝอยด้านบน ผ่านหัวฉีดน้ำให้เป็นฝอย (Nozzle) และถังใบในเป็นตะแกรงด้วยสแตนเลส สตีลมีรูขนาด 1 mm. มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm. สูง 50 cm. หนา 3 mm. สำหรับใส่วัตถุคิบ โดยถังสกัดมีจำนวน 3 ถัง

(2) การออกแบบถังระเหยสูญญากาศ

กำหนดค่าอุณหภูมิในการออกแบบ $T_{des} = 130^{\circ}\text{C}$

กำหนดความดันในการออกแบบ $P_{des} = 0.102 \text{ MPa}$

เลือกวัสดุในงานอาหารใช้เป็น Stainless steel 304

ชนิดฝาถังเป็นรูปไข่

เลือกวิธีการเชื่อมต่อแบบ Double melled butt joint ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสายตา

ค่า E = 19700 N/mm^2

ค่า V = 0.32 (Perry handbook, table 28.18)

ความหนาของตัวถังทรงกระบอก

กำหนดความหนาตั้งต้น (Initial thickness, t_i) = 3 mm

ความความหนาซดเซยการกัดกร่อน (C) = 1 mm

กำหนดความหนาในการทดสอบ t_{test} = $t_i - C = 2 \text{ mm}$

คำนวณความยาววิกฤติ (Critical length, L_c)

$$L_c = 1.14(1 - V^2)^{\frac{1}{4}} D_o \left(\frac{D_o}{t_{test}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

กำหนด $D_i = 300 \text{ mm}$

$$D_o = D_i + 2C = 306 \text{ mm}$$

ดังนั้น $L_c = 4201.362 \text{ mm}$

กำหนดความยาวตัวถัง

$$L' = L + \frac{2h}{3}$$

$$h = D_i/4$$

ดังนั้น $L' = 550 \text{ mm}$

เมื่อ $L_c > L'$ จะได้ว่า

$$P_C \approx 2.80 \left(\frac{D_o}{t_{\text{test}}} \right)^{-2.5} \left(\frac{L'}{D_o} \right)^{-1} = 1.06 \text{ MPa}$$

$$P_a = \frac{P_c}{4} = 0.265 \text{ MPa}$$

พบว่า $P_a \geq P_{\text{des}}$ ดังนั้นความหนาของตัวถังในเป็น 3 mm

ถังระเหยขนาดใหญ่มีฝาถังรูปโค้ง ใช้ฮีตเตอร์แบบรัดท่อ 2 อัน รัศรอบตัวถังระเหยจากภายนอก มีป้อนเพื่อหมุนเวียนและฉีดฝอยเพื่อเพิ่มอัตราการระเหย ส่วนถังระเหยขนาดเล็กมีฝาถังแบบโค้งและใช้ฮีตเตอร์แบบรัดท่อ 2 อัน เช่นเดียวกัน

(3) การออกแบบเครื่องควบแน่น

การกำหนดรายละเอียดระดับ 1

ชนิดของ Exchanger	Shell-and-tube
ของไหลในกระบวนการ	ไอน้ำ
Molecular weight	18.015
ความร้อนจำเพาะ, C_p	1.8842 kJ/kg-K
ความร้อนแฝงของน้ำ	2257 kJ/kg
อัตราไหล, W_p	30.00 kg/h (คิดเป็น 4.8 m ³ /h)
ความดันเข้า, P_{des}	101.25 kPa
อุณหภูมิเข้า, T_1	100 °C (คิดเป็น 373.15 K)
อุณหภูมิออก, T_2	33 °C (คิดเป็น 306.15 K)
ความหนาแน่น	0.59776 kg/m ³
ภาระทางความร้อน	$Q = \left(\frac{1000}{3600} \right) W_p C_p T_1 - T_2 + \left(\frac{1000}{3600} \right) W_p \lambda = 19240 W$
	แต่ความร้อนจากถังระเหยใช้เพียง 19000 W
ของไหลดำเนินการ	น้ำหล่อเย็น
อุณหภูมิเข้า, t_1	22 °C (คิดเป็น 295.15 K)
อุณหภูมิออก, t_2	32 °C (คิดเป็น 305.15 K)
ความหนาแน่น	994 kg/m ³
ความร้อนจำเพาะ, C_s	4.187 kJ/kg-K
ความหนืด, μ	0.71

สเปส นำความร้อน, k 0.63

อัตราการไหล $W_p C_p (T_2 - T_1) = W_s C_s (t_1 - t_2) + W_s \lambda$

$$W_s = \frac{C_p (T_2 - T_1) + \lambda}{C_s (t_1 - t_2)} W_p = \frac{19000}{4.187(32 - 22)} = 453.786 \text{ kg/h}$$

ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอก $LMTD = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2}\right)}$

$$= 31.291 \text{ }^\circ\text{C}$$

สัมประสิทธิ์ปรับแก้อุณหภูมิ $F_t = 0.8$

ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย $\Delta T_{mean} = F_t \cdot LMTD = 0.8 \cdot 31.291 = 25.03 \text{ }^\circ\text{C}$

กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายโอนความร้อน

ค่ารวม, U $1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$

ของตะกรันน้ำ, r_{fs} $0.00053 \text{ m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C/W}$

ของตะกรันอากาศ, U_{fp} $5000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$

เมื่อใช้งาน $\frac{1}{U_{service}} \approx \frac{1}{U} + \frac{1}{U_{fp}} + \frac{1}{U_{fs}} = 0.00173$

$$U_{service} = 578.035 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

พื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนเบื้องต้น

$$A_p = \frac{Q}{U_{service} \cdot \Delta T_{mean}}$$

$$A_p = 1.05046 \text{ m}^2$$

การกำหนดรายละเอียดในระดับขั้นที่ 2

การกำหนดของไหล

ของไหลในท่อ	น้ำหล่อเย็น
ของไหลในตัวยัง	น้ำและอากาศ
แบบของ Exchanger	Fixed tube sheet
การจัดเรียงท่อ	Δ 20x24 TEMA Copper tube
ระยะระหว่างท่อ, P_T	24 mm
ช่องว่างระหว่างท่อ, C'	4 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, d_i	15.784 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก, d_o	20 mm

ความยาวท่อรวม, L 21.195 m

กำหนดความหนาของท่อ

ความดันที่ปลอดภัย, P_s 0.12656 MPa

อุณหภูมิในการออกแบบ, T_{des} 130 °C

ความเค้นที่ปลอดภัย, S_s 95.75 MPa

ความหนาขดเชยการกัดกร่อน, C 1.5 mm

$$\text{ความหนาต่ำสุดที่ปลอดภัย } t_m = \frac{d_0}{2.3} \left(\frac{P_s}{S_s} + \frac{1}{30} \right) + C = 1.80135 \text{ mm}$$

กำหนดความหนา t_m 2.108 mm (B.W.G.14)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, d_i 15.784 mm

กำหนดจำนวน Pass

Shell pass n_{sp} 1

Tube pass n_{tp} 1

$$\text{สัดส่วนผลต่างอุณหภูมิของไหล } R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = 6.7$$

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ } S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = 0.12821$$

หาค่าของสปส.ปรับแก้อุณหภูมิ (F)

$$X = \frac{1 - \left(\frac{RS - 1}{s - 1} \right)^{1/n_{sp}}}{R - \left(\frac{RS - 1}{S - 1} \right)^{1/n_{sp}}} = 0.12821$$

$$F_T = \left[\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \right] \frac{\ln \left(\frac{1 - X}{1 - RX} \right)}{\ln \left(\frac{2/X - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{2/X - 1 - R - \sqrt{R^2 + 1}} \right)} = 0.77192$$

(เงื่อนไข $F_t > 0.75$)

ตามเงื่อนไข F_t ไม่ต่ำกว่า 0.75 ใช้จำนวน Shell pass เท่ากับ 1

$$\text{คำนวณผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยใหม่ } \Delta T_{\text{mean}} = F_T \cdot \text{LMTD} = 24.1542^\circ \text{C}$$

$$\text{ปรับแก้ค่า } A_p \text{ ใหม่ } A_p = \frac{Q}{U_{\text{service}} \Delta T_{\text{mean}}} = 1.36084 \text{ m}^2$$

กำหนดความยาวท่อ $L_T = 500 \text{ mm}$ (ปรับลดครั้งละ 250 ซม)

$$L_{\text{eff}} = L_T - 75\text{mm} = 425\text{mm}.$$

กำหนดจำนวนท่อทั้งหมดที่บรรจุอยู่ในเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน (n_T)

$$\text{จำนวนท่อทั้งหมด, } n_T = 36$$

$$\text{กำหนดขนาดระบุดำรง, } D = 200 \text{ mm} \quad (\text{บรรจุได้สูงสุด } 36)$$

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มท่อ} \quad D_b = d_0 \left(\frac{n_T}{K} \right)^{1/n} = 181.657 \text{ mm}$$

$$\text{ระยะที่ต้องเผื่อไว้สำหรับขอบในตัวถัง} \quad C_b = 8 + 0.01D_b = 9.81657 \text{ mm}$$

ตรวจสอบสัดส่วนความยาวท่อและตัวถัง

$$L_T/D = 2.5 \quad (\text{เงื่อนไข อยู่ในช่วง } 2.5-8)$$

ตัวถัง

วัสดุ Stainless steel (304)

ความหนาต่ำสุด, t_m 1.51043 mm

กำหนดความหนาที่ใช้, t_m 3 mm

กำหนดรายละเอียดของ Baffle

ชนิด Segmental แบบ Side by side

ร้อยละการตัด $P_{BC} = 25$

ระยะระหว่าง Baffle $P_B = 0.2D_i = 40 \text{ mm}$ (เงื่อนไข ไม่น้อยกว่า 50 mm)

เลือกใช้ $P_B = 0.2D_i = 50 \text{ mm}$

เครื่องควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 cm. ยาว 50 cm. หนา 3 mm. ติดตั้งเอียงขวาประมาณ 10° เพื่อให้ น้ำออกไหลทางน้ำออกได้ง่าย บนถังรองรับตัวทำลายหลังควบคุม และมีท่อจำนวน 36 ท่อ อยู่ในถัง กั้นด้วย Baffle 3 แผ่น ซึ่ง Baffle มีการตัดร้อยละ 25 วางสลับบน-ล่าง โดยให้ไอน้ำผ่านเข้าสู่ตัวถัง (Shell) และน้ำหล่อเย็นผ่านท่อ (Tube) แบบไหลผ่านครั้งเดียว (Single pass) มีส่วนต่ำสุดของตัวถังจะต่อท่อเพื่อเก็บสารที่ได้จากการควบคุม ท่อน้ำหล่อเย็นภายในเครื่องควบคุม มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 cm. ระยะระหว่างท่อ 0.4 cm. หนาประมาณ 0.2 cm. จำนวน 36 ท่อ จัดวางท่อแบบสามเหลี่ยม

(4) การออกแบบถังให้ความร้อน

ถังให้ความร้อนจะให้ความร้อนแก่ตัวกลาง และป้อนให้ความร้อนแก่ตัวทำลายในถังสกัดทั้ง 3 ถัง สร้างด้วยสแตนเลส สตีลหนา 3 mm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm. สูง 70 cm. มีฝาแบบแบน โดยมีคอยล์ให้ความร้อน เทอร์โมคัปเปิ้ลในการควบคุมอุณหภูมิ

(5) การออกแบบถังเก็บสารละลาย (Solvent tank)

อยู่ด้านล่างของเครื่องควบแน่น ต่อเข้ากับถังตกไอ (Tap) ก่อนต่อกับปั๊มสุญญากาศ ซึ่งมีขนาดเพียงพอต่อการรองรับสารที่ระเหยได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm. ถังหนา 3 mm. สูง 80 cm.

ตาราง ก-1 แสดงปริมาตรและจำนวนถังของชุดสกัดแบบต่อเนื่อง

ชนิด	ปริมาตร (ลิตร)	จำนวน (ถัง)
ส่วนสกัดแบบต่อเนื่อง		
ถังสารละลายใหม่	180	1
ถังให้ความร้อน	88	1
ถังสกัด	70	3
ถังพักสารละลาย	50	3
ส่วนระเหยแบบสุญญากาศ		
ถังพักระเหย	250	1
ถังระเหยใหญ่	60	1
ถังระเหยเล็ก	7	
ถังควบแน่น	50	1
ถังใส่สารละลายที่ระเหยได้	150	1
ถังใส่สารละลายที่ระเหยได้	250	1

ภาคผนวก ง

วิธีการดำเนินการสกัดด้วยชุดสกัดแบบต่อเนื่อง

ตาราง ง-1 ตู้ควบคุมในส่วนสกัด

สัญลักษณ์ตู้ควบคุม	การทำงานและรายละเอียด
ชุดกำหนดอุณหภูมิ	
Hot oil temperature	กำหนดและแสดงอุณหภูมิตัวกลางในถัง Heating Oil
Extractor 1 temperature	กำหนดอุณหภูมิในถังสกัด 1
Extractor 2 temperature	กำหนดอุณหภูมิในถังสกัด 2
Extractor 3 temperature	กำหนดอุณหภูมิในถังสกัด 3
O <input type="checkbox"/> OFF (Status)	ไฟสีเขียวแสดงสถานะ เมื่อเปิดเครื่อง
หมายเหตุ	เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่กำหนด จะปิดวาล์วไม่ให้ตัวกลางความร้อนผ่านท่อทองแดงในถังสกัด
ไฟแสดงสถานะ	
Heating oil	ไฟสีแดงแสดงสถานะของ Heating oil เมื่อคอยล์ความร้อนทำงาน
Ext A pump	ไฟสีเขียวแสดงสถานะของปั๊ม เมื่อปั๊มถังสกัด A ทำงาน
Ext B pump	ไฟสีเขียวแสดงสถานะของปั๊ม เมื่อปั๊มถังสกัด B ทำงาน
Ext C Pump	ไฟสีเขียวแสดงสถานะของปั๊ม เมื่อปั๊มถังสกัด C ทำงาน
F.solvent pump	ไฟสีเขียวแสดงสถานะของปั๊ม เมื่อปั๊มสารละลายใหม่ทำงาน
Hot oil pump	ไฟสีเขียวแสดงสถานะของปั๊ม เมื่อปั๊มตัวกลางความร้อนทำงาน
ปุ่มและสวิทช์ระบบอัตโนมัติ	
Start auto button	ปุ่มเริ่มระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ
Extract A button	ปุ่มเริ่มการสกัด โดยเปลี่ยนวัตถุดิบในถังสกัด A และกดปุ่มสกัด
Extract B button	ปุ่มเริ่มการสกัด โดยเปลี่ยนวัตถุดิบในถังสกัด B และกดปุ่มสกัด
Extract C button	ปุ่มเริ่มการสกัด โดยเปลี่ยนวัตถุดิบในถังสกัด C และกดปุ่มสกัด

ตาราง ง-1 ผู้ควบคุมในส่วนสกัด (ต่อ)

สัญลักษณ์ผู้ควบคุม	การทำงานและรายละเอียด
Interupt button	ปุ่มยกเลิกการทำงานทันที
Break sto level A	หมุนไปซ้าย เพื่อหยุดปั๊มสารละลายจากถังสกัด A ไปถังพัก C
Break sto level B	หมุนไปซ้าย เพื่อหยุดปั๊มสารละลายจากถังสกัด B ไปถังพัก A
Break sto level C	หมุนไปซ้าย เพื่อหยุดปั๊มสารละลายจากถังสกัด C ไปถังพัก B
หมายเหตุ	วาล์วโซลินอยล์และปั๊ม หมุนไปซ้ายทำงานแบบ Manual หมุนไปขวาทำงานแบบ Auto และไม่หมุนจะปิดสวิตช์
ปุ่มและสวิตช์ระบบ manual	
V_StoA =>ExtA	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังพัก A กับถังสกัด A
V_StoB =>ExtB	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังพัก B กับถังสกัด B
V_StoC =>ExtC	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังพัก C กับถังสกัด C
V_ExtA (Circulate)	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วในกวน สารละลาย (Circulate) ในถังสกัด A
V_ExtB (Circulate)	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วในกวน สารละลาย (Circulate) ในถังสกัด B
V_ExtC (Circulate)	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วในกวน สารละลาย (Circulate) ในถังสกัด C
V_ExtA =>Evap	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังสกัด A กับถังพักสารละลายรอระเหย
V_ExtB =>Evap	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังสกัด B กับถังพักสารละลายรอระเหย
V_ExtC =>Evap	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังสกัด C กับถังพักสารละลายรอระเหย
V_ExtA =>StoC	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังสกัด A กับถังพัก C
V_ExtB =>StoA	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังสกัด B กับถังพัก A
V_ExtC =>StoB	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังสกัด C กับถังพัก B
V_F. Solv =>Sto A	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังเก็บสารละลายใหม่ไปถังสกัด A
V_F. Solv =>Sto B	วาล์วโซลินอยล์ วาล์วระหว่างถังเก็บสารละลายใหม่ไปถังสกัด B

ตาราง ง-1 ตู้ควบคุมในส่วนสกัด (ต่อ)

สัญลักษณ์ตู้ควบคุม	การทำงานและรายละเอียด
V_F. Solv =>Sto C	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วระหว่างถังเก็บสารละลายใหม่ไปถังสกัด C
V_Hot oil & heater	การเปิดคอยล์ให้ความร้อนและปั๊มของตัวกลางความร้อน เงื่อนไขต้องทั้งสามถึงปั๊มจะเริ่มทำงาน
ExtA pump	ปั๊มถังสกัด A
ExtB pump	ปั๊มถังสกัด B
ExtC pump	ปั๊มถังสกัด C
F.Solv pump	ปั๊มถังสารละลายใหม่
หมายเหตุ	ปั๊มถังสกัดและปั๊มถังสารละลายใหม่ หมุนซ้ายทำระบบ Manual และหมุนขวาทำระบบอัตโนมัติ

เปิดระบบการระเหยอัตโนมัติตามการเปิดของ Control box I for auto-transfer solvent (Extractor phase) ซึ่งมีการทำงานของปั๊มและวาล์วต่าง ๆ โดยมีการทำงานแบบอัตโนมัติ ประกอบด้วยการเติมตัวทำละลายใหม่เข้าถังพักเพื่อตรวจ ก่อนปล่อยสู่ถังสกัดที่มีระบบหมุนเวียนสารละลายจากการปั๊มจากกันถังแล้วผ่านหัวฉีดที่ฝาถัง จากนั้นสารสกัดที่ได้จะปั๊มสู่ถังระเหย โดยให้ความร้อนด้วยถัง Heating oil ควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลที่จะปิดวาล์วไม่ให้ตัวกลางไหลผ่านท่อทองแดงในถังสกัด

การทำระบบ Manual

(1) การเติมตัวทำละลายใหม่ด้วยหมุนสวิทช์ไปซ้ายที่ตู้ควบคุม F.solv pump และแสดงการทำงานไฟสีแดงแสดงสถานะของ Heating oil และไฟสีเขียวแสดงสถานะของปั๊ม

(1.1) การเติมตัวทำละลายใหม่ในถัง A หมุนสวิทช์ไปซ้าย V_F. Solv =>Sto A

(1.2) การเติมตัวทำละลายใหม่ในถัง B หมุนสวิทช์ไปซ้าย V_F. Solv =>Sto B

(1.3) การเติมตัวทำละลายใหม่ในถัง C หมุนสวิทช์ไปซ้าย V_F. Solv =>Sto C

(2) เปิดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ หมุนสวิทช์ไปซ้าย V_Hot oil & heater ตั้งค่าและแสดงอุณหภูมิตัวกลางที่ Hot oil temperature

(2.1) ตั้งค่าและแสดงอุณหภูมิในถังสกัด A ที่ Extractor 1 temperature

(2.2) ตั้งค่าและแสดงอุณหภูมิในถังสกัด B ที่ Extractor 2 temperature

- (2.3) ตั้งค่าและแสดงอุณหภูมิในถังสกัด C ที่ Extractor 3 temperature
- (3) เดิมสารละลายในถังสกัดจากถังพัก
- (3.1) ถังสกัด A หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{StoA} \Rightarrow ExtA$
- (3.2) ถังสกัด B หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{StoB} \Rightarrow ExtB$
- (3.3) ถังสกัด C หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{StoC} \Rightarrow ExtC$
- (4) ดำเนินการสกัด ด้วยเงื่อนไขว่าต้องทำการสกัดทั้งสามถังพร้อมกัน และแสดงการทำงานของไฟสีส้มแสดงสถานะของปั๊ม
- (4.1) ถังสกัด A หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_{ExtA} (Circulate), ExtA pump และควบคุมอุณหภูมิ Extractor 1 temperature
- (4.2) ถังสกัด B หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_{ExtB} (Circulate), ExtB pump และควบคุมอุณหภูมิ Extractor 2 temperature
- (4.3) ถังสกัด C หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_{ExtC} (Circulate), ExtC pump และควบคุมอุณหภูมิ Extractor 3 temperature
- (5) การถ่ายสารละลายในระบบต่อเนื่อง
- (5.1) ถังสกัด A กับถังพัก C หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{ExtA} \Rightarrow StoC$ และ ExtA pump
- (5.2) ถังสกัด B กับถังพัก A หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{ExtB} \Rightarrow StoA$ และ ExtB pump
- (5.3) ถังสกัด C กับถังพัก B หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{ExtC} \Rightarrow StoB$ และ ExtC pump
- (6) การถ่ายสารละลายเมื่อเสร็จสิ้นการสกัด
- (6.1) ถังสกัด A หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{ExtA} \Rightarrow Evap$ และ ExtA pump
- (6.2) ถังสกัด B หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{ExtB} \Rightarrow Evap$ และ ExtB pump
- (6.3) ถังสกัด C หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{ExtC} \Rightarrow Evap$ และ ExtC pump
- (7) การสกัดในระบบต่อเนื่อง
- (7.0) หมายเหตุ ทำการสกัด หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_{ExtA} (Circulate), ExtA pump, V_{ExtB} (Circulate), ExtB pump, V_{ExtC} (Circulate) และ ExtC pump
- (7.1) เปิดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ หมุนสวิตช์ไปซ้าย $V_{Hot\ oil\ \&\ heater}$ ตั้งค่าอุณหภูมิตัวกลางที่ Hot oil temperature ตั้งค่าอุณหภูมิในถังสกัดทั้งสามที่ Extractor 1 temperature, Extractor 2 temperature และ Extractor 3 temperature
- (7.2) ป้อนตัวทำละลายใหม่ในถังสกัดทั้งสาม หมุนสวิตช์ไปซ้าย F.Solv pump, $V_{F.\ Solv} \Rightarrow Sto\ A$, $V_{F.\ Solv} \Rightarrow Sto\ B$ และ $V_{F.\ Solv} \Rightarrow Sto\ C$

(7.3) Pre-process 1: ทำการสกัด จากนั้นเปลี่ยนตัวทำละลายจากถึงสกัดไปถึงพักตามทิศทางของ $C \Rightarrow B$ $B \Rightarrow A$ และ $A \Rightarrow C$ หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_ExtA \Rightarrow StoC, V_ExtB \Rightarrow StoA, V_ExtC \Rightarrow StoB, ExtA pump, ExtB pump และ ExtC pump

(7.4) Pre-process 2: ทำการสกัด จากนั้นเปลี่ยนตัวทำละลายจากถึงสกัดไปถึงพักตามทิศทางของ $C \Rightarrow B$ $A \Rightarrow C$ และถึง B ไปสู่ถังระเหย หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_ExtA \Rightarrow StoC, V_ExtB \Rightarrow Evap, V_ExtC \Rightarrow StoB, ExtA pump, ExtB pump และ ExtC pump

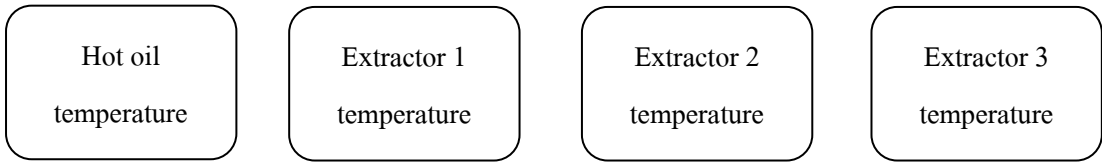
(7.5) Process 1: ทำการสกัด จากนั้นเปลี่ยนตัวทำละลายจากถึงสกัดไปถึงพักตามทิศทางของ $B \Rightarrow A$ $A \Rightarrow C$ และถึง C ไปสู่ถังระเหย หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_ExtA \Rightarrow StoC, V_ExtB \Rightarrow StoA, V_ExtC \Rightarrow Evap, ExtA pump, ExtB pump และ ExtC pump

(7.6) Process 2: ทำการสกัด จากนั้นเปลี่ยนตัวทำละลายจากถึงสกัดไปถึงพักตามทิศทางของ $C \Rightarrow B$ $B \Rightarrow A$ และถึง A ไปสู่ถังระเหย หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_ExtB \Rightarrow StoA, V_ExtC \Rightarrow StoB, V_ExtA \Rightarrow Evap, ExtA pump, ExtB pump และ ExtC pump

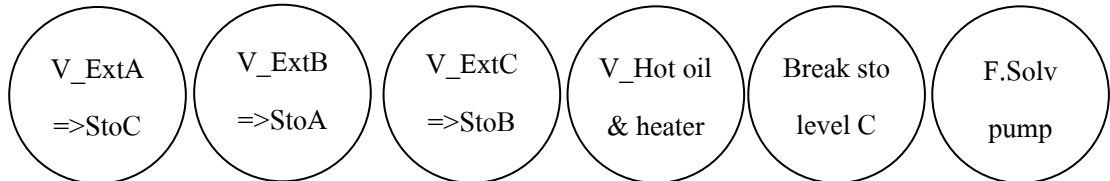
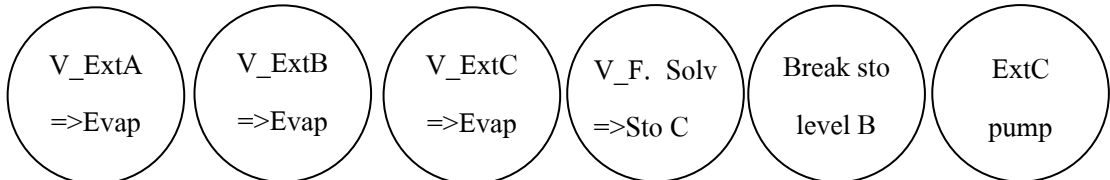
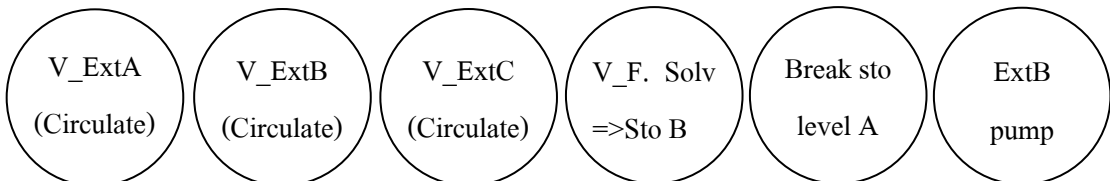
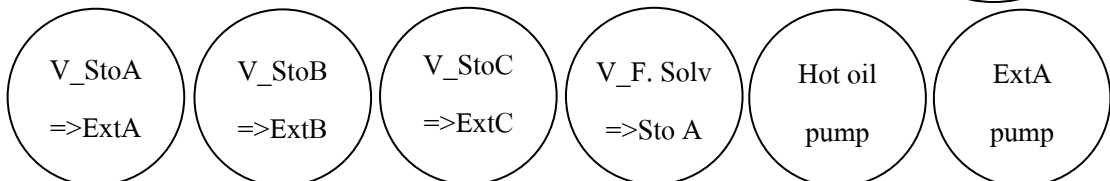
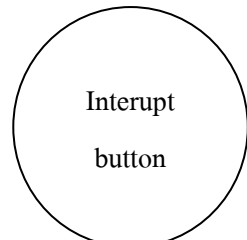
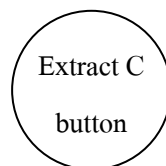
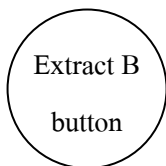
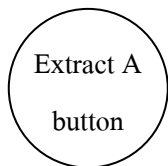
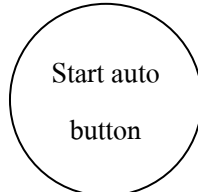
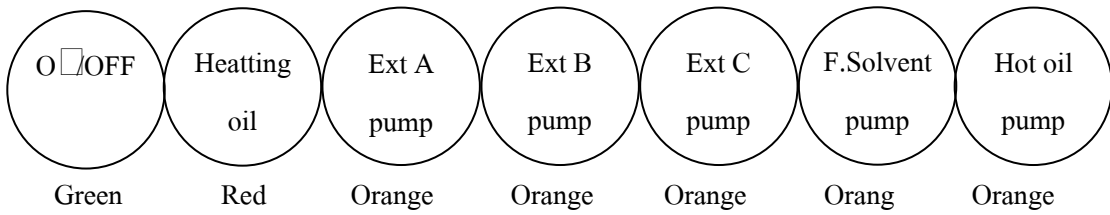
(7.7) Process 3: ทำการสกัด จากนั้นเปลี่ยนตัวทำละลายจากถึงสกัดไปถึงพักตามทิศทางของ $C \Rightarrow B$ $A \Rightarrow C$ และถึง B ไปสู่ถังระเหย หมุนสวิตช์ไปซ้าย V_ExtA \Rightarrow StoC, V_ExtC \Rightarrow StoB, V_ExtB \Rightarrow Evap, ExtA pump, ExtB pump และ ExtC pump

ภาพประกอบ ง-1 Control box I (Extractor phase)

Temperature control

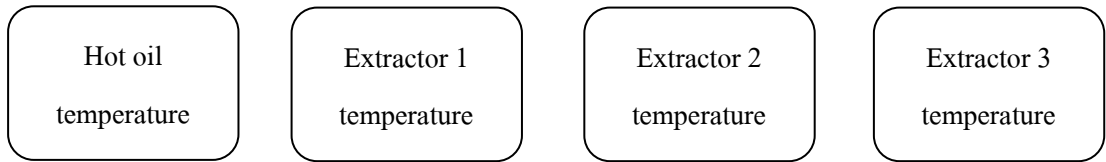


Status light

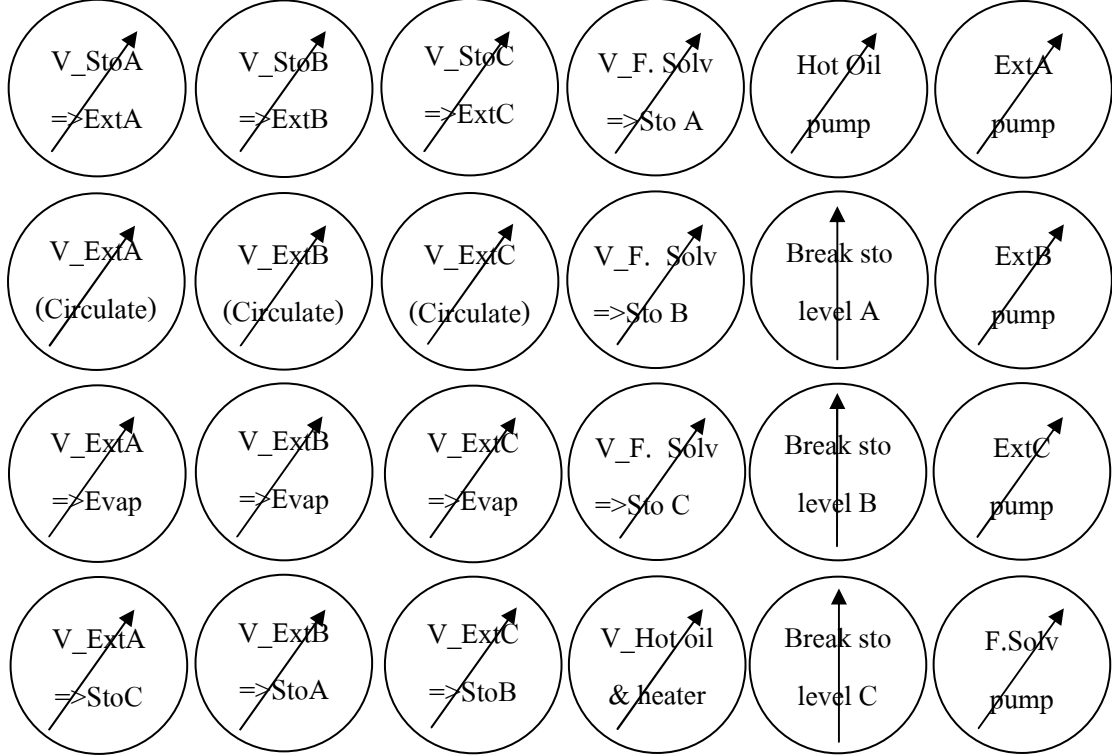
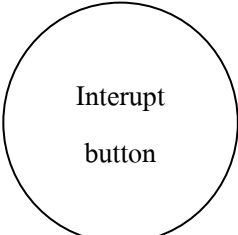
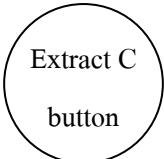
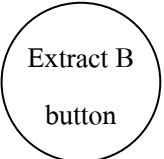
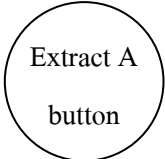
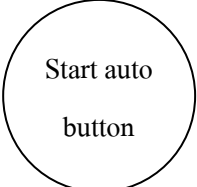
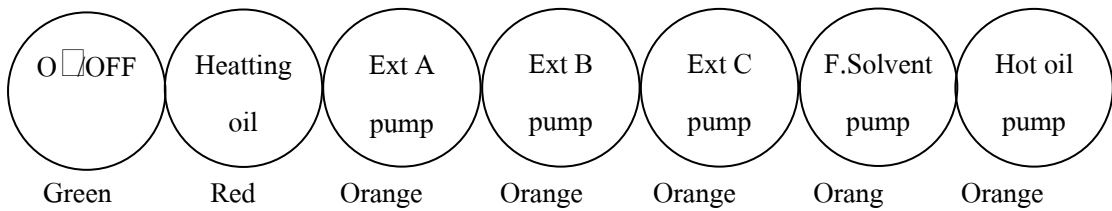


ภาพประกอบ ง-2 Control box I for auto-transfer solvent (Extractor phase)

Temperature control



Status light



ตาราง ง-2 ตู้ควบคุมในส่วนระเหยตัวทำละลาย

สัญลักษณ์ของผู้ควบคุม	การทำงานและรายละเอียด
ชุดกำหนดอุณหภูมิ	
Evaporator I temperature control (Large)	กำหนดอุณหภูมิในถังระเหย 1 (ถังระเหยใหญ่)
Evaporator II temperature control (Small)	กำหนดอุณหภูมิในถังระเหย 2 (ถังระเหยเล็ก)
ไฟแสดงสถานะ	
Stored tank to evap (L) pump	ไฟสีเขียวแสดงสถานะ เมื่อปั๊มสารละลายจากถังพักระเหยไปถังระเหยใหญ่
Pump large to small evap (& Circulate)	ไฟสีเขียวแสดงสถานะ เมื่อปั๊มสารละลายจากถังระเหยใหญ่ไปถังระเหยเล็กหรือเปิดปั๊มหมุนเวียนนิตสารละลายเป็นฝอย
Condenser cooling-water pump	ไฟสีเขียวแสดงสถานะ เมื่อเปิดปั๊มน้ำหล่อเย็น
Vacuum water pump	ไฟสีเขียวแสดงสถานะ เมื่อเปิดปั๊มสุญญากาศ
Condensed solvent to store tank 2	ไฟสีเขียวแสดงสถานะ เมื่อเปิดปั๊มจากถังเก็บตัวทำละลาย 1 ไปถังเก็บตัวทำละลาย 2
O <input type="checkbox"/> OFF (Status)	ไฟสีเขียวแสดงสถานะ เมื่อเปิดเครื่อง
Heater evaporator I	ไฟแสดงสถานะ เมื่อฮีตเตอร์ถังระเหยใหญ่ทำงาน
Heater evaporator II	ไฟแสดงสถานะ เมื่อฮีตเตอร์ถังระเหยเล็กทำงาน
ปุ่มและสวิตช์ระบบอัตโนมัติ	
Interupt button	ปุ่มยกเลิกการทำงานทันที
ปุ่มและสวิตช์ระบบ manual	
Stored tank to large evap pump	ปั๊มสารละลายจากถังพักระเหยไปถังระเหยใหญ่

ตาราง ง-2 ตู้ควบคุมในส่วนระเหยตัวทำละลาย (ต่อ)

สัญลักษณ์ของตู้ควบคุม	การทำงานและรายละเอียด
Large to small evap pump (&Circulate)	ปั๊มสารละลายจากถังระเหยใหญ่ไปยังระเหยเล็กหรือเปิดปั๊มหมุนเวียนฉีดสารละลายเป็นฝอย
Condenser cooling-water pump	ปั๊มน้ำหล่อเย็น
Vacuum water pump	ไฟสีส้มแสดงสถานะ เมื่อเปิดปั๊มสุญญากาศ
Condensed solvent to stored tank pump	ปั๊มจากถังเก็บตัวทำละลาย 1 ไปยังถังเก็บตัวทำละลาย 2
Stored tank to large evap valve	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วระหว่างถังพักสารละลายรอระเหยกับถังระเหยใหญ่
Large to small evap valve (&Circulate)	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วระหว่างถังระเหยใหญ่กับถังระเหยเล็กและระบบ Circulate
Large to small evap valve	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วระหว่างถังระเหยใหญ่กับถังระเหยเล็ก
Small evap valve (Conc.extract)	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วถังระเหยเล็ก
Small evap to condenser valve	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วระหว่างถังระเหยเล็กกับ Condenser
Circulated valve (Large evap)	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วระหว่างถังระเหยใหญ่กับระบบ Circulate
Large evap to condenser valve	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วระหว่างถังระเหยใหญ่กับ Condenser
Condensed tank to stored tank valve	วาล์วโซลินอยด์ วาล์วระหว่างถังเก็บสารละลายหลังระเหยกับถังเก็บเพิ่มเติม
หมายเหตุ	วาล์วโซลินอยด์ หมุนไปด้านซ้ายเป็นการทำงานแบบ Manual และหมุนไปทางขวาเพื่อการทำงานแบบ Auto(V & SV)

เปิดระบบการระเหยอัตโนมัติตามการเปิดของ Control box II for auto-transfer solvent (Evaporator phase) ซึ่งมีการทำงานของปั๊ม วาล์ว และฮีตเตอร์ โดยมีการทำงานแบบอัตโนมัติ ประกอบด้วยการเพิ่มตัวทำละลาย การระเหยในถังระเหยใหญ่ที่มีระบบหมุนเวียน เมื่อสารละลายเหลือน้อยจะปั๊มเข้าสู่ถังระเหยเล็กเพื่อทำการระเหยต่อ ขณะที่ตัวทำละลายจะเข้าสู่ถังเก็บสารละลายหลังระเหยที่อยู่ใต้เครื่องควบแน่น นอกจากนี้ถังเก็บสารละลายหลังระเหยก็จะปั๊มถ่ายไปถังเก็บเพิ่มเติม ทั้งระบบทำงานภายใต้สุญญากาศ

การทำระบบ Manual

(1) การเติมสารละลายลงในถังระเหยใหญ่ โดยหมุนซ้ายที่ตู้ควบคุมสวิตช์ Stored tank to large evap pump และ Stored tank to large evap valve

(2) เปิดเครื่องระเหยใหญ่ โดยหมุนซ้ายที่ตู้ควบคุมสวิตช์ Large to small evap pump (&Circulate), Condenser cooling-water pump, Vacuum water pump, Large to small evap valve (&Circulate), Circulated valve (Large evap) และ Large evap to condenser valve

(3) ถ่ายสารละลายจากถังระเหยใหญ่ไปยังถังระเหยเล็ก โดยหมุนซ้ายที่ตู้ควบคุมสวิตช์ Large to small evap pump (&Circulate), Large to small evap valve (&Circulate), Large to small evap valve และ Small evap to condenser valve

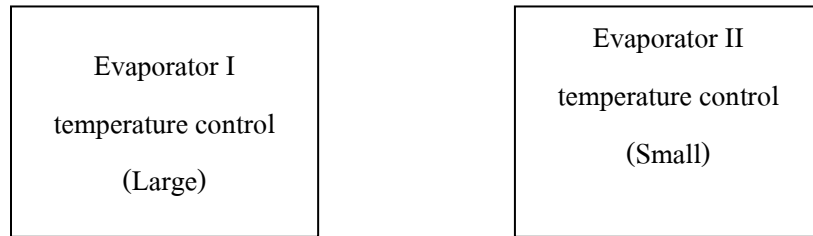
(4) เปิดเครื่องระเหยเล็ก โดยหมุนซ้ายที่ตู้ควบคุม Small evap to condenser valve, Vacuum water pump และ Condenser cooling-water pump

(5) เก็บสารละลายเข้มข้นหลังระเหย โดยหมุนซ้ายที่ตู้ควบคุม Small evap valve (Conc.extract) และวาล์วสำหรับลดความดันของระบบ

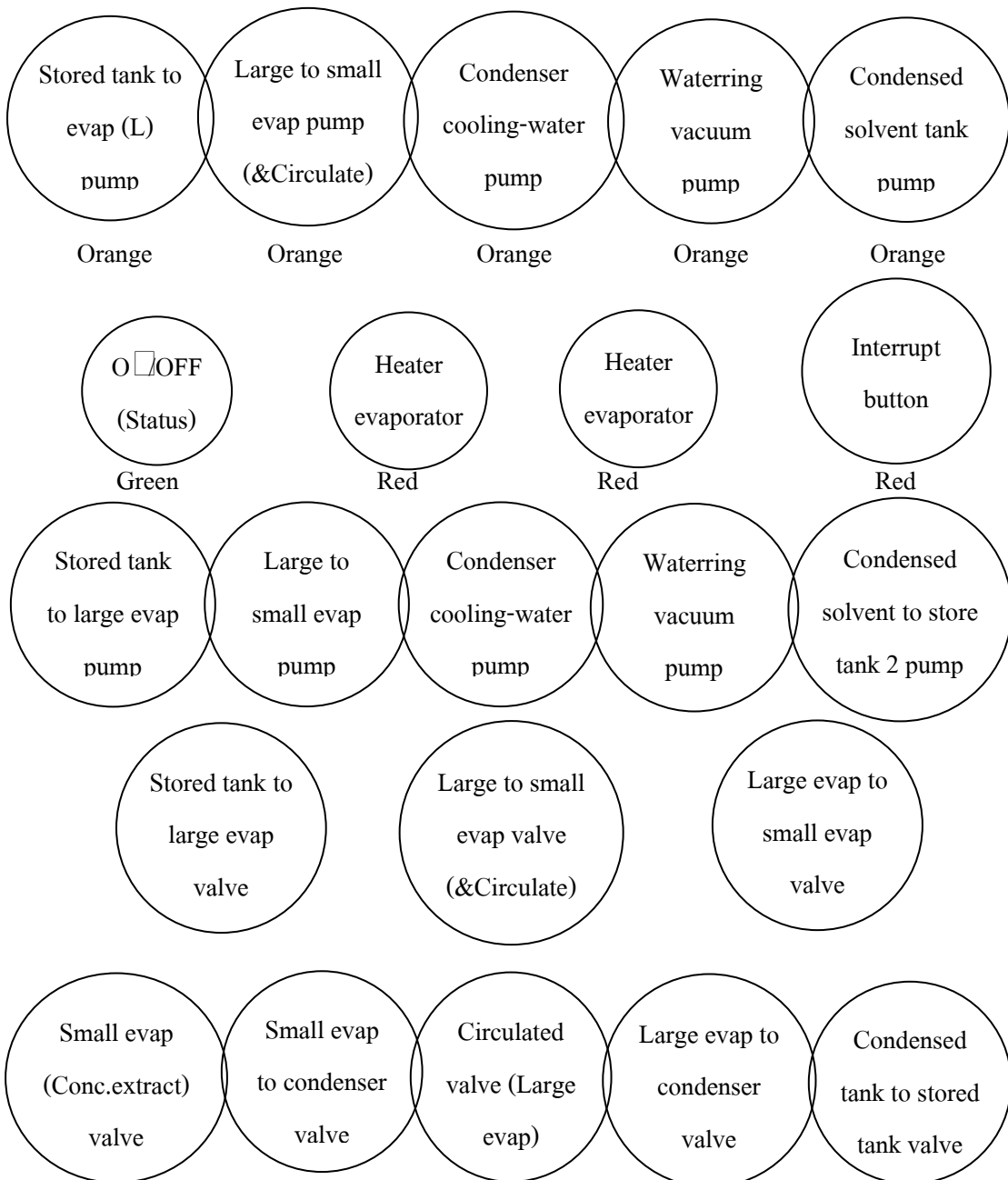
(6) เก็บตัวทำละลายที่ระเหยได้ไปสู่ถังเก็บ โดยหมุนซ้ายที่ตู้ควบคุม Condensed solvent to stored tank pump และ Condensed tank to stored tank valve

ภาพประกอบ ง-3 Control box II (Evaporator phase)

Temperature control

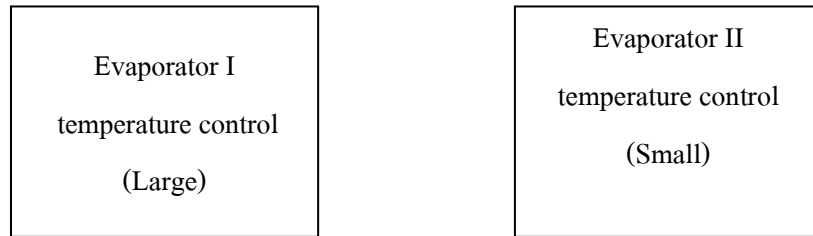


Status light

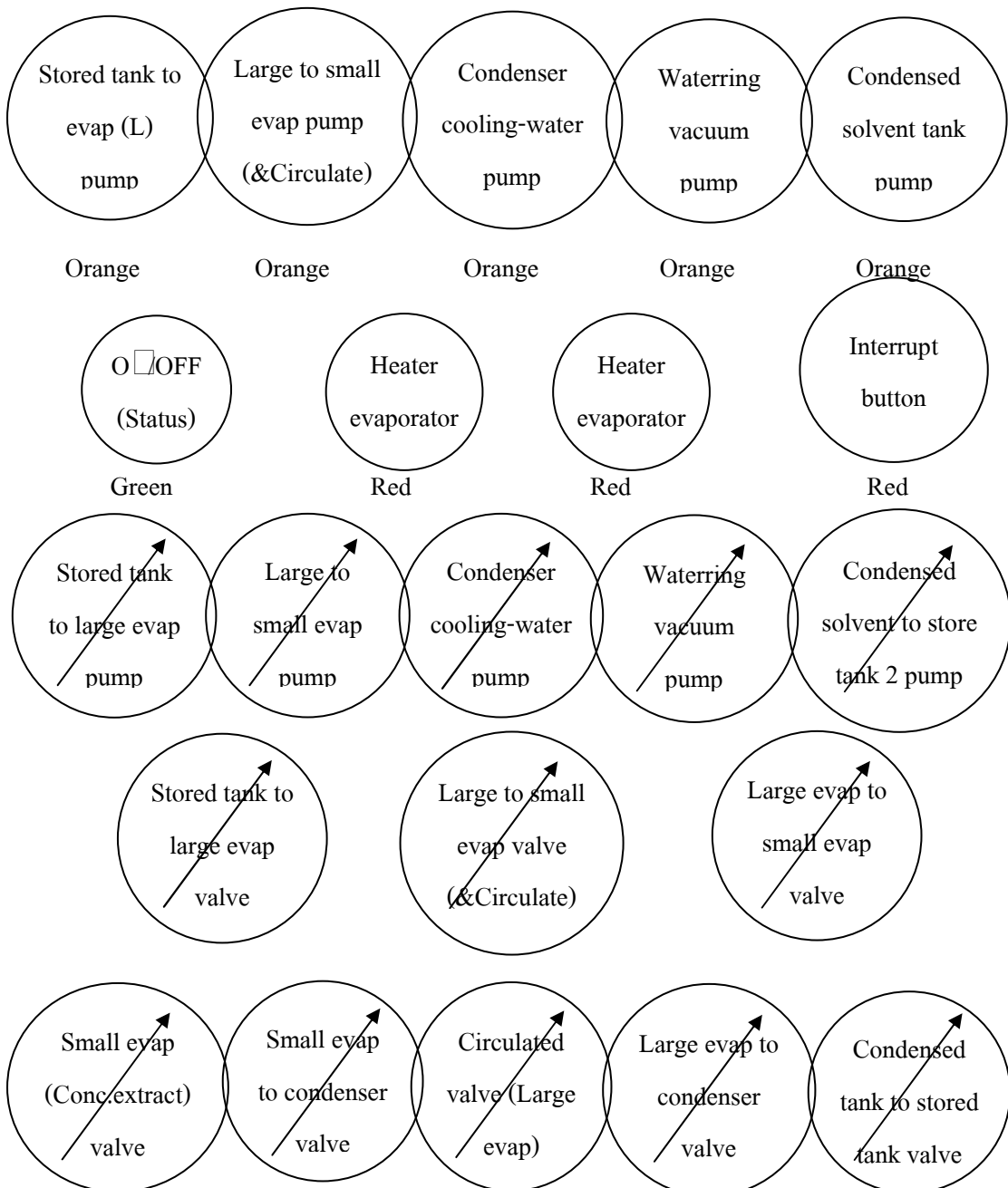


ภาพประกอบ ง-4 Control box II for auto-transfer solvent (Evaporator phase)

Temperature control



Status light



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายวีระพงศ์ พรสมิทติกุล	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910120040	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนศิษย์ก้นกุฏิระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พ.ศ.2549
2. ทุนโครงการวิจัย จากโครงการสมองไหลกลับ (RBD) ของสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)
3. ทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์ สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วีระพงศ์ พรสมิทติกุล ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ ราม แย้มแสงสังข์ และ กุลชนาฐ ประเสริฐ สิทธิ.2551. การพัฒนากระบวนการสกัดฟรียไบโอติกส์จากเปลือกด้านในขมุน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6 (The 6th PSU-Engineering Conference (PEC-6)). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2551 หน้า 150.

Veeraphong Bhornsmithikun, Pakamas Chetpattananondh, Ram Yamsaengsung and Kulchanat Prasertsit. 2008. Study on the Effectiveness of a Continuous Prebiotics Extraction Process from Jackfruit Seeds. Proceedings of the 18th Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICHE18). Pattaya, Thailand, Oct 20-21 2008, 142.