



การสกัดสารพรีไบโอติกส์จากพืชเกษตร

Extraction of Prebiotics from Agricultural Plants

สุพจน์ นวลละออง

Supotch Nualla-ong

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

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสกัดสารฟีนีลโอบีโอดีคส์จากพืชเกษตร
ผู้เขียน นายสุพจน์ นวลละออง
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์) (รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ศิริพิชนะ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราม เข้มแสงสังข์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราม เข้มแสงสังข์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากพืชเกษตร
ชื่อผู้เขียน นายสุพจน์ นวลละออง
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากพืชเกษตรด้วยเครื่องสกัดแบบแบทช์ ซึ่งพืชที่ใช้ในการทดลองได้แก่เปลือกลูกตาลส่วนที่หุ้มเนื้อและเมล็ดขนุน จากผลการทดลองพบว่า แม้สารสกัดจากเปลือกลูกตาลจะมีความสามารถในการเสริมการเจริญของแบคทีเรีย *Lactobacillus plantarum* แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย HPLC พบองค์ประกอบของน้ำตาลที่เป็นฟรีไบโอติกส์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่พบในเมล็ดขนุนมากกว่า ดังนั้นในการทดลองจึงมุ่งเน้นไปที่การใช้เมล็ดขนุน โดยเมล็ดขนุนถูกนำมาสกัดที่สภาวะต่างๆ กันด้วยชุดทดลองขนาดเล็กเพื่อศึกษาผลของชนิดตัวทำละลาย (น้ำกลั่น, เอทานอล 50% และ เอทานอล 95%) ขนาดของเมล็ดขนุน (1.0-2.0, 2.0-2.8 and 2.8-5.6 mm) และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย (1:2, 1:4, 1:6 และ 1:8) โดยพิจารณาจากผลได้ของสารสกัดเพื่อนำสภาวะดังกล่าวมาทดลองกับเครื่องสกัดแบบแบทช์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 จากนั้นทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ (30 และ 60 °C) และเวลาในการสกัด (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360 และ 480 นาที) ด้วยชุดสกัดแบบแบทช์ สารที่ได้จากการสกัดถูกนำไปหาผลได้ของสารสกัด น้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิซซ์ และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิซซ์ซึ่งเป็นส่วนที่คาดว่าจะ เป็นสารฟรีไบโอติกส์ และตั้งแต่ระยะเวลาในการสกัด 90 นาทีพบว่า ผลได้ของสารสกัดเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล และที่อุณหภูมิในการสกัด 60 °C ให้ผลได้ของสารสกัดมากกว่าที่อุณหภูมิ 30 °C เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ค่าน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิซซ์ที่อุณหภูมิ 30 °C มีค่ามากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิในการสกัดสูงอาจเกิด Heat-denatured ของโปรตีน ทำให้ตัวทำละลายไม่สามารถเข้าไปละลายน้ำตาลในเมล็ดขนุนออกมาได้ ซึ่งยืนยันผลการทดลองด้วยการสกัดด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm อุณหภูมิในการสกัด 30 °C และเวลาในการสกัด 90 นาที

Thesis Title	Extraction of Prebiotics from Agricultural Plants
Author	Mr. Supotch Nualla-ong
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2008

ABSTRACT

This research aims to study the optimum condition of prebiotics extraction from agricultural plants using a batch extractor. The agricultural plants to be studied are sugar palm shells, which cover the palm kernels, and jackfruit seeds. Although the extracted samples from sugar palm shells could promote growth of *Lactobacillus plantarum*, but low amount of the prebiotic sugars determined by HPLC were found. Higher amount of prebiotic sugars were gained from extracted samples of jackfruit seeds. Thus, further experiments were focused on jackfruit seeds. Jackfruit seeds were extracted in a lab scale using beakers to determine the optimal extraction condition. The effects of different solvents (distilled water, 50% ethanol, and 95% ethanol), particle sizes of ground jackfruit seeds (1.0-2.0, 2.0-2.8 and 2.8-5.6 mm), and solid to solvent ratios (1:2, 1:4, 1:6 and 1:8 w/v) were investigated. Based on total solids (%yield) obtained, optimal condition from the lab scale were translated into batch scale study. In this case, the optimal condition of 50% ethanol as a solvent, a jackfruit seed particle size of 1.0-2.0 mm, and a solid to solvent ratio of 1:8, was applied in order to investigate effects of extraction temperature (30 and 60°C) and extraction time (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360 and 480 minutes). The resulting extracts were analyzed for total solids, total sugar, reducing sugar and non-reducing sugar. After the extraction time of 90 minutes, extraction equilibrium was reached and that jackfruit seeds extracted at 60°C only had slightly higher percent yield of prebiotics compared to the 30°C because high temperature may lead to denaturation of protein which entrapped sugar from jackfruit seeds leading to lower effectiveness of the extraction process. Furthermore, the lower extraction temperature also produced a higher yield of non-reducing sugar which agreed well with the lab scale result. Therefore, optimum conditions for the extraction of

prebiotics from jackfruit seeds were 50% ethanol as the solvent, particle size of 1.0-2.0 mm, solid to solvent ratio of 1:8, extraction temperature of 30 °C and the extraction time of 90 minutes.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
บทตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	32
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	32
บทที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	33
ตัวอย่างพืชที่นำมาใช้ในการสกัด	33
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
วิธีการทดลอง	34
วิธีการวิเคราะห์	38
บทที่ 3 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	43
การสกัดสารฟีนอลิกจากเปลือกลูกตาลในชุดทดลองขนาดเล็ก	43
การสกัดสารฟีนอลิกจากเมล็ดขนุนด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก	52
การสกัดสารฟีนอลิกจากเมล็ดขนุนด้วยชุดสกัดแบบแบบพ่นขนาด โรงงานจำลอง	55
ผลการหาวิเคราะห์หาความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ระเหยได้	65
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก การออกแบบชุดสกัดแบบแบบพ่น	73
ภาคผนวก ข การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์	114
ภาคผนวก ค ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	120
ประวัติผู้เขียน	132
	(7)

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1. ตัวอย่างของสารที่จัดเป็นฟังก์ชันน้ำตาล	3
2. จุลินทรีย์ที่ชนิดต่าง ๆ ที่จัดเป็นโปรไบโอติกส์	4
3. ปริมาณ Inulin และ Oligofructose ในอาหารชนิดต่างๆ	9
4. ผลการคัดเลือกชนิดสารสกัดจากพืชเพื่อใช้เป็นแหล่งของพรีไบโอติกส์ที่ส่งเสริมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ได้ดี	13
5. สถิติการปลูกขนุนหนึ่งแยกราชอาณาจักร	16
6. ข้อมูลการผลิตขนุนหนึ่งและจำปะคะในภาคใต้ ปี 2542	16
7. คุณค่าทางโภชนาการของขนุน ชั่งขนุน และเมล็ดขนุน	17
8. ผลการวิเคราะห์หาชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง HPLC	52
9. ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของสารสกัดและน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ เมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 เวลาในการสกัด 60 นาที	64
10. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะและโลหะผสมบางชนิด	74
11. สมบัติทางกายภาพของโลหะและโลหะผสมที่ใช้ทั่วไป	76
12. อัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้	78
13. ค่าความเค้นในการออกแบบของเหล็กกล้าและเหล็กปลอดสนิม (N/mm^2)	81
14. สมการในการคำนวณปริมาตรและพื้นที่ผิวของถังและส่วนประกอบ	86
15. ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อ	89
16. สัดส่วนความเค้นที่ยอมรับได้ของวัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ	90
17. ความเค้นในการออกแบบของโลหะแผ่น (N/mm^2)	91
18. สมการในการคำนวณความหนาของถังสำหรับแรงดันภายใน	92
19. ความหนาเพื่อชดเชยการกัดกร่อนในการออกแบบ (มิลลิเมตร)	93
20. ความหนาต่ำสุดของตัวถัง	94
21. โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ (kN/mm^2)	95
22. น้ำหนักเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆสำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน	119

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
23. ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของสารสกัด โดยสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วน ระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	120
24. ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	120
25. ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	121
26. ผลของเวลาต่อผลได้ของสารสกัด ที่ได้จากการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่าง เปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	121
27. ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของเวลาต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิ ในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	121
28. ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของเวลาต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายอุณหภูมิ ในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	122
29. ผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อผลได้ ของสารสกัด ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัว ทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ เวลาในการสกัด 60 นาที	122
30. ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาล กับตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ เวลาในการสกัด 60 นาที	122

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
31. ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้งโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ เวลาในการสกัด 60 นาที	123
32. ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อผลได้ของสารสกัด เมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	123
33. ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	123
34. ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	124
35. ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนเมื่อทำการทดลองด้วยชุดทดลองขนาดเล็กเพื่อศึกษาผลของชนิดตัวทำละลาย ขนาดอนุภาค และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการสกัดเป็น 30 °C (อุณหภูมิห้อง) และ 60 นาที ตามลำดับ	124
36. ผลได้ของสารสกัด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน	125
37. ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆ กัน (ครั้งที่ 1)	126
	(10)

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
38. ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 2)	126
39. ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 1)	127
40. ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 2)	127
41. ผลได้ของสารสกัด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน	128
42. ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 1)	128
43. ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 2)	129

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
44. ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 1)	129
45. ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 2)	130
46. ผลการวัดค่า pH ของตัวอย่างสารสกัดที่อุณหภูมิในการสกัด 30 °C	130
47. ผลการวัดค่า pH ของตัวอย่างสารสกัดที่อุณหภูมิในการสกัด 60 °C	131

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1. โครงสร้างโมเลกุลของ Sorbitol (ก) และ Maltitol (ข)	8
2. โครงสร้างโมเลกุลของ Inulin	10
3. โครงสร้างโมเลกุลของ Fructooligosaccharide	10
4. ลักษณะของเมล็ดและเปลือกตาล โตนด	14
5. ลักษณะของผล เปลือกและเมล็ดขนุน	17
6. ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลระหว่างตัวทำละลายกับตัวละลาย	18
7. ลักษณะเครื่องระเหยท่อแนวนอนแบบหมุนเวียนธรรมชาติ	24
8. ลักษณะเครื่องระเหยชนิดท่อแนวตั้งแบบหมุนเวียนธรรมชาติ	25
9. ลักษณะเครื่องระเหยชนิดท่อยาวแนวตั้ง	26
10. ลักษณะเครื่องระเหยแบบบังคับหมุนเวียน	27
11. กลไกการสกัด Balm leaves ด้วยเอทานอลที่ 20 °C และอัตราส่วนของตัวทำละลายเป็น 4 dm ³ /kg raw material: ผลของขนาดอนุภาค	30
12. ภาพวาด 3 มิติของชุดสกัดแบบแบทช์	35
13. ชุดสกัดแบบแบทช์	36
14. ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของสารสกัด โดยสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	44
15. ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวิซ์ และ น้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์ ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	44
16. ผลของเวลาต่อผลได้ของสารสกัด ที่ได้จากการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	45
17. ผลของเวลาต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวิซ์ และ น้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์ ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	46

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
18. ผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อผลได้ของสารสกัด ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้ น้ำกลั่น เป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิ ในการสกัด 60 °C และ เวลาในการสกัด 60 นาที	47
19. ผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวิซ์ และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์ ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้งโดย ใช้ น้ำกลั่น เป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ เวลาในการสกัด 60 นาที	47
20. ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อผลได้ของสารสกัด เมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาล กับตัวทำละลาย 1:10 w/v	48
21. ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวิซ์ และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์ เมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v	49
22. การเจริญของแบคทีเรียโปรไบโอติก <i>Lactobacillus plantarum</i> เมื่อใช้สารสกัด จากเปลือกลูกตาล	50
23. การเจริญของแบคทีเรียโปรไบโอติก <i>Lactobacillus acidophilus</i> เมื่อใช้สารสกัด จากเปลือกลูกตาล	51
24. ผลได้ของสารสกัดเมื่อสกัดด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก โดยใช้ น้ำกลั่น เป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) เวลาในการสกัด 60 นาที ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0, 2.0-2.8 และ 2.8-5.6 mm และอัตราส่วน ระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:2, 1:4, 1:6 และ 1:8	53
25. ผลได้ของสารสกัดเมื่อสกัดด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก โดยใช้เอทานอล 50% เป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) เวลาในการสกัด 60 นาที ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0, 2.0-2.8 และ 2.8-5.6 mm และอัตราส่วน ระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:2, 1:4, 1:6 และ 1:8	54

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
26. ผลได้ของสารสกัดเมื่อสกัดด้วยชุดทดลองขนาดเล็กโดยใช้เอทานอล 95% เป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) เวลาในการสกัด 60 นาที ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0, 2.0-2.8 และ 2.8-5.6 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:2, 1:4, 1:6 และ 1:8	54
27. ผลได้ของสารสกัดเมื่อตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น เอทานอล 50% และเอทานอล 95% อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) ขนาดอนุภาค 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8	55
28. บริเวณของจุดเก็บตัวอย่าง	56
29. ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนกับเวลาโดยการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบบท์เมื่ออุณหภูมิในการสกัดเป็น 30 °C	57
30. ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนกับเวลาโดยการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบบท์เมื่ออุณหภูมิในการสกัดเป็น 60 °C	58
31. ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนกับเวลาโดยการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบบท์ อุณหภูมิในการสกัด 30 °C เมื่อมีลูกแก้วและไม่มีลูกแก้ว	59
32. ภาพถ่ายด้านบนในการใช้แผ่นตะแกรงแยกในการบรรจุวัตถุดิบ	60
33. ภาพถ่ายด้านข้างในการใช้แผ่นตะแกรงแยกในการบรรจุวัตถุดิบ	61
34. ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนกับเวลาโดยการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบบท์ อุณหภูมิในการสกัด 30 และ 60 °C เมื่อมีการใช้แผ่นตะแกรง	61
35. แผ่นตะแกรงและถังตะแกรงสแตนเลส	62
36. ผลได้ของสารสกัดเมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุน 1:8 เวลาในการสกัด 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360, 480 นาทีและอุณหภูมิในการสกัด 30 และ 60 °C	63
37. ปริมาณน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์เมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุน 1:8 เวลาในการสกัด 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360, 480 นาทีและอุณหภูมิในการสกัด 30 และ 60 °C	64
38. แผนผังแสดงขั้นตอนการเลือกวัสดุ	75

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
39. ถังทรงกระบอก	82
40. ฟลาจิงแบบแบน	83
41. ฟลาจิงแบบจาน	84
42. ฟลาจิงรูปไข่	84
43. ฟลาจิงรูปครึ่งทรงกลม	84
44. ฟลาจิงทรงกรวย	85
45. สัมประสิทธิ์ความเสียหายของถัง (K_c)	97
46. ภาพวาด 3 มิติถังสักรัดที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	100
47. ภาพถ่ายถังสักรัดพร้อมถังตะแกรงที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	101
48. ภาพถ่ายด้านในถังสักรัดที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	102
49. ถังสักรัดที่ประกอบด้วยชุดสักรัดแบบเบทซ์	103
50. ภาพวาด 3 มิติถังระเหยขนาดใหญ่ที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	105
51. ภาพถ่ายด้านในถังระเหยขนาดใหญ่ที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	106
52. ถังระเหยขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยชุดสักรัดแบบเบทซ์	107
53. ภาพวาด 3 มิติถังระเหยขนาดเล็กที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	108
54. ภาพถ่ายถังระเหยขนาดเล็กที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	108
55. ภาพวาด 3 มิติเครื่องควบแน่นที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	109
56. ภาพถ่ายเครื่องควบแน่นที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	110
57. ภาพวาด 3 มิติถังให้ความร้อนที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	110
58. ภาพถ่ายถังให้ความร้อนที่จัดสร้างสำหรับชุดสักรัดแบบเบทซ์	111
59. ภาพวาด 3 มิติของชุดสักรัดแบบเบทซ์	112
60. ชุดสักรัดแบบเบทซ์	113
61. กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวิซ์	115
62. กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์น้ำตาลทั้งหมด	116
63. กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ HPLC ของน้ำตาลแต่ละชนิด	118
64. กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการระเหย	119

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันมนุษย์มีปัญหาเกี่ยวกับสุขภาพมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนไป การใช้ชีวิตประจำวันที่สะดวกสบาย ไม่มีเวลาในการออกกำลังกายเพื่อดูแลสุขภาพ รวมไปถึงพฤติกรรมมารับประทานอาหารที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ร่างกายมีความเสี่ยงในการเกิดโรคต่างๆได้ง่าย เช่น ระบบภูมิคุ้มกันลดลง โรคมะเร็ง ระดับคอเลสเตอรอลในเลือดสูง รวมไปถึงโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินอาหารต่างๆ เช่น ท้องเสีย ท้องร่วง ลำไส้อักเสบ การติดเชื้อในระบบทางเดินอาหาร เป็นต้น ทำให้มนุษย์เล็งเห็นความสำคัญในการดูแลสุขภาพมากขึ้น ซึ่งวิธีการหนึ่งที่สามารถลดความเสี่ยงในการเกิดโรคต่างๆ เหล่านี้ได้คือ การรักษาสมดุลของจุลินทรีย์ที่อยู่ในร่างกาย โดยในร่างกายของเรามีจุลินทรีย์อยู่ 2 ชนิด ได้แก่ จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ (Beneficial microorganisms) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มโปรไบโอติกส์ และจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค (Pathogenic microorganisms) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในลำไส้ใหญ่ ดังนั้นการเจริญของโปรไบโอติกส์และการส่งเสริมสุขภาพจึงขึ้นอยู่กับอาหารที่รับประทานเข้าไป โดยอาหารที่สามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์เรียกว่า 프리ไบโอติกส์ มีคุณสมบัติคือ ไม่ถูกย่อยด้วยกรดในกระเพาะอาหาร และเอนไซม์ในลำไส้เล็กและสามารถเคลื่อนไปยังลำไส้ใหญ่ในสภาพที่สมบูรณ์ ทั้งนี้การรับประทานอาหารในกลุ่ม 프리ไบโอติกส์ จะช่วยกระตุ้น ส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ เช่น *Bifidobacteria* และ *Lactobacillus* แต่ไม่ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค 프리ไบโอติกส์คือสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีกลุ่มโมโนแซคคาไรด์ตั้งแต่ 3 หน่วยขึ้นไป ได้แก่ โอลิโกแซคคาไรด์และโพลีแซคคาไรด์ เช่น ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ กาแลกโตโอลิโก-แซคคาไรด์ และอินนูลิน มีประโยชน์ในการช่วยป้องกันและลดอาการท้องเสียที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย ป้องกันโรคลำไส้อักเสบ ป้องกันการติดเชื้อในระบบทางเดินอาหาร ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกัน ช่วยในการย่อยและการดูดซึมสารอาหารเข้าสู่ร่างกาย และช่วยให้ระบบ เมตาบอลิซึมของไขมันดีขึ้น มีผลช่วยลดคอเลสเตอรอลชนิด LDL ได้

ฟรีไบโอติกส์สามารถสกัดได้จากพืชอาหาร และการสังเคราะห์ด้วยเอนไซม์ แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบที่ใช้กันแพร่หลายในท้องตลาดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยมีการพบและรายงานถึงแหล่งของฟรีไบโอติกส์ที่ได้จากธรรมชาติในพืชหลายชนิดได้แก่ ชิโครี หัวหอม

ใหญ่ อาร์ติโชก หน่อไม้ฝรั่ง ถั่วฝักยาว กระเทียม ถั่วเหลือง ขนุน ลูกตาล เงาะ จำปาตะ มะพร้าวอ่อน ฯลฯ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปสู่การพัฒนาการผลิตฟรีไบโอดีทจากพืชธรรมชาติต่อไป

ปัจจุบันนักวิจัยได้หันมาให้ความสนใจในการสกัดสารอาหารกลุ่มฟรีไบโอดีทจากพืชธรรมชาติมากขึ้นเช่น การสกัด โอลิโกแซคคาไรด์จากถั่วเหลือง (Kim *et al.*, 2003) การสกัด Raffinose family oligosaccharides (RFOs) ใน Leguminous vine peas (Ekvall *et al.*, 2006) เป็นต้น ซึ่งพบว่าประเทศไทยมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสกัดฟรีไบโอดีทจากธรรมชาติเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่ประเทศไทยมีพืชที่มีศักยภาพในการเป็นแหล่งฟรีไบโอดีทอยู่หลายชนิด โดยส่วนใหญ่แล้วเป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษากการสกัดสารฟรีไบโอดีทจากพืชเกษตรในขนาดโรงงานจำลอง โดยมีการจัดสร้างเครื่องสกัดแบบแบบทซ์ขึ้นเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟรีไบโอดีท รวมไปถึงการคัดเลือกชนิดของพืชที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังกล่าว สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องสกัดสารฟรีไบโอดีทจากธรรมชาติต่อไป อีกทั้งได้ทราบถึงสภาวะเบื้องต้นในการสกัดสารฟรีไบโอดีทจากพืชธรรมชาติ

บทตรวจเอกสาร

1. ฟังก์ชันนัลฟู้ดส์ (Functional foods)

ในความหมายทางวิทยาศาสตร์อาหาร ฟังก์ชันนัลฟู้ดส์ คือ อาหารที่มนุษย์บริโภคเข้าไปแล้วให้ประโยชน์หรือคุณสมบัติอื่นๆ ต่อสุขภาพนอกเหนือจากคุณค่าทางโภชนาการพื้นฐาน ซึ่งได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามินและเกลือแร่ ซึ่งสมบัติพิเศษที่ได้รับนี้มีประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค ส่วนใหญ่เป็นการช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรค เช่น ช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือด ลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคกระดูกพรุน มีผลต่อการป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง โรคอ้วน โรคเบาหวาน ตลอดจนมีผลต่อการเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย อาหารหลายชนิดที่จัดเป็นฟังก์ชันนัลฟู้ดส์และพบได้ในชีวิตประจำวันมีมากมายหลายชนิด เช่น โปรไบโอติกส์ พรีไบโอติกส์ ธัญพืช เส้นใยอาหาร ตลอดจนสารเคมีพืช หรือที่เรียกว่าไฟโตเคมีคัล (Phytochemicals) ตัวอย่างของกลุ่มอาหารที่จัดเป็นฟังก์ชันนัลฟู้ดส์โดยทั่วไปแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของสารที่จัดเป็นฟังก์ชันนัลฟู้ดส์

ฟังก์ชันนัลฟู้ดส์	ตัวอย่าง
โปรไบโอติกส์	แบคทีเรียกรดแลคติก บีฟิโดแบคทีเรีย
พรีไบโอติกส์	เส้นใยอาหาร โอลิโกแซคคาไรด์
วิตามิน	วิตามินบี 6 บี 12 วิตามินดีและเค
แร่ธาตุ	แคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี
สารต้านออกซิเดชัน	วิตามินเอ วิตามินซี แคโรทีนอยด์ ฟลาโวนอยด์ โพลีฟีนอล
โปรตีน เปปไทด์ และ กรดอะมิโน	ไตรเปปไทด์จากโปรตีนในนม
ลิปิด	โอเมกาทรี
ไฟโตเคมีคัล	ไฟโตสเตอรอล เบต้า-กลูแคน ไอโซฟลาโวน ลิกแนน

ที่มา: ปิ่นมณี ขวัญเมือง, 2548

2. โพรไบโอติกส์ (Probiotics)

โพรไบโอติกส์ หมายถึงกลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ มีผลต่อความสมดุลของจุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ สามารถทนต่อสภาวะที่เป็นกรดในกระเพาะอาหารและทนต่อเกลือน้ำดีในลำไส้ ซึ่งพบได้ในบริเวณลำไส้ที่เรียกว่า Gastrointestinal (GI) Tract และยังรวมถึงจุลินทรีย์ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอาหารในรูปที่มีชีวิต อาหารประเภทโพรไบโอติกส์โดยทั่วไปมีส่วนผสมของจุลินทรีย์หนึ่งชนิดหรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้ต้องได้รับการศึกษาและตรวจสอบอย่างแน่ชัดแล้วว่าไม่มีผลเสียต่อสุขภาพของผู้บริโภค จุลินทรีย์ที่เป็นโพรไบโอติกส์ส่วนใหญ่ได้แก่ แบคทีเรียหลายสายพันธุ์ เช่น แลคโตบาซิลลัส (*Lactobacillus*) เมื่อมนุษย์บริโภคเข้าไปแล้วจะเป็นตัวช่วยควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ที่ร่างกายไม่ต้องการให้อยู่ในปริมาณที่ไม่ก่อให้เกิดโรค หรือก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ให้แก่ร่างกายได้ เชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ส่วนใหญ่ได้รับการบริโภคอาหารที่มีส่วนประกอบของโพรไบโอติกส์ เช่น ผลิตภัณฑ์นมหมักชนิดต่าง ๆ แหนมสด แบคทีเรียที่เป็นโพรไบโอติกส์มีคุณสมบัติปกป้องร่างกายไม่ให้ได้รับอันตรายจากเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค และยังสามารถผลิตเอนไซม์มาย่อยสลายอาหารบางประเภทที่ระบบการย่อยในร่างกายมนุษย์ไม่สามารถย่อยได้ให้เป็นสารที่มีประโยชน์และร่างกายดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติกส์แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จุลินทรีย์ที่ชนิดต่าง ๆ ที่จัดเป็นโพรไบโอติกส์

ชนิดของจุลินทรีย์	ประโยชน์ต่อสุขภาพ
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	1. มีผลต่อระบบการย่อยอาหาร บรรเทาอาการท้องเสียและท้องผูก
<i>Lactobacillus casei</i>	
<i>Lactobacillus immunitus</i>	2. เพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้กับร่างกายโดยการผลิตแบคทีเรียโอซิน
<i>Lactobacillus plantarum</i>	
<i>Lactobacillus lactis</i>	3. ช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรค เช่น ลดระดับคอเลสเตอรอล ลดเชื้อก่อโรคลำไส้ใหญ่ และป้องกันมะเร็ง
<i>Bifidobacterium lactis</i>	
<i>Bifidobacterium lonhum</i>	

ที่มา: ปิ่นมณี ขวัญเมือง, 2548

2.1 คุณสมบัติของโปรไบโอติกส์

โปรไบโอติกส์เป็นแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์ โดยจะทำหน้าที่ส่งเสริมสุขภาพของเจ้าบ้านให้ดีขึ้น โดยแบคทีเรียโปรไบโอติกส์จะต้องสามารถเจริญและผ่านไปยังลำไส้ใหญ่ให้ได้ ซึ่งต้องมีคุณสมบัติหลายประการเพื่อสามารถทนต่อสภาวะต่างๆในระบบทางเดินอาหารส่วนบนและผ่านไปยังลำไส้ใหญ่แบบมีชีวิต โดยแบคทีเรียโปรไบโอติกส์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. แบคทีเรียโปรไบโอติกส์จะต้องสามารถทนต่อความเป็นกรดในกระเพาะอาหารได้ดี เนื่องจากในกระเพาะอาหารจะมี pH อยู่ในช่วง 1-3 ซึ่งเกิดจากการที่ร่างกายมีการหลั่งกรดไฮโดรคลอริกออกมาเพื่อช่วยในกระบวนการย่อยอาหาร ทำให้ค่า pH ในกระเพาะอาหารมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์จะต้องมีความสามารถในการทนต่อ pH ช่วงนี้ได้ จึงจะสามารถมีชีวิตรอดผ่านไปยังลำไส้ใหญ่ได้ (Kontula *et al.*, 1998)

2. แบคทีเรียโปรไบโอติกส์ที่ดีจะต้องมีความสามารถในการทนต่อเกลือแร่ได้ เนื่องจากในระบบทางเดินอาหารส่วนต้นโดยเฉพาะบริเวณลำไส้เล็ก จะมีเกลือแร่ที่หลังจากตับอ่อนเพื่อเข้ามาช่วยในกระบวนการย่อยอาหารพวกไขมัน ซึ่งจะมีความเข้มข้นของเกลือแร่คืออยู่ 0.15-0.3% (Erkkila และ Petaja, 2000) ความสามารถในการทนต่อเกลือแร่จะให้แบคทีเรียโปรไบโอติกส์สามารถเจริญและผ่านไปถึงลำไส้ใหญ่ได้

3. สามารถยึดเกาะผนังลำไส้ใหญ่ได้ ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้แบคทีเรียก่อโรคเกาะและต่อต้านการเคลื่อนที่ของลำไส้ที่มีการบีบตัวให้อาหารเคลื่อนที่ในลักษณะเป็นลูกคลื่น (peristalsis) การเกาะผนังลำไส้ของแบคทีเรียโปรไบโอติกส์ทำให้การย่อยอาหารและการดูดซึมอาหารเป็นไปอย่างปกติ (Fuller, 1993)

4. ส่งเสริมสุขภาพของเจ้าบ้าน (host) ให้ดีขึ้น โดยนอกจากสามารถทนต่อสภาวะต่างๆในระบบทางเดินอาหารได้แล้ว ยังมีคุณสมบัติในการป้องกันการเกิด lactose intolerance ได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากร่างกายมนุษย์ไม่สามารถผลิตเอนไซม์ lactase มาย่อยน้ำตาลแลคโตสได้ ทำให้เกิดอาการท้องอืดหรือท้องเสียเมื่อกินอาหารที่มีน้ำตาลแลคโตสเข้าไป ซึ่งแบคทีเรียโปรไบโอติกส์สามารถผลิตเอนไซม์ lactase ช่วยย่อยน้ำตาลแลคโตสในนมได้ (Fook *et al.*, 1999) นอกจากนี้แบคทีเรียโปรไบโอติกส์จะต้องมีคุณสมบัติในการช่วยปรับสมดุลจุลินทรีย์ในร่างกายและป้องกันการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคในระบบทางเดินอาหารซึ่งเป็นสาเหตุของอาหารท้องเสีย ท้องร่วง ซึ่งแบคทีเรียโปรไบโอติกส์จะไปยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคโดยการแข่งขันกับแบคทีเรียก่อโรคในการยึดเกาะผนังลำไส้ แย่งอาหารของแบคทีเรียก่อโรค และสร้างสารยับยั้งขึ้นเพื่อยับยั้งการ

เจริญของแบคทีเรียก่อโรคไม่ให้มีมากเกินไป เช่น กรดอินทรีย์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแบคทีเรียโอซิน เป็นต้น (Fuller, 1993)

2.2 ประโยชน์ของโปรไบโอติกส์

โปรไบโอติกส์ เป็นจุลินทรีย์ที่ไม่มีอันตรายต่อร่างกายของสิ่งมีชีวิต (Friendly Microorganisms) ช่วยในการปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้ การบริโภคผลิตภัณฑ์ที่มีโปรไบโอติกส์ทำให้อวัยวะจะได้รับประโยชน์หลายประการ เช่น ช่วยในเรื่องระบบการย่อยอาหาร และสร้างภูมิคุ้มกัน ช่วยบรรเทาอาการท้องเสีย ประโยชน์ของโปรไบโอติกส์ที่สำคัญพอกล่าวได้ 3 ประการ คือ

1. มีผลต่อระบบการย่อยอาหาร แบคทีเรียกรดแลคติกที่พบในผลิตภัณฑ์นมจะช่วยให้ผู้ที่มียeast และแลคเตสไม่ปกติหรือผู้ที่แพ้นมสามารถบริโภคนมได้ง่ายขึ้น เพราะแบคทีเรียกรดแลคติกจะช่วยย่อยน้ำตาลแลคโทสในนมให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวกลูโคสกับกาแลคโทส ซึ่งร่างกายสามารถดูดซึมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทั้งสองชนิดไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้แบคทีเรียกรดแลคติกยังสังเคราะห์วิตามินที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น วิตามินบี 1 บี 2 บี 6 บี 12 ไนอะซิน กรดโฟลิก กรดแพนโททีนิก และยังสังเคราะห์เอนไซม์มาช่วยย่อยสลายโปรตีนให้เป็นประโยชน์ต่อร่างกายได้มากขึ้น

2. ช่วยเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย โดยแบคทีเรียกรดแลคติกบางสายพันธุ์ผลิตสารยับยั้งแบคทีเรียที่เรียกกันว่าแบคทีเรียโอซินมาช่วยยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคได้ นอกจากนี้การสร้างกรดของแบคทีเรียในบริเวณลำไส้ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ลดต่ำลงส่งผลให้เกิดสภาวะไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค แบคทีเรียกรดแลคติกมีคุณสมบัติยับยั้งพิษที่จุลินทรีย์อื่นสร้างขึ้นและยับยั้งปฏิกิริยาของสารก่อมะเร็งได้ แบคทีเรียบางสายพันธุ์ผลิตสารที่มีลักษณะเป็นเมือกในลำไส้ ซึ่งจะช่วยให้จับกับสารพิษบางอย่างและขับถ่ายออกจากร่างกายได้ ซึ่งประโยชน์ของโปรไบโอติกส์ส่วนนี้จะช่วยให้ผู้ที่บริโภคอาหารที่มีโปรไบโอติกส์มีโอกาสเกิดโรคต่าง ๆ ได้น้อยลง

3. ช่วยลดความอ่อนแอของร่างกายจากการติดเชื้อโรคต่าง ๆ

โดยเมแทบอลิซึมของโปรไบโอติกส์มีผลต่อการควบคุมการติดเชื้อในลำไส้ ยับยั้งการเกิดมะเร็งลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือดและเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย (ปีนมณี ขวัญเมือง, 2548)

3. 프리ไบโอติกส์ (Prebiotics)

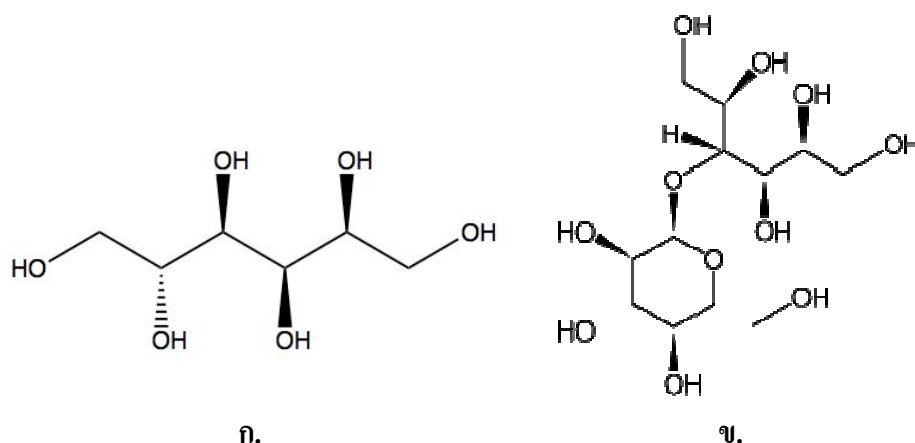
프리ไบโอติกส์ เป็นสารประกอบพวกโอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) ซึ่งเป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ถูกย่อยและไม่ถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหารส่วนบนและสามารถผ่านไปสู่บริเวณลำไส้ใหญ่ได้ในสภาพที่สมบูรณ์ มีผลช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มโปรไบโอติกส์ในลำไส้ใหญ่และส่งเสริมสุขภาพของเจ้าบ้าน (Host) (Gibson and Roberfroid, 1995) จากการที่จุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ย่อยสารกลุ่มนี้จะได้สารบางชนิดที่เป็นประโยชน์ซึ่งร่างกายนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้หลายชนิด เช่น กรดไขมันสายสั้น (Short Chain Fatty Acid, SCFA) และผลจากการย่อยยังทำให้ค่าความเป็นกรดต่างในลำไส้ลดลง ผลดังกล่าวยังช่วยลดและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค (Morisse *et al.*, 1993) ซึ่งในลำไส้ใหญ่มีแบคทีเรียอยู่ 2 กลุ่มด้วยกันคือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่มีประโยชน์ (Beneficial bacteria) เช่น *Bifidobacteria* และ *Lactobacillus* กลุ่มที่สองคือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค (Pathogenic bacteria) เช่น *E. coli*, *Salmonella* และ *Clostridium* (เฉลิมขวัญ และมัลลิกา, 2548)

3.1 คุณสมบัติของ프리ไบโอติกส์

สารที่สามารถจัดเป็น프리ไบโอติกส์ได้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติคือ สารนั้นต้องสามารถทนต่อการย่อยของกรดในกระเพาะอาหาร ไม่ถูกดูดซึมในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก และสามารถเคลื่อนที่ไปจนถึงลำไส้ใหญ่ได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Gibson, 2004; Kolida *et al.*, 2002; Ellegard *et al.*, 1997) สามารถที่จะเกิดการหมักในลำไส้ใหญ่โดยแบคทีเรียที่มีประโยชน์ เช่น *Bifidobacteria* และ *Lactobacillus* อีกทั้งต้องไปส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียที่มีประโยชน์ในทางเดินอาหาร และไม่ส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค (Gibson and Roberfroid, 1995) เพื่อใช้เป็นอาหารให้กับจุลินทรีย์ประจำถิ่น (Microflora) ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ ซึ่งสามารถใช้สารเหล่านี้ในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน

3.2 ประเภทของ프리ไบโอติกส์ (เฉลิมขวัญ และมัลลิกา, 2548)

1. **Alcohol sugar** จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดโครงสร้างหรือดัชนีการสังเคราะห์โพลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) เพียง 1-2 ตัว ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้เช่น Maltitol, Sorbitol, Isomalt และ Xylitol เป็นต้น ในบางครั้งจะเรียกว่า Polyols สามารถเป็นสารให้ความหวานได้ โดยมีความหวานประมาณ 3 ใน 4 หรือครึ่งหนึ่งของน้ำตาลทั่วไป และยังคงดูดซับได้ช้าในลำไส้เล็กเมื่อเทียบกับน้ำตาล จึงทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ด้วย



ภาพประกอบที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของ Sorbitol (ก) และ Maltitol (ข)

2. Resistant starch เป็นแป้งหรือผลิตภัณฑ์แป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ และดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ปกติได้ ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะและแหล่งที่มาได้ 3 ประเภทคือ แป้งที่มีลักษณะทางกายภาพขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ (Physically inaccessible starch; RS1) โดยเม็ดแป้งอาจถูกห่อหุ้มอยู่ภายในร่างแหของโปรตีนหรือถูกตรึงอยู่ภายในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในเม็ดแป้งได้ ประเภทถัดมาคือ เม็ดแป้งดิบที่ทนทานต่อการทำงานของเอนไซม์ (Raw starch granules; RS2) ได้แก่ เม็ดแป้งมันฝรั่งดิบ เม็ดแป้งกล้วยดิบ และแป้งจากเมล็ดถั่ว โดยความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างตามธรรมชาติของเม็ดแป้งที่ไม่มีรูหรือช่องเปิดให้เอนไซม์เข้าไปในเม็ดแป้ง การเกิดเจลลิตินซ์ของแป้งจะช่วยให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งได้มากขึ้น และประเภทสุดท้ายคือ แป้งคืนตัว (Retrograded starch; RS3) Resistant starch โดยส่วนใหญ่จะจัดอยู่ในประเภท Retrograded starch ซึ่งได้แก่ อาหารที่ผ่านการให้ความร้อนจนแป้งเกิดการเจลลิตินซ์ แล้วถูกทำให้เย็นตัวลง ทำให้ส่วนอะมิโลส (โพลีเมอร์เชิงเส้นของกลูโคส) ในน้ำแป้งที่หลุดออกมาในขณะที่เม็ดแป้งพองตัวเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ได้เป็นผลึกแป้งที่แข็งแรงและทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ดังนั้นแป้งที่มีอัตราส่วนของอะมิโลสสูงกว่า จะสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าแป้งที่มีอะมิโลเพกทิน (โพลีเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส) สูง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงก็สามารถผลิต Resistant starch ได้ในระดับสูงเช่นเดียวกัน พืชส่วนใหญ่จะมีอะมิโลสอยู่ประมาณ 20-25%

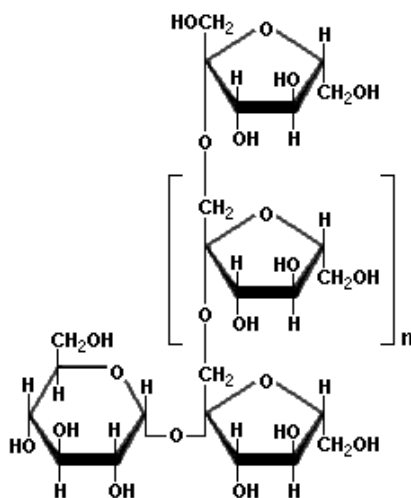
3. Non-starch polysaccharides เป็นสารที่ได้จากพืช เช่น Pectin, Hemicellulose, Guar Cellulose, และ Xylan

4. Inulin เป็นสาร Polysaccharides ที่สามารถละลายน้ำได้และมีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตให้กับพืช พบในพืชมากกว่า 36,000 ชนิด เช่น Chicory root เห็ด หัวหอม หัวกระเทียม กลัวย เป็นต้น โครงสร้างของอินนูลินประกอบด้วย ฟรุคโตส (Fructose) 80% และกลูโคส (Glucose) 20% เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\beta(2-1)$ ที่มีความยาวตั้งแต่ 2-60 หน่วย โดยทั่วไป อินนูลิน มีขนาดโครงสร้างหรือค่าดัชนีการสังเคราะห์โพลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ประมาณ 10 (ส่วนค่า DP ของ Fructooligosaccharide โดยทั่วไปเท่ากับ 4) และตามโครงสร้างจะมี Oligofructose ประกอบอยู่เป็นโครงสร้างกลุ่มย่อย โดยพืชต่างชนิดกันจะมีปริมาณ Inulin และ Oligofructose ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 และจากการทดลองนำ Inulin และ Oligofructose ให้ผู้ใหญ่จำนวน 8 คน ในปริมาณ 15 กรัมต่อวัน เป็นเวลา 15 วัน พบว่า 프리ไบโอติกส์ทั้งสองชนิดสามารถเพิ่มปริมาณ *bifidobacteria* ได้ (Gibson *et al.*, 1995)

ตารางที่ 3 ปริมาณ Inulin และ Oligofructose ในอาหารชนิดต่างๆ

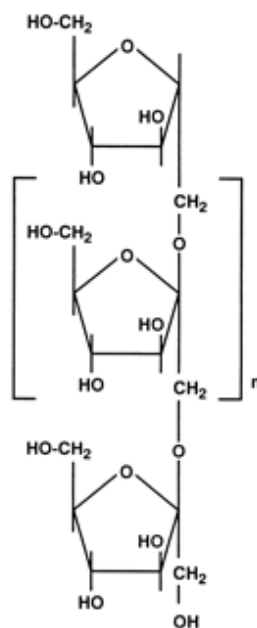
พืช	ปริมาณ Inulin (%)	ปริมาณ Oligofructose (%)
Onion (หัวหอม)	2-6	2-6
Jerusalem artichoke (เยรูซาเลม อาร์ติโชค)	16-20	16-20
Chicory (ซีโครี)	15-20	5-10
Asparagus (แอสปารากัส)	1-30	1-20
Leek (ต้นกระเทียม)	3-10	2-5
Garlic (กระเทียม)	9-16	3-6
Artichoke (อาร์ติโชค)	3-10	<1
Banana (กล้วย)	0.3-0.7	0.3-0.7
Wheat (ข้าวสาลี)	1-4	1-4
Rye (ข้าวไรย์)	0.5-1	0.5-1
Barley (ข้าวบาเลย์)	0.5-1.5	0.5-1.5

ที่มา: เฉลิมขวัญ, มัลลิกา 2548



ภาพประกอบที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของ Inulin

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



ภาพประกอบที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของ Fructooligosaccharide

6. Mucin glycoproteins ถูกสร้างโดย Goblet cells ที่อยู่ในเยื่อเมือกในลำไส้และเป็นสารตั้งต้นหลักสำหรับการหมักในลำไส้

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

8. Protein and peptides สารเหล่านี้สร้างขึ้นในอาหาร สร้างโดยการหลั่งของตับอ่อนหรือสร้างโดยแบคทีเรีย แต่จะมีปริมาณน้อยกว่าพวกคาร์โบไฮเดรต

3.3 ประโยชน์ของไฟโบรติกส์

ประโยชน์ต่อสุขภาพของไฟโบรติกส์จะมีความเกี่ยวข้องกันกับประโยชน์ของโปรไบโอติกส์ซึ่งเมื่อมีการเพิ่มการเจริญของแบคทีเรียในกลุ่มนี้แล้วทั้งแบคทีเรียเองและสารที่เกิดจากกระบวนการในการใช้ไฟโบรติกเป็นแหล่งคาร์บอนก็จะมีบทบาทต่อผู้บริโภค เช่น ช่วยส่งเสริมการทำงานของระบบทางเดินอาหาร มีผลต่อการดูดซึมแร่ธาตุบางชนิด และมีผลต่อเมแทบอลิซึมของไขมัน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ผลต่อระบบทางเดินอาหาร

ไฟโบรติกส์จะทนต่อการย่อยในทางเดินอาหารส่วนบนของมนุษย์เมื่อมาถึงลำไส้ใหญ่ก็จะเป็นอาหารให้กับแบคทีเรียในลำไส้ซึ่งเมื่อแบคทีเรียนำไปใช้ก็จะให้พลังงานและสารสำคัญบางอย่างแก่ร่างกาย ตัวอย่าง เช่น Inulin-type fructans ให้กรดแลคติก (Lactic acid) และกรดไขมันชนิดสายสั้น (short-chain fatty acids) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการหมัก (Fermentation) ซึ่งการหมักนี้จะทำให้มีการกระตุ้นการเจริญของ *Bifidobacteria* ซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์สุขภาพ และในสภาวะความเป็นกรดที่เกิดขึ้นจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Clostridium perfringens*, *Salmonella spp.* และ *Escherichia coli* ในลำไส้ จึงช่วยป้องกันท้องเสียท้องเดิน โดยเฉพาะจากการติดเชื้อได้ นอกจากนี้ ด้วยคุณสมบัติคล้ายใยอาหารอื่นๆ ก็จะช่วยบรรเทาอาการท้องผูก เนื่องจากผลของการเพิ่มน้ำหนักของอุจจาระและผลต่อการเคลื่อนไหวของลำไส้ จึงช่วยให้ขับถ่ายง่ายขึ้น นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาถึงผลของไฟโบรติกส์ในการต้านมะเร็ง (Anticarcinogenic effect) ซึ่งก็สามารถนำผลที่มีต่อทางเดินอาหารมาอธิบายได้เช่นกัน

2. ผลต่อการดูดซึมแร่ธาตุบางชนิด

ปกติพวกใยอาหารหรือไฟโบรติกส์นี้จะรบกวนการดูดซึมของเกลือแร่ด้วยการไปจับกับแร่ธาตุไว้ในโครงสร้างที่ซับซ้อนของมันทำให้ไม่สามารถถูกดูดซึมได้ที่ลำไส้เล็กก็จะเดินทางมาถึงลำไส้ใหญ่ จากนั้นมันก็จะปลดปล่อยแร่ธาตุเหล่านั้นออกมา เมื่อมีการหมักโดย

แบคทีเรียในลำไส้ได้กรดไขมันชนิดสายสั้น ความเป็นกรดก็จะช่วยในการดูดซึมแร่ธาตุบางชนิดได้แก่แคลเซียมและแมกนีเซียม นอกจากนี้อาจด้วยกลไกที่ทำให้เกิดแรงดันออสโมติก (Osmotic effect) มันจะดึงน้ำเข้ามาช่วยในการละลายเกลือแร่ต่าง ๆ ได้ และแม้ว่าจะมีพรีไบโอติกส์จะช่วยเรื่องการดูดซึมแคลเซียมซึ่งอาจส่งผลลดความเสี่ยงต่อกระดูกพรุน แต่ก็ยังคงต้องการการศึกษามากกว่านี้

3.4 แหล่งของพรีไบโอติกส์

พรีไบโอติกส์ที่พบมีอยู่ 2 กลุ่ม คือ พรีไบโอติกส์ที่พบในธรรมชาติจะพบได้ในผักและผลไม้ เช่น กัลวาล หน่อไม้ฝรั่ง ถั่ว กลุ่มธัญพืช และพรีไบโอติกส์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้เอนไซม์ย่อย Polysaccharides เช่น แป้ง (Charant, 2542) ซึ่งในปัจจุบันพรีไบโอติกส์ที่นำมาใช้ทางการค้าและในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่ได้มาจากการสังเคราะห์

จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการแสดงว่า สามารถสกัดสารพรีไบโอติกส์ได้ด้วยตัวทำละลาย ซึ่งได้ศึกษาพืชที่มีความสามารถในการเป็นสารพรีไบโอติกส์ทั้งหมด 32 ชนิด และเมื่อนำสารสกัดจากพืชเหล่านี้ไปทดสอบความเป็นพรีไบโอติกส์ พบว่ามีแนวโน้มสูงที่สารสกัดนั้นจะเป็นพรีไบโอติกส์ที่ดี โดยสามารถคัดเลือกวัตถุดิบจากพืชได้ทั้งหมด 10 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการคัดเลือกชนิดสารสกัดจากพืชเพื่อใช้เป็นแหล่งของฟิโอบัยโอติกส์ที่ส่งเสริมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ได้ดี

ลำดับ	พืช	ส่วนสกัด	ตัวทำละลายที่ใช้สกัด	โพลีแซกคาไรด์ที่ไม่ย่อยในเฟสสกัด % (w/w)	โพลีแซกคาไรด์ที่ไม่ย่อย mg/g extract
1	ลูกตาล	เปลือก	เอทานอล 95%	70.58	705.8
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	จำปาตะ	เนื้อ	เอทานอล 95%	54.26	542.56
6	มะพร้าวอ่อน	เนื้อ	น้ำ	51.39	513.87
7	กระเจียวเขียว	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

ที่มา: รายงานความก้าวหน้าโครงการการสกัดสารฟิโอบัยโอติกส์จากพืช คณะอุตสาหกรรมเกษตร

จากตารางที่ 4 เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลและขนุน โดยใช้ เอทานอล 95% เป็นตัวทำละลายพบว่า ให้ โพลีแซกคาไรด์ที่ไม่ย่อยเป็น 70.58 และ 69.81 % (w/w) ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจึงนำไปสู่การเลือกชนิดของพืชในเบื้องต้น เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

4. ตาลโตนด (Sugar Palm)

ตาลโตนดมีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Borassus flabellifer L.* ชื่อสามัญว่า Palmyra palm หรือ Sugar palm ตาลโตนดเป็นพืชตระกูลปาล์มชนิดหนึ่งจากปาล์ม 20 ชนิด 1,500 สปีชีส์ มีลำต้นสูงชะลูด โดยมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 20-30 เมตร มีถิ่นกำเนิดอยู่ทางใต้ของทวีปเอเชีย โคนต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เมตร ลำต้นที่สูงขึ้นไปประมาณ 4 เมตร จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40 เซนติเมตร และจะขยายออกที่ความสูงประมาณ 10 เมตร ซึ่งจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 เซนติเมตร และคงขนาดนี้ไปถึงยอดตาลโตนด เราสามารถนำตาลโตนดไป

ใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้หลายประการและเกือบทุกส่วนไม่ว่าจะเป็นลำต้น ราก ทางตาล ผล ซึ่งในส่วนของผลตาลโคนคั้นมีลักษณะเป็นผลอยู่ในทะลายประมาณ 6-12 ทะลาย แต่ละทะลายมีประมาณ 10-15 ผลต่อปี ผลอ่อนมีสีเขียว ผลจะเปลี่ยนเป็นสีม่วง เมื่อแก่จัดมีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ เป็นมัน เส้นผ่านศูนย์กลางของผลประมาณ 10-20 เซนติเมตร ภายในมี 2-4 เมล็ด แต่โดยทั่วไปแล้วมี 3 เมล็ด เมล็ดมีลักษณะแบนยาวประมาณ 3 นิ้ว กว้าง 2 นิ้ว และหนาประมาณครึ่งนิ้ว ซึ่งมีเปลือกแข็งหุ้มอยู่ ภายในเป็นเส้นละเอียดเมื่อสุกจะมีสีเหลืองแก่และมีกลิ่นหอม เนื้อประกอบด้วยแป้งและน้ำตาล นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมของแคโรทีนอยด์ซึ่งให้สีเหลือง ใช้แต่งสีอาหารได้ ส่วนประกอบของผลแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ เปลือกชั้นนอก มีผิวเรียบเป็นมัน เปลือกชั้นกลางเป็นส่วนของเส้นใยสด ส่วนเปลือกชั้นในเป็นเปลือกหรือกะลาแข็งหุ้มเมล็ดไว้ ข้างในเมล็ดที่แก่เต็มที่จะเป็นของแข็งสีขาว เรียกว่า จาวตาล ซึ่งมีเนื้อคล้ายมะพร้าวแต่มีความแข็งกว่ามาก เมื่อเป็นผลอ่อนเนื้อเมล็ดจะเป็นโพรง นุ่ม ลักษณะคล้ายเจลลี่ และโปร่งใส ลักษณะคล้ายน้ำแข็ง และข้างในมีของเหลวรสชาติหวาน (สมยศ, 2547) ลักษณะของเมล็ดและเปลือกตาล โคนคแสดงดังภาพประกอบที่ 4



ภาพประกอบที่ 4 ลักษณะของเมล็ดและเปลือกตาล โคนค

ที่มา : โครงการแผนที่ภูมิทัศน์ภาคใต้: ฐานเศรษฐกิจและทุนวัฒนธรรม. ตาลโตนด : พันธุ์ไม้

จากการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อตาลสุกพบว่าเนื้อผลตาลสุกมีความชื้น ร้อยละ 89.4 โปรตีนร้อยละ 0.7 ไขมันร้อยละ 0.6 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 21 เกลือแร่ร้อยละ 0.7 สารใยร้อยละ 0.5 แคลเซียมร้อยละ 7 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสร้อยละ 22 มิลลิกรัม และธาตุเหล็กร้อยละ 0.9 มิลลิกรัม (จารุณี และชลธิชา, 2545)

การศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของตาลโตนคในภาคใต้ที่ปรากฏเป็นเอกสารมักจะอยู่ในแถบคาบสมุทรสทิงพระเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีการประมาณว่าในปี พ.ศ. 2526 อำเภอสทิงพระ

มีจำนวนต้นตาลโตจนถึง 500,000 ต้น (สมยศ, 2547) อย่างไรก็ตามปริมาณการปลูกตาลโตจนถึงมีการกระจายไปในพื้นที่อื่นของภาคใต้ สำหรับในจังหวัดสงขลามีต้นตาลโตจนถึงอยู่นับตั้งแต่ริมทะเลด้านตะวันออกจนจรดริมทะเลสาบด้านตะวันตก โดยจังหวัดสงขลามีประชากรต้นตาลโตจนจำนวนกว่าสามล้านต้น ครอบคลุมพื้นที่ในจังหวัดจำนวน 6 อำเภอ ได้แก่ อำเภอสทิงพระ อำเภอสิงหนคร อำเภอกระแสดินธุ์ อำเภอรโนด อำเภอกวนเนียง และอำเภอรัตนภูมิ นอกจากนี้ยังพบเป็นหย่อมๆ บริเวณที่ราบลุ่มทำนาของอำเภอจะนะ อำเภอเทพา อำเภอนาทวี และอำเภอนาหม่อม เป็นต้น เนื่องจากการปลูกตาลโตในจังหวัดประมาณ 118,500 ไร่ (www.songkhla.go.th/newweb45/data/snj_songkhla/March48/songkhla48.doc)

5. ขนุน (Jack Fruit)

ขนุนมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Artocarpus heterophyllus*, Lamk. อยู่ในตระกูล Moraceae มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศอินเดีย ขนุนเป็นไม้ยืนต้น อายุยืน ลำต้นสูงประมาณ 10-25 เมตร ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ในทุกสภาพพื้นที่ของประเทศไทย สภาพดินที่เหมาะสมในการใช้ปลูกควรมีค่า pH อยู่ระหว่าง 5.5-7.5 และดินควรเป็นดินร่วนหรือดินร่วนปนทราย มีการระบายน้ำได้ดี อายุการให้ผลจะเริ่มให้ผลเมื่ออายุประมาณ 4 ปี โดยสามารถให้ผลต่อไปได้อย่างต่อเนื่องไม่ต่ำกว่า 25 ปี อายุตั้งแต่เริ่มออกดอกถึงดอกบาน 20-25 วัน หลังดอกบานผลจะแก่เมื่ออายุ 120-150 วัน ผลผลิตเฉลี่ยต่อต้นเมื่ออายุประมาณ 10 ปี อยู่ระหว่าง 25-30 ผล ซึ่งฤดูกาลเก็บเกี่ยวนั้น ถ้าเป็นขนุนในฤดูจะเก็บเกี่ยวได้ตั้งแต่เดือน มกราคมถึงพฤษภาคม และถ้าเป็นขนุนนอกฤดูจะเก็บเกี่ยวได้ตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงตุลาคม พื้นที่ที่มีการปลูกขนุนกันมากได้แก่ ชลบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ปราจีนบุรี สงขลา กาญจนบุรี เพชรบุรี และนครศรีธรรมราช ขนุนที่ปลูกกันโดยทั่วไปมีอยู่ 2 ประเภท คือ ขนุนหนังและขนุนละมุด แต่ที่นิยมปลูกกันในปัจจุบันเป็นพันธุ์ขนุนหนัง สถิติการปลูกขนุนหนังแยกภาคแสดงดังตารางที่ 5 และข้อมูลการผลิตขนุนหนังและจำปะดะในภาคใต้แสดงดังตารางที่ 6

จากการสำรวจเมื่อปี 2540 พบว่า พื้นที่เพาะปลูกขนุนทั้งประเทศประมาณ 251,978 ไร่ (ที่มา: <http://www.doae.go.th/plant/kanun.htm>) และในปี พ.ศ. 2542 ได้มีการสำรวจพื้นที่การปลูกไม้ผลในภาคใต้ซึ่งมีพื้นที่การปลูกทั้งสิ้น 2,096,130 ไร่ ไม้ผลในภาคใต้มีหลายชนิดและบางชนิดก็เป็นพืชที่มีแหล่งกำเนิดในท้องถิ่นโดยเฉพาะได้แก่ ทูเรียน เงาะ กล้วย มังคุด ขนุน มะละกอ เป็นต้น ในส่วนของจังหวัดสงขลามีเนื้อที่ปลูกขนุน 3,585 ไร่ ผลผลิตปีละ 5,801 ตัน มูลค่ารวม 53,311,190 บาท โดยพื้นที่ที่มีการปลูกมากคือ อำเภอเมือง สทิงพระ กวนเนียง หาดใหญ่ รัตภูมิ บางกล่ำ จะนะ นาทวี เทพา สะบ้าย้อย และคลองหอยโข่ง ลักษณะของผล

เปลือกและเมล็ดขนุนแสดงดังภาพประกอบที่ 5 คุณค่าทางโภชนาการของขนุน ชั่งขนุน และเมล็ด
ขนุนแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 5 สถิติการปลูกขนุนหนึ่งแยกรายภาค

ภาค	พื้นที่เพาะปลูก (ไร่)			ผลผลิต		ราคาขายได้ที่สวน (บาท/กก.)			
	ให้ผล แล้ว	ยังไม่ ให้ผล	รวม	ผลผลิต เฉลี่ย (กก./ ไร่)	ผลผลิต รวม (ตัน)	สูงสุด		ต่ำสุด	
						ราคา	เดือน	ราคา	เดือน
เหนือ	24,418	12,237	36,655	3,351	81,831.98	6.45	พ.ค.	3.67	มิ.ย.
ตะวันออกเฉียงเหนือ	32,861	32,920	69,781	2,952	106,820.06	8.18	-	4.69	-
กลาง	8,682	4,855	13,537	2,600	22,577.7	7.83	พ.ค.	4.29	ธ.ค.
ตะวันออก	66,981	41,509	108,490	3,382	226,581.08	11.55	มี.ค.	5.09	พ.ค.
ตะวันตก	30,788	20,799	51,567	3,034	93,429	8.46	ธ.ค.	4.26	มิ.ย.
ใต้	13,380	3,835	17,215	2,326	31,152.62	10.99	-	6.64	-
รวมทั้งประเทศ	181,110	116,135	297,245	3,116	564,382.43	8.52	-	4.74	-

ที่มา: ฝ่ายข้อมูลส่งเสริมการเกษตร กองแผนงาน กรมส่งเสริมการเกษตร, 2542

ตารางที่ 6 ข้อมูลการผลิตขนุนหนึ่งและจำปาดะในภาคใต้ ปี 2542

	พื้นที่ให้ผลผลิต (ไร่)	พื้นที่ปลูก (ไร่)	ผลผลิตรวม (ตัน)	ผลผลิตเฉลี่ย (กก./ไร่)
ขนุนหนึ่ง	13,380	17,215	31,153	2,328
จำปาดะ	13,451	22,127	25,033	1,661

ที่มา: สำนักงานส่งเสริมการเกษตรภาคใต้, 2545



ภาพประกอบที่ 5 ลักษณะของผล เปลือกและเมล็ดขนุน

(www.pk-siam.com/website/mart/fruits/jackfruit/jackfruit.html)

ตารางที่ 7 คุณค่าทางโภชนาการของขนุน ชั่งขนุน และเมล็ดขนุน

องค์ประกอบ	ขนุนแก่	ชั่งขนุน	เมล็ดขนุน
ความชื้น (ร้อยละ)	72.90	66.60	60.70
ไขมัน (ร้อยละ)	0.30	0.00	0.20
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	23.70	29.20	30.60
เส้นใย (ร้อยละ)	0.90	1.80	1.60
โปรตีน (ร้อยละ)	1.70	1.40	5.50
ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/g)	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
วิตามินบี1 (mg/100g)	0.09	0.08	1.74
วิตามินบี2 (mg/100g)	0.11	0.15	0.02
วิตามินซี (mg/100g)	9.00	13.00	3.25
ไนอาซีน (mg/100g)	0.70	0.00	24.00
วิตามินเอ (หน่วยสากล)	392.00	0.00	22.00

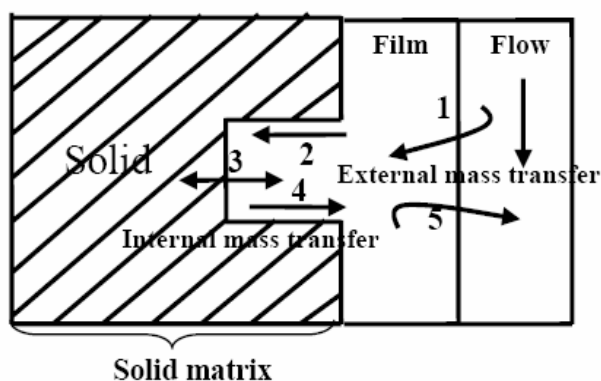
ที่มา: นฤชิต, 2529

6. หลักการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) หรือการชะละลาย (Leaching)

สารอินทรีย์ อนินทรีย์ สารเชิงชีวภาพ มักอยู่ในสารผสม โดยมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันในของแข็ง ในการแยกตัวละลายที่ต้องการหรือแยกส่วนประกอบตัวละลายที่ไม่ต้องการจากเฟสของแข็ง ของแข็งถูกนำมาสัมผัสกับเฟสของเหลว เฟสทั้งสองจะสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดและตัวละลายตัวเดียวหรือหลายตัวสามารถที่จะแพร่จากเฟสของแข็งไปสู่เฟสของเหลว ซึ่งจะเกิดการแยกของส่วนประกอบในของแข็งตั้งต้น กระบวนการนี้เรียกว่า การชะละลายของเหลว-ของแข็งหรือการชะละลาย กระบวนการชะละลายจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลและการแพร่ของตัวละลายในของแข็ง การแทนที่ของเฟสสกัดในช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็ง

กระบวนการชะละลายของสารเชิงชีวภาพ ในอุตสาหกรรมกระบวนการอาหาร และชีวภาพนั้น ผลผลิตหลายชนิดถูกแยกจาก โครงสร้างธรรมชาติตั้งต้นด้วยการชะละลายของเหลว-ของแข็ง กระบวนการที่สำคัญคือ การชะละลายน้ำตาลจากชูการ์บีท (Sugar beets) ด้วยน้ำร้อน ในกระบวนการผลิตน้ำมันพืช ตัวทำละลายอินทรีย์เช่น เฮกเซน อะซิโตน อีเธอร์ ถูกใช้ในการสกัดน้ำมันจากถั่ว ถั่วเหลือง เมล็ด flax เมล็ดละหุ่ง เมล็ดทานตะวัน เมล็ดฝ้าย ชะละลายได้ถูกผลิตโดยการละลายใบชาด้วยน้ำ แทนนินถูกแยกจากเปลือกไม้ด้วยการชะละลายด้วยน้ำ

กลไกในการถ่ายโอนมวลในการสกัดตัวละลายในของแข็งด้วยตัวทำละลายมี 5 ขั้นตอน ด้วยกัน (ภาพประกอบที่ 6)



ภาพประกอบที่ 6 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลระหว่างตัวทำละลายกับตัวละลาย
ที่มา: Pongnaravan, 2004

1. โมเลกุลของตัวทำละลายถ่ายโอนจาก Bulk fluid ผ่านชั้นฟิล์มบางๆ ของของไหลที่ปกคลุมพื้นผิวของของแข็ง แรงขับเคลื่อนในการถ่ายโอนคือความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่าง

Bulk fluid กับชั้นฟิล์มบางๆ ของของไหล ซึ่งฟิล์มนี้ทำหน้าที่เสมือนตัวต้านทานการถ่ายโอนโมเลกุลของตัวทำละลาย ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนจึงขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มของของไหล ความหนาของฟิล์มของของไหลขึ้นอยู่กับความเร็วของตัวทำละลาย ถ้าความเร็วของตัวทำละลายสูงก็จะทำให้ชั้นฟิล์มนั้นบางกว่า ส่งผลให้ความต้านทานน้อยกว่าด้วย

2. โมเลกุลของตัวทำละลายเคลื่อนที่จากพื้นผิวของของแข็งเข้าไปภายในช่องว่างหรือภายในรูพรุนของของแข็ง อัตราการถ่ายโอนขึ้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างระหว่างของแข็ง ความเป็นรูพรุน และความคดเคี้ยวของของแข็ง (Tortuosity of the solid)

3. ตัวทำละลายจะละลายตัวละลายที่อยู่ภายในช่องว่างของของแข็ง ขึ้นตอนนี้บางครั้งเรียกว่า Solubilization step หรือ Solubility step ความสามารถในการละลายขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของตัวละลายและตัวทำละลาย

4. สารละลายที่มีตัวละลายอยู่ก็จะแพร่ออกจากของแข็งมาสู่พื้นผิวของของแข็ง

5. สารละลายจะถ่ายโอนจากพื้นผิวของของแข็งออกมาสู่ชั้นฟิล์มของของไหล และ Bulk fluid ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามขั้นตอนแรกกับขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนที่ไม่มีความสำคัญ เนื่องจากว่าอัตราการไหลในการดำเนินการสูงพอ จึงสามารถพิจารณาได้ว่าความต้านทานของชั้นฟิล์มของของไหลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่นๆ

7. ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการสกัด

1. ขนาดอนุภาค (Particle size) ขนาดอนุภาคถ้ามีขนาดเล็กจะทำให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสารมีมากขึ้นและระยะทางของตัวถูกละลายที่อยู่ภายในของแข็งจะแพร่กระจายสู่ตัวทำละลายได้เร็วขึ้น ดังนั้นก่อนทำการสกัดควรนำพืชมาทำให้มีขนาดเล็กลงก่อน

2. ตัวทำละลาย (Solvent) ตัวทำละลายที่ดีควรมีความเป็นขั้ว (Polarity) ที่เหมาะสมกับตัวถูกละลายและมีความหนืด (Viscosity) ต่ำ เพื่อให้มีการไหลเวียนที่ดี โดยทั่วไปจะใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ซึ่งในการสกัดตัวทำละลายที่บริสุทธิ์ช่วงเริ่มต้นจะไม่มีตัวถูกละลายอยู่เลย เมื่อทำการสกัดความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลายและในอนุภาคของพืชที่ใช้ในการสกัดน้อยลง ทำให้ตัวถูกละลายสกัดได้น้อยลง

3. อุณหภูมิของตัวทำละลาย (Temperature of solvent) โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้นจะทำให้อัตราการสกัดสูงขึ้นด้วย เนื่องจากว่าอุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้น การแพร่ของตัวถูกละลายและตัวทำละลายสูงกว่าที่อุณหภูมิในการสกัดต่ำ อย่างไรก็ตามผลผลิตบางชนิดการใช้

อุณหภูมิสกัดที่สูง อาจทำให้สารที่ไม่ต้องการออกมาด้วยและอาจทำให้เกิดความเสื่อมสภาพทางเคมี และทางกายภาพของตัวผลิตภัณฑ์ได้ อีกทั้งทำให้สูญเสียตัวทำละลายมากเกินไป

4. เวลาในการสกัด (Extraction time) เวลาในการสกัดมีผลต่อการสกัดคือ ถ้าใช้เวลาในการสกัดน้อยเกินไปสารที่ต้องการสกัดก็ถูกสกัดออกมาได้น้อย ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการสกัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณสารสกัดที่ต้องการมากที่สุด

5. การกวน (Agitation) การกวนตัวทำละลายในการสกัดจะช่วยเพิ่มอัตราการสกัดเนื่องจากทำให้เกิดการแพร่ในสภาวะปั่นป่วน ทำให้อัตราการแพร่สูงขึ้นจึงทำให้การถ่ายโอนมวลสารจากผิวสัมผัสของอนุภาคไปยังตัวทำละลายเกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น

8. การถ่ายโอนมวลและการแพร่ (Mass transfer and diffusion)

การถ่ายโอนมวลเป็นการเคลื่อนย้ายของค์ประกอบภายในเฟสเดียวกันหรือจากเฟสหนึ่งเข้าสู่อีกเฟสหนึ่ง โดยที่เฟสทั้งสองจะเหมือนกันหรือแตกต่างกันก็ได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของศักย์เคมีหรือเกรเดียนต์ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่มีอยู่ในแต่ละเฟสหรือแต่ละบริเวณในเฟสนั้นๆ ทั้งนี้เพื่อปรับให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลนั่นเอง ความสำคัญของการถ่ายโอนมวลในอุตสาหกรรมเคมีมักมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการแยกสารเฉพาะเจาะจงออกจากสารผสม กระบวนการแยกได้แก่ การระเหย การตกผลึก การดูดซับ และการสกัด เป็นต้น กลไกการถ่ายโอนมวลแบ่งออกได้หลายแบบ เช่น การถ่ายโอนมวลแบบการแพร่หรือแพร่ซึม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนั้นกระบวนการแพร่จะเป็นการแพร่ที่สภาวะไม่คงตัว กล่าวคือ สมบัติของระบบที่จุดหนึ่งๆ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ผ่านไป (Time dependent process) ดังนั้นสภาวะไม่คงตัวของการถ่ายโอนมวลจะมีค่าเกรเดียนต์ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ฟลักซ์การถ่ายโอนมวลขึ้นกับเวลาที่ผ่านไปด้วย สมการดิฟเฟอเรนเชียลของการแพร่ที่สภาวะไม่คงตัวแบบง่ายซึ่งเป็นการแพร่ผ่านของแข็งแสดงดังสมการที่ 1

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (1)$$

สมการที่ 1 เป็นการแพร่มิติเดียวตามแนวแกนของวัตถุแผ่นแบน เรียกสมการนี้ว่า กฎข้อที่สองของฟิคสำหรับการแพร่ (Fick's second law of diffusion) พิจารณาโดย การละเทอมการไหลบัลค์ของของไหล และไม่มีปฏิกิริยาเคมี ซึ่งการแพร่แบบนี้มักพบได้ในการแพร่ผ่านของแข็ง สำหรับกฎข้อที่สองของฟิคของทรงกระบอกและทรงกลมในมิติเดียวที่มีการแพร่ในแนวรัศมีนั้นแสดงดังสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (จูไรวัลย์, 2546)

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{D_{AB}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{D_{AB}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) \quad (3)$$

9. การเตรียมของแข็งสำหรับการชะละลาย (Solid feed preparation)

สารเชิงชีวภาพมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์และส่วนที่ละลายได้มักจะพบภายในเซลล์ อัตราของการชะละลายอาจจะค่อนข้างช้า เพราะผนังเซลล์จะมีความต้านทานต่อการแพร่ อย่างไรก็ตามการบดสารเชิงชีวภาพให้มีขนาดเล็ก จะเพิ่มอัตราการถ่ายโอนการแพร่ของตัวละลายจากของแข็งสู่เฟสสกัด แต่หากใช้ขนาดเล็กเกินไป เฟสสกัดจะไม่สามารถไหลผ่านชั้นหรือเบคของของแข็งได้เท่าที่ต้องการ การเกาะติดของเฟสสกัดบนผิวของแข็งจะมากยิ่งขึ้น ความยากในการแยกเฟสของแข็ง-ของเหลว อาจเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้ขนาดอนุภาคที่เหมาะสม เป็นสิ่งที่ต้องการอย่างมาก หนึ่งในวิธีการชะละลายผลผลิตเชิงเกษตรกรรมจากใบ ต้น และราก การอบแห้งวัตถุดิบก่อนการสกัดจะช่วยทำให้ผนังเซลล์แตก ดังนั้นตัวทำละลายสามารถละลายตัวละลายได้โดยตรง ผนังเซลล์ของถั่วเหลืองและเมล็ดพืชหลายชนิดส่วนมากจะแตกเมื่อลดขนาดจนเหลือ 0.1-0.5 มิลลิเมตร การทำให้เซลล์มีขนาดเล็กลงและผนังเซลล์แตกออกทำให้ตัวทำละลายเข้าถึงน้ำมันพืชได้ง่าย

10. การระเหยตัวทำละลาย

การระเหยเป็นการลดปริมาณตัวทำละลาย โดยให้ความร้อนเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกจากสารละลาย และจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารละลายที่เข้มข้นขึ้น การระบวนการระเหยจะเหมาะกับสารละลายที่ประกอบด้วยตัวทำละลายที่ระเหยได้ง่ายกับตัวถูกละลายที่ไม่ระเหย โดยทั่วไปกระบวนการระเหยมักถูกนำไปใช้เพื่อให้ได้สารละลายที่เข้มข้นขึ้น (Thick liquor) และจะทิ้งไอของตัวทำละลายที่ระเหยออกมา เช่น การผลิตน้ำตาลไม่เข้มข้น การผลิตน้ำตาล เป็นต้น แต่ในบางอุตสาหกรรมจะให้การระเหยเพื่อต้องการไอของตัวทำละลายที่ระเหยออกมาก็ได้ ในทางความเป็นจริงนั้นจะพบว่า โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักใช้กระบวนการระเหยเพื่อระเหยน้ำออกจากสารละลาย การระเหยจะให้ความร้อนเปลี่ยนเฟสของเหลวไปเป็นเฟสไอ จึงเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายโอนมวลและความร้อนพร้อมกัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยเรียกว่า เครื่องระเหย (Evaporator)

11. ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหย

1. ความเข้มข้นของสารละลายถึงแม้ว่าสารละลายตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะเป็นสารละลายเจือจาง แต่เมื่อสารละลายเจือจางผ่านชุดเครื่องระเหย จะทำให้ความเข้มข้นสารละลายสูงขึ้น และมีสมบัติเปลี่ยนไป เช่น มีความหนาแน่นและความหนืดสูงขึ้น ถ้าความเข้มข้นของสารละลายสูงมาก อาจเกิดการตกผลึกได้ ก่อให้เกิดการอุดตันภายในระบบ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารละลายหนืดจะลดต่ำลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายเจือจาง ทำให้การถ่ายโอนความร้อนไม่ทั่วถึง ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการเลือกชนิดของเครื่องระเหยให้เหมาะสม เช่น เครื่องระเหยที่มีระบบช่วยหมุนวนหรือทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน

2. การเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอาหารและยาหรือสารชีวภาพ เช่น การผลิตน้ำส้ม น้ำผลไม้สกัด สารเคมีอินทรีย์ มีความไวต่ออุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสภาพของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ หากอุณหภูมิของระบบสูงเกินไปหรือช่วงเวลาที่ให้ความร้อนแก่สารนานเกินไป

3. อุณหภูมิและความดัน อุณหภูมิเดือดของสารละลายจะขึ้นกับความดันของระบบ โดยทั่วไปเมื่อความดันของระบบสูงขึ้น อุณหภูมิเดือดของสารละลายย่อมสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ความเข้มข้นที่สูงขึ้นมักส่งผลให้อุณหภูมิเดือดของสารละลายสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิเดือดของตัวทำละลายบริสุทธิ์ที่ความดันนั้นๆ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเดือดหรือการเกิดระดับของอุณหภูมิเดือด BPE (Boiling-point elevation) ดังนั้นหากสารละลายมีความเสื่อมสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงแล้ว ความดันในเครื่องระเหยควรจะควบคุมให้ต่ำกว่า 1 บรรยากาศหรือทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อควบคุมไม่ให้อุณหภูมิของระบบสูงเกินไป

4. ความสามารถในการละลาย (Solubility) โดยทั่วไปเมื่อสารละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายมักเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นหากอุณหภูมิของสารละลายที่ผ่านชุดเครื่องระเหยลดลงมายังอุณหภูมิห้องแล้ว อาจเกิดการตกผลึกของตัวถูกละลายได้

5. การเกิดฟอง สารละลายบางชนิดจะเกิดฟองมากเมื่อมีการเดือด ไอที่ได้จากการเดือดจะนำฟองบางส่วนออกไปจากระบบ ทำให้เกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการผลิต ตัวอย่างสารละลายเหล่านี้ เช่น สารละลายคอสติก (Caustic solution) น้ำมันพร้อมมันเนย เป็นต้น

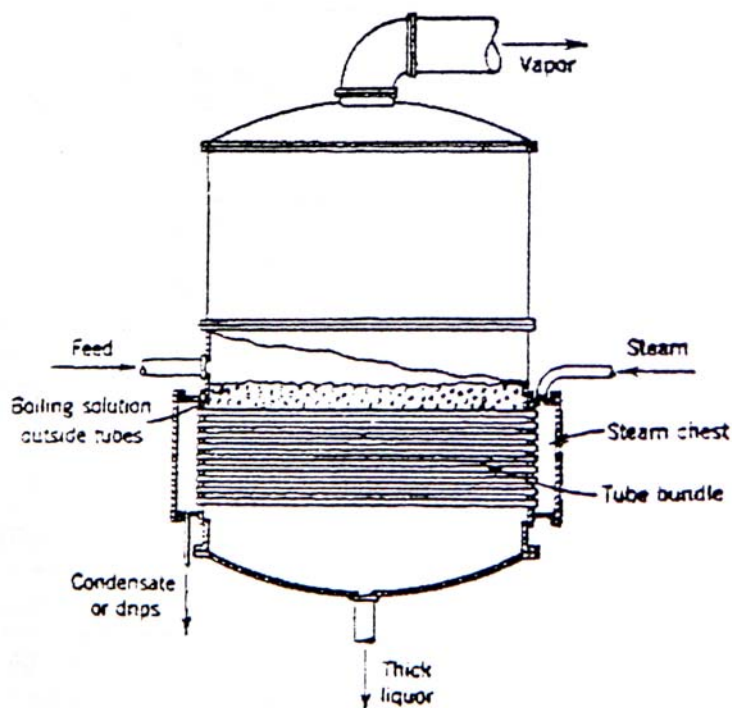
6. การเกิดตะกอนและชนิดวัสดุของเครื่องระเหย สารละลายบางชนิดเมื่อได้รับความร้อนอาจทำให้เกิดตะกอนซึ่งจะเกาะบริเวณพื้นผิวของแหล่งที่ให้ความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนลดลง และเกิดการฟุกร้อนของวัสดุของเครื่องระเหยเร็วขึ้นกว่าที่ควรจะเป็น

นอกจากนี้ตะกรันเหล่านี้อาจส่งผลทำให้ความสามารถการละลายของตัวถูกละลายลดลงได้ รวมทั้งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน ดังนั้นควรเลือกใช้ชนิดวัสดุที่เหมาะสม

12. ชนิดของเครื่องระเหย

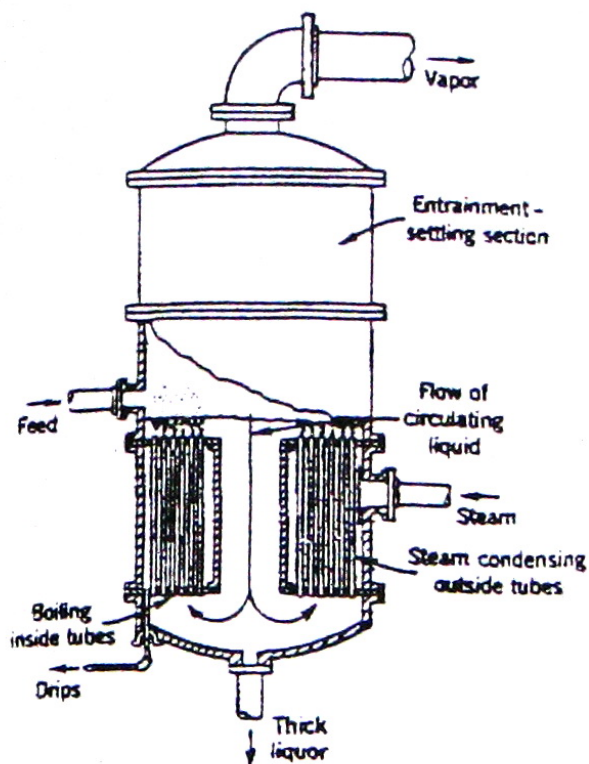
เครื่องระเหยจำแนกได้หลายประเภทขึ้นกับเกณฑ์ที่ใช้พิจารณา เช่น ลักษณะการถ่ายโอนความร้อน รูปแบบการไหลของสารละลาย เป็นต้น

1. ภาพประกอบที่ 7 แสดงเครื่องระเหยชนิดท่อแนวนอนแบบหมุนเวียนธรรมชาติ (Horizontal-tube Natural Circulation Evaporator) ภายในเครื่องระเหยจะประกอบด้วยกลุ่มท่อความร้อนเรียงกันในแนวนอนที่บริเวณค่อนมาด้านล่าง ไอน้ำร้อนจะไหลเข้าสู่ท่อความร้อนเหล่านี้ที่ทางเข้าและจะกลายเป็นคอนเดนเสทที่ทางออก สำหรับสารละลายจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องระเหย โดยสารละลายจะอยู่ด้านนอกท่อและปกคลุมกลุ่มท่อความร้อนทั้งหมด ซึ่งสารละลายจะรับความร้อนจากกลุ่มท่อความร้อนจนกระทั่งเดือด ทำให้ตัวทำละลายระเหยเป็นไอออกไป การหมุนเวียนภายในเป็นโดยธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลมาจากการเดือดของสารละลาย เครื่องระเหยชนิดนี้ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความหนืดสูง ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งท่อในแนวนอนจะขวางการหมุนเวียนของสารละลาย ส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนอาจไม่ทั่วถึงทั้งระบบ จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนต่ำ หากสารละลายเดือดมีฟองเกิดขึ้นมากแล้ว ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ป้องกันการสูญเสียฟอง เพราะไอร้อนที่เหยขึ้นอาจจะดึงฟองออกไปจากเครื่อง เครื่องระเหยชนิดนี้นิยมใช้กับสารละลายที่มีความหนืดต่ำ และไม่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นสูง รวมทั้งเป็นสารละลายที่ไม่ก่อให้เกิดการเกาะตัวของตะกรันผิวท่อความร้อนได้ง่าย



ภาพประกอบที่ 7 ลักษณะเครื่องระเหยท่อแนวนอนแบบหมุนเวียนธรรมชาติ

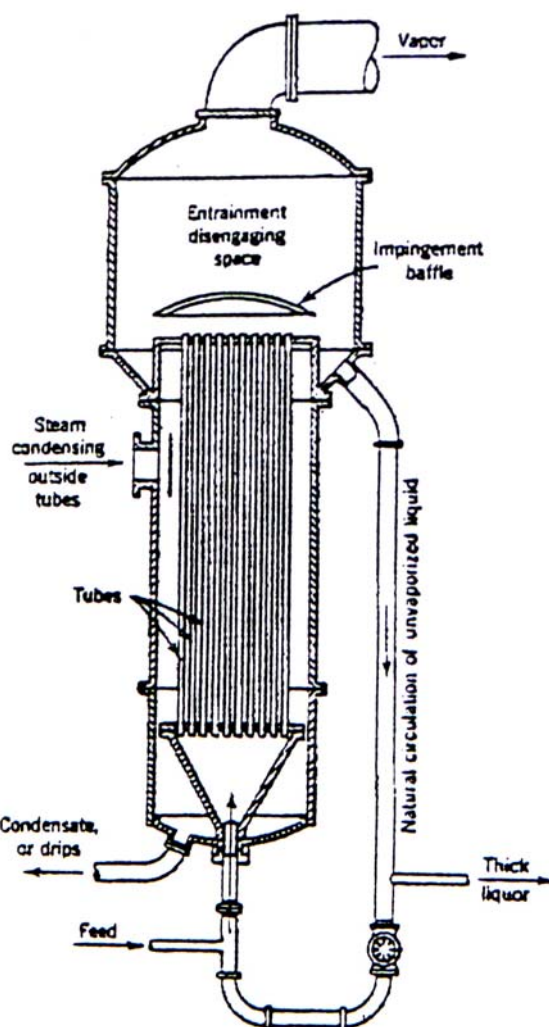
2. ภาพประกอบที่ 8 แสดงเครื่องระเหยชนิดท่อแนวตั้งแบบหมุนเวียนธรรมชาติ (Vertical-type Natural Circulation Evaporator) เครื่องระเหยชนิดท่อแนวตั้ง ภายในเครื่องระเหยจะประกอบด้วยกลุ่มท่อเรียงกันในแนวตั้ง โดยรับความร้อนจากไอน้ำที่จะควบแน่นภายนอกท่อ การที่สารละลายเดือดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นนั้น จะส่งผลให้สารละลายเกิดการไหลเวียนได้เอง โดยของเหลวจะไหลผ่านตามท่อในแนวตั้ง และเมื่อออกจากท่อแล้ว สารละลายจะไหลตกลงมายังตรงกลางผ่านคาน้ำคัมเมอร์ และไหลออกทางด้านล่างของเครื่องระเหย ในขณะที่ส่วนที่เป็นไอจะเคลื่อนที่ออกไปทางด้านบน ซึ่งจะไหลผ่านอุปกรณ์ป้องกันการเกิดเอนทรอปเมนต์ เครื่องระเหยประเภทนี้จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมสูง กว่าประเภทท่อในแนวนอน ทั้งนี้เพราะสารละลายมีการหมุนเวียนดีกว่า อย่างไรก็ตามเครื่องระเหยประเภทนี้ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความหนืดสูงเช่นกัน



ภาพประกอบที่ 8 ลักษณะเครื่องระเหยชนิดท่อแนวตั้งแบบหมุนเวียนธรรมชาติ

3. เครื่องระเหยชนิดท่อแนวยาวแนวตั้ง (Long-Tube Vertical-Type Evaporator) หากเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของไอน้ำและสารละลายแล้ว จะพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของไอน้ำจะมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของสารละลาย ดังนั้นหากต้องการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของของเหลวให้สูงขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของสารละลาย สำหรับเครื่องระเหยชนิดท่อยาวนี้ จะมีความยาวของท่ออยู่ในช่วง 3-10 เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 นิ้ว ซึ่งเมื่อสารละลายเดือดจะเกิดไอลอยขึ้น ทำให้ความเร็วของสารละลายเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ภาพประกอบที่ 9 แสดงเครื่องระเหยชนิดท่อยาวในแนวตั้ง ซึ่งภายในประกอบด้วยท่อยาวจัดเรียงในแนวตั้ง ไอน้ำร้อนจะไหลอยู่ภายนอก ในขณะที่สารละลายจะไหลเข้าสู่ภายในท่อยาวนี้ เมื่อสารละลายในท่อได้รับความร้อนจะเดือด ดังนั้นสารละลายและไอน้ำจะเคลื่อนที่ถึงด้านบนสุด แล้วจึงเข้าสู่เครื่องแยกเฟสไอและของเหลวออก ซึ่งสารละลายที่เข้มข้นขึ้นจะไหลออกตามท่อทางออกและถูกดึงออกทางด้านล่างของเครื่อง เครื่องระเหยชนิดนี้มีการทำงานแบบครั้งเดียวผ่าน และทำให้สะดวกในการออกแบบการระเหยแบบหลายขั้นตอน รวมทั้งสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของเครื่องระเหยชนิดนี้สูง โดย

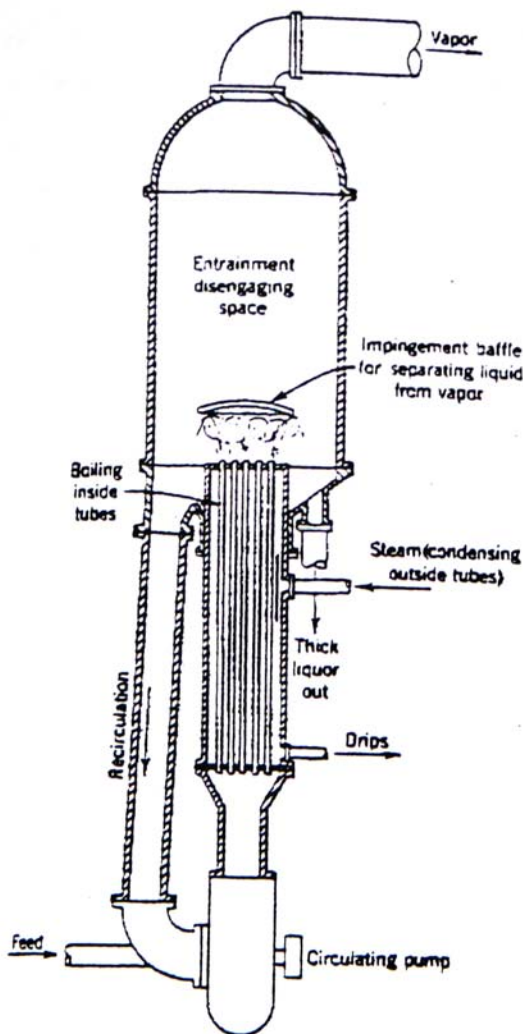
ที่ไม่ต้องใช้ปั๊มดังเช่นแบบบังคับหมุนเวียน เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องระเหยทั้งสองชนิดที่ได้กล่าวในข้างต้นนั้น เครื่องระเหยชนิดท่อยาวในแนวตั้งนี้จะเป็นระบบที่สารละลายมีการไหลเวียนด้วยตัวเอง โดยอาศัยการเดือดทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่น เช่นเดียวกับเครื่องระเหยทั้งสองชนิดที่ได้กล่าวข้างต้น แต่เครื่องระเหยประเภทนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูงกว่าสองชนิดแรก เครื่องระเหยประเภทนี้จะพบในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น นม เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 9 ลักษณะเครื่องระเหยชนิดท่อยาวแนวตั้ง

4. เครื่องระเหยแบบบังคับหมุนเวียน (Forced Circulation Evaporator) การเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของสารละลายทำได้โดยการเพิ่มความเร็ว แต่สำหรับสารละลายที่มีความหนืดสูงแล้ว การหมุนเวียนตามธรรมชาติอาจไม่เหมาะสม ดังนั้นเครื่องระเหยแบบบังคับหมุนเวียน ภาพประกอบที่ 10 จะมีการติดตั้งปั๊มหรือเครื่องสูบเพื่อช่วยให้ของเหลวมีการหมุนเวียนได้ดีขึ้น

ส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนเป็นไปอย่างทั่วถึงและทำได้ดีขึ้น เครื่องระเหยประเภทนี้ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูง และมีความยาวท่อน้อยกว่าชนิดท่อแนวดิ่ง (Long tube vertical-type evaporator) เพราะระบบมีการติดตั้งปั๊มแล้ว จึงไม่มีความจำเป็นต้องเพิ่มความยาวของท่อ



ภาพประกอบที่ 10 ลักษณะเครื่องระเหยแบบบังคับหมุนเวียน

5. เครื่องระเหยแบบสร้างฟิล์ม (Falling Film Evaporator) เครื่องระเหยประเภทนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความไวต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง เพราะเวลาที่สัมผัสกับความร้อนเป็นช่วงสั้นๆ เท่านั้น สารละลายจะถูกป้อนเข้าด้านบนของท่อแนวดิ่ง หลังจากนั้นจะถูกปล่อยให้ไหลลงเป็นฟิล์มบางๆ รอบผนังท่อ และจะไหลออกทางด้านล่าง ในขณะที่ไอร่ะเหยจากสารละลายจะออกทางด้านล่างด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งที่ทางออกจะติดตั้งอุปกรณ์ที่จะแยกสารผสมระหว่างสารละลายเข้มข้น

และไอร่หะเหยออกจกกันด้วย เครื่องระเหยประเภทนี้จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูง นอกจากนี้เครื่องระเหยจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสร้างฟิล์มของเหลวให้มีความสม่ำเสมอด้วย เครื่องระเหยประเภทนี้มักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น น้ำผลไม้เข้มข้น หรือใช้กับสารละลายที่มีความหนืดสูงได้

13. การเลือกตัวทำละลาย (Solvent selection)

ตัวทำละลายที่ดีควรมีความมีขั้ว (Polarity) ที่เหมาะสมกับตัวละลายเนื่องจากตัวละลายจะละลายได้ดีในสารละลายที่มีความมีขั้วที่เหมือนหรือใกล้เคียงกัน และตัวทำละลายควรมีความหนืด (Viscosity) ต่ำ เพื่อให้มีการไหลเวียนของสารละลายที่ดี คุณสมบัติของตัวทำละลายเหล่านี้ มีผลต่อความเหมาะสมและความสามารถในการเลือกจับตัวละลายหรือสภาพการเลือก (Selectivity) เพื่อให้การสกัดตัวละลายที่ต้องการให้ได้ปริมาณ และคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ปริมาณและอัตราของตัวทำละลายต่อตัวละลายที่ต้องการ รวมทั้งสิ่งเจือปนอื่นๆ ในของแข็งมีอิทธิพลอย่างมากต่อขนาดและชนิดของเครื่องสกัด ค่าดำเนินการรวม และต้นทุนในการแยก เช่น เครื่องมือที่ใช้แยกตัวละลายออกจากตัวทำละลาย และนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ และคุณภาพของตัวทำละลายที่ได้ ตัวทำละลายที่ใช้ควรมีความเหมาะสมในการชะละลายหรือสภาพการเลือกสูง มีความสามารถละลายสารที่ต้องการสกัด ปลอดภัย ไม่เป็นพิษ และไม่เป็นอันตราย ราคาไม่แพงจนเกินไปและควรเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตขึ้นได้ภายในประเทศ และใช้ประโยชน์ได้ทันที

14. อุณหภูมิในการชะละลาย (Temperature of leaching)

โดยทั่วไปกระบวนการสกัด จะกระทำที่อุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ทำให้การละลายของตัวทำละลายเกิดขึ้นได้ดีกว่า (Treybal, 1980) จึงทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนที่สกัดได้สูงขึ้น อัตราการชะละลายจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนืดของของเหลวลดลง และการแพร่ของตัวละลายและตัวทำละลายสูงกว่าค่าที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิสูงในการผลิตผลิตภัณฑ์ธรรมชาติบางชนิด เช่น กาแฟ และชูการ์บีท จะทำให้วัสดุที่ไม่ต้องการออกมาระหว่างการสกัดมากเกินไป และเกิดการเสื่อมเสียทางเคมีของผลิตภัณฑ์ อนึ่ง การดำเนินการที่อุณหภูมิสูง อาจไม่สามารถทำได้เนื่องจากมีการสูญเสียตัวทำละลายมากเกินไป และด้วยเหตุผลทางด้านความปลอดภัย ดังนั้นจึงต้องอาศัยการพิจารณาความเหมาะสมในหลายๆ ประการในการเลือกอุณหภูมิที่จะใช้

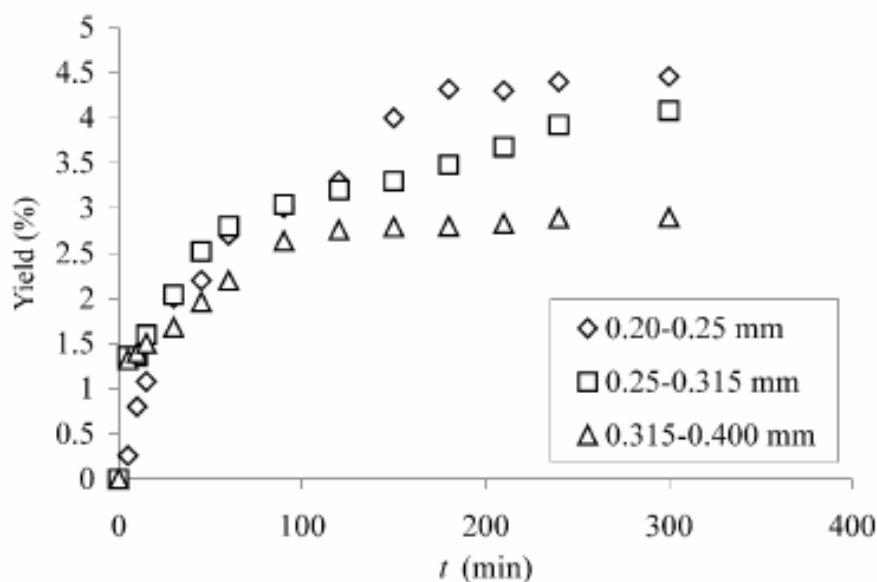
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kim *et al.* (2003) ได้ทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด Soybean oligosaccharide (SOS) จาก Defatted soybean meal (DSM) โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนระหว่าง DMS ต่อ น้ำ (1:5, 1:7.5 และ 1:10 w/v) เวลาในการสกัด (1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง) ขนาดอนุภาคที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบด และอุณหภูมิในการสกัด (25, 50, 65 และ 80 °C) นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการกวนต่อการสกัดโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C ผลจากการทดลองพบว่า อัตราส่วนระหว่างน้ำกลั่นต่อ DSM ที่เหมาะสมคือ 5:1 อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 50 °C การกวนและการใช้ DSM ที่ไม่ผ่านการบดทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดดีขึ้น และการใช้ เอทานอล 10% จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าใช้เฉพาะน้ำกลั่นอย่างเดียว

Ekvall *et al.* (2006) ได้ทำการทดลองเพื่อหา Raffinose family oligosaccharides (RFOs) ใน Leguminous vine peas โดยใช้สารละลายเอทานอลเป็นตัวทำละลาย ความเข้มข้นของเอทานอลที่ใช้คือ 50% และ 80% V/V อุณหภูมิในการสกัดคือ อุณหภูมิห้อง (21 °C) กับอุณหภูมิจุดเดือด (83 °C) เวลาในการสกัดเป็น 15, 30 และ 60 นาที ศึกษาผลของความเข้มข้นของเอทานอลต่อประสิทธิภาพในการสกัดโดยควบคุมอุณหภูมิในการสกัดเป็น 21 °C เวลาในการสกัดเป็น 30 นาที ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการสกัดโดยควบคุมความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 50 % V/V เวลาในการสกัดเป็น 30 นาที และศึกษาผลของเวลาในการสกัดต่อประสิทธิภาพในการสกัดโดยควบคุมความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 50 % V/V อุณหภูมิในการสกัด 21 °C โดยจากผลการทดลองพบว่า ผลได้ของ Oligosaccharides มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 2 เท่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอล 50% เปรียบเทียบกับเอทานอล 80% ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Oligosaccharides ทั้งสามชนิดคือ Raffinose, Stachyose และ Verbascose ยกเว้น Verbascose ที่ผลได้จะใกล้เคียงกันที่ การสกัดด้วยเอทานอล 50% และเอทานอล 80% และอุณหภูมิในการสกัดมีผลต่อผลได้ของ RFOs น้อยมาก เมื่อสกัดด้วยเอทานอล 50% การเพิ่มอุณหภูมิจึงจะเร่งการสกัด RFOs แต่การดำเนินการที่จุดเดือดอาจส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของเอทานอลได้และยากต่อการควบคุมการก่อให้เกิดโปรตีน และผลของเวลาในการสกัดพบว่า เมื่อใช้เวลาในการสกัด 15 นาที ให้ผลได้ต่ำกว่าที่ 30 และ 60 นาที (ที่ 30 และ 60 นาที ให้ผลได้ใกล้เคียงกัน) นั่นคือ สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือที่อุณหภูมิห้อง (21 °C) เวลาในการสกัด 30 นาที โดยความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 50% และการเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลเป็น 80% ทำให้ผลได้ลดลง

Herodez *et al.* (2003) ทำการสกัดสาร Antioxidants จาก Balm leaves โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย พบว่า การลดขนาดอนุภาค การเพิ่มอุณหภูมิจาก 0-20 °C และการเพิ่มปริมาณตัวทำละลาย ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอน

เริ่มต้นของการสกัดและจะลดลงหลังจากนั้น โดยกระบวนการที่เกิดอย่างรวดเร็ว นั้นเกิดจากการที่ตัวทำละลายละลายตัวถูกละลายที่อยู่บริเวณผิวนอกของอนุภาค และในขั้นตอนที่เกิดช้าขึ้นจะสอดคล้องกับการสกัดตัวละลายที่อยู่ภายในอนุภาค จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ผลได้ในช่วงต้นของการสกัดไม่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค แต่ผลได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดอนุภาคลง และในช่วงท้ายของการสกัด การแพร่ของตัวทำละลายเข้าไปภายในอนุภาคกับการแพร่ออกมาของตัวทำละลาย-ตัวถูกละลายจากอนุภาคเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการสกัดของกระบวนการดังแสดงในภาพประกอบที่ 11 โดยสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.2-0.25 มิลลิเมตร ตัวทำละลาย 4 dm³/kg Balm leaves และอุณหภูมิ 20 °C



ภาพประกอบที่ 11 กลไกการสกัด Balm leaves ด้วยเอทานอลที่ 20 °C และอัตราส่วนของตัวทำละลายเป็น

4 dm³/kg raw material: ผลของขนาดอนุภาค

ที่มา: Herodez *et al.*, 2003

ยรรยง สุขคล้าย (2547) ทำการทดลองการสกัดสารสำคัญจาก *Andrographis paniculata* หรือฟ้าทะลายโจร โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ 95% เป็นตัวทำละลายในถังกวน ซึ่งมีใบพัดกวนแบบพีชต์เบลคเทอร์ไบน์ ที่เข้าด้านข้างถัง และได้ทดสอบหามุมเพลลาของใบกวนที่เอียงจากจุดศูนย์กลางถึงที่สามารถให้การกระจายของอนุภาคของแข็งในของเหลวอย่างสม่ำเสมอ การทดสอบทำโดยใช้เม็ดพลาสติกในน้ำ ผลการทดสอบแสดงว่ามุมที่เหมาะสมที่สุด คือ 15 องศา ค่ามุมนี้ถูกใช้ในการสกัดที่มีอัตราส่วนของวัตถุดิบซึ่งเป็นส่วนของลำต้น และก้านของฟ้าทะลายโจรที่

บดแห้ง ต่อตัวทำละลายเป็นอัตราส่วน 1:10 และมีความเร็วของใบกวนเท่ากับ 560, 840 และ 1,120 รอบต่อวินาที ผลการทดลองแสดงว่า การกระจายตัวของอนุภาควัตถุบดสม่ำเสมอทุกการทดลอง และอัตราเร็วของการสกัดใกล้เคียงกันทุกความเร็วของใบกวน การสกัดถือว่าสมบูรณ์เมื่อใช้เวลาปฏิบัติการประมาณ 4 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณสารสำคัญในวัตถุบดที่ถูกสกัดได้ประมาณ 80 %

Wongkittipong *et al.* (2004) ทดลองสกัดแอนโดรกราโฟไลด์ในถังกวนขนาด 1 ลิตร โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 60 ถึง 80% พบว่า ความเข้มข้นของเอทิลแอลกอฮอล์ไม่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการสกัดและขนาดอนุภาคของวัตถุบดในช่วง 0.1 ถึง 0.8 มิลลิเมตร ไม่มีผลต่อความเร็วในการสกัดหรือปริมาณแอนโดรกราโฟไลด์ที่ถูกสกัดได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการสกัดจาก 40 เป็น 60 °C แอนโดรกราโฟไลด์ที่ถูกสกัดได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น

นิรัญญา บุญรัตน์ (2550) ได้ทำการศึกษาการคัดเลือกโปรไบโอติกส์จากสัตว์ทะเล และการใช้สารสกัดจากพืชหัวเป็นพรีไบโอติกส์พบว่า สารสกัดจากมันเทศสีขาวเปลือกแดง บีทรูท มันฝรั่ง และมันเทศสีม่วงเปลือกเหลือง มีองค์ประกอบของสารสกัดที่ไม่ถูกย่อยเป็น 75.37, 84.25, 74.29 และ 88.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสารสกัดดังกล่าวสามารถส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียโปรไบโอติกส์ *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium bifidum* และ *Enterococcus faecium* โดยสามารถส่งเสริมการเจริญของ *L. plantarum* ได้ดีที่สุด

Siddeshwar *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการคัดเลือกและการหาปริมาณ โอลิโกแซคคาไรด์ในผลไม้ ผัก และรากพืช โดยการสกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 98 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า แครอท กระเจี๊ยบ หัวหอม กระเทียม บีทรูท มันแกว ฝรั่ง แอปเปิ้ล มะเขือเทศ และกล้วย เป็นแหล่งพรีไบโอติกส์ที่ดีในการนำมาสกัดในเชิงการค้า และพบว่าการอบแห้งไม่มีผลต่อกระบวนการ Enzymatic hydrolysis ของโอลิโกแซคคาไรด์แต่ละชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสด

Xiaoli *et al.* (2008) ทดลองหาความเข้มข้นของโอลิโกแซคคาไรด์ในเมล็ดของ Chickpea จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลของชนิดตัวทำละลาย (เอทานอล 0, 30, 50, 70 และ 80 % v/v) อุณหภูมิ (อุณหภูมิห้อง, 50 °C, 70 °C และอุณหภูมิจุดเดือด) เวลา (15, 30 และ 60 นาที) และอัตราส่วนระหว่าง Defatted chickpea meal (DCM) กับตัวทำละลาย (1:5, 1:10, 1:15 และ 1:20 w/v) ต่อประสิทธิภาพในการสกัด พบว่า การใช้เอทานอล 50% เป็นตัวทำละลาย นำและเอทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำกว่านี้ จะสกัดน้ำตาลโมเลกุลที่มีขนาดเล็กได้ดี ส่วนที่ความเข้มข้นของเอทานอลมากกว่า 50% ผลได้ของการสกัดลดลงเนื่องจากการสกัดที่ไม่สมบูรณ์และ โปรตีนที่มีอยู่อาจเกิดการ denatured ได้ที่ความเข้มข้นของเอทานอลสูงๆ ซึ่งโปรตีนดังกล่าวอาจขัดขวางการแพร่ออกมาของ

α -GOS เข้ามาในสารละลาย ส่วนผลของอุณหภูมิต่อการสกัดพบว่า ความสามารถในการสกัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 50 °C และจะลดลงทันทีเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 50 °C ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเกิด Heat-denaturation ของโปรตีนที่ละลายได้ของ Chickpea เมื่อพิจารณาเวลาในการสกัดพบว่า เมื่อใช้เวลาในการสกัด 15 นาที ให้ปริมาณน้ำตาลต่ำกว่าเมื่อใช้เวลาในการสกัด 30 หรือ 60 นาที (เวลาในการสกัด 30 และ 60 นาทีให้ค่าที่ไม่แตกต่างกัน) และการเพิ่มปริมาณของตัวทำละลายทำให้ได้รับโพลิโกแซกคาไรด์มากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนระหว่าง DCM กับตัวทำละลายมากกว่า 1:10 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ตัวทำละลายเอทานอล 50% อัตราส่วนระหว่าง DCM กับตัวทำละลาย 1:10 อุณหภูมิการสกัด 50 °C และเวลาในการสกัด 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม โดยจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดด้วย HPLC พบว่าสายพันธ์ 171 ให้ค่า α -GOS สูงที่สุด (8.68%) และน้ำตาลซูโคสที่ต่ำ (2.36%) ซึ่งสามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์โดยปราศจากน้ำตาลซูโคสเพื่อใช้เป็นอาหารส่งเสริมสุขภาพต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อออกแบบและจัดสร้างระบบสกัดสารฟรีไบโอติกส์แบบแบทช์
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากพืชเกษตรด้วยเครื่องสกัดแบบแบทช์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากพืชเกษตร
2. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องสกัดสารฟรีไบโอติกส์
3. ส่งเสริมให้มีการนำฟรีไบโอติกส์จากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์มากขึ้น

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. ตัวอย่างพืชที่นำมาใช้ในการสกัด

1. เปลือกกลูกตาลส่วนที่หุ้มวุ้น ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์แปรรูปผลผลิตจากตาลโตนคร หมู่ 3 ต. คลองรี อ. สทิงพระ จ. สงขลา 90190
2. เมล็ดขนุนพันธุ์ทองประเสริฐ จากร้านสรรพสินค้าคาร์ฟูร์และโลตัส อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำกลั่น
2. 95%Ethanol (Commercial grade)
3. Phenol (Laboratory grade)
4. 98% Conc. Sulfuric acid (Laboratory grade)
5. Dinitrosalicylic acid (Laboratory grade)
6. Sodium sulfite (Laboratory grade)
7. Sodium hydroxide (Laboratory grade)
8. Potassium sodium tartrate (Laboratory grade)

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

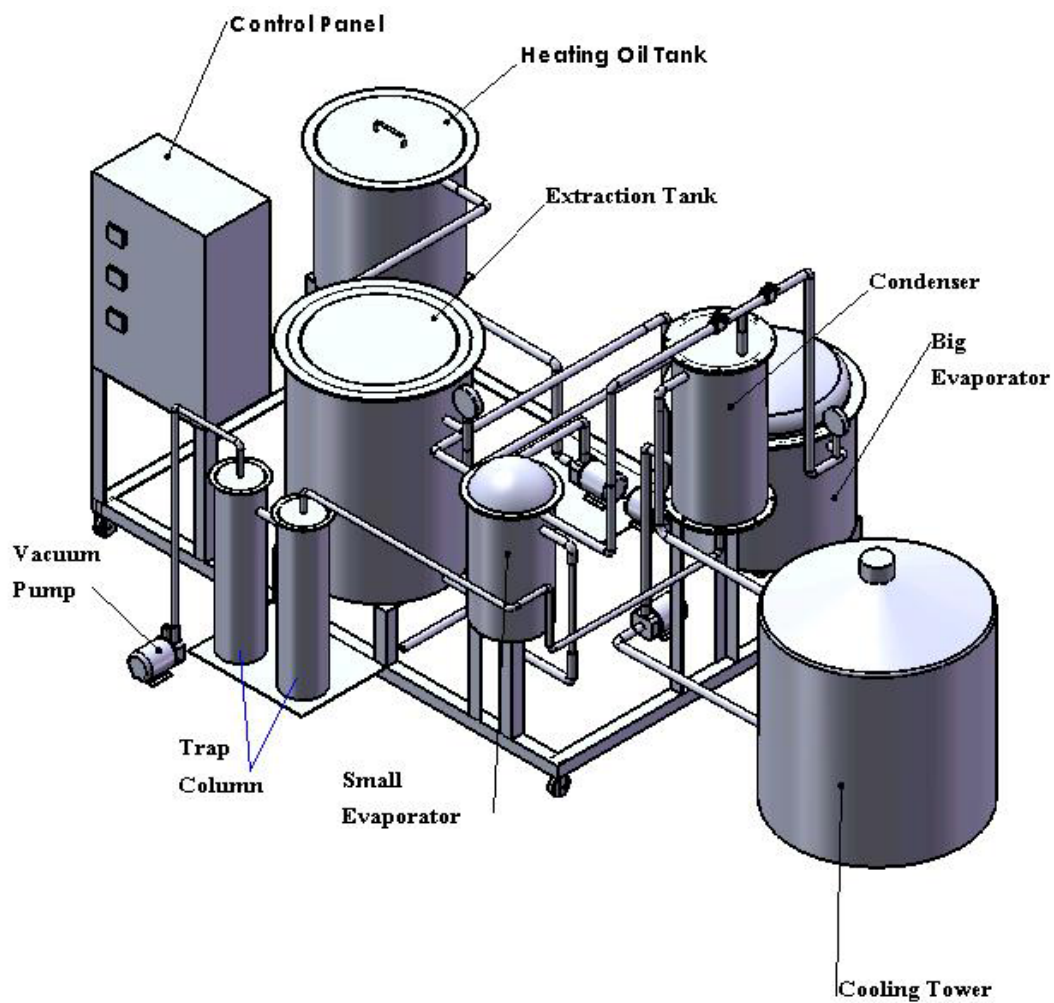
1. ตู้อบความร้อน (Mettler: UNB 400)
2. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Mettler: SV 1422)
3. Microplate 96 หลุม
4. Microplate reader (Biotek: Power Wave XS.)
5. Rotary vacuum evaporator (Buchi: Vacuum pump V-700)
6. หลอดทดลอง
7. เครื่อง UV-visible spectrophotometer (Hewlett Packard 8453)
8. ไมโครปิเปต (ขนาด 20-200 ไมโครลิตร)

9. ไมโครปิเปต (ขนาด 1000 ไมโครลิตร)
10. Multichannels pipet (ขนาด 20-200 ไมโครลิตร)
11. เครื่องกรองสุญญากาศ (SIBATA: Circulating Aspirator WJ-20)
12. เครื่องเหวี่ยงแยก
13. เครื่องทำแห้งเยือกแข็ง (Flexi-Dry μ P)
14. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน
15. Refractometer

4. วิธีการทดลอง

4.1 ชุดสกัดแบบเบทซ์ขนาดโรงงานจำลอง

ชุดสกัดแบบเบทซ์ต้นแบบโรงงานประกอบด้วยถังสกัด (Extraction tank) ภายในถังสกัดจะมีขดลวดทองแดงไว้ให้น้ำร้อนไหลผ่านเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการสกัด สารละลายที่ได้จากการสกัดถูกนำมาระเหยด้วยถังระเหยขนาดใหญ่ (Big Evaporator) และถังระเหยขนาดเล็ก (Small evaporator) ซึ่งถูกทำให้เป็นแบบสุญญากาศเพื่อลดอุณหภูมิในการระเหย โดยถังระเหยขนาดใหญ่จะต้องมีสารละลายอย่างน้อย 14 ลิตร เพื่อให้สารละลายท่วม Heater หากไม่มีสารละลายท่วม Heater จะทำให้ Heater ไหมได้ ไอของตัวทำละลายที่ระเหยจะไปยังถังควบแน่น (Condenser) โดยน้ำหล่อเย็นที่ผ่านถังควบแน่นต่อกับ cooling tower ซึ่งมีพัดลมระบายความร้อนอยู่ด้านบน เพื่อระบายความร้อนน้ำหล่อเย็น ไอของตัวทำละลายที่ควบแน่นถูกเก็บไว้ที่ Trap column ซึ่งรูปชุดสกัดแบบเบทซ์แบบ 3 มิติ และ ชุดสกัดแบบเบทซ์ขนาดโรงงานจำลอง แสดงดังภาพประกอบที่ 12 และ 13 ตามลำดับและรายละเอียดในการออกแบบแสดงในภาคผนวก ก.



ภาพประกอบที่ 12 ภาพวาด 3 มิติของชุดสกัดแบบเบทซ์



ภาพประกอบที่ 13 ชุดสกัดแบบเบทซ์ขนาดโรงงานจำลอง

4.2 การสกัดเปลือกลูกตาลและเมล็ดขมิ้น

4.2.1 การเตรียมเปลือกลูกตาล

นำเปลือกลูกตาลส่วนที่หุ้มเนื้อมาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 40-45 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เนื่องจากเปลือกลูกตาลมีปริมาณมาก จึงต้องการทำการอบเพื่อไม่ให้เกิดเน่าเสีย ซึ่งเปลือกลูกตาลมีความชื้นเริ่มต้น 98% และเปลือกลูกตาลที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีความชื้น 2-4 %

4.2.2 การสกัดเปลือกลูกตาลด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก

1. นำเปลือกลูกตาลที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาทำให้มีขนาด 2-10 mm. ซึ่งเปลือกลูกตาลมา 20 กรัม ทำการสกัดโดยแช่ในตัวทำละลายในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ที่ใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

2. ทำการสกัดที่สภาวะต่างๆ กัน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ (30, 50 และ 60 °C) เวลาในการสกัด (30, 60 และ 120 นาที) อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย (1:8, 1:10 และ 1:15 w/v) และชนิดของตัวทำละลาย (น้ำกลั่นและเอทานอล 95%)
3. นำสารละลายที่ได้จากการสกัดมากรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกเปลือกลูกตาลออก จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อแยกกากที่ละเอียดออกอีกครั้งหนึ่ง
4. นำสารละลายใสที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่อง Rotary vacuum evaporator จากนั้นนำไปทำเป็นผงแห้งด้วยเครื่อง Freeze dryer
5. คำนวณผลได้ของสารสกัด (Total extracted yield, %) โดยคิดจากน้ำหนักสารที่สกัดได้หลังจากการทำแห้งต่อน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของเปลือกลูกตาล
6. นำสารสกัดที่ผ่านการทำแห้งแล้วมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวิซ์และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์

4.2.3 การสกัดเมล็ดขุ่นด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก

เตรียมตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด ได้แก่ น้ำกลั่น เอทานอล 50% และเอทานอล 95% จากนั้นนำเมล็ดขุ่นมาล้างทำความสะอาดแล้วทำให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดและแยกขนาดด้วยเครื่องแยกขนาดที่ขนาดต่างๆ กัน ซึ่งเมล็ดขุ่นที่ผ่านการแยกขนาดต่างๆ กัน 100 กรัม มาสกัด โดยตัวทำละลายแต่ละความเข้มข้นจะทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของเมล็ดขุ่น (1.0-2.0, 2.0-2.8 และ 2.8-5.6 mm.) อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลาย (1:2, 1:4, 1:6 และ 1:8 w/v) โดยแต่ละสภาวะใช้เวลาในการสกัด 1 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) และมีการควบคุมอัตราการกวนที่ 200 รอบต่อนาที หลังจากทำการสกัดเรียบร้อยแล้ว นำสารละลายที่ได้มากรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกกาก จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการสกัดกรองด้วยกระดาษกรอง (whatman, No. 1) อีกครั้งเพื่อแยกกากที่มีขนาดเล็ก และนำสารละลายใสที่ได้ไปหาผลได้ของสารสกัด (%yield) จากนั้นเลือกสภาวะเบื้องต้นจากการทดลองด้วยชุดทดลองขนาดเล็กเพื่อนำไปศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบทซ์ต่อไป

4.2.4 การสกัดเมล็ดขุ่นด้วยเครื่องสกัดแบบเบทซ์ขนาดโรงงานจำลอง

ในการทดลองด้วยชุดสกัดแบบเบทซ์ได้มีการศึกษาถึงจุดเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสกัด รวมไปถึงการปรับปรุงระบบการไหลเวียนของสารละลายภายในถังสกัดเนื่องจากในตอนเริ่มต้นการไหลเวียนของสารละลายเป็นแบบไหลสั้นทำให้ต้องใช้วัตถุดิบทั้งในส่วนของเมล็ดขุ่นและตัวทำละลายในปริมาณที่มาก ดังนั้นจึงได้มีการปรับเปลี่ยนระบบการ

ไหลเวียนของสารละลายให้เกิดขึ้นเฉพาะภายในถังสกัดเพียงอย่างเดียว และการเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสกันระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลายโดยการใช้แผ่นตะแกรงแบ่งเมล็ดขุ่นออกเป็นชั้นๆ ก่อนจะบรรจุในถังตะแกรง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. นำเมล็ดขุ่นมาล้างทำความสะอาดแล้วทำให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดและแยกขนาดให้ได้ขนาดอยู่ในช่วง 1.0-2.0 mm. โดยเมล็ดขุ่นในช่วงขนาดอนุภาค 1.0-2.0 mm. มีความหนาแน่น 1.088 g/cm^3
2. เตรียมสารละลายเอทานอล 50% ใส่ในถังสกัดในอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลายเป็น 1:8
3. นำเมล็ดขุ่นขนาด 1.0-2.0 mm. บรรจุในถังตะแกรงโดยมีแผ่นตะแกรงแบ่งเมล็ดขุ่นออกเป็นชั้นๆ นำไปแช่ในถังสกัด 12 ชั่วโมง ก่อนเริ่มทำการสกัด
4. ทำการสกัดที่อุณหภูมิห้อง (30°C) และ 60°C โดยที่อุณหภูมิ 60°C ได้ตั้งค่าอุณหภูมิของถังให้ความร้อนไว้ที่ 60°C หลังจากอุณหภูมิในถังสกัดเป็น 60°C ให้ลดอุณหภูมิของถังให้ความร้อนลงมาประมาณ 57°C และทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360 และ 480 นาที โดยเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ประมาณ 220 มิลลิลิตร
5. นำสารสกัดที่ได้ที่เวลาในการสกัดต่างๆ มากรองด้วยกระดาษกรอง whatman no.1
6. นำสารละลายใส่ที่ผ่านการกรองไปหาผลได้ของสารสกัดซึ่งใช้ประมาณ 20 มิลลิลิตร และนำสารละลายใส่ส่วนที่เหลือไประเหยด้วยเครื่องระเหยระบบสุญญากาศ เพื่อให้ได้สารสกัดที่มีความเข้มข้นมากขึ้นโดยความดันในการระเหยมีค่าอยู่ในช่วง 16-26 cmHg
7. นำสารสกัดที่ผ่านการระเหยเอาตัวทำละลายออกแล้วไปทำแห้งด้วยเครื่อง freeze dry
8. นำสารสกัดที่ผ่านการทำแห้งแล้วมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวิซ์และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์

5. วิธีการวิเคราะห์

5.1 การคำนวณหาผลได้ของสารสกัด (%yield)

1. นำถ้วยเซรามิกอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำถ้วยเซรามิกที่อบแล้วใส่โถดูดความชื้นประมาณ 20-30 นาที
3. นำมาชั่ง บันทึกน้ำหนักถ้วย จากนั้น นำสารสกัดปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ในถ้วยเซรามิก
4. นำไประเหยเอาตัวทำละลายออกด้วยอ่างควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C จนกระทั่งตัวทำละลายเริ่มแห้ง

5. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. เอาตัวอย่างที่อบใส่โถดูดความชื้นประมาณ 15- 20 นาที จากนั้นนำมาชั่งและบันทึกน้ำหนัก และนำไปอบต่ออีก 1 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนัก ทำเช่นนี้จนกระทั่งน้ำหนักที่ได้คงที่ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าผลได้ของสารสกัด (%yield) โดยหาจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารสกัดหลังจากทำแห้งต่อน้ำหนักเริ่มต้นของพืชก่อนเริ่มทำการสกัด

$$\text{Total extracted yield (\%)} = \frac{\text{weight of extracted after ovened}}{\text{weight of plant before extracting}}$$

5.2 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยวิธี Modified dinitrosalicylic acid (Miller, 1959)

1. เตรียมสารสกัดให้มีความเข้มข้น 1% w/v จากนั้นเจือจางให้อยู่ในช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม
2. คุดตัวอย่างสารละลายที่เจือจางเหมาะสมปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ใน microplate 96 หลุม
3. เติมสารละลาย Dinitrosalicylic acid ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เขย่าเบาๆ ให้สารละลายผสมกัน ประมาณ 30 วินาที
4. ปิด microplate ด้วยถุงซิปล็อค และนำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที
5. ทำให้เย็นและนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร
6. เปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐานและคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในตัวอย่างสารสกัดในหน่วย mg/g สารสกัด

5.3 การวิเคราะห์น้ำตาลทั้งหมด โดยวิธี Modified phenol sulfuric method (Fox and Robyt, 1991)

1. เตรียมสารสกัดให้มีความเข้มข้น 1% w/v จากนั้นเจือจางให้อยู่ในช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม
2. คุดตัวอย่างสารละลายที่เจือจางเหมาะสมปริมาตร 25 ไมโครลิตร ใส่ใน microplate 96 หลุม
3. เติมสารละลาย 5%phenol ปริมาตร 25 ไมโครลิตร เขย่า microplate เบาๆ เพื่อให้สารผสมกันประมาณ 30 วินาที

4. วางแผ่น microplate บนน้ำแข็ง ค่อยๆ เติม Conc. Sulfuric acid ปริมาตร 125 ไมโครลิตร จากนั้นเขย่าเบาๆ เพื่อให้สารผสมกันประมาณ 30 วินาที
5. ปิด microplate ด้วยถุงซิปล็อกและนำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที
6. ทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง และนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 492 นาโนเมตร
7. เปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐานและคำนวณหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในตัวอย่างสารสกัดในหน่วย mg/g สารสกัด

5.4 การหาปริมาณน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์

ปริมาณน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ (Non-reducing sugar) คือน้ำตาลที่จัดอยู่ในกลุ่มโอลิโกแซคคาไรด์และโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งคาดว่าจะเป็นที่เปปไทด์หรือโพลีแซคคาไรด์ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Non-reducing sugar} = \text{Total sugar} - \text{Reducing sugar}$$

5.5 การทดสอบความสามารถในการส่งเสริมการเจริญของโปรไบโอติกส์

ทดสอบความสามารถในการส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียโปรไบโอติกส์ของสารสกัด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียกลุ่ม Lactobacilli และ Bifidobacteria เนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้สามารถหมักกรดแลคติกและเป็นจุลินทรีย์ที่พบในทางเดินอาหารของมนุษย์ ในการทดสอบนี้ใช้แบคทีเรีย 2 ชนิดคือ *Lactobacillus acidophilus* และ *Lactobacillus plantarum* โดยนำแบคทีเรียโปรไบโอติกส์มาเลี้ยงในอาหารเหลว De Man Rogosa Sharpe (MRS) ซึ่งประกอบด้วย Proteose peptone 10 g/l, Beef extract 10 g/l, Yeast extract 5 g/l, Dextrose 20 g/l, Polysorbate 80 1 mg/l, Ammonium citrate 2 g/l, Sodium acetate 5 g/l, Magnesium sulphate 0.1 g/l, Manganese sulphate 0.05 g/l และ Dipotassium phosphate 2g/l จากนั้นทำการถ่ายเชื้อลงใน minimal medium ซึ่งประกอบด้วย Peptone water 2 g/l, Yeast extract 2 g/l, NaCl 0.1 g/l, K₂HPO₄ 0.04 g/l, KH₂PO₄ 0.04 g/l, CaCl₂·6H₂O 0.01 g/l, MgSO₄·7H₂O 0.01 g/l, NaHCO₃ 2 g/l, Tween 80 2 mg/l, Cysteine-HCl 0.5 g/l และ Bile salt 0.5 g/l โดยใส่สารที่สกัดได้เพื่อเป็นแหล่งของคาร์บอนเปรียบเทียบกับ การใช้น้ำตาลกลูโคส โดยในการทดสอบความสามารถในการเจริญของโปรไบโอติกส์จะทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง เพื่อนำมาวัดการเจริญของแบคทีเรียโปรไบโอติกส์

5.6 วิเคราะห์หาชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

สารเคมี

1. Acetonitrile HPLC grade
2. Water HPLC grade
3. Iso-propanol HPLC grade
4. H₂SO₄ concentration
5. 1 N NaOH

เครื่องมือ

Column: Agilent Zorbax LC- NH₂, 4.6 mm x 250 mm, 5µm

Mobile phase: acetonitrile : water, 75:25

Flow rate: 1 ml/min

Temp.: ambient

Detector: RI

Inject. 20 µl

วิธีการเตรียมสารละลายสารสกัด

การเตรียมตัวอย่าง โดยการละลายสารสกัดด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 น้ำหนักต่อปริมาตร นำมาแบ่งเป็น 2 หลอด

หลอดที่ 1 เจือจางสารละลายสารสกัดด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นในช่วงของสารละลายมาตรฐาน

หลอดที่ 2 ย่อย (Hydrolyze) สารละลายสารสกัดโดยการเติมกรดซัลฟูริกให้มีความเข้มข้นของกรดสุดท้ายในสารละลายเป็น 2 N ต้มใน water bath อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำให้เป็นกลางด้วย 1 N NaOH เจือจางสารละลายสารสกัดด้วยน้ำกลั่นให้มีความ

เข้มข้นในช่วงของสารละลายมาตรฐาน นำสารละลายสารสกัดทั้งสองหลอดกรองด้วยตัวกรองขนาด $0.2\ \mu\text{m}$ ฉีดเข้าเครื่อง HPLC ปริมาณ 20 ไมโครลิตร

การหาความเข้มข้นของเอทานอลที่ระเหยได้

หาความเข้มข้นของเอทานอลที่ระเหยได้ด้วยเครื่อง Refractometer โดยนำเอทานอลที่ได้จากการระเหยมาเตรียมให้ได้ความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม จากนั้นนำไปวัดค่าดัชนีหักเหด้วยเครื่อง Refractometer นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

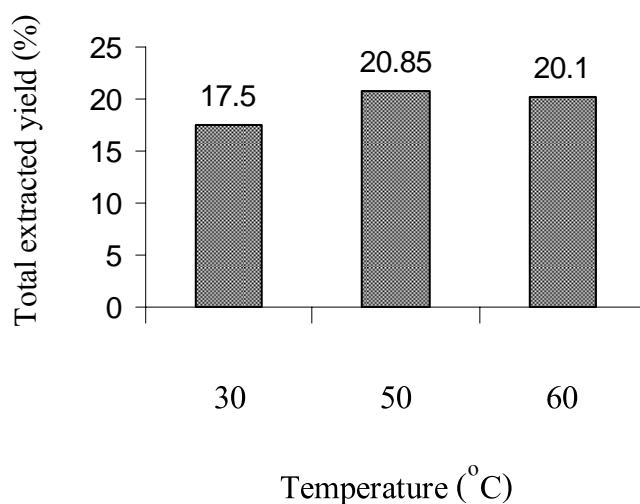
บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การสกัดสารพรีไบโอติกส์จากเปลือกลูกตาลในชุดทดลองขนาดเล็ก

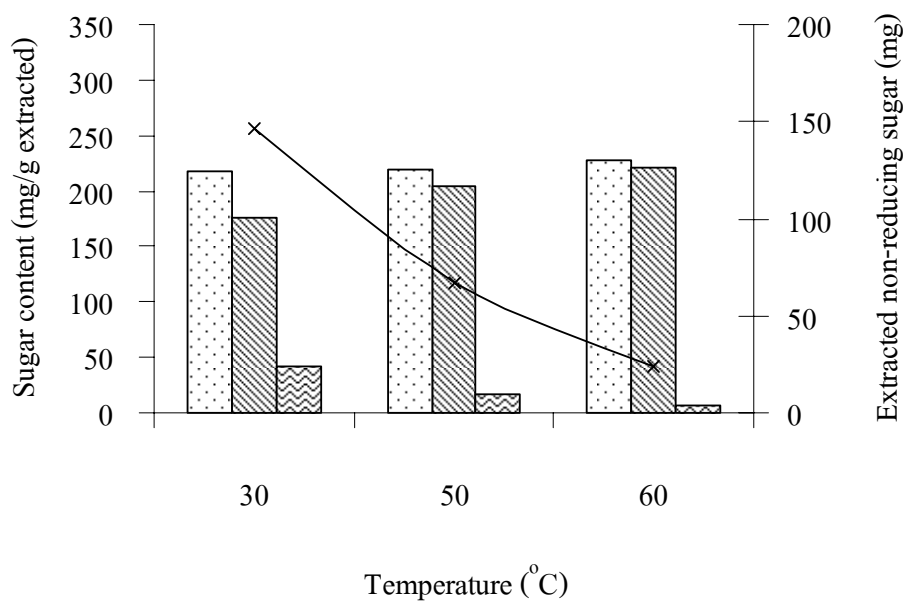
1.1 ผลของอุณหภูมิในการสกัดเปลือกลูกตาล

ทำการสกัดโดยใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับน้ำกลั่น 1:10 w/v และเวลาในการสกัด 60 นาที จากภาพประกอบที่ 14 พบว่า ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 °C ให้ผลได้ของสารสกัดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนที่อุณหภูมิ 30 °C ให้ผลได้ของสารสกัดน้อยกว่า เมื่อนำสารสกัดดังกล่าวไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวิซ์พบว่าที่อุณหภูมิ 60 °C มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมากที่สุดคือ 227.01 mg/g extracted ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงตัวทำละลายสามารถละลายน้ำตาลได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (Treybal, 1980) ความเข้มข้นของน้ำตาลในส่วนที่สกัดได้จึงสูง อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเล็กออกมาในปริมาณที่มากด้วย ดังจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ก็มีค่าสูง คือ 220.99 mg/g extracted ซึ่งจะเหลือปริมาณน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์ซึ่งเป็นส่วนของน้ำตาลที่น่าจะเป็นพรีไบโอติกส์เพียง 6.03 mg/g extracted ในขณะที่อุณหภูมิในการสกัดเป็น 30 °C จะได้ปริมาณน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์สูงกว่า (ภาพประกอบที่ 15) ดังนั้นการสกัดสารพรีไบโอติกส์จึงไม่ควรทำที่อุณหภูมิสูงเกินไป และเมื่อพิจารณาในแง่ของพลังงานที่ใช้แล้ว การสกัดพรีไบโอติกส์ที่อุณหภูมิ 30 °C จึงน่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสม



ภาพประกอบที่ 14 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของสารสกัด โดยสกัดเปลือกกลูคาลอบแห้ง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย

1:10 w/v



total sugar

reducing sugar

non-reducing sugar

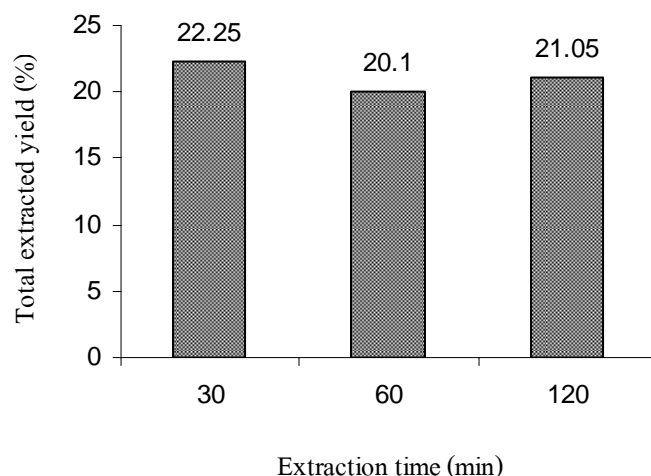
Extracted non-reducing sugar

ภาพประกอบที่ 15 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์และ น้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ ทำการสกัดเปลือกกลูคาลอบแห้ง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที

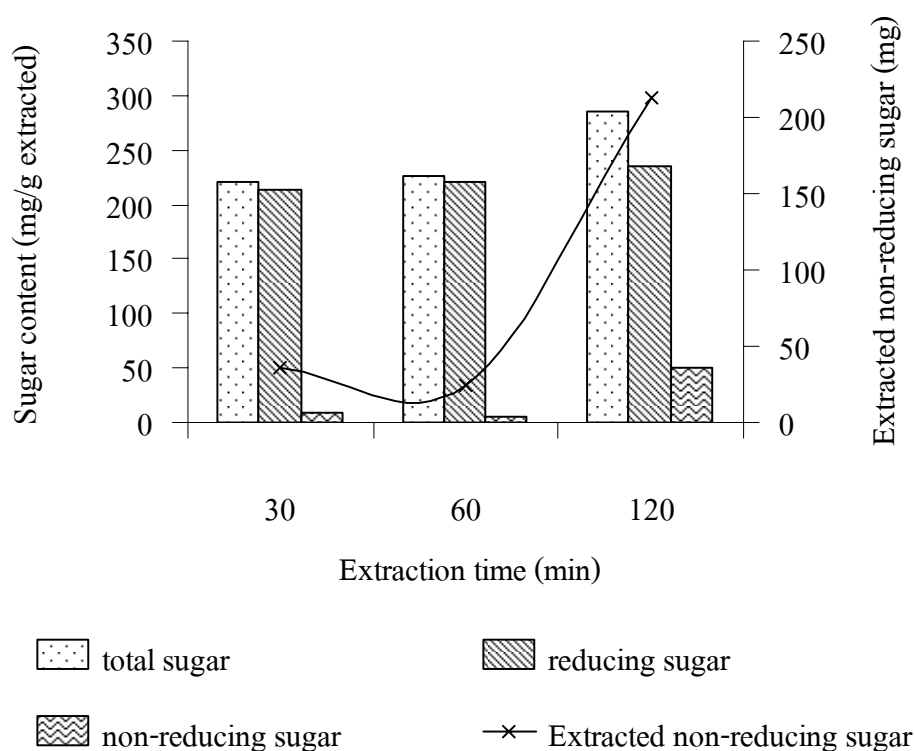
และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

1.2 ผลของเวลาในการสกัดเปลือกลูกตาล

ทำการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60°C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v จากภาพประกอบที่ 16 พบว่าเมื่อเวลาในการสกัดนานขึ้นผลได้ของสารสกัดไม่มากขึ้นแต่กลับลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อนำสารสกัดมาวิเคราะห์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวิซ์ พบว่าเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวิซ์จะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลจากระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวละลายและตัวทำละลายที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปจนสารละลายอิ่มตัวด้วยตัวละลาย อัตราการสกัดก็จะลดลง (Herodez, 2003) เมื่อพิจารณาในส่วนของน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์ พบว่าที่เวลาในการสกัด 120 นาที มีปริมาณมากที่สุดคือ 50.51 mg/g extracted (ภาพประกอบที่ 17) ซึ่งจากการศึกษา กระบวนการสกัดที่ผ่านมา พบว่าการสกัดที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ใช้ระยะเวลาในการสกัดที่น้อยลง (Kim *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 1987) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการสกัดที่อุณหภูมิสูง 60°C ซึ่งได้ระยะเวลา 120 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นถ้าทำการสกัดที่อุณหภูมิ 30°C อาจต้องใช้เวลาในการสกัดที่นานขึ้น



ภาพประกอบที่ 16 ผลของเวลาต่อผลได้ของสารสกัด ที่ได้จากการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60°C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

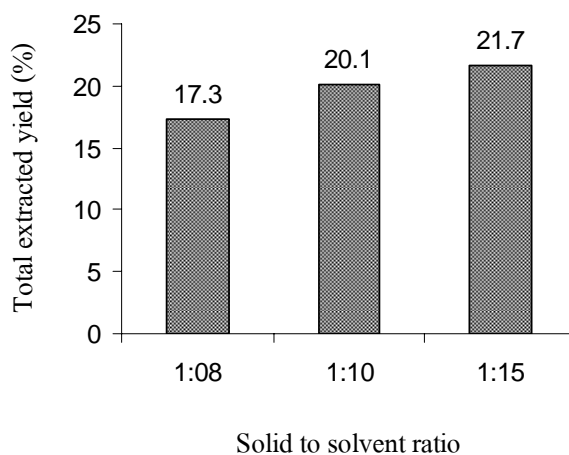


ภาพประกอบที่ 17 ผลของเวลาต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ และ น้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

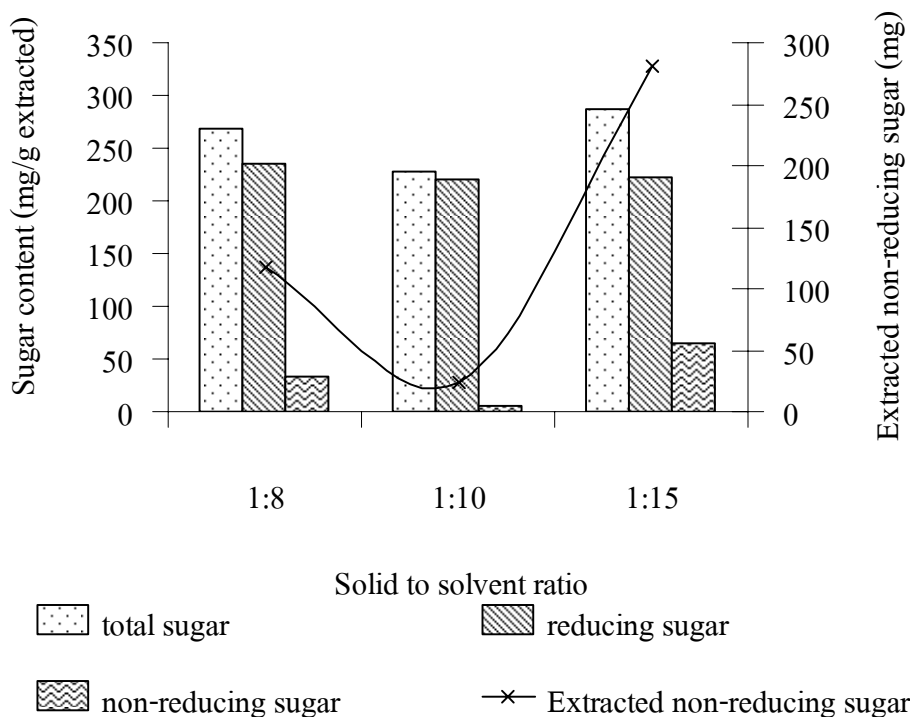
1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายในการสกัดเปลือกลูกตาล

ทำการสกัดโดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการสกัด 60 นาที จากภาพประกอบที่ 18 พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ผลได้ของสารสกัดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อนำสารสกัดมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ พบว่าจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 19 ส่วนการสกัดที่อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:2 และ 1:4 ทำให้เกิดการดูดซับตัวทำละลายเข้าไปภายในเปลือกลูกตาลจนเหลือปริมาณตัวทำละลายอยู่น้อยมาก ในขณะที่ถ้าใช้ตัวทำละลายมากเกินไปจะทำให้เกิดภาวะเจือจางที่จะทำให้เกิดการสกัดได้น้อยลง (Kim *et al.*, 2003) ซึ่งในการทดลองของเราที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:15 ยังไม่เกิดภาวะเจือจาง และถ้าเพิ่มปริมาณของตัวทำละลายอาจได้ฟรีไบโอดีคส์มากขึ้นหรือน้อยลงก็ได้ เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ทั้งในส่วนของค่าใช้จ่าย

ของวัตถุดิบและพลังงานที่ต้องใช้ในขั้นตอนการระเหย อัตราส่วน 1:15 จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสม



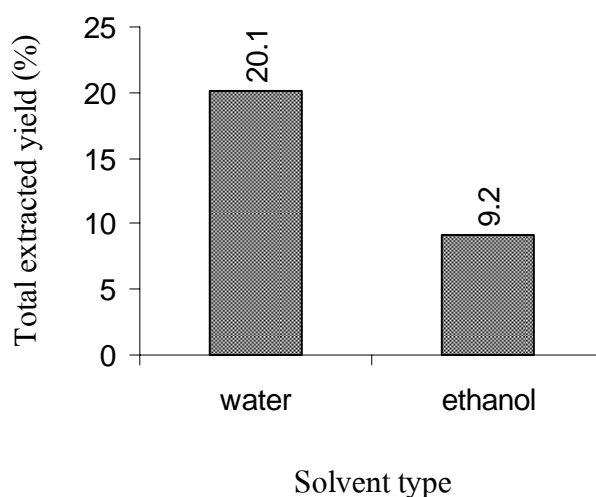
ภาพประกอบที่ 18 ผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อผลได้ของสารสกัด ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ เวลาในการสกัด 60 นาที



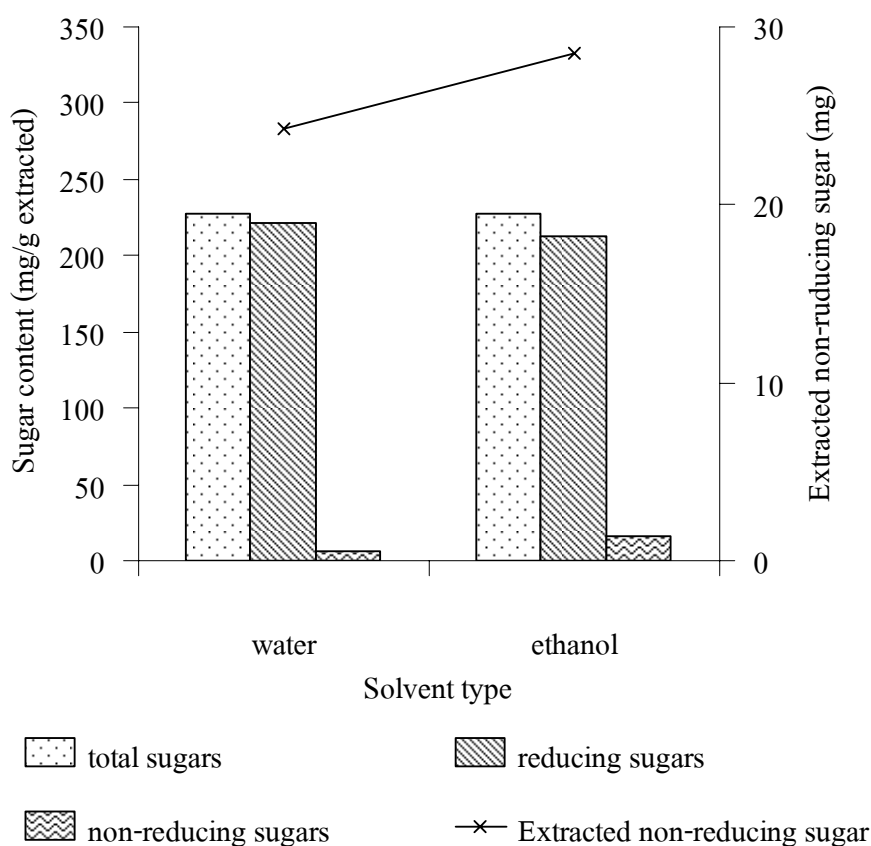
ภาพประกอบที่ 19 ผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ เวลาในการสกัด 60 นาที

1.4 ผลของชนิดตัวทำละลายในการสกัดเปลือกลูกตาล

ทำการสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v โดยใช้ น้ำกลั่นและเอทานอลเข้มข้น 95% เป็นตัวทำละลาย จากภาพประกอบที่ 20 พบว่าเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะได้ผลได้ของสารสกัดมากกว่า เอทานอลอย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 21 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวิซ์ และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวิซ์จะใกล้เคียงกัน ซึ่งการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะมีข้อเด่นกว่าการใช้เอทานอลในแง่ของต้นทุนวัตถุดิบที่ถูกลง แต่ก็มีข้อด้อยในขั้นตอนของการระเหยตัวทำละลายที่จะต้องใช้พลังงานมากกว่า และจากข้อมูลการสกัด Soybean oligosaccharides การสกัดด้วยเอทานอล 10% จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นอื่นๆ ของเอทานอลและน้ำกลั่น (Kim *et al.*, 2003) จึงควรมีการทดลองโดยใช้เอทานอลเข้มข้น 10% เป็นตัวทำละลายต่อไป



ภาพประกอบที่ 20 ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อผลได้ของสารสกัด เมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

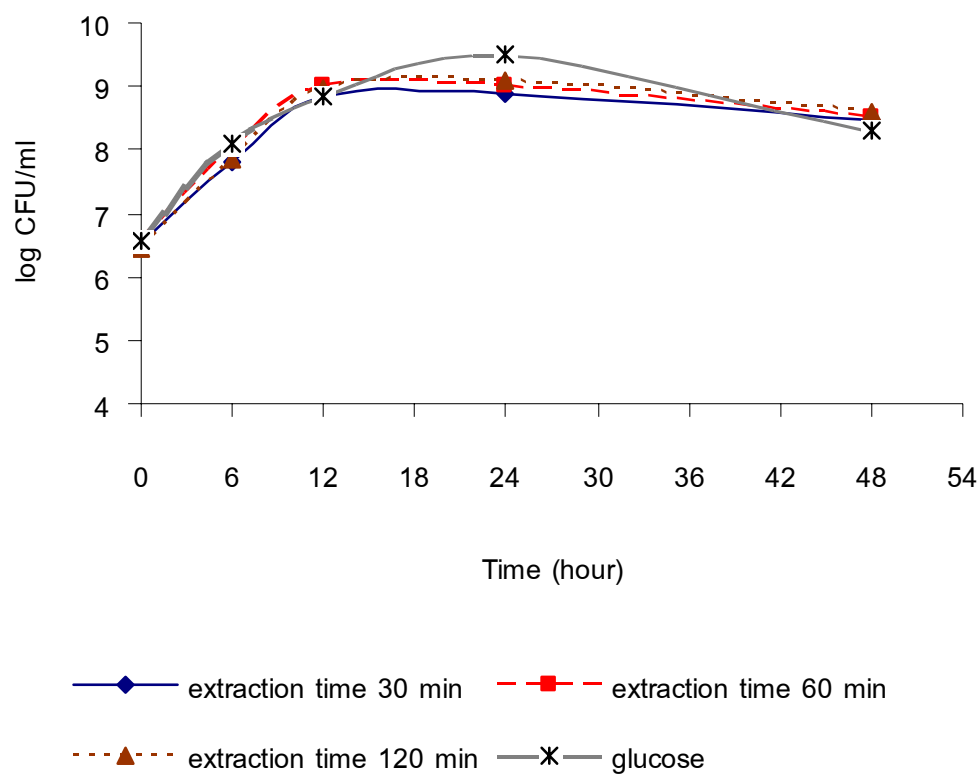


ภาพประกอบที่ 21 ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ เมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

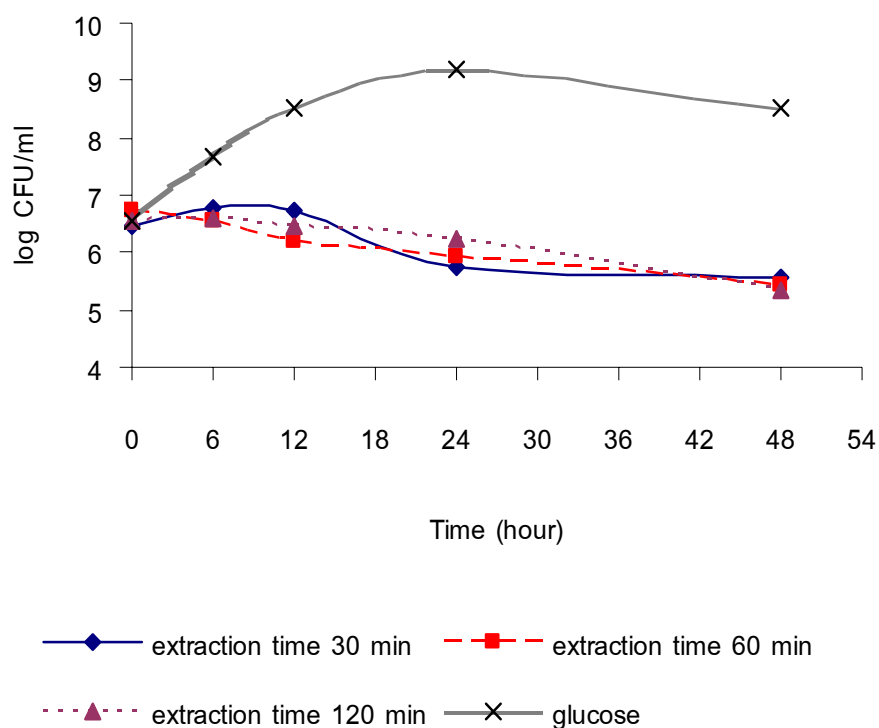
1.5 ผลการทดสอบความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของโปรไบโอติกส์ของสารสกัดจากเปลือกลูกตาล

เมื่อนำสารที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับน้ำกลั่น 1:10 w/v และเวลาในการสกัด 30 60 และ 120 นาที มาใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนของแบคทีเรีย โปรไบโอติกส์ *Lactobacillus acidophilus* และ *Lactobacillus plantarum* เปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส พบว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดที่เวลาต่างๆ กันส่งเสริมการเจริญของ *L. plantarum* ได้ใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับน้ำตาลกลูโคส ดังแสดงในภาพประกอบที่ 22 แต่ไม่ส่งเสริมการเจริญของ *L. acidophilus* ดังแสดงในรูปที่ 23 ซึ่งโดยปกติโปรไบโอติกส์ที่ใช้ในห้องทดลองก็ไม่สามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์โปรไบโอติกส์ได้ทุกตัว จะส่งเสริมการเจริญเพียงบางตัวเท่านั้น (นิรัญญา, 2550) จึงมีแนวโน้มว่าสารสกัดที่ได้จากเปลือกตาลมีคุณสมบัติตาม

ลักษณะของพรีไบโอติกส์ แต่ทั้งนี้จะต้องยืนยันผลด้วยการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี HPLC



ภาพประกอบที่ 22 การเจริญของแบคทีเรียโปรไบโอติก *Lactobacillus plantarum* เมื่อใช้สารสกัดจากเปลือกลูกตาล



ภาพประกอบที่ 23 การเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติก *Lactobacillus acidophilus* เมื่อใช้สารสกัดจากเปลือกลูกตาล

1.6 ผลการวิเคราะห์ชนิดของน้ำตาลด้วย HPLC ของสารสกัดจากเปลือกลูกตาล

จากการวิเคราะห์ชนิดของน้ำตาลด้วย HPLC ไม่พบปริมาณ Oligosaccharides ในสารสกัดจากเปลือกลูกตาลอบแห้ง และพบเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในสารสกัดจากเปลือกลูกตาลสด และพบว่าสารสกัดจากเมล็ดขนุน เมื่อสกัดด้วยเอทานอล 50% จะมี Polysaccharide content อยู่ดังตารางที่ 8 ดังนั้นจึงเปลี่ยนวัตถุดิบในการสกัดมาเป็นเมล็ดขนุน

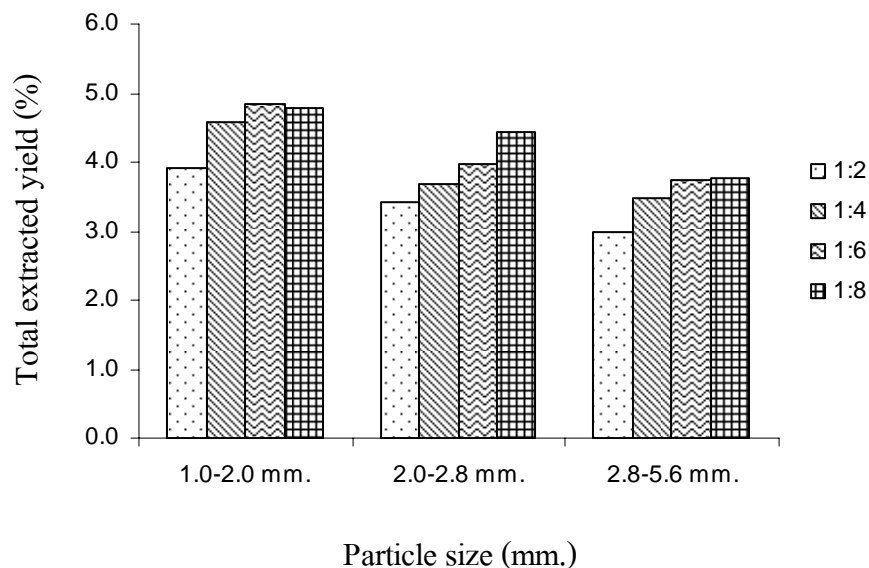
ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์หาชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง HPLC

ตัวอย่าง	สารที่ใช้สกัด	Polysaccharide content mg/g extracted
เปลือกลูกตาลสด	เอทานอล 95%	0.00
เปลือกลูกตาลแห้ง	เอทานอล 95%	0.00
เปลือกลูกตาลสด	น้ำกลั่น	1.14
เปลือกลูกตาลแห้ง(รอบแรก)	น้ำกลั่น	0.00
เปลือกลูกตาลแห้ง(รอบสอง)	น้ำกลั่น	0.00
เมล็ดขนุน (ก่อนตกตะกอน)	เอทานอล 50%	29.35
เมล็ดขนุน (หลังตกตะกอน)	เอทานอล 50%	155.44

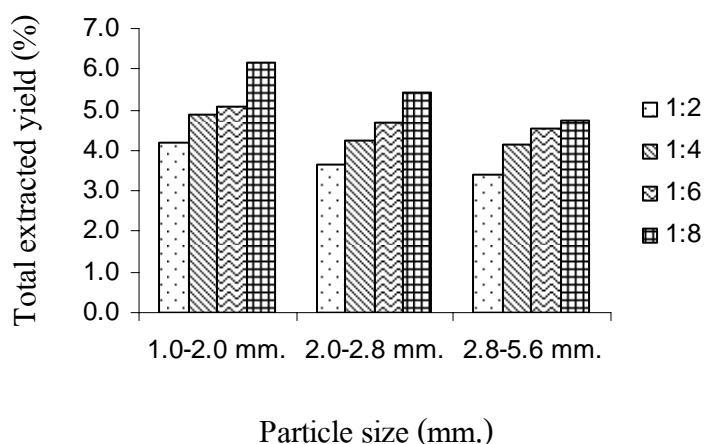
2. การสกัดสารพรีไบโอติกส์จากเมล็ดขนุนด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก

ทดลองหาตัวแปรเบื้องต้นด้วยชุดสกัดแบบเบทซ์ขนาดเล็กเพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการสกัดสารพรีไบโอติกส์ด้วยเครื่องสกัดแบบเบทซ์ขนาดโรงงานจำลอง โดยความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดได้แก่ น้ำกลั่น เอทานอล 50% และเอทานอล 95% ตัวทำละลายแต่ละความเข้มข้นจะทำการศึกษาผลของขนาดเมล็ดขนุน (2.0-1.0, 2.0-2.8 และ 2.8-5.6 mm) อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย (1:2, 1:4, 1:6 และ 1:8) แต่ละสภาวะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C (อุณหภูมิห้อง) และเวลาในการสกัด 60 นาที โดยมีการกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากนั้นนำสารที่ได้จากการสกัดไปหาผลได้ของสารสกัด (% extracted yield) จากการทดลองพบว่าขนาดของเมล็ดขนุนที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้ผลได้ของสารสกัดที่สูงกว่า ดังแสดงในภาพประกอบที่ 24, 25 และ 26 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลายมีมากขึ้น และในขั้นตอนของการลดขนาดจะช่วยทำลายผนังเซลล์ที่หุ้มสารที่ต้องการสกัด ทำให้สารที่ต้องการสกัดเกิดการแพร่สู่ตัวทำละลายได้ง่ายขึ้น ทำให้อัตราการสกัดที่ได้เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลายพบว่า ผลได้ของสารสกัดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งจากภาพประกอบที่ 24, 25 และ 26 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนระหว่าง

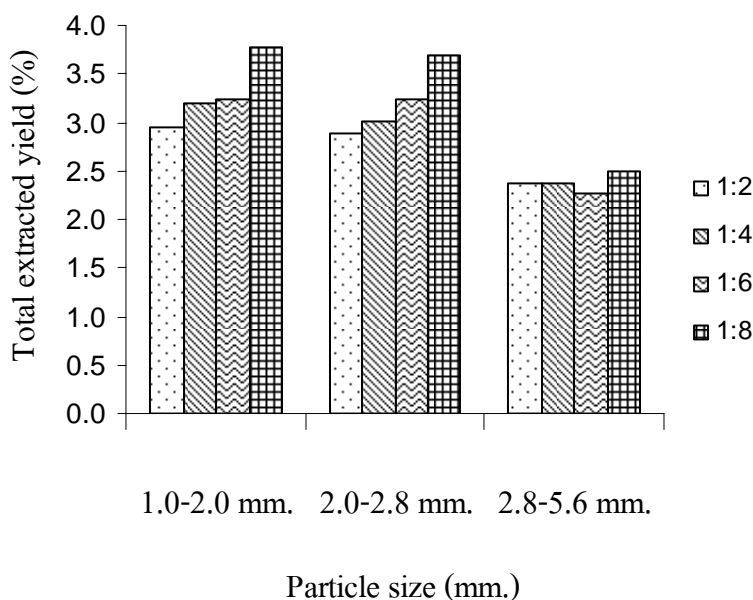
เมล็ดขุ่นกับตัวทำละลายมากกว่า 1:8 อาจทำให้ได้ผลได้ของสารสกัดที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้ปริมาณของตัวทำละลายมาก ก็จะเป็นการเพิ่มต้นทุนวัตถุดิบ อีกทั้งพลังงาน และเวลาที่ใช้ในการระเหยตัวทำละลายก็จะมากขึ้น จึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลาย 1:8 ผลได้ของสารสกัดเมื่อใช้เอทานอล 50% เป็นตัวทำละลายให้ผลได้ของสารสกัดมากกว่าการใช้ น้ำกลั่นและเอทานอล 95% ดังแสดงในภาพประกอบที่ 27 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากว่าที่ เอทานอล 50% จะมีสภาพความเป็นขี้สูงกว่เอทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำ (Ekvall et al., 2007) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ (Xiaoli et al., 2008) ซึ่งได้ทำการสกัด Oligosaccharides จาก Chickpea พบว่าเมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% จะให้ประสิทธิภาพมากกว่าตัวทำละลายตัวอื่นๆ และผลได้ของ oligosaccharides น้อยกว่าเมื่อสกัดโดยใช้น้ำกลั่นหรือเอทานอล 30% และการใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลมากกว่า 50% ทำให้ผลได้ของ Oligosaccharides ลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากการสกัดที่ไม่สมบูรณ์ในขณะที่โปรตีนอาจเกิดการ Denatured ได้ที่ความเข้มข้นของเอทานอลสูง นอกจากนี้การใช้น้ำกลั่นหรือ เอทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำเหมาะสมกับการสกัดน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (Xiaoli et al., 2008) ซึ่งสารฟรีไบโอติกส์เป็นสารที่มีมวลโมเลกุลสูง



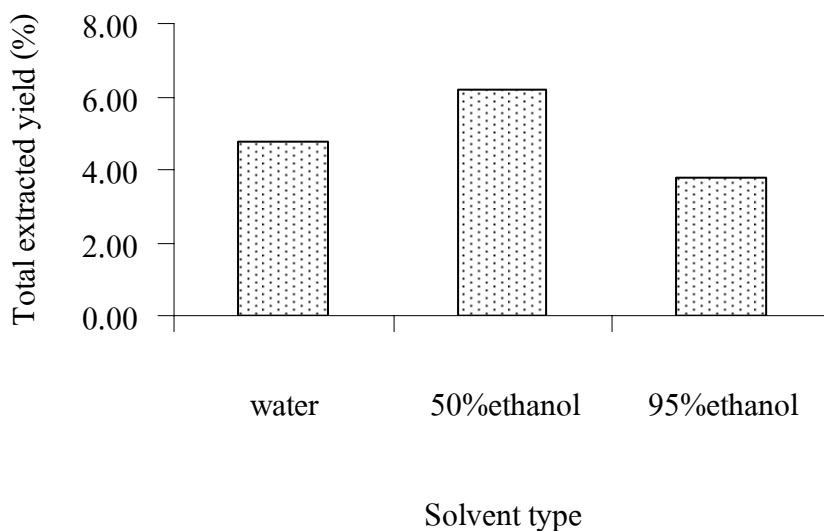
ภาพประกอบที่ 24 ผลได้ของสารสกัดเมื่อสกัดด้วยชุดทดลองขนาดเล็กโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) เวลาในการสกัด 60 นาที ขนาดเมล็ดขุ่น 1.0-2.0, 2.0-2.8 และ 2.8-5.6 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลาย 1:2, 1:4, 1:6 และ



ภาพประกอบที่ 25 ผลได้ของสารสกัดเมื่อสกัดด้วยชุดทดลองขนาดเล็กโดยใช้เอทานอล 50% เป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) เวลาในการสกัด 60 นาที ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0, 2.0-2.8 และ 2.8-5.6 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:2, 1:4, 1:6 และ 1:8



ภาพประกอบที่ 26 ผลได้ของสารสกัดเมื่อสกัดด้วยชุดทดลองขนาดเล็กโดยใช้เอทานอล 95% เป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) เวลาในการสกัด 60 นาที ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0, 2.0-2.8 และ 2.8-5.6 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:2, 1:4, 1:6 และ 1:8



ภาพประกอบที่ 27 ผลได้ของสารสกัดเมื่อตัวทำละลายเป็นน้ำกลั่น เอทานอล 50% และเอทานอล 95% อุณหภูมิในการสกัด 30 °C (อุณหภูมิห้อง) ขนาดอนุภาค 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลาย 1:8

ดังนั้นสภาวะเบื้องต้นที่นำไปใช้ทดลองสกัดสารฟิโอบิติกส์ด้วยเครื่องสกัดแบบแบทช์คือ ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดของเมล็ดขุ่น 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลาย 1:8

3. การสกัดสารฟิโอบิติกส์จากเมล็ดขุ่นด้วยชุดสกัดแบบแบทช์ขนาดโรงงานจำลอง

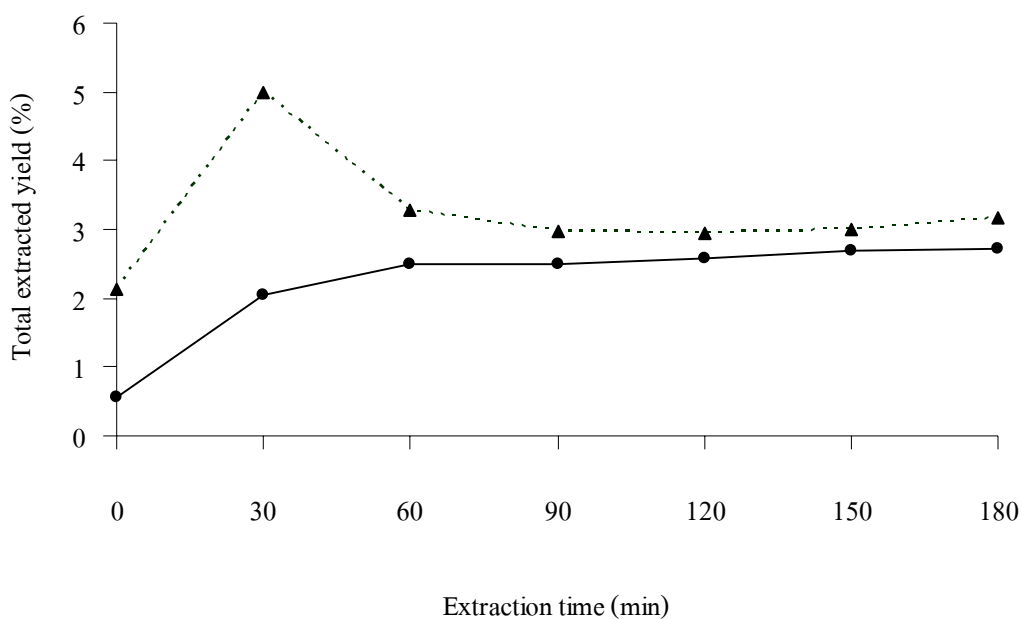
3.1 การศึกษาจุดเก็บตัวอย่างสารสกัด

เนื่องจากเครื่องสกัดแบบแบทช์สามารถเก็บตัวอย่างได้หลายจุด ในการศึกษาผลของเวลาในการสกัดจึงจำเป็นต้องเลือกจุดเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมโดยได้ทำการสกัดเมล็ดขุ่นด้วยเครื่องสกัดแบบแบทช์โดยอุณหภูมิในการสกัดเป็น 30 °C (อุณหภูมิห้อง) ด้วยตัวทำละลายเอทานอล 50 % อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลายเป็น 1:8 และขนาดอนุภาค 1.0-2.0 mm เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่าง 2 จุด คือ บริเวณด้านบนของถังสกัดในส่วนที่ไหลล้น และบริเวณด้านล่างของถังสกัด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 28 เพื่อเปรียบเทียบจุดที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่าง จากภาพประกอบที่ 29 จะเห็นว่าผลได้ของ

การเก็บตัวอย่างบริเวณส่วนด้านบนของถังสกัดในส่วนที่ไหลล้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาในการสกัดผ่านไป 30 นาที เมื่อเวลาในการสกัดนานกว่า 60 นาที ผลได้มีแนวโน้มคงที่ แต่ผลได้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยบีกเกอร์ (ผลได้จากการสกัดด้วยบีกเกอร์ประมาณ 6%) ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากการสัมผัสกันระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลายได้ไม่ดีพอ เพราะเมล็ดขุ่นจะอัดแน่นกันอยู่ในถังตะแกรง การเข้าถึงของตัวทำละลายทำได้ยาก การถ่ายโอนมวลจากเมล็ดขุ่นมายังตัวทำละลายจึงเกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่วนการเก็บตัวอย่างบริเวณด้านล่างของถังสกัดพบว่า ณ เวลาเริ่มต้นการสกัดให้ค่าผลได้ที่สูงกว่า และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากเวลาในการสกัด 45 นาทีเป็นต้นไป %yield ที่ได้กลับลดลงอย่างมาก ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่สารละลายมีการผสมไม่ทั่วถึง เพราะการผสมจะเกิดจากการปั่นตัวทำละลายจากด้านล่างของถังสกัด อย่างไรก็ตาม เวลาในการสกัดเข้าสู่สมดุลเป็น 60 นาที เช่นเดียวกัน



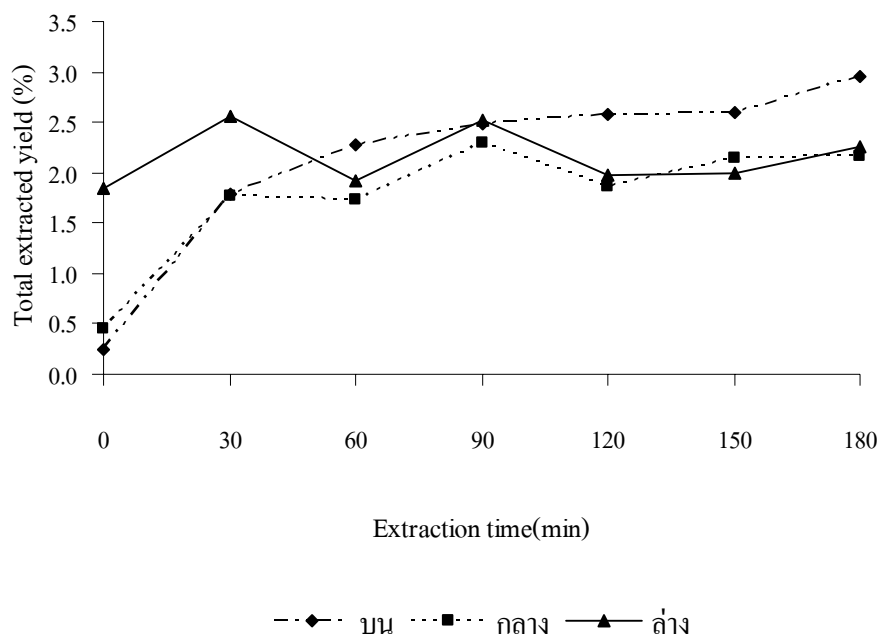
ภาพประกอบที่ 28 บริเวณของจุดเก็บตัวอย่าง



—●— เก็บตัวอย่างที่ไหลล้น ···▲··· เก็บตัวอย่างด้านล่างถึงสกัด

ภาพประกอบที่ 29 ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนกับเวลาโดยการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบทซ์เมื่ออุณหภูมิในการสกัดเป็น 30 °C

เมื่อทำการสกัดเมล็ดขนุนด้วยชุดสกัดแบบเบทซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสถานะอื่นๆ เหมือนกับการสกัดที่อุณหภูมิห้อง ทำการเก็บตัวอย่าง 3 จุด คือ บริเวณด้านบนของถังสกัดในส่วนที่ไหลล้น บริเวณด้านล่างของถังสกัด และบริเวณภายในถังสกัด พบว่า การเก็บตัวอย่างบริเวณด้านบนของถังสกัดยังคงให้ผลได้ที่มีแนวโน้มที่ดีกว่าบริเวณอื่นๆ โดยในช่วงเริ่มต้นของการสกัด อัตราการสกัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและหลังจากเวลาในการสกัด 60 นาทีเป็นต้นไปพบว่า การแพร่ของตัวทำละลายเข้าสัมผัสกับตัวละลายเป็นกลไกควบคุมการสกัด ดังภาพประกอบที่ 30 ซึ่งดังนั้นจึงควรเก็บตัวอย่างบริเวณด้านบนของถังสกัดในส่วนที่ไหลล้น



ภาพประกอบที่ 30 ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนกับเวลาโดยการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบบท์เมื่ออุณหภูมิในการสกัดเป็น 60 °C

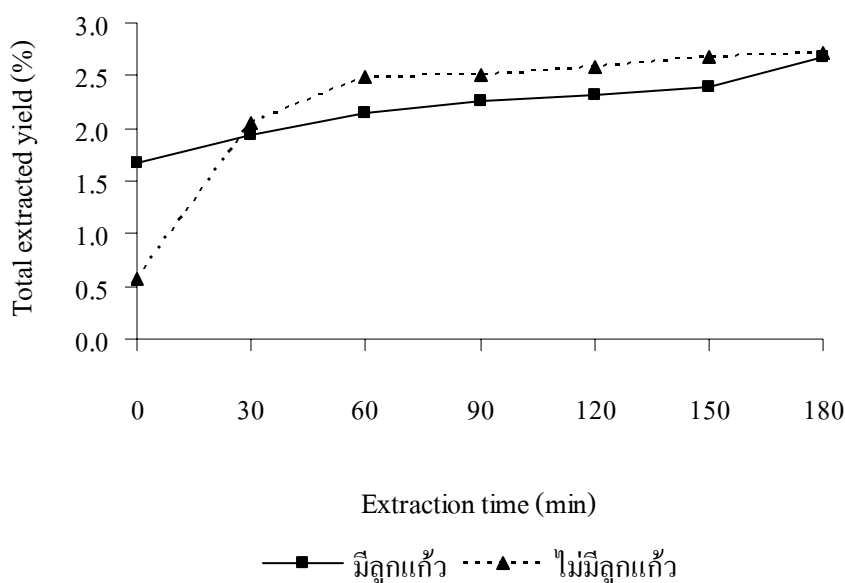
จากการทดลองหาจุดเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมพบว่า ในทุกๆ จุดของการเก็บตัวอย่าง ผลได้ของสารสกัดยังมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบการสกัดด้วยชุดสกัดขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการอัดแน่นของเมล็ดขนุน โอกาสในการได้สัมผัสกันระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลายมีน้อย ผลได้ของสารสกัดจึงมีค่าน้อยด้วย จึงควรมีการปรับปรุงกระบวนการสกัด

3.2 การปรับปรุงกระบวนการสกัด

3.2.1 การใช้ลูกแก้วแทรกระหว่างวัตถุดิบ

เนื่องจากผลได้ยังมีค่าต่ำ จึงได้หาวิธีการในการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย โดยการเพิ่มชั้นลูกแก้วระหว่างเมล็ดขนุนเพื่อไม่ให้เมล็ดขนุนอัดแน่นจนเกินไป และเนื่องจากกลไกการแพร่ของตัวทำละลายเข้าสัมผัสกับตัวละลายเป็นกลไกควบคุมการสกัด ก่อนการสกัดจึงได้แช่เมล็ดขนุนในตัวทำละลายนาน 30 นาที จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มชั้นลูกแก้วไม่ได้ทำให้ผลได้เพิ่มขึ้นแต่กลับทำให้ลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 31 ทั้งนี้เนื่องมาจากลูกแก้วมีน้ำหนักมาก ทำให้เมล็ดขนุนอัดแน่นมากขึ้น จึงไม่น่าจะเป็นวิธีการที่

เหมาะสม และการแช่เมล็ดขุ่นก่อนการสกัด 30 นาที ยังไม่นานพอ ดังนั้นในการสกัดจึงควรมีการแช่เมล็ดขุ่นในตัวทำละลายก่อนเริ่มกระบวนการสกัดที่นานขึ้น เพื่อลดระยะเวลาในการสกัด ดังจะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาในการสกัดเป็น 180 นาที ผลได้ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 31 ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขุ่นกับเวลาโดยการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบบท์ อุณหภูมิในการสกัด 30 °C เมื่อมีลูกแก้วและไม่มีลูกแก้ว

3.2.2 การใช้แผ่นตะแกรงแยกในการบรรจุวัตถุดิบ

ดัดแปลงการบรรจุวัตถุดิบให้มีช่องว่างและการสัมผัสระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลายให้มากขึ้น โดยใช้เส้นลวดร้อยเป็นฐานจากนั้นนำแผ่นตะแกรงวางข้างบนเส้นลวด โดยแบ่งออกเป็น 4 ชั้น คั่นระหว่างการบรรจุวัตถุดิบทุกๆ 2 กิโลกรัม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 32-33 และทำการแช่วัตถุดิบในตัวทำละลายนาน 12 ชั่วโมง พบว่าผลได้มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ดังแสดงในภาพประกอบที่ 34 และด้วยวิธีการดังกล่าว เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 และ 60 °C พบว่าที่อุณหภูมิในการสกัด 60 °C ให้ผลได้มากกว่า 30 °C ดังนั้นจึงใช้แนวทางนี้ในการทดลองต่อไป ทั้งนี้ได้ทำแผ่นตะแกรงชนิดถาวรขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการทำการทดลอง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 35

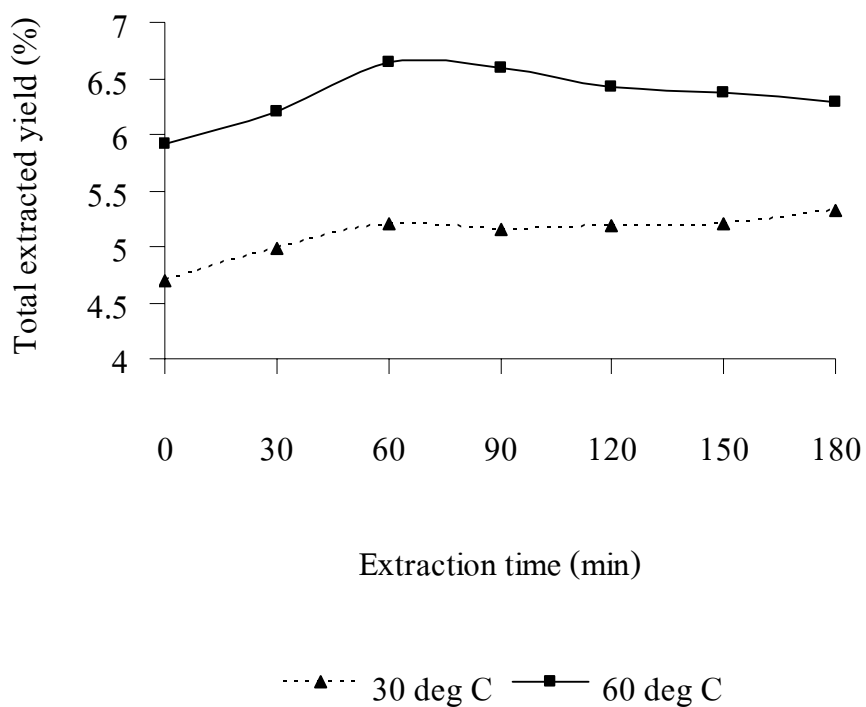
เนื่องจากการทดลองแต่ละครั้งจะที่ผ่านมา จะทำการเก็บตัวอย่างบริเวณที่ไหล ล้น ซึ่งทำการป้อนสารละลายจากถังสกัดไปยังถังระเหยซึ่งใช้เป็นตัวพักสารละลายด้วย จากนั้นจึงป้อน สารละลายจากถังพักเข้าทางด้านล่างของถังสกัด แล้วให้ไหลล้นมายังถังพัก วิธีการนี้ต้องใช้ปริมาณ ของเมล็ดขนุนและตัวทำละลายในปริมาณมาก โดยจะต้องใช้เมล็ดขนุน 8 กิโลกรัม และตัวทำ ละลาย 64 ลิตร ทำให้มีความสิ้นเปลืองในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัด ดังนั้นจึงได้มีการ ดัดแปลงระบบการไหลเวียนของสารละลายให้ดำเนินการอยู่เฉพาะภายในถังสกัดเพียงอย่างเดียว โดยการปรับเปลี่ยนระบบท่อจากการป้อนสารละลายไปยังถังพักก่อนเป็นการป้อนสารละลายจาก ด้านล่างของถังสกัดเข้าทางด้านบนของถังสกัดแทน ซึ่งทำให้สามารถลดปริมาณเมล็ดขนุนและตัว ทำละลายที่ใช้ลงได้



ภาพประกอบที่ 32 ภาพถ่ายด้านบนในการใช้แผ่นตะแกรงแยกในการบรรจุวัตถุดิบ



ภาพประกอบที่ 33 ภาพถ่ายด้านข้างในการใช้แผ่นตะแกรงแยกในการบรรจุวัตถุดิบ



ภาพประกอบที่ 34 ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนกับเวลาโดยการสกัดด้วยชุดสกัดแบบเบทซ์ อุณหภูมิในการสกัด 30 และ 60 °C เมื่อมีการใช้แผ่นตะแกรง

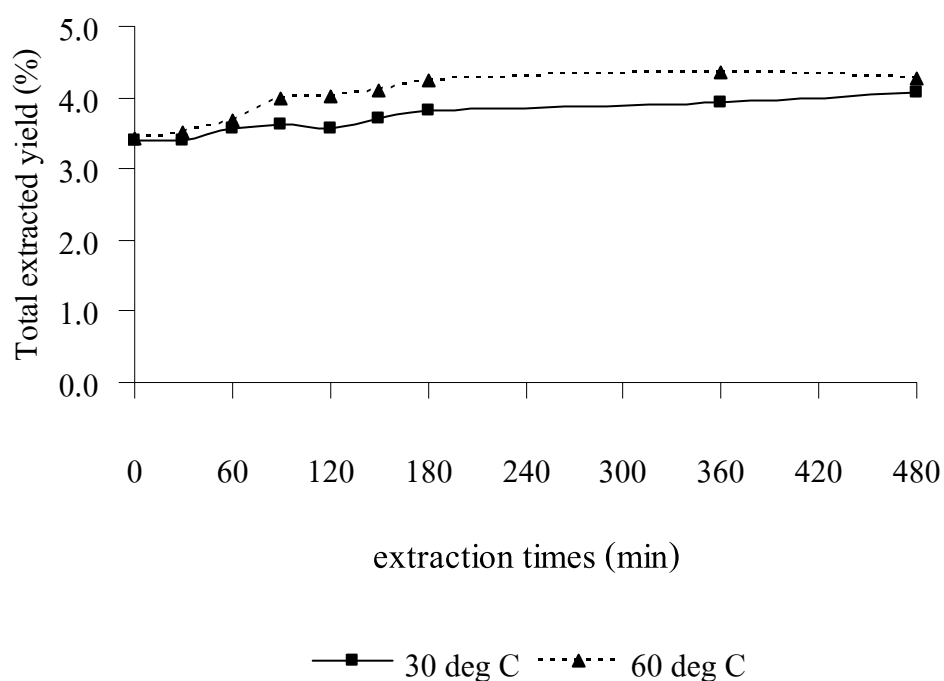


ภาพประกอบที่ 35 แผ่นตะแกรงและถังตะแกรงสแตนเลส

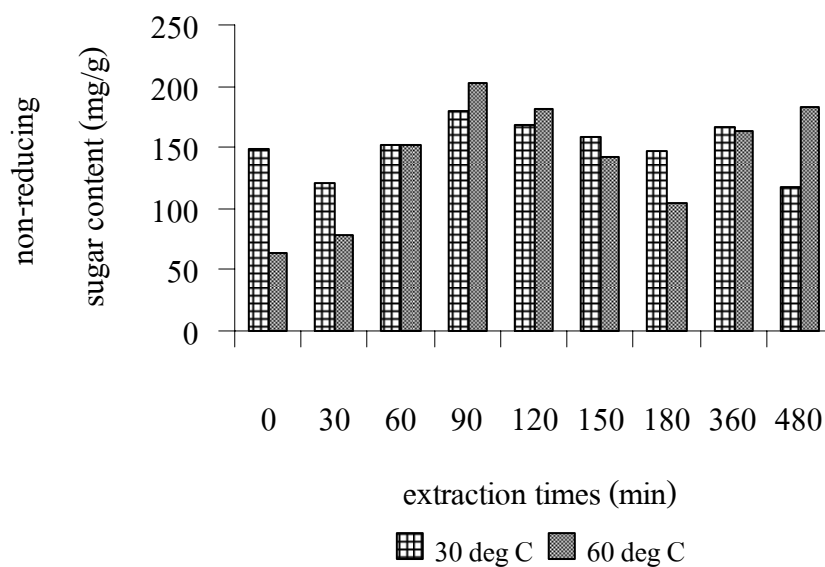
3.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการสกัดเมื่อทดลองสกัดด้วยเครื่องสกัดแบบเบทซ์

ทำการสกัดที่อุณหภูมิ 30 และ 60 °C โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลายเป็น 1:8 ที่เวลาในการสกัดเป็น 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360 และ 480 นาที โดยมีการแช่เมล็ดขนุนในตัวทำละลายก่อนการสกัด 12 ชั่วโมง จากภาพประกอบที่ 36 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการสกัดนานขึ้นผลได้ของสารสกัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและหลังจากเวลาในการสกัด 90 นาที ผลได้ของสารสกัดเริ่มมีค่าคงที่โดยการสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าผลได้สูงกว่าการสกัดที่อุณหภูมิ 30 °C อย่างไรก็ตาม ผลได้ของสารสกัดจากเครื่องสกัดแบบเบทซ์ยังมีค่าน้อยกว่าการสกัดด้วยชุดทดลองขนาดเล็ก เนื่องจากระบบปั่นไหลเวียนของสารละลายภายในถังสกัดขนาดโรงงานจำลอง ยังไม่ดีเท่าระบบการกวนของชุดทดลองขนาดเล็ก ซึ่งจะต้องมีการปรับปรุงระบบการไหลเวียนต่อไป เมื่อนำสารสกัดไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ซึ่งเป็นส่วนที่คาดว่าจะเป็ฟริไบโอดิกส์นั้นพบว่า ที่เวลา 90 นาทีเป็นเวลาสมดุลย์ของการสกัด การสกัดที่อุณหภูมิ 30 °C จะให้ปริมาณน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์สูงกว่าการสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C ดังภาพประกอบที่ 37 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโปรตีนที่อยู่ภายในเมล็ดขนุนเกิดการ Denatured ที่อุณหภูมิ 60 °C ทำให้เกิดการขัดขวางการสัมผัสกันของตัวละลายกับตัวทำละลาย เช่นเดียวกับการศึกษาของ Kim *et al.* (2003) ที่ศึกษาการสกัด Oligosaccharides จาก Defatted soybean meal ที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด เป็น 65 °C ผลได้ของการสกัดจะลดลง เนื่องมาจาก

การสกัดที่อุณหภูมิสูง อาจทำให้เกิดการ heat-denatured ของโปรตีนในเมล็ดขนุนทำให้ไม่สามารถสกัด oligosaccharides ออกมาได้ (Kim *et al.*, 2003) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Xiaoli *et al.* (2008) (Xiaoli *et al.*, 2008) และเมื่อทำการทดลองด้วยชุดสกัดขนาดเล็กเพื่อยืนยันผลอีกครั้งพบว่า ผลได้ของสารสกัดที่อุณหภูมิ 30 และ 60 °C มีค่าเป็น 6.57 และ 7.27 % ตามลำดับ และในส่วนของน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์พบว่าที่อุณหภูมิ 30 และ 60 °C มีค่าเป็น 522.36 และ 236.92 mg/g สารสกัด ตามลำดับ ดังนั้นควรสกัดสารฟรีไบโอติกส์ที่อุณหภูมิ 30 °C



ภาพประกอบที่ 36 ผลได้ของสารสกัดเมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุน 1:8 เวลาในการสกัด 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360, 480 นาทีและอุณหภูมิในการสกัด 30 และ 60 °C



ภาพประกอบที่ 37 ปริมาณน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์เมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุน 1:8 เวลาในการสกัด 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360, 480 นาทีและอุณหภูมิในการสกัด 30 และ 60 °C

ตารางที่ 9 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของสารสกัดและน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ เมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 เวลาในการสกัด 60 นาที

อุณหภูมิสกัด (°C)	Total extracted yield (%)	Non-reducing sugar (mg/g extracted)
30	6.57	522.36
60	7.27	236.92

4. ผลการหาวิเคราะห์หาความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ระเหยได้

จากการนำเอทานอลที่ระเหยได้ ซึ่งมีอัตราการระเหยประมาณ 76 มิลลิลิตรต่อนาที มาหาความเข้มข้นด้วยเครื่อง Refractive index พบว่า หากทำการระเหยตัวทำละลายหนึ่งรอบ สารละลายเอทานอลที่ได้มีความเข้มข้นประมาณ 63% และเมื่อทำการระเหยซ้ำพบว่าสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นมากขึ้นคือประมาณ 85% และเมื่อนำเอทานอลที่ได้จากการระเหยมาทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบเพื่อตรวจสอบความปนเปื้อนด้วยเครื่อง GC พบว่าสารละลายเอทานอลมีองค์ประกอบเช่นเดียวกับเอทานอลบริสุทธิ์ 99% จึงสามารถนำเอทานอลที่ระเหยได้นำกลับมาใช้ในการสกัดต่อไปได้

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

การสกัดเปลือกลูกตาลในชุดทดลองขนาดเล็ก

จากการศึกษาการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากเปลือกลูกตาลพบว่า สารสกัดจากเปลือกลูกตาลยังไม่มีคุณสมบัติในการเป็นฟรีไบโอติกส์เนื่องจากไม่พบน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของฟรีไบโอติกส์ ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนพืชที่ใช้ในการทดลองมาเป็นเมล็ดขนุน ซึ่งในเมล็ดขนุนมีคุณสมบัติดังกล่าว

เครื่องสกัดแบบเบทซ์ขนาดโรงงานจำลอง

ชุดสกัดประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ คือ ถังสกัดขนาด 60 ลิตร หน่วยระเหยตัวทำละลายภายใต้สภาวะสุญญากาศขนาด 55 ลิตร เพื่อให้ความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการสกัด และถังน้ำหล่อเย็นสำหรับควบแน่นตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ จากการทดลองพบว่า ผลได้ของการสกัดเมื่อทดลองด้วยเครื่องสกัดแบบเบทซ์ขนาดโรงงานจำลองยังมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการสัมผัสกันระหว่างของแข็งกับตัวทำละลายไม่ทั่วถึง ทำให้ตัวทำละลายไม่สามารถเข้าไปละลายน้ำตาลออกมาได้ เพราะปริมาณของวัตถุดิบและตัวทำละลายที่มากเกินไป และวัตถุดิบอัดกันแน่น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังกล่าว สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากธรรมชาติต่อไป อีกทั้งได้ทราบถึงสภาวะเบื้องต้นในการสกัดสารฟรีไบโอติกส์จากพืชธรรมชาติ

การสกัดเมล็ดขนุนด้วยชุดสกัดแบบเบทซ์

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟรีไบโอติกส์พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ ตัวทำละลายเป็นเอทานอล 50% ขนาดของเมล็ดขนุน 1.0-2.0 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 หลังจากเวลาในการสกัด 90 นาทีการสกัดเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ และพบว่าการสกัดที่อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงโมเลกุลของโปรตีนภายในเมล็ดขนุนมาเคลือบผิวของเมล็ดขนุนไว้ ทำให้ไม่สามารถสกัดสารที่ต้องการออกมาได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาในแง่พลังงานที่ใช้ อุณหภูมิใน

การสกัดที่เหมาะสมคือ 30 °C ซึ่งยืนยันผลการทดลองด้วยค่าน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์เมื่อทดลองด้วยชุดทดลองขนาดเล็กอีกครั้งหนึ่ง

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากค่าผลได้จากการสกัดด้วยเครื่องสกัดแบบเบทซ์ยังมีค่าต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากระบบป้อนไหลเวียนของสารละลายหรือการสัมผัสระหว่างตัวทำละลายกับเมล็ดขนุนยังไม่ดีพอดังนั้นควรปรับปรุงระบบและ/หรือกระบวนการสกัดให้ดีขึ้น โดยอาจทำเป็นระบบหัวฉีด (Nozzle) จากด้านบนของถังสกัดเพื่อเพิ่มการสัมผัสระหว่างวัตถุดิบและสารละลาย
2. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับคุณภาพของสารที่สกัดได้ ดังนั้นน่าจะมีการศึกษารายละเอียดต่อไป
3. สารสกัดที่ได้ยังไม่มีควมบริสุทธิ์พอ ดังนั้นจึงควรศึกษาในส่วนของการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ และทำให้ได้สารที่ต้องการมีความบริสุทธิ์มากขึ้น
4. การสกัดสารโดยเลือกเฉพาะฟรีโบโอติกส์ ยังไม่คุ้มค่าในการลงทุน แต่การสกัดอาจได้สารชนิดอื่น เช่นสารประกอบฟีนอลิก หรือ Pectin ซึ่งเป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีประโยชน์ด้วย จึงควรมีการศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณสารชนิดอื่นร่วมด้วย

เอกสารอ้างอิง

- จารุณี มาสมจิตร, ชลธิชา เทพรักษ์. 2545. การศึกษาขบวนการผลิตตาลผง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.
- จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ. 2546. การถ่ายโอนมวลและหลักการปฏิบัติเฉพาะหน่วยพื้นฐาน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เฉลิมขวัญ คำคำ, มัลลิกา ชมนาวิง. 2548. คุณรู้จัก Prebiotics แล้วหรือยัง, ว.อาหาร ปีที่ 35 ฉ. 2 เมษายน- มิถุนายน 2548: น. 96-102
- ชาคริต ทองอุไร. 2544. หลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 2. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชาคริต ทองอุไร, สุธรรม สุขมณี, สรวีศ จิตรบรรเจิดกุล. 2539-2540. การสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยตัวทำละลาย: 15-18
- ธารารัตน์ สุกศิริ. 2542. Probiotic แบคทีเรียเพื่อสุขภาพ, ว.วิทยาศาสตร์ ปีที่ 53 ฉ. 4-6. พฤศจิกายน-ธันวาคม: 357-360.
- นฤชิต แว่วศรีส่อง. การปลูกขมิ้น., กรุงเทพมหานคร: บริษัท พิมพ์สวย จำกัด, 2529.
- นิรัญญา บุญดิน. 2550. การคัดเลือกโปรไบโอติกจากสัตว์ทะเลและการใช้สารสกัดจากพืชหัวเป็นพรีไบโอติก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ปิ่นมณี ขวัญเมือง. ฟังก์ชันนัลฟู้ดส์: อาหารเพื่อสุขภาพ (Functional Food: Food for Health), ว.ครุศาสตร์อุตสาหกรรม ปีที่ 4 ฉ.2 เมษายน-กันยายน 2548: น. 44-50

ฝ่ายข้อมูลส่งเสริมการเกษตร กองแผนงาน กรมส่งเสริมการเกษตร. สถิติการปลูกไม้ผลไม่ยืนต้น ปี 2538. กรุงเทพฯ: กองแผนงาน กรมส่งเสริมการเกษตร, 2542

ยรรยง สุขคล้าย. 2547. การสกัดสารสำคัญจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรโดยใช้ถังกวน, วิศวกรรมศาสตร์ มก. 18,52 (เม.ย.- ก.ค. 2547): 10-18

รายงานความก้าวหน้าโครงการการสกัดสารฟิโอบีโอติกส์จากพืช คณะอุตสาหกรรมการเกษตร, 2550

สมยศ พุ่งหว่า 2547. โครงการแผนที่ภูมิทัศน์ภาคใต้: ฐานเศรษฐกิจและทุนวัฒนธรรม. ตาลโตนด : พันธุ์ไม้. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย : สกว.

สุธรรม สุขมณี. 2548. การออกแบบวิศวกรรมเคมี. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., and Smith, F., 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28: 350-356.

Ekavall, J., Stegmark, R., 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: 13-18

Ellegard, L. Andersson, H. and Bosaeus, I. 1997. Inulin and oligofructose do not influence the absorption of cholesterol, or the excretion of cholesterol, Ca, Mg, Zn, Fe or bile acids but increases energy excretion in ileostomy subjects. *European Journal of Clinical Nutrition*, 51: 1-5

Erkkila, S and Petaja, E. 2000. Screening of commercial meat starter cultures at low pH in the presence of bile salts for potential probiotic use. *Meat Science*, 55: 297-300

- Fuller, R. 1993. Probiotic food current use and future developments. *IFI NR*, 3: 23-26
- Fooks, L. J., Fuller, R. and Gibson, G. R. 1999. Prebiotics, probiotics and human gut microbiology. *International Dairy Journal*, 9: 53-61
- Giannoccaro, E. Janewang, Y. Chen, P. 2006. Effect of Solvent, Temperature, Time, Solvent-to-Sample Ratio, Sample Size and Defatted on the Extraction of Soluble Sugars in Soybean. *Journal of Food Science*, 71: 59-64.
- Gibson, G. R. 2004. Prebiotic. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 18: 287-298
- Gibson, G. R. and Roberfroid, M. B. 1995. Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition*, 125: 1401-1412
- Herodez, S., Hadolin, M., Skerget, M., Knez, Z., 2003. Solvent extraction study of antioxidants from Balm (*Melissa officinalis L.*) leaves. *Food Chemistry*, 80: 275-282
- Kim, S., Kim, W., & In K. Hwang. 2003. Optimization of the extraction and purification of oligosaccharides from defatted soybean meal. *International Journal of food Science and technology*, 38: 337-342
- Kolida, S., Tuohy, K. and Gibson, G. R. 2002. Prebiotic effects of inulin and oligosaccharide. *British Journal of Nutrition*, 87: S193-S197
- Kontula, P., Jaskali, J., Nollet, L., Smet, I. D., Wright, A. V., Poutanan, K. and Sandholm, T. M. 1998. The colonization of a simulator of the human intestinal microbial ecosystem by a probiotic strain fed on fermented oat bran product effect on gastrointestinal microbiota. *Applied of Microbiology and Biotechnology*, 50: 246-252

- 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: 492-498.
- Pongnaravan, B., 2004. Subcritical water extraction of anthraquinones from roots of *morinda citrifolia*. Chulalongkorn University
- Siddeshwar, S., 2008. Screening and Estimation of Pre-biotic Oligosaccharides in Fruits and Vegetables. *Biotechnology and Pharmacy*, 2(1): 183-191
- Treybal, R.E. 1980. Mass-transfer operation. 3rd ed. McGraw-Hill Book Company.
- Wongkittipong, R., Prat, L., Damronglerd, S., Gourdon, C., (2004). Solid - liquid extraction of andrographolide from plants-experimental study, kinetic reaction and model. *Separation and Purification Technology*, 40: 147-154
- Wongputtisin, P., 2003. Selection of oligosaccharides from some local plants for utilizing as prebiotics. Chiang Mai University
- Xiaoli, X., 2008. Determination of oligosaccharide contents in 19 cultivars of chickpea (*Cicer arietinum* L) seeds by high performance liquid chromatography. *Food Chemistry*, 111: 215-219
- www.songkhla.go.th/newweb45/data/snj_songkhla/March48/songkhla48.doc
(Accessed on 13 March 2007)
- <http://www.doae.go.th/plant/kanun.htm>
(Accessed on 13 March 2007)
- www.pk-siam.com/website/mart/fruits/jackfruit/jackfruit.html
(Accessed on 13 March 2007)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การออกแบบชุดสกัดแบบแบทช์

การเลือกวัสดุเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการในช่วงต้นๆของการกำหนดรายละเอียดในการออกแบบ เนื่องจากวัสดุที่ใช้จะต้องสามารถทนต่อภาวะการดำเนินงานของเครื่องมือ มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้เครื่องมือเหล่านั้นสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย รวมทั้งต้องไม่ทำให้ราคาของเครื่องมือที่จัดสร้างขึ้นสูงเกินไป

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกวัสดุ (สุธรรม สุขมณี, 2548)

การเลือกใช้วัสดุในการออกแบบสร้างเครื่องมือในกระบวนการทางเคมี มีสิ่งจำเป็นที่ต้องคำนึงถึง ดังนี้

1. ปัจจัยทางเคมี (Chemical factor) เป็นความต้านทานต่อสารเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีภายใต้กระบวนการของวัสดุที่เลือกใช้สร้างหรือเป็นส่วนประกอบของเครื่องมือ
2. ปัจจัยทางกายภาพ (Physical factor) ประกอบด้วย
 - ความแข็งแรงภายใต้ภาวะของกระบวนการ ถือเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง
 - การนำความร้อน (Thermal conductivity) หรือไฟฟ้า (Electrical conductivity)
 - ความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Toughness) ความยืดหยุ่น (Elasticity)
 - ความพรุน (Porosity) ความหนาแน่น (Density)
 - ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue) ความคราก (Creep)
 - ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเชิงกล
 - ความยากง่ายในการขึ้นรูป

ข้อแนะนำเกี่ยวกับสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะและโลหะผสมบางชนิด แสดงใน

ตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะและโลหะผสมบางชนิด

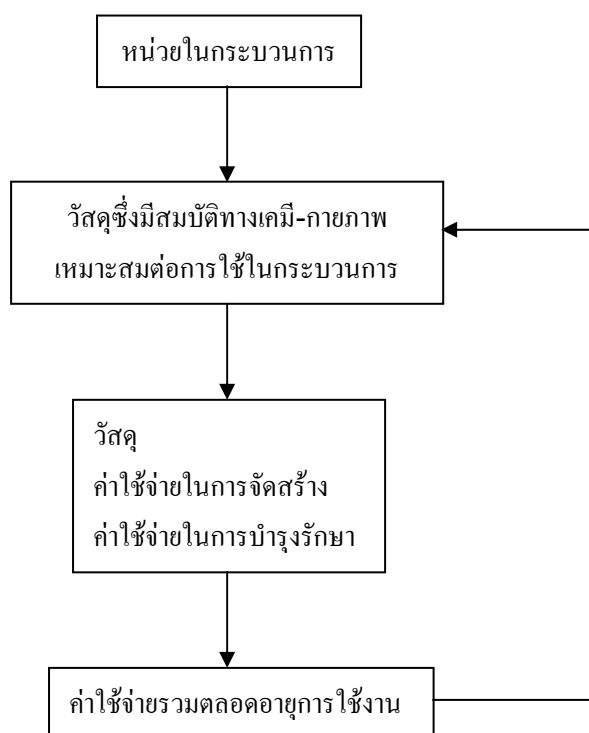
Metal and Alloy	Machinig	Cold working	Hot workig	Casting	Welding	Annealing temp. °C
Mild steel	S	S	S	D	S	750
Low alloy steel	S	D	S	D	S	750
Cast iron	S	U	U	S	D/U	-
Stainless steel (18Cr, 8Ni)	S	S	S	D	S	1050
Nickel	S	S	S	S	S	1150
Monel	S	S	S	S	S	1100
Copper	D	S	S	S	D	800
Brass (Admiralty)	S	D	S	S	S	700
Aluminium	S	S	S	D	S	550
Dural	S	S	S	-	S	350
Lead	-	S	-	-	S	-
Titanium	S	S	U	U	D	-

S เป็นที่น่าพอใจ D ยากหรือต้องใช้เทคนิคพิเศษ U ใช้ไม่ได้ - ไม่มีข้อมูล

- ปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ (Economic factor) คำนึงถึงราคาวัสดุ ค่าใช้จ่ายในการสร้าง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และอายุการใช้งาน

ขั้นตอนในการเลือกวัสดุ

ขั้นตอนของการเลือกวัสดุ อาจแสดงได้ด้วยไดอะแกรมง่ายต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 38 แผนผังแสดงขั้นตอนการเลือกวัสดุ

ในบางกรณีการเลือกใช้วัสดุราคาถูกและเปลี่ยนเฉพาะส่วนที่ชำรุดของเครื่องมือ เพื่อยืดอายุการใช้งาน อาจจะประหยัดกว่าการเลือกใช้วัสดุคุณภาพสูง ราคาแพง ซึ่งมีอายุการใช้งานยาวนานก็ได้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงควบคู่ไปกับความประหยัดคือ ความปลอดภัยต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม เมื่อเลือกใช้วัสดุนั้นๆ มาสร้างเครื่องมือ

สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ข้อมูลทั่วไปของสมบัติทางกายภาพบางตัวของวัสดุต่างๆ ที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมสำหรับสร้างเครื่องมือหรือหน่วยในกระบวนการผลิตทางเคมี ได้สรุปไว้ในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 สมบัติทางกายภาพของโลหะและโลหะผสมที่ใช้ทั่วไป

Metal and Alloy	Tensile Strength (N/mm ²)	0.1% Proof stress (N/mm ²)	Modulus of elasticity (kN/mm ²)	Hardness (Brinell)	Specific gravity (-)	Cost Index (-)
Mild steel	430	220	210	100-200	7.9	1
Low alloy steel	420-660	230-460	210	130-200	7.9	2
Cast iron	140-170	-	140	150-250	7.2	-
Stainless steel (18Cr, 8Ni)	>540	200	210	160	8.0	5-6
Nickel (> 99% Ni)	500	130	210	80-150	8.9	23
Monel	650	170	170	120-250	8.8	25
Copper	200	60	110	30-100	8.9	6
Brass (Admiralty)	400-600	130	115	100-200	8.6	7
Aluminium	80-150	-	70	30	2.7	7
Dural	400	150	70	100	2.7	-
Lead	30	-	15	5	11.3	-
Titanium	500	350	110	150	4.5	26

1. ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) เป็นค่าที่ใช้บอกความแข็งแรงพื้นฐานของวัสดุ คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้จากเครื่องวัดแรงดึงมาตรฐาน
2. ความเค้นในการออกแบบของวัสดุ คือค่าที่ใช้ในการออกแบบใดๆเป็นค่าที่อิงมาจากค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง หรือจากค่า Proof Stress
3. ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) คือค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวตามที่กำหนดอย่างถาวร โดยทั่วไปใช้ค่าร้อยละ 0.1
4. ความแกร่ง (Stiffness) คือความสามารถต้านทานต่อการงอหรือการแอ่นตัว มีค่าขึ้นกับ Elastic Modulus ของวัสดุและรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนนั้นๆ
5. ความเหนียว (Toughness) เป็นสมบัติที่เชื่อมโยงอยู่กับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง เป็นค่าที่ใช้บอกความต้านทานต่อการแตกร้าวของวัสดุ

6. ความแข็ง (Hardness) ความแข็งที่ผิวซึ่งวัดจากเครื่องวัดมาตรฐาน คือค่าที่ใช้บอกความต้านทานต่อการขีดข่วนของวัสดุ สมบัติข้อนี้ถือเป็นสมบัติที่สำคัญ เมื่อต้องออกแบบเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการเก็บของแข็ง หรือขนถ่ายของเหลวที่มีสารแขวนลอยเป็นของแข็ง
7. ความล้า (Fatigue) ความล้าเกิดขึ้นกับเครื่องมือที่ต้องรับแรงกระทำซ้ำแล้วซ้ำอีก เป็นเครื่องมือที่มีการหมุน เช่น ปีม เครื่องอัด และเครื่องมือที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันเป็นวัฏจักร
8. ความคราก (Creep) คือการยืดตัวออกทีละน้อยของวัสดุ เมื่อรับแรงดึงอย่างสม่ำเสมอเป็นระยะเวลานาน โดยทั่วไปจะมีผลชัดเจนเมื่อเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง
9. ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ ความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่า Elastic Modulus ของวัสดุ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลงจาก 450 N/mm^2 ที่ 25°C เหลือเพียง 210 N/mm^2 ที่ 500°C (ลดลงประมาณ 50%) ค่า Elastic Modulus มีค่าลดลงจาก 200 kN/mm^2 ที่ 25°C เหลือเพียง 150 kN/mm^2 ที่ 500°C (ลดลงประมาณ 25%) การออกแบบเครื่องมือซึ่งใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ ควรเลือกใช้วัสดุซึ่งคงสภาพความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำไว้มากที่สุด ในกรณีของการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เหล็กปลอดสนิมมีสมบัติเหนือกว่าเหล็กกล้า เมื่อเครื่องมือต้องรับความเค้นมากๆ ที่อุณหภูมิสูง วัสดุที่เลือกใช้ต้องมีความต้านทานต่อการคราก เช่น การใช้โลหะผสมพิเศษ Inconel ในท่อไฟ (Furnace Tubes) ของหม้อน้ำ (Boiler)

ความต้านทานต่อการกัดกร่อน

1. ลักษณะของการกัดกร่อน ในส่วนของการเลือกวัสดุที่เหมาะสมต่อภาวะการกัดกร่อนต่างๆ ของแบ่งลักษณะของการกัดกร่อนออกเป็นกลุ่มๆ ดังนี้
 - การกัดกร่อนสม่ำเสมอ (Uniform)
 - การกัดกร่อนกัลวานิก (Galvanic)
 - การกัดกร่อนเฉพาะจุด (Pitting)
 - การกัดกร่อนระหว่างอนุ (Intergranular)
 - การกัดกร่อนจากความเค้น (Stress)
 - การขุดสี (Erosion)
 - การกัดกร่อนจากความล้า (Fatigue)
 - การออกซิไดส์ที่อุณหภูมิสูง (Oxidation)

- ปฏิกริยากับไฮโดรเจน (Hydrogen Embrittlement)
- 2. อัตราการกัดกร่อน สำหรับการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ นิยมแสดงอัตราการกัดกร่อนในรูปของความหนาที่ลดลงต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา หรืออาจจะแสดงในรูปของมวลที่ลดลงต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา สมการที่ใช้หาอัตราการกัดกร่อนจากการทดลองเป็นดังนี้

$$\text{อัตราการกัดกร่อน (mm/y)} = \frac{10^6 w}{tA\rho}$$

เมื่อ	w	=	มวลที่หายไป (กรัม)
	t	=	เวลา (ปี)
	A	=	พื้นที่ผิว (ตารางมิลลิเมตร)
	ρ	=	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

อัตราการกัดกร่อนมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารกัดกร่อน โดยทั่วไปอัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ขณะที่ผลของความเข้มข้นต่ออัตราการกัดกร่อนมีความซับซ้อนมากกว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสารละลายกรดกำมะถัน มีค่าสูงมากในสารละลายเจือจางและความเข้มข้นเกินร้อยละ 70 ขณะที่ค่าที่สามารถยอมรับได้สำหรับสารละลายกรดความเข้มข้นปานกลาง ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ของวัสดุขึ้นอยู่กับ ราคา วัสดุ การใช้งาน โดยเฉพาะความปลอดภัยและอายุการใช้งาน ตารางที่ 12 แสดงเกณฑ์หยาบๆ ที่ใช้ตัดสินในการเลือกวัสดุตามอัตราการกัดกร่อนของวัสดุต่างๆ

ตารางที่ 12 อัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้

การใช้งานวัสดุ	อัตราการกัดกร่อน (มม./ปี)	
	วัสดุราคาถูก	วัสดุราคาแพง
ใช้ได้ดี	<0.25	<0.125
ใช้อย่างระมัดระวัง	<0.75	<0.375
ใช้เฉพาะเมื่อมีการสัมผัสในช่วงสั้นๆ	<1.5	<0.75
ใช้ไม่ได้	>1.5	>0.75

3. การเลือกวัสดุที่ต้านทานต่อการกัดกร่อน ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสม ต้องมีข้อมูลของสิ่งแวดล้อมในกระบวนการชัดเจน ปัจจัยต่างๆที่ต้องนำมาพิจารณานอกเหนือจากข้อมูลการกัดกร่อนทางเคมีหลักคือ
- อุณหภูมิ
 - ความดัน
 - ความเป็นกรด-ด่าง (pH)
 - สิ่งเจือปนปริมาณน้อย (Trace)
 - ปริมาณการเติมอากาศ
 - ความเร็วและการกวนในกระแส
 - อัตราการถ่ายโอนความร้อน

การปนเปื้อน

ปัญหาการปนเปื้อนของกระแสในกระบวนการหรือของผลผลิต จากโลหะหรือจากการกัดกร่อน อาจเป็นปัจจัยหลักในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมเหนือปัจจัยอื่น เช่น การใช้เหล็กปลอดสนิมหรืออลูมิเนียมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เหมาะสมมากกว่าเหล็กกล้า เพื่อป้องกันสนิมที่จะติดไปกับเส้นใยหรือตัวสิ่งทอ หรือในอุตสาหกรรมอาหารที่อาจมีการปนเปื้อนของวัสดุลงไปในการผลิตภัณฑอาหารได้

สำหรับกระบวนการที่มีการใช้สารเร่ง (Catalyst) การเลือกใช้วัสดุก็ต้องการระมัดระวังการปนเปื้อนไปยังตัวสารเร่ง ซึ่งอาจไปทำลายหรือลดประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งนั้นๆ นอกจากนี้ ยังมีตัวอย่างอื่นๆที่แสดงถึงประเด็นที่ต้องระมัดระวังในการเลือกวัสดุ โดยพิจารณาจากการปนเปื้อนของโลหะบางชนิดในปริมาณที่ไม่มากนักในกระบวนการ เช่น

- ไม่ใช่โลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสมของทองแดง เงิน โปรท หรือทอง ในการสร้างเครื่องมือที่ต้องสัมผัสกับอะเซทิลีน เพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบอะเซทิลไซด์ ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดการระเบิด
- ปริมาณโปรทเพียงเล็กน้อยในรูปไอหรือละอองในกระแสกระบวนการ ทำให้เกิดความเสียหายต่อท่อหรือเครื่องมือที่ทำด้วยทองเหลือง เนื่องจากปรากฏการณ์รวมตัวของทองแดงกับโปรทเป็นสารกัมมันต์โปรท-ทองแดง
- ปัญหาการแตกร้าวของท่อเหล็กปลอดสนิม เนื่องจากการปนเปื้อนของสังกะสีในกระแสกระบวนการ

ชนิดของวัสดุประเภทโลหะ

เป็นวัสดุกลุ่มที่ใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งกระบวนการผลิตส่วนใหญ่ต้องใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่อปัจจัยทางเคมี และยังมีความแข็งแรงภายใต้สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิและความดันสูง วัสดุกลุ่มนี้อาจแบ่งย่อยออกเป็น โลหะประกอบเหล็ก ซึ่งมีสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกันมาก ขึ้นกับองค์ประกอบของส่วนผสม ส่วนใหญ่โลหะชนิดนี้จะมีเหล็กประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 95 และโลหะไม่ใช่เหล็ก ซึ่งอาจมีเหล็กเป็นส่วนประกอบอยู่ในปริมาณไม่มากนัก รายละเอียดคร่าวๆของวัสดุประเภทโลหะชนิดต่างๆมีดังนี้

เหล็กหล่อ (Cast Iron) ประกอบด้วยคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 1.7 เหล็กหล่อมีความแข็งแรงเปราะและพราะ สามารถกลึงแต่งรูปได้ โลหะผสมของเหล็กหล่อมีการเติมโครเมียม นิกเกิล ทองแดงหรือ โมลิบดีนัม เพื่อให้มีความต้านทานต่อการสึกกร่อน และทนต่อความร้อนดีขึ้น เหล็กหล่อซึ่งมีปริมาณซิลิกอนสูง (ร้อยละ 14-15) มีความทนทานต่อการกัดสีสูงมากแต่ไม่สามารถกลึงแต่งรูปได้เลย โดยเหล็กหล่ออาจแบ่งกลุ่มย่อยออกได้ดังนี้

- เหล็กหล่อเทา (Gray Cast Iron) ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 1.7-4.5 บางส่วนอยู่ในรูปของกราฟไฟท์ มีซิลิกอนและมันганиตเป็นส่วนผสม กลึงแต่งรูปได้ ขณะที่ต้องใช้เทคนิคพิเศษในการเชื่อม เป็นวัสดุที่ไม่ทนต่อการกระแทก แต่สามารถดูดซับการสั่นได้ดีมาก ทนกรดและด่าง ความเข้มข้นสูงได้ดี นิยมนำมาใช้เป็นท่อ ปิ๊ม และวาล์วในอุตสาหกรรมกรดกำมะถัน
- เหล็กหล่อขาว (White Cast Iron) ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 1.7 ขึ้นไป ในรูปของการรวมตัวมีซิลิกอนและมันганиตเป็นส่วนผสม มีความเปราะ กลึงได้ยาก ทนต่อการกัดสีและการสึกหรอได้ดีมาก นิยมใช้เป็นวัสดุบุผิวหน้า (Liner) ลูกบิด (Ball) ใบพัดปิ๊ม (Impeller)
- เหล็กหล่อซิลิกอน (High Silicon Cast Iron) ประกอบด้วยซิลิกอนร้อยละ 13-16 ใช้ชื่อทางการค้าว่า Duriron และ Corrosiron มีความแข็งแรงและเปราะ กลึงยาก ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก ใช้ได้ดีกับกรดกำมะถันทุกระดับความเข้มข้น

เหล็กถัก (Wrought Iron) มีคาร์บอนร้อยละ 0.02-0.04 มีเส้นเหล็กซิลิก้าอยู่ร้อยละ 1-2 เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการสึกกร่อน เหล็กชนิดนี้สามารถเชื่อมต่อดีได้ง่าย แต่มีใช้น้อยในอุตสาหกรรมนอกจากใช้งานพิเศษเนื่องจากมีราคาแพง

เหล็กกล้า (Steel) มีคาร์บอนอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.05-1.6 มีธาตุอื่นๆ เช่น มันганиต ฟอสฟอรัส กำมะถัน ซิลิกอน นิกเกิล โครเมียม โมลิบดีนัม วานาเดียม ฯลฯ เป็นส่วนผสมอยู่ด้วย การแยกประเภทเหล็กกล้าโดยทั่วไป ถือเอามาตรฐานของ SAE (Society of Automotive Engineering)

เหล็กกล้าปลอดสนิม (Stainless Steel) บางมาตรฐานได้แยกเหล็กปลอดสนิมออกจากกลุ่มของเหล็กและเหล็กกล้า โดยเหล็กปลอดสนิม ใช้เป็นวัสดุต้านทานต่อการกัดกร่อนมากที่สุด

อุตสาหกรรมเคมี สมบัติด้านทานการกัดกร่อนของเหล็กปลอดสนิม ได้จากการเติมโครเมียมไม่น้อยกว่าร้อยละ 12 เพื่อต้านทานต่อการกัดกร่อนในภาวะที่เกิดออกซิไดซ์ (Oxidizing) และเติมนิกเกิล เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในภาวะที่ไม่เกิดออกซิไดซ์ (Non-oxidizing)

การแบ่งเหล็กปลอดสนิม อาจแบ่งหายๆตามปริมาณของโครเมียมและนิกเกิล ออกได้ 3 กลุ่มคือ เฟอไรต์ (Ferrite) ออเทนไนต์ (Austenite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) สำหรับมาตรฐาน AISI (American Iron and Steel Institute) ได้แบ่งเหล็กปลอดสนิมตามองค์ประกอบ โดยกำหนดชนิดด้วยระบบตัวเลขสามหลัก ที่เริ่มต้นจากเลข 3 เช่น 304 310 316 321 347 เป็นต้น เหล็กปลอดสนิมตามมาตรฐาน AISI ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ 304 ซึ่งมีโครเมียมประมาณร้อยละ 18 และนิกเกิลประมาณร้อยละ 8 จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เหล็กปลอดสนิม 18-8 และชนิด 316 ซึ่งมีการเติม โมลิบดีนัม เพื่อเพิ่มสมบัติด้านทานการกัดกร่อนในภาวะรีดิวซ์ ในที่นี้ ได้สรุปข้อมูลเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างเหล็กกล้ากับเหล็กปลอดสนิมที่อุณหภูมิต่างๆไว้ในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าความเค้นในการออกแบบของเหล็กกล้าและเหล็กปลอดสนิม (N/mm²)

ชนิดของเหล็ก	อุณหภูมิ (°C)			
	300	400	500	600
เหล็กกล้า	77	62	31	-
เหล็กปลอดสนิม	108	100	92	62

การออกแบบถึงความดัน ถังบรรยากาศ และถังสุญญากาศ

การแบ่งประเภทของถัง

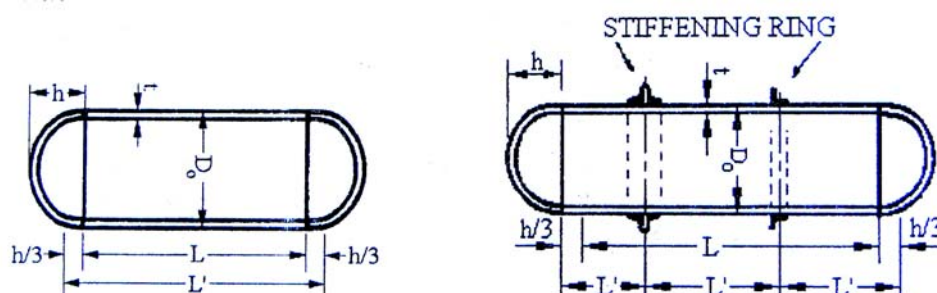
ถังที่ใช้ในอุตสาหกรรม มีรูปร่างต่างๆกัน เช่น ถังทรงกลม ถังทรงกระบอก หรือ ถังทรงสี่เหลี่ยม ที่นิยมใช้กันมากคือ ใช้ถังกลมเป็นถังเก็บวัตถุดิบหรือผลผลิต ส่วนถังทรงกระบอก อาจใช้เป็นถังเก็บ ถังปฏิกรณ์ คอลัมน์ หรือหอสูง (Tower) ในที่นี้ แบ่งประเภทของถังในอุตสาหกรรมตามความดันใช้งานคือ ความดันใช้งานสูงกว่าบรรยากาศเป็นประเภทถึงความดัน ความดันใช้งานต่ำกว่าบรรยากาศเป็นประเภทถังสุญญากาศ และความดันใช้งานเท่ากับบรรยากาศเป็นถังบรรยากาศ

รายละเอียดหรือข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการออกแบบถัง

ในการออกแบบหรือกำหนดรายละเอียดของถัง ผู้ออกแบบต้องมีข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นพอสมควร ข้อมูลบางส่วนเป็นความต้องการของผู้ใช้ บางส่วนมาจากกระบวนการหรือหน่วยผลิต รวมทั้งข้อมูลเสริมที่ผู้ออกแบบต้องหาหรือกำหนดขึ้น เช่น การใช้งาน อุณหภูมิและความดันใช้งาน สารที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ ตำแหน่งที่ตั้ง ช่องหรือทางเปิดและการเชื่อมต่อกับหน่วยอื่น รายละเอียดของระบบถ่ายโอนความร้อน อุปกรณ์ภายในต่างๆ ข้อมูลสมบัติทางเคมี-กายภาพของวัสดุ เป็นต้น

เทอมหรือศัพท์เทคนิคต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบถัง

1. **ถังถัง (Shell)** คือส่วนประกอบหลักของถัง (Vessel) เป็นรูปกลม ทรงกระบอกหรือสี่เหลี่ยม ขึ้นรูปจากแผ่นโลหะ หรือวัสดุอื่น ต่อเชื่อมกันโดยใช้หมุดยึด (Riveted) เชื่อม (Welded) หรือวิธีการอื่น ภาพประกอบที่ 39 แสดงถึงรูปทรงกระบอกวางในแนวระดับ L คือ ความยาวและความสูงของถัง L' คือระยะยังผล (Effective length) ของถังสำหรับการคำนวณความหนาของถังสุญญากาศ h คือ ความสูงของฝาถัง

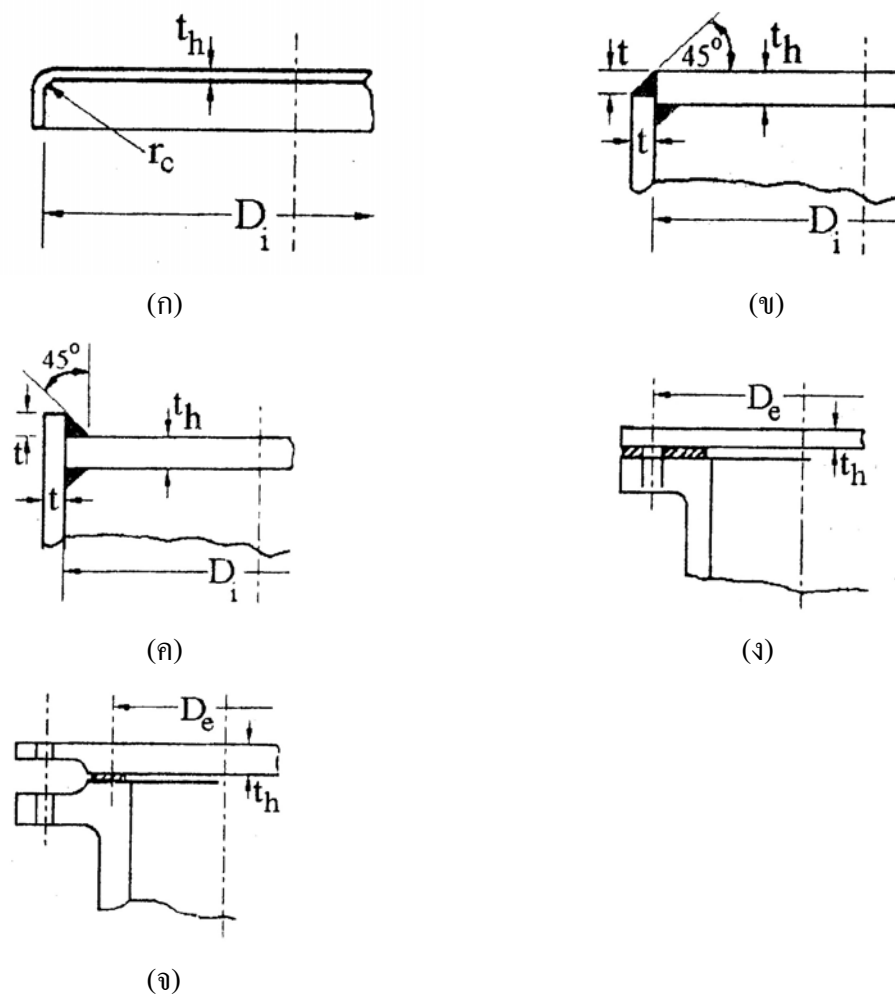


ภาพประกอบที่ 39 ถังทรงกระบอก

2. ฝาถัง (Head หรือ Closer)

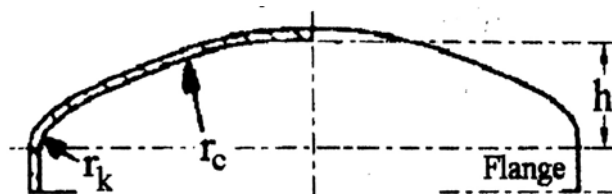
คือส่วนที่ใช้ปิดถังด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน ฝาถังที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายแบบ เช่น

2.1 ฝาถังแบน (Flat Plate) มีลักษณะเป็นแผ่นแบน อาจเชื่อมต่อกับตัวถังเลย หรือติดกับตัวถังโดยใช้หน้าแปลน (Flange) และกรูร้อยพร้อมปะเก็น (Gasket) กันการรั่วซึม ฝาปิดชนิดนี้สร้างง่าย ราคาถูก รวมทั้งไม่กินที่ ข้อเสียคือการกระจายแรงเค้นไม่ดี ทนความดันสูงไม่ได้ จึงนิยมใช้กับถังขนาดเล็ก เครื่องมือถ่ายโอนความร้อนหรือปิดช่องคน (Manhole) และช่องมือ (Handhole) ภาพประกอบที่ 40 แสดงฝาถังแบบชนิดต่างๆ (ก) ฝาถังแบบไร้ตะเข็บ (ข) และ (ค) ฝาถังแบบเชื่อมติดกับตัวถัง (ง) และ (จ) เป็นฝาถังแบบแบนติดหน้าแปลน (Flange)



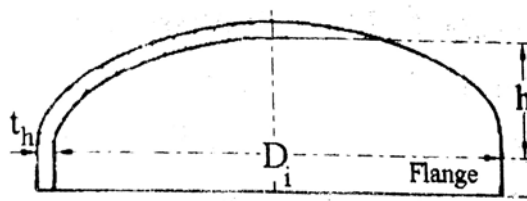
ภาพประกอบที่ 40 ฝาถังแบบแบน

2.2 ฝาถังแบบจาน (Dished) เป็นฝาถังแบบโค้ง ในลักษณะของวงแหวน (Torus) ต่อเชื่อมกับส่วนของทรงกลม (Sphere) รัศมีของทรงกลมคือ Crown Radius (r_c) ส่วนรัศมีของวงแหวนที่หักมุมคือ Knuckle Radius (r_k) ดังภาพประกอบที่ 41 เป็นฝาถังแบบที่นิยมใช้มากสำหรับช่วงความดันใช้งานไม่เกิน 15 บรรยากาศ กินที่ค่อนข้างน้อย การกระจายแรงเค้นภายในค่อนข้างดี ราคาค่อนข้างถูก สามารถผลิตแบบไร้ตะเข็บ (Seamless) ได้ สำหรับช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ตั้งแต่ 300-4000 มิลลิเมตร



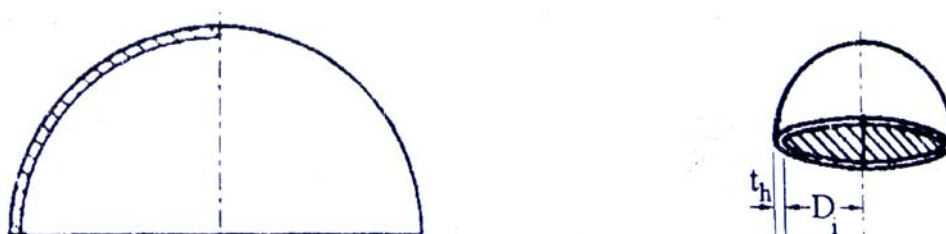
ภาพประกอบที่ 41 ฝาถังแบบจาน

2.3 ฝาถังรูปไข่ (Ellipsoidal Head) เป็นฝาถังรูปโค้ง ในลักษณะการหมุนส่วนโค้งครึ่งรูปไข่ ที่จุดศูนย์กลางของตัวถัง ดังภาพประกอบที่ 42 โดยแกนหลัก (Major Axis) ของรูปไข่คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังและแกนรอง (Minor Axis) คือสองเท่าของความสูงฝาถัง (h) ฝาถังรูปไข่มาตรฐานมีสัดส่วนระหว่างแกนหลักต่อแกนรองเท่ากับ 2:1 หรือความสูงของฝาถังเท่ากับ 0.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางตัวถัง เมื่อเปรียบเทียบกับฝาถังแบบจาน ฝาถังแบบนี้ มีการกระจายแรงเค้นภายในดีกว่า กินที่มากกว่า ราคาสูงกว่า ความดันใช้งานตั้งแต่ 10 บรรยากาศขึ้นไป มีฝาถังชนิดนี้แบบไร้ตะเข็บเช่นเดียวกัน



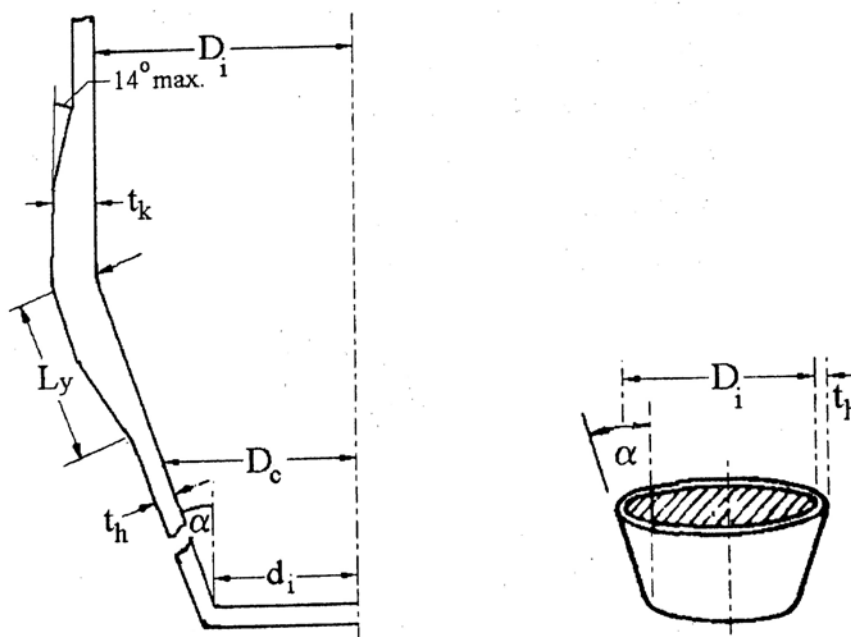
ภาพประกอบที่ 42 ฝาถังรูปไข่

2.4 ฝาถังครึ่งทรงกลม (Hemispherical Head) เป็นฝาถังครึ่งทรงกลม เป็นฝาถังซึ่งมีการกระจายแรงเค้นได้ดีที่สุด สามารถรับแรงดันได้ประมาณสองเท่าของฝาถังแบบจาน ซึ่งมีขนาดและความหนาเดียวกัน กินที่ และมีราคาแพงกว่าฝาถังรูปไข่ การจัดสร้างทำได้ทั้งแบบไร้ตะเข็บ และแบบเชื่อมต่อส่วนโค้งสำหรับฝาถังขนาดใหญ่ ภาพประกอบที่ 43 แสดงฝาถังรูปครึ่งทรงกลม



ภาพประกอบที่ 43 ฝาถังรูปครึ่งทรงกลม

2.5 ฝาถังทรงกรวย (Conical Head) เป็นฝาถังรูปกรวย ปลายแหลมหรือปลายตัด ใช้เพื่อให้การไหลสม่ำเสมอขึ้น หรือแยกอนุภาคของของแข็งในอุปกรณ์ เช่น ถังเก็บของแข็ง (Hopper) เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) เครื่องตกผลึก (Crystallizer) การกระจายแรงเค้นภายในไม่ดี บางกรณีต้องเสริมความแข็งแรงบริเวณหักมุม (Knuckle Radius) ถ้าต้องนำไปใช้งานที่ความดันสูง ภาพประกอบที่ 44 แสดงฝาถังทรงกรวย D_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของตัวถัง d_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของปลายฝาถัง t_k คือความหนาของฝาถังตรงจุดหักมุม t_h คือความหนาของฝาถังส่วนอื่น α คือ มุมเอียงของฝาถัง



ภาพประกอบที่ 44 ฝาถังทรงกรวย

2.6 ความจุและพื้นที่ผิวของถัง ความจุของถัง (Vessel capacity, V) คือปริมาตรภายในของถังปิด หรือปริมาตรของถังส่วนที่ใช้บรรจุสารในกระบวนการ เป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดมิติของถังตามความต้องการของกระบวนการผลิต พื้นที่ผิวของถัง (Vessel surface area, A) คือพื้นที่ผิวภายในของถังทั้งหมด ซึ่งเมื่อนำมาคูณกับค่าความหนาของถังแต่ละส่วน (ตัวถังและฝาถัง) จะเป็นค่าโดยประมาณของปริมาตรของวัสดุที่ใช้ในการสร้างถัง ซึ่งใช้เป็นข้อมูลคร่าวๆ ในการประเมินน้ำหนักของถังเปล่าหรือประเมินราคาของถัง สมการที่ใช้ในการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 สมการในการคำนวณปริมาตรและพื้นที่ผิวของถังและส่วนประกอบ

รายการ	ค่าที่คำนวณ	สมการ
ถังทรงกลม	ปริมาตร (เต็ม)	$V = 0.524D_i^3$
	ปริมาตร (บางส่วน)	$V = 0.524D_i^2h$
	พื้นที่ผิว	$A = 3.1416D_i^2$
	ปริมาตร (เต็ม)	$V = 0.785D_i^2L + 2V_{head}$
ถังทรงกระบอก	ปริมาตร (บางส่วน, วางตั้ง)	$V = 0.785D_i^2h + V_{head}$
	ปริมาตร (บางส่วน, วางนอน)	$V = 0.25D_i^2L(0.0175\alpha - \sin\alpha \cos\alpha) + 1.5a^2(1 - \frac{a}{3})V_{head}$ เมื่อ $a = \frac{2h}{D_i}$ และ $\cos\alpha = 1-a$
	พื้นที่ผิว	$A = 3.1416D_iL + 2A_{head}$
ฝาถังรูปไข่ มาตรฐาน ($h=D_i/4$)	ปริมาตร	$V_{head} = 0.131D_i^3$
	พื้นที่ผิว	$A_{head} = 1.09D_i^2$
ฝาถังรูปไข่	ปริมาตร	$V_{head} = 0.524D_i^2h$
	พื้นที่ผิว	$A_{head} = 0.785D_i^2 \left[1 + \frac{8h^2}{D_i^2} \left(1 - \frac{h}{D_i} \right) \right]$
ฝาถังแบบจาน	ปริมาตร	$V_{head} = 0.524D_i^2h$
	พื้นที่ผิว	$A_{head} = 0.524 \left[D_i^2 + 8h^2 \left(1 - \frac{h}{D_i} \right) \right]$
ฝาถังทรงกรวย	ปริมาตร	$V_{head} = 0.262h(D_i^2 + d_iD_i + d_i^2)$
	พื้นที่ผิว	$A_{head} = 0.785(D_i^2 + d_i^2) \sqrt{4h^2 + (D_i - d_i)^2} + 0.785d_i^2$ เมื่อ $h = 0.5(D_i - d_i)\cot\alpha$

ขนาดที่เหมาะสมของถัง

สำหรับถังรูปทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางมีความแน่นอนตามความจุของถังที่กำหนด ส่วนถังรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของตัวถังมีได้หลายค่าสำหรับความจุเดียวกัน การหาเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่เหมาะสมนี้ เป็นการคำนวณซ้ำแล้วซ้ำอีก (Iteration) เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม และเสียค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างต่ำสุด โดยปกติมักใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ เนื่องจากการคำนวณหาค่าความหนาของถังซึ่งสามารถใช้งานได้ตามอุณหภูมิและความดันที่กำหนด ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังด้วย ในที่นี้ขอแสดงขั้นตอนการคำนวณไว้คร่าวๆ ดังนี้

1. กำหนดอุณหภูมิ ความดัน และความจุในการออกแบบและหาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของของไหลที่ใช้
2. เลือกวัสดุ วิธีการเชื่อมต่อ และกำหนดชนิดของฝาถัง
3. กำหนดค่าความเค้นในการออกแบบ
4. กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตัวถัง
5. คำนวณความยาวของตัวถังตามความจุของถัง
6. กำหนดค่าความหนาของตัวถังและฝาถัง
7. ประมาณค่าวัสดุที่ใช้
8. ประเมินราคาถังที่สร้างขึ้นตามรายละเอียดที่กำหนด และใช้วัสดุที่เลือกในการจัดสร้าง
9. ใช้เงื่อนไขด้านค่าใช้จ่ายเพื่อให้ได้รายละเอียดเฉพาะของถังที่เหมาะสมที่สุด

การกำหนดความหนาของถังและฝาถัง

การกำหนดความหนาของถังและฝาถัง เมื่อมีรายละเอียดเกี่ยวกับมิติต่างๆ ของถัง เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และภาวการณ์ใช้งานของถังแล้ว ขึ้นกับลักษณะการใช้งาน เช่น ใช้เป็นถังความดัน เป็นถังบรรยากาศ หรือเป็นถังสุญญากาศ นอกจากนี้ สำหรับถังทรงกระบอกที่มีสัดส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากๆ และติดตั้งในแนวตั้ง ที่เรียกว่า คอลัมน์ (Column) หรือหอคอย (Tower) ซึ่งต้องรับแรงกระทำในลักษณะผสมผสาน (Combined loading) ความหนาที่กำหนดจะต้องสามารถรองรับความเค้นที่เกิดจากแรงกระทำลักษณะต่างๆ อย่างปลอดภัยทุกกรณี ขั้นตอนการกำหนดความหนาของถังและฝาถัง สำหรับการใช้งานในกรณีต่างๆ ข้างต้น เป็นดังนี้

ขั้นตอนการกำหนดความหนาของถังความดัน (Pressure Vessel)

1. กำหนดค่าอุณหภูมิในการออกแบบ (Design Temperature, T_{des})

- กรณีใช้วัสดุชนิดเดียวโดยไม่มีกรับผิวชั้นใน กำหนดจาก ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เป็นไปได้ บวก 30°C สำหรับการใช้งานตั้งแต่อุณหภูมิห้องขึ้นไปหรือใช้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่เป็นไปได้ไปสำหรับการใช้งานตั้งแต่อุณหภูมิห้องลงมา

- กรณีใช้วัสดุสองชนิดหรือมากกว่าประกบกัน มักใช้ในกรณีอุณหภูมิสูง โดยวัสดุชั้นในเป็นวัสดุทนความร้อน วัสดุชั้นนอกเป็นตัวเสริมความแข็งแรง จะต้องคำนวณค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านในของวัสดุชั้นนอก จากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งต้องไม่เกินอุณหภูมิสูงสุดที่วัสดุชั้นนอกจะสามารถรับได้

2. กำหนดค่าความดันในการออกแบบ (Design Pressure, P_{des}) โดยใช้ค่าที่สูงกว่าจาก

- เมื่อมีข้อมูลของความดันสูงสุดที่เป็นไปได้ (Maximum Pressure, P_{max}) กำหนดจากค่าความดันที่ตั้งไว้ที่อุปกรณ์ควบคุม โดยเพื่อสำรองไว้ประมาณร้อยละ 5-10

- เมื่อมีข้อมูลเฉพาะความดันใช้งานปกติ (Normal operating pressure, P_n) เพื่อสำรองไว้ประมาณร้อยละ 10-25 แล้วแต่ความดันใช้งานปกติเบี่ยงเบน (Fluctuation) มากน้อยเพียงใด




3. เลือกหรือกำหนดวัสดุ

โดยทั่วไปจะใช้เหล็กกล้า นอกจากการใช้งานพิเศษบางประการจึงจะใช้วัสดุอื่น เช่น ใช้เหล็กปลอดสนิมในอุตสาหกรรมอาหาร เหล็กกล้าชุบผิวด้วยแก้ว ยาง หรือเทฟลอน เมื่อต้องนำถังไปใช้งานกับสารซึ่งมีสมบัติในการกัดกร่อนรุนแรง

4. เลือกวิธีการเชื่อมต่อ กำหนดค่าประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ (Joint efficiency, f)

โดยทั่วไปใช้วิธีเชื่อม โดยประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อเป็นไปตามวิธีการเชื่อมต่อ และการตรวจสอบรอยเชื่อมต่อ ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อ

ชนิดของการเชื่อมต่อ	ความหนา	วิธีตรวจสอบรอยเชื่อม		
	สูงสุด (มม.)	รังสีทั้งหมด	รังสีเฉพาะจุด	สายตา
Double welded butt joint 	Without limitation	1.0	0.85	0.75
Single welded butt joint with backing strip 	30	0.9	0.8	0.65
Double welded 	15	-	-	0.6
Double fillet lab joint 	15	-	-	0.55
Single fillet with plug 	15	-	-	0.5
Single welded butt joint Without backing strip 	15	-	-	0.45

5. การกำหนดความเค้นในการออกแบบ (Design Stress, S_{des})

ค่าความเค้นในการออกแบบ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์หรือมาตรฐานการออกแบบที่ใช้ในที่นี้ถือเอามาตรฐานของ ASME สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำและถังความดันเป็นเกณฑ์ โดยกำหนดจากค่าต่ำสุดของความเค้นในการออกแบบ ที่กำหนดขึ้นจากกรณีต่างๆต่อไปนี้

- ที่อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 350 °C เลือกค่าที่ต่ำกว่า จากค่าความเค้นในการออกแบบที่ประเมินจากความเค้นประลัย (Ultimate stress, $S_{ultimate}$) หรือความเค้นคราก (Yield stress, S_{yield}) ของวัสดุที่เลือกดังนี้

$$S_{des} = \frac{1}{4} S_{ultimate} f$$

$$S_{des} = \frac{5}{8} S_{yield} f$$

สำหรับเหล็กกล้า มีความเค้นครากประมาณ 260 MPa และมีความเค้นประลัยประมาณ 430 MPa ข้อมูลความเค้นครากและความเค้นประลัยของวัสดุอื่นๆ หาได้จากตำราหรือหนังสือทางด้านวิศวกรรมวัสดุ หรือในตารางที่ 11

- ที่อุณหภูมิใช้งานตั้งแต่ 350 °C ขึ้นไป กำหนดค่าความเค้นในการออกแบบจากสัดส่วนความเค้นที่ยอมรับได้ (Allowable stress fraction, F_s) ซึ่งมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิและวัสดุดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 16 และความเค้นประลัย ดังนี้

$$S_{des} = S_{ultimate} F_s f$$

ตารางที่ 16 สัดส่วนความเค้นที่ยอมรับได้ของวัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เหล็กแผ่น/เหล็กเตาเผา	เหล็กกล้าหล่อ
≤350	0.25	0.167
375	0.237	0.164
400	0.21	0.147
425	0.18	0.129
450	0.15	0.111
475	0.12	0.093
500	0.09	0.075
525	0.062	0.057

- กำหนดจากความเค้นในการออกแบบของโลหะแผ่น (Plate stress, S_{plate}) ตามอุณหภูมิและวัสดุที่เลือก ดังได้สรุปข้อมูลของวัสดุบางชนิดบางประเภทไว้ในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ความเค้นในการออกแบบของโลหะแผ่น (N/mm²)

Sheet Metals	Design Temperature (°C)											
	≤50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Carbon steel ASTM A53	109	104	99	95	91	86	82	73	56	36	14	
Carbon steel ASTM A106	159	152	146	139	133	126	119	100	-	-	-	-
Cast iron ASA A21.2	41	41	41	41	-	-	-	-	-	-	-	-
Low alloy 3.5Ni	147	141	135	129	123	117	110	94	64	36	14	
Low alloy 5Cr/0.5Mo	128	122	117	112	106	101	96	91	85	66	31	16
Stainless steel (304)	126	113	103	94	87	81	76	71	67	63	59	48
Stainless steel (309)	129	128	119	115	114	114	113	111	103	89	66	42
Stainless steel (310)	129	129	127	125	122	119	116	111	103	89	64	32
Stainless steel (316)	129	128	123	120	119	882	117	116	114	106	91	68
Stainless steel (321)	129	127	117	109	105	103	102	101	98	96	-	-
Copper	41	40	34	18	7	-	-	-	-		-	-
Red Brass	55	55	54	24	-	-	-	-	-		-	-
Aluminium	50	45	30	15	-	-	-	-	-		-	-
Low Carbon Nickel	54	52	51	51	51	51	51	50	43	27	18	-
Monel	119	112	106	102	101	101	101	101	88	-	-	-
Inconel	135	127	124	124	124	124	122	118	114	86	39	-

6. เลือกชนิดของฝาถัง (เฉพาะกรณีของถังรูปทรงระบอก)

พิจารณาจากสมบัติของฝาถังและหากต้องการใช้เกณฑ์ของความดันช่วยในการพิจารณา ฝาถังแบบจานไม่ควรใช้กับความดันภายในเกิน 15 บรรยากาศ ฝาถังรูปไข่สามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงความดันตั้งแต่ 10-30 บรรยากาศ ส่วนฝาถังรูปครึ่งทรงกลมจะใช้กับความดันสูงเกิน 25 บรรยากาศขึ้นไป ทั้งนี้หาฝาถังที่เลือกเป็นแบบไร้ตะเข็บจะต้องกำหนดความเค้นในการออกแบบส่วนของฝาถังใหม่ โดยใช้ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อ (f) = 1 ด้วย

7. คำนวณความหนาของตัวถังและฝาถัง

ใช้สมการที่สรุปไว้ในตารางที่ 18 ในการคำนวณความหนาต่ำสุดที่ปลอดภัยของตัวถังและฝาถังชนิดต่างๆ ตามความดันและความเค้นในการออกแบบ

ตารางที่ 18 สมการในการคำนวณความหนาของถังสำหรับแรงดันภายใน

รายละเอียดในการคำนวณ	สมการ
ตัวถังทรงกระบอก $P_{des} \leq 0.385S_{des}$	$t = \frac{P_{des} D_i}{2S_{des} - 1.2P_{des}}$ $t = \frac{P_{des} D_o}{2S_{des} + 0.8P_{des}}$
ตัวถังทรงกระบอก (หนา) $P_{des} > 0.385S_{des}$	$t = \frac{D_i}{2} \left(\sqrt{\frac{S_{des} + P_{des}}{S_{des} - P_{des}}} - 1 \right)$
ถังทรงกลม ฝาถังครึ่งทรงกลม $P_{des} \leq 0.385S_{des}$	$t = \frac{P_{des} D_i}{4S_{des} - 0.4P_{des}}$ $t = \frac{P_{des} D_o}{4S_{des} + 1.6P_{des}}$
ถังทรงกลม (หนา) ฝาถังครึ่งทรงกลม (หนา) $P_{des} > 0.385S_{des}$	$t = \frac{D_i}{2} \left(3 \sqrt{\frac{2(S_{des} + P_{des})}{2S_{des} - P_{des}}} - 1 \right)$
ฝาถังรูปไข่มาตรฐาน $h = \frac{D_i}{4}$	$t = \frac{P_{des} D_i}{2S_{des} - 0.2P_{des}}$ $t = \frac{P_{des} D_o}{2S_{des} + 1.8P_{des}}$
ฝาถังรูปไข่ $k = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{D_i}{2h} \right)^2 \right]$	$t = \frac{P_{des} D_i K}{2S_{des} - 0.2P_{des}}$
ฝาถังแบบจานมาตรฐาน $r_k = 0.06r_c$	$t = \frac{0.885P_{des} r_c}{S_{des} - 0.1P_{des}}$

รายละเอียดในการคำนวณ	สมการ																				
ฝาถังแบบจาน $M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{r_c}{r_k}} \right)$	$t = \frac{P_{des} r_c M}{2S_{des} - 0.2P_{des}}$																				
ฝาถังทรงกรวย	$t = \frac{P_{des} D_i}{2 \cos \alpha (S_{des} - 0.6P_{des})}$																				
ฝาถังแบน	$t = C_p D_e \sqrt{\frac{P_{des}}{S_{des}}}$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>ชนิดฝาถัง</th> <th>C_p</th> <th>D_e</th> <th>รูปแบบ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Flange welded</td> <td>0.45</td> <td>D_i</td> <td>รูป 7.2 (ก)</td> </tr> <tr> <td>Shell welded</td> <td>0.55</td> <td>D_i</td> <td>รูป 7.2 (ข-ค)</td> </tr> <tr> <td>Gasket (full)</td> <td>0.4</td> <td>D_b</td> <td>รูป 7.2 (ง)</td> </tr> <tr> <td>Gasket (partial)</td> <td>0.55</td> <td>D_g</td> <td>รูป 7.2 (จ)</td> </tr> </tbody> </table>	ชนิดฝาถัง	C_p	D_e	รูปแบบ	Flange welded	0.45	D_i	รูป 7.2 (ก)	Shell welded	0.55	D_i	รูป 7.2 (ข-ค)	Gasket (full)	0.4	D_b	รูป 7.2 (ง)	Gasket (partial)	0.55	D_g	รูป 7.2 (จ)
ชนิดฝาถัง	C_p	D_e	รูปแบบ																		
Flange welded	0.45	D_i	รูป 7.2 (ก)																		
Shell welded	0.55	D_i	รูป 7.2 (ข-ค)																		
Gasket (full)	0.4	D_b	รูป 7.2 (ง)																		
Gasket (partial)	0.55	D_g	รูป 7.2 (จ)																		

8. กำหนดความหนาต่ำสุดที่ปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน

รวมความหนาของตัวถังและค่าค่าความหนาของฝาถังที่คำนวณได้ กับความหนาเพื่อชดเชยการกัดกร่อน (Corrosion Allowance, C) ตามชนิดและสมบัติการกัดกร่อนของของไหล โดยใช้ค่าที่แสดงไว้ในตารางที่ 19 หรือกำหนดจากผลคูณระหว่างอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) กับอายุการใช้งานของถัง อัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ ควรอยู่ในช่วงระหว่าง 0.025-1.25 มิลลิเมตรต่อปี

ตารางที่ 19 ความหนาเพื่อชดเชยการกัดกร่อนในการออกแบบ (มิลลิเมตร)

สมบัติการกัดกร่อนของของไหล	วัสดุที่ใช้	
	วัสดุราคาถูก	วัสดุราคาแพง
ไม่กัดกร่อน	1-2	0.5-1
กัดกร่อนปานกลาง	3-5	1.5-2.5
กัดกร่อนรุนแรง	6	3

9. ตรวจสอบความหนาของตัวถังและฝาถังที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ (8) กับความหนาต่ำสุดซึ่งกำหนดไว้ในมาตรฐาน (Minimum thickness, t_{min}) หากมาตรฐานในการออกแบบให้ใช้ค่านี้ ความ

หนาต่ำสุดนี้ ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถัง ตามที่แสดงไว้ในถังตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 20 โดยเลือกใช้ค่าที่สูงกว่า

ตารางที่ 20 ความหนาต่ำสุดของตัวถัง

D_i (mm.)	T_{min} (mm.)
≤ 1000	5
1000-2000	7
2000-2500	9
2500-3000	10
> 3000	12

10. กำหนดความหนาของตัวถังและฝาถังในการจัดสร้าง

ตรวจสอบความหนาของตัวถังและฝาถังที่กำหนดกับความหนาของโลหะแผ่นที่ใช้ในการสร้างตัวถังหรือความหนาของฝาถังที่มีจำหน่าย (Available thickness, t_u) โดยใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับความหนาของตัวถังและฝาถังที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ (9) ในทางสูง

ขั้นตอนการกำหนดความหนาของตัวถังและฝาถังสุญญากาศ (Vacuum vessel)

- กำหนดอุณหภูมิในการออกแบบเช่นเดียวกับกรณีของถังความดัน
- กำหนดความดันในการออกแบบ เนื่องจากความดันภายในถัง ไม่มีโอกาสเป็นสุญญากาศสมบูรณ์ จึงสามารถกำหนดความดันในการออกแบบตามความดันภายนอกตัวถังได้ทันที
- เลือกวัสดุ ชนิดของฝาถัง และวิธีการเชื่อมต่อเช่นเดียวกันกับถังความดัน
- หาข้อมูลโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) และสัดส่วนพัวซอง (Poisson's ratio, ν) ของวัสดุที่เลือก หากเป็นไปได้ควรเป็นค่าที่อุณหภูมิในการออกแบบ

โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (E) คือ สัดส่วนระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ของวัสดุในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรง หาข้อมูลได้จากตารางกรรมวัสดุทั่วไป ในที่นี้ได้รวบรวมข้อมูลโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ ไว้ในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ (kN/mm²)

Sheet Metals	Design Temperature (°C)											
	≤50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Carbon steel <0.3%C	192	191	189	186	183	178	173	166	147	121	102	
Carbon steel >0.3%C	205	203	200	196	190	185	178	169	157	142	124	100
Low alloy steel 5Cr/0.5Mo	205	203	200	197	194	190	186	180	174	166	155	137
Int. alloy steel 5-9Cr/Mo	188	187	185	182	180	176	173	169	165	161	156	150
Chromium steel 12-27Cr	200	198	195	191	187	181	174	165	154	140	124	105
Wrought iron	201	199	194	191	187	184	180	168	-	-	-	-
Gray cast iron	92	91	89	87	85	82	78	73	-	-	-	-
Monel	179	179	179	178	177	176	172	165	153	140	124	109
Cupro-Nickel	130	129	127	124	122	119	116	113	109	-	-	-
Aluminium	73	73	72	70	66	61	-	-	-	-	-	-
Copper 99.98%Cu	110	109	108	106	104	102	99	96	-	-	-	-
Brass 66%Cu 34%Zn	96	96	94	93	90	88	85	83	-	-	-	-
Bronze	89	89	88	86	83	81	79	76	-	-	-	-

สัดส่วนพัชอง (V) คือ สัดส่วนระหว่างความเครียดในแนวที่ตั้งฉากกับแรง (Lateral strain) กับความเครียดในแนวเดียวกันกับแรง (Axial strain) หาข้อมูลได้จากแหล่งเดียวกันกับ โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น

- กำหนดความหนาที่ปลอดภัยของตัวถังและฝาถัง สำหรับตัวถังทรงกระบอกต้องใช้วิธีสุ่มค่า (Trial and Error) โดยกำหนดความหนาดั้งเดิม แล้วนำความหนาดั้งเดิมที่กำหนด ไปคำนวณความดันภายนอกตัวถังที่ยอมรับได้ (Allowable pressure, P_a) สำหรับความหนาที่ใช้ได้อย่างปลอดภัย ต้องมีค่าความดันภายนอกที่ยอมรับได้ใกล้เคียงกับความดันในการออกแบบในทางสูง ส่วนความหนาของตัวถังรูปทรงกลมและฝาถัง สามารถคำนวณได้จากสมการโดยตรง ขั้นตอนการกำหนดความหนาสำหรับแต่ละส่วนเป็นดังนี้

การกำหนดความหนาของตัวถังทรงกระบอก

1. กำหนดความหนาตั้งต้น (Initial thickness, t_i)

หากมีข้อกำหนดเกี่ยวกับความหนาต่ำสุดตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ให้ใช้ค่านี้เป็นความหนาตั้งต้น โดยพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการจัดหาโลหะแผ่น ซึ่งมีความหนาที่กำหนดในการจัดสร้างถึงสุญญากาศนี้ด้วย

2. กำหนดความหนาในการทดสอบ (Test thickness, t_{test}) จากความหนาตั้งต้น (t_i) และความหนาขีดเคาะการกัดกร่อน (C) โดย $t_{test} = t_i - C$

3. กำหนดความยาววิกฤติ (Critical length, L_c) จากความหนาในการทดสอบที่กำหนด สำหรับวัสดุซึ่งมีค่าสัดส่วนพัวซอง (V) ใดๆ

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

4. กำหนดความยาวตัวถังที่ใช้ในการคำนวณ Adjusted vessel length, L' จากสมการ

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

5. เปรียบเทียบความยาวตัวถังที่ใช้ในการคำนวณ (L') กับความยาววิกฤติ (L_c) เพื่อหาค่าของความดันวิกฤติ (Critical pressure, P_c) ดังนี้

- กรณีที่ L' มากกว่า L_c

ค่าความดันวิกฤติ (P_c) หาได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกถัง (D_o) ความหนาในการทดสอบ (t_{test}) และโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (E) ของวัสดุที่ใช้สร้าง

$$P_c = 2.20E \left(\frac{D_o}{t_{test}} \right)^{-3}$$

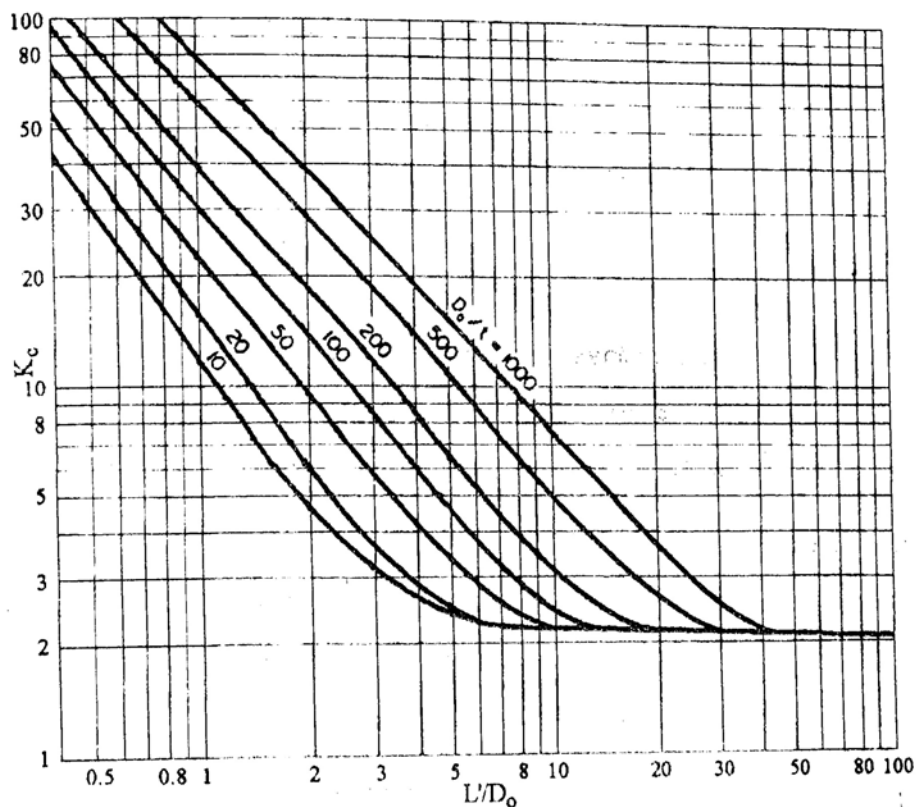
- กรณีที่ L' ไม่เกินกว่าค่าของ L_c

ค่าความดันวิกฤติ (P_c) หาได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกถัง (D_o) ความหนาในการทดสอบ (t_{test}) และโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (E) ของวัสดุที่ใช้สร้าง และสัมประสิทธิ์ความเสียหายของถัง (Collapse coefficient, K_c) ดังนี้

$$P_c = K_c E \left(\frac{D_o}{t_{test}} \right)^{-3}$$

สัมประสิทธิ์แห่งความเสียหายของถัง (K_c) หาได้จากสัดส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลาง (L'/D_o) และสัดส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความหนาทดสอบ (D_o/t_{test}) ดังที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 45 และหากวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านี้ในรูปแบบสมการ ค่าโดยประมาณของความดันวิกฤติ (P_c) หาได้จาก

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



ภาพประกอบที่ 45 สัมประสิทธิ์ความเสียหายของถัง (K_c)

6. กำหนดความดันภายนอกถังที่ยอมรับได้ (Allowable pressure, P_a) จากความดันวิกฤติที่คำนวณได้ และสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (Safety factor, S_F) ซึ่งในกรณีถึงสุญญากาศนิยมใช้ $S_F = 4$

$$P_a = \frac{P_c}{S_F} = \frac{P_c}{4}$$

7. ตรวจสอบค่าความดันภายนอกถังที่ยอมรับได้ (P_a) กับความดันภายนอกถังในการออกแบบ (P_{des}) ค่าของ P_a จะต้อง $\geq P_{des}$ โดยอาจจะต้องปรับค่าความหนาตั้งต้นที่กำหนด (t) จนกระทั่งความดันภายนอกถังที่ยอมรับได้มีค่าใกล้เคียงกับความดันภายนอกถังในการออกแบบในทางสูง

8. กำหนดความหนาตั้งต้นที่ผ่านเกณฑ์ (t) เป็นความหนาที่ใช้ในการจัดสร้าง (t)

การออกแบบถังสกัดสารโพโตคัส

ในการออกแบบถังรูปทรงกระบอกนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของตัวถัง มีได้หลายค่า สำหรับความจุเดียวกัน การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่เหมาะสมนี้ เป็นการคำนวณแบบซ้ำแล้วซ้ำอีก (Iteration) เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม และเสียค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างต่ำสุด การคำนวณหาความหนาของถังซึ่งสามารถใช้งานได้ตามอุณหภูมิและความดันที่กำหนด ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังด้วย โดยขั้นตอนในการคำนวณคร่าวๆ มีดังนี้

1. กำหนดอุณหภูมิ ความดัน และความจุในการออกแบบและหาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของของไหลที่ใช้
2. เลือกวัสดุ วิธีการเชื่อมต่อ และกำหนดชนิดของฝาถัง
3. กำหนดค่าความเค้นในการออกแบบ
4. กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตัวถัง
5. คำนวณความยาวของตัวถังตามความจุของถัง
6. กำหนดค่าความหนาของตัวถังและฝาถัง
7. ประมาณค่าวัสดุที่ใช้
8. ประเมินราคาถังที่สร้างขึ้นตามรายละเอียดที่กำหนด และใช้วัสดุที่เลือกในการจัดสร้าง
9. ใช้เงื่อนไขด้านค่าใช้จ่ายเพื่อให้ได้รายละเอียดเฉพาะของถังที่เหมาะสมที่สุด

การกำหนดความหนาของถังสกัด

ข้อมูลในการออกแบบ

ความดันสูงสุดในการใช้งาน $P_{\max} = 1 \text{ bar}$

อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน $T_{\max} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ความจุถังขึ้นต่ำ 60 ลิตร

ค่าความเค้นประลัย (Ultimate stress, S_{ultimate}) สำหรับ stainless steel เป็น 540 N/mm^2

ค่าความเค้นคราก (Yield stress, S_{yield}) สำหรับ stainless steel เป็น 200 N/mm^2

ค่าความเค้นของโลหะแผ่น (Stress plate, S_{plate}) เป็น 103 N/mm^2

1. กำหนดค่าอุณหภูมิในการออกแบบ (Design temperature, T_{des}) กรณีที่ใช้วัสดุชนิดเดียว โดยไม่มีการบุผิวชั้นใน (Cladding) กำหนดจากค่าอุณหภูมิที่เป็นไปได้บวก $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับการใช้งานตั้งแต่อุณหภูมิห้องขึ้นไปหรือใช้ค่าอุณหภูมิต่ำสำหรับสุดที่เป็นไปได้สำหรับการใช้งานตั้งแต่อุณหภูมิห้องลงมา ดังนั้น

$$\begin{aligned} T_{\text{des}} &= T_{\max} + 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 80 + 30 \end{aligned}$$

$$= 110^{\circ}\text{C}$$

2. กำหนดค่าความดันในการออกแบบ (Design pressure, P_{des}) โดยใช้ค่าสูงสุดจากกรณีที่ 1 เมื่อมีข้อมูลของความดันสูงสุดที่เป็นไปได้ (Maximum Pressure, P_{max}) กำหนดจากค่าความดันที่ตั้งไว้ที่อุปกรณ์ควบคุม โดยเผื่อสำรองไว้ประมาณร้อยละ 5-10%

กรณีที่ 2 เมื่อมีข้อมูลเฉพาะความดันใช้งานปกติ (Normal Operation Pressure, P_n) เพื่อสำรองไว้ประมาณร้อยละ 10-25% แล้วแต่ว่าความดันใช้งานปกติความเบี่ยงเบน (Fluctuation) มากน้อยเพียงใด ซึ่งในการออกแบบ ความดันสูงสุดที่ใช้คือความดันบรรยากาศ ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_{des} &= 1.1P_{max} \\ &= 1.1 \text{ bar} \\ &= 0.11 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3. กำหนดวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งเลือก Stainless steel เป็นวัสดุในการก่อสร้าง

4. เลือกวิธีการเชื่อมแบบ Double melted butt joint ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสายตา ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ (Joint efficiency, f) เท่ากับ 0.75

5. กำหนดค่าความเค้นในการออกแบบ (Design stress, S_{des}) โดยกำหนดจากค่าที่ต่ำที่สุดจากกรณีต่างๆดังต่อไปนี้

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

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

$$S_{des} = S_{plate} * f = 77.25 \text{ MPa}$$

ดังนั้นค่าความเค้นในการออกแบบเป็น 77.25 MPa

6. กำหนดความหนาขนาดเขยการกัดกร่อน, $C = 3 \text{ mm}$

กำหนดให้ $L/D = 1.5$ ซึ่งจากกรณีถึงทรงกระบอกจะได้ว่า

$$V = 0.785D^2L + 2V_{head}$$

$$\text{เมื่อ } V_{head} = 0.131D^3$$

จะได้ว่าค่า D เท่ากับ 0.32 เมตร

กำหนดค่า D เป็นจำนวนเต็มเท่ากับ 0.4 เมตร

เพราะฉะนั้น L จึงเท่ากับ 0.6 เมตร

กำหนดความหนาขนาดเขยการกัดกร่อน เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

สำหรับตัวถังทรงกระบอกนั้น ความหนาสำหรับทนแรงดันภายในจะต้องมีค่า P_{des}
 $\leq 0.0385S_{des}$

$$P_{des} = 23.7 \text{ MPa}$$

$$\text{ดังนั้น ค่า } P_{des} \leq 0.0385S_{des}$$

ความหนาของตัวถังสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t = \frac{P_{des} D}{2S_{des} - 1.2P_{des}} = 0.285 \text{ mm}$$

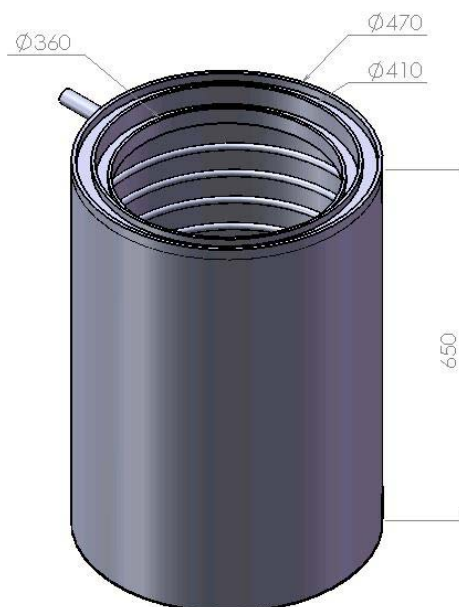
ความหนาของตัวถังที่ปลอดภัยจึงมีค่าเท่ากับ $0.285 + 3 = 3.285$

กำหนดความหนาที่ปลอดภัยเป็นเลขจำนวนเต็มคือ 5 mm

$$\text{กำหนดความหนาของฝาถังจากสมการ } t = \frac{P_{des} D}{2S_{des} - 0.2P_{des}} = 0.285 \text{ mm}$$

กำหนดความหนาของฝาถังที่ปลอดภัยเป็นเลขจำนวนเต็มคือ 5 mm

ถังสกัดที่จัดสร้างเป็นถังสองชั้นทำจากสแตนเลส ชั้นนอกมีขดลวดทองแดง
 สำหรับบรรจุน้ำให้ความร้อน ส่วนชั้นในคือบริเวณสำหรับการสกัด โดยมีถังตะแกรงสำหรับบรรจุ
 วัสดุคิบ ด้านบนขอบถังมีรูที่ต่อกับท่อให้สารละลายเกิดการไหลขึ้นไปสู่ถังระเหยขนาดใหญ่
 จากนั้นจะบีบสารละลายจากถังระเหยขนาดใหญ่กลับสู่ถังสกัดบริเวณก้นถังที่มีท่อเจาะรูอยู่
 (ภาพประกอบที่ 46-49)



ภาพประกอบที่ 46 ภาพวาด 3 มิติถังสกัดที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบเบทซ์



ภาพประกอบที่ 47 ภาพถ่ายถึงสก็ดพร้อมถังตะแกรงที่จัดสร้างสำหรับชุดสก็ดแบบแบทช์



ภาพประกอบที่ 48 ภาพถ่ายด้านในถังสกัดที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบแบทช์



ภาพประกอบที่ 49 ถึงสกัดที่ประกอบกับชุดสกัดแบบเบทซ์

2. การออกแบบถังระเหย

- กำหนดอุณหภูมิในการออกแบบเช่นเดียวกับกรณีการออกแบบถังสกัด $T_{des} = 130^{\circ}\text{C}$
- กำหนดความดันในการออกแบบ เนื่องจากความดันภายในถังไม่มีโอกาสเป็นสุญญากาศสมบูรณ์ จึงสามารถกำหนดความดันในการออกแบบ ตามความดันภายนอกตัวถังได้ทันที $P_{des} = 0.1 \text{ MPa}$
- เลือกวัสดุ ชนิดฝาถัง และวิธีการเชื่อมต่อเช่นเดียวกันกับถังสกัด โดยเลือกวัสดุในการก่อสร้างเป็น stainless steel และเลือกวิธีการเชื่อมแบบ Double welded butt joint ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสายตา
- หาข้อมูลโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) และสัดส่วนพัซของ (Poisson's Ratio,) ของวัสดุที่เลือก หากเป็นไปได้ควรกำหนดเป็นค่าที่อุณหภูมิในการออกแบบ โดยโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (E) คือสัดส่วนระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ของวัสดุในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรง และสัดส่วนพัซของ ν คือสัดส่วนระหว่างความเครียดในแนวที่ตั้งฉากกับแรง (Lateral Strain) กับความเครียดในแนวเดียวกับแรง (Axial Strain) ซึ่งสำหรับ stainless steel นั้น ค่า $E = 19700 \text{ N/mm}^2$ และค่า $\nu = 0.32$ (Perry handbook, table 28.18)
- กำหนดความหนาของตัวถังทรงกระบอก โดย
 - กำหนดความหนาดั้งเดิม (Initial Thickness, t_i) เท่ากับ 5 mm
 - กำหนดความหนาในการทดสอบ, t_{test} จากความหนาดั้งเดิมและความความหนาขาดเซยการกัดกร่อน (C) โดย $t_{test} = t_i - C = 3 \text{ mm}$
 - คำนวณความยาววิกฤติ (Critical Length, L_c) จากความหนาในการทดสอบจากสมการ
$$L_c = 1.14(1 - \nu^2)^{\frac{1}{4}} D_o \left(\frac{D_o}{t_{test}} \right)^{\frac{1}{2}}$$
 โดยกำหนดให้ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน D_i มีค่าเป็น 400 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก D_o มีค่าเท่ากับ $D_i + 2C = 410 \text{ mm}$ ดังนั้น $L_c = 4961.891 \text{ mm}$
 - กำหนดความยาวตัวถังที่ใช้ในการคำนวณ (Adjusted Vessel Length, L') จากสมการ
$$L' = L + \frac{2h}{3}$$
 เมื่อ h คือความสูงของฝาถังมีค่าเท่ากับ $D_i/4$ ดังนั้น $L' = 466.67 \text{ mm}$
- เปรียบเทียบ L' กับ L_c เพื่อหาค่าความดันวิกฤติ P_c

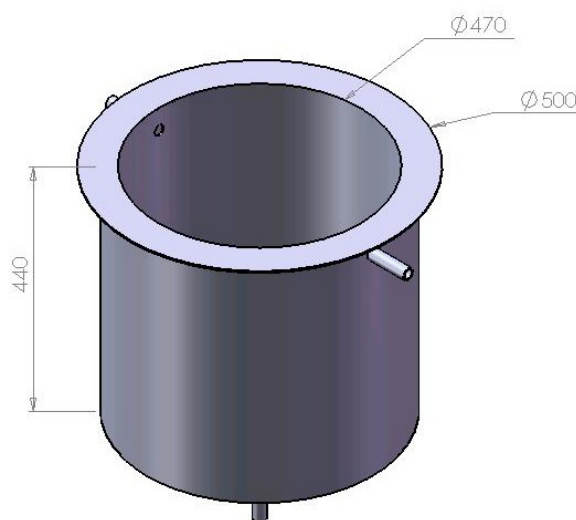
เมื่อ $L_c > L'$ จะได้ว่า $P_c \approx 2.8E \left(\frac{D_o}{t_{test}} \right)^{-2.5} \left(\frac{L'}{D_o} \right)^{-1} \approx 2.22 \text{ MPa}$

6. คำนวณความดันภายนอกที่ยอมรับได้ (Allowable Pressure, P_a) จากความดันวิกฤติที่คำนวณได้ และสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (Safety Factor, S_F) ซึ่งในกรณีถึงสุญญากาศนิยมใช้ $S_F = 4$

$$P_a = \frac{P_c}{4} = 0.555 \text{ MPa}$$

7. ตรวจสอบความดันภายนอกที่ยอมรับได้ กับความดันภายนอกในการออกแบบ (P_{des}) โดยค่าของ P_a จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ P_{des} ซึ่งจากการคำนวณพบว่า $P_a \geq P_{des}$ ดังนั้น กำหนดค่าความหนาตั้งต้นเป็นความหนาที่ใช้ในการจัดสร้าง (t)

ถังระเหยขนาดใหญ่ที่จัดสร้างมีฝาถังแบบโค้ง มี Heater ให้ความร้อนติดตั้งด้านในถัง (ภาพประกอบที่ 50-52) ส่วนถังระเหยขนาดเล็กมีฝาถังแบบโค้งเช่นกัน และมี Heater ให้ความร้อนติดตั้งด้านนอกตัวถัง (ภาพประกอบที่ 53-54)



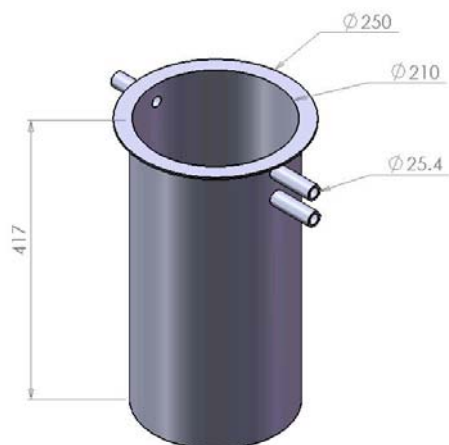
ภาพประกอบที่ 50 ภาพวาด 3 มิติถังระเหยขนาดใหญ่ที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบแบทช์



ภาพประกอบที่ 51 ภาพถ่ายด้านในถังระเหยขนาดใหญ่ที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบแบตช์



ภาพประกอบที่ 52 ถังระเหยขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยชุดสกัดแบบเบตซ์



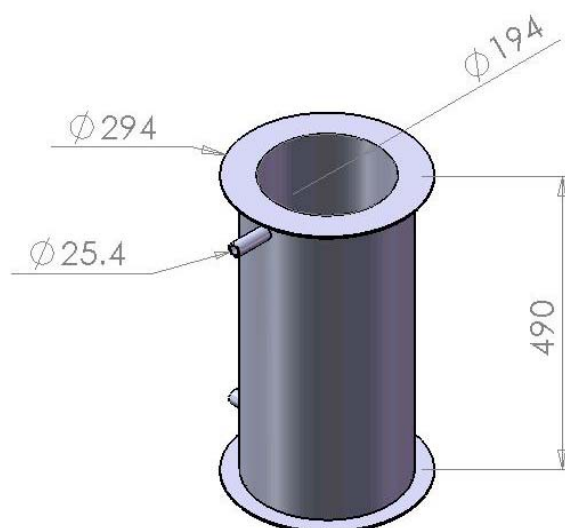
ภาพประกอบที่ 53 ภาพวาด 3 มิติถึงระเหยขนาดเล็กที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบเบทซ์



ภาพประกอบที่ 54 ภาพถ่ายถึงระเหยขนาดเล็กที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบเบทซ์

3. การออกแบบเครื่องควบแน่น

ในการออกแบบเครื่องควบแน่นจำเป็นที่จะต้องมึข้อมูลที่เป็นบางประการ เช่น ชนิดของของไหล สถานะของของไหล อัตราการไหลของของไหล อุณหภูมิเข้าและอุณหภูมิออกของของไหลที่ต้องการ ความดันใช้งานของเครื่องมือ ซึ่งได้ออกแบบเครื่องควบแน่นเป็นถังทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 294 mm ยาว 490 mm โดยมีขดลวดทองแดงสำหรับบรรจุน้ำหล่อเย็นอยู่ภายในยาว 15 เมตร สารละลายสถานะไอจะอยู่ในขดลวดทองแดง ส่วนน้ำหล่อเย็นจะอยู่ในถัง โดยเป็นการไหลสวนทางกัน (ภาพประกอบที่ 55-56)



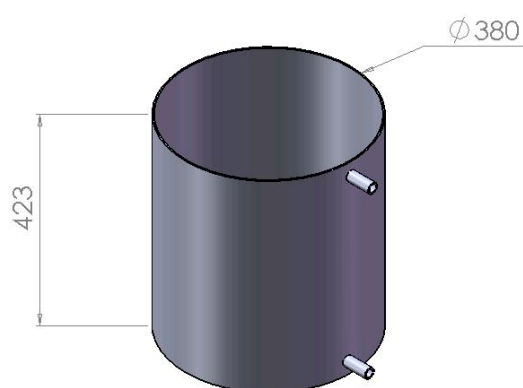
ภาพประกอบที่ 55 ภาพวาด 3 มิติเครื่องควบแน่นที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบเบทซ์



ภาพประกอบที่ 56 ภาพถ่ายเครื่องควบแน่นที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบเบทซ์

4. การออกแบบถังให้ความร้อน

ถังให้ความร้อน เป็นถังสำหรับต้มน้ำมันหรือน้ำเพื่อควบคุมความร้อนในถังสกัด ถังให้ความร้อนที่จัดสร้างมีฝาถังแบบแบน โดยแหล่งให้ความร้อนคือ Heater 3 เฟสขนาด 10 kW สารให้ความร้อนจะถูกสูบผ่านปั๊มเพื่อให้ไหลวนในขดลวดทองแดงภายในถังสกัด (ภาพประกอบที่ 57-58)

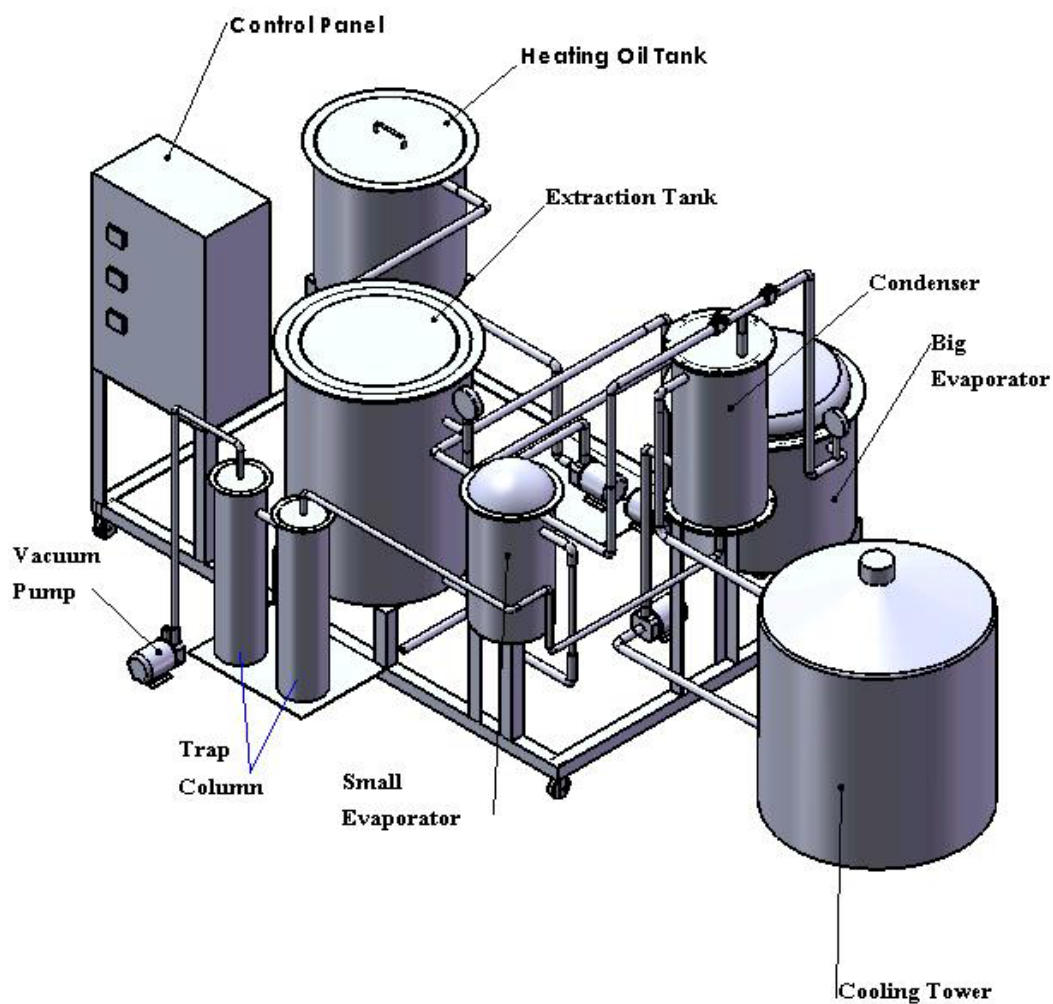


ภาพประกอบที่ 57 ภาพวาด 3 มิติถังให้ความร้อนที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบเบทซ์



ภาพประกอบที่ 58 ภาพถ่ายถังให้ความร้อนที่จัดสร้างสำหรับชุดสกัดแบบแบทช์

ชุดสกัดแบบเบทซ์มีลักษณะดังภาพประกอบที่ 59 และ 60



ภาพประกอบที่ 59 ภาพวาด 3 มิติของชุดสกัดแบบเบทซ์



ภาพประกอบที่ 60 ชุดสกัดแบบเบทซ์

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยวิธี Modified dinitrosalicylic acid (Miller, 1959)

สารเคมีที่ใช้คือสารละลาย Dinitrosalicylic acid ซึ่งประกอบด้วยสารเคมีต่างๆดังนี้

Dinitrosalicylic acid	1%	w/v
Phenol	0.2%	w/v
Sodium sulfite	0.05%	w/v
Sodium hydroxide	1%	w/v
Potassium sodium tartrate	20%	w/v

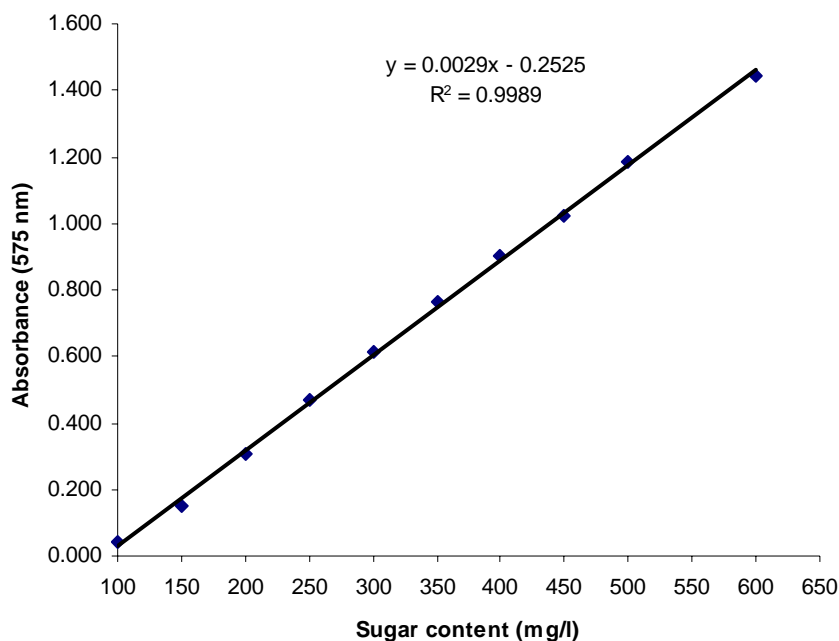
การเตรียมสารละลาย Dinitrosalicylic acid

ชั่ง NaOH 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 0.9 ลิตร นำส่วนประกอบที่เหลือ (Na_2SO_3 0.5 กรัม, Sodium potassium tartrate 200 กรัม, 3,5-Dinitrosalicylic acid 10 กรัม และ Phenol 2 กรัม) ละลายในสารละลาย NaOH คนให้เข้ากันด้วย magnetic stirrer ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

การเตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์

1. เตรียมสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการชั่งน้ำตาลกลูโคส 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
2. เจือจางสารละลายกลูโคสให้มีความเข้มข้นเป็น 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ใส่อุณหภูมิกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆใส่ใน microplate 96 หลุม ปริมาณ 100 ไมโครลิตร
4. เติมน้ำตาลละลาย Dinitrosalicylic acid ปริมาณ 100 ไมโครลิตร เขย่าเบาๆ ให้สารละลายผสมกัน ประมาณ 30 วินาที
5. ปิด microplate ด้วยถุงซีลล๊อค และนำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80°C เป็นเวลา 30 นาที

6. ทำให้เย็นและนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง microplate reader และนำค่าที่ได้ไปทำกราฟมาตรฐานดังแสดงในภาพประกอบที่ 61



ภาพประกอบที่ 61 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์

2. การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด โดยวิธี Modified phenol sulfuric method (Fox and Robyt, 1991)

สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วย

5%phenol

Conc. Sulfuric acid 98%

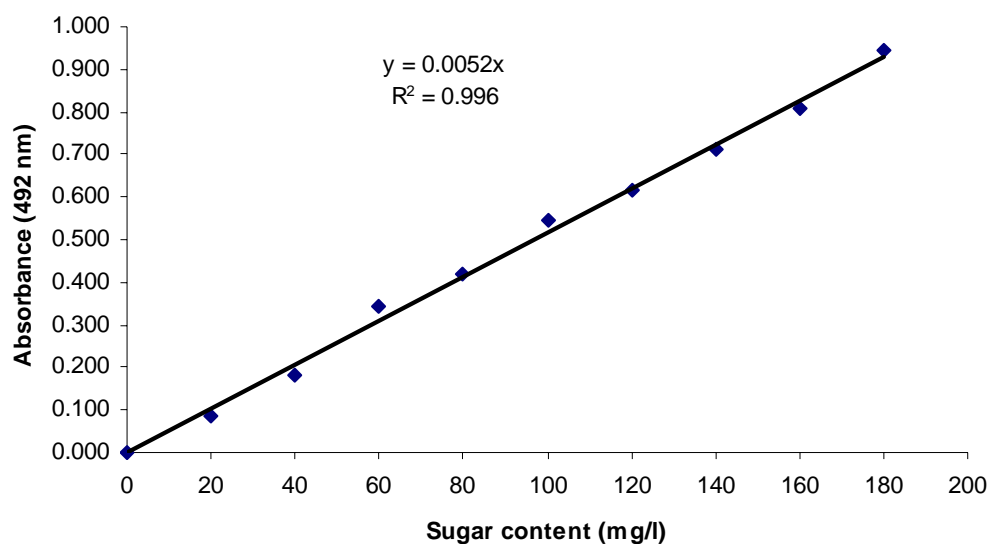
การเตรียม 5% phenol

ชั่ง Phenol 50 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 0.9 ลิตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

การเตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์น้ำตาลทั้งหมด

1. เตรียมสารละลายกลูโคสให้มีความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ดูดสารละลายกลูโคสที่มีความเข้มข้นต่างๆใส่ใน microplate 96 หลุม ปริมาณ 25 ไมโครลิตร

3. เติมสารละลาย 5%phenol ปริมาตร 25 ไมโครลิตร เขย่า microplate เบาๆ เพื่อให้สารผสมกันประมาณ 30 วินาที
4. วางแผ่น microplate บนน้ำแข็ง ค่อยๆเติม Conc. Sulfuric acid ปริมาตร 125 ไมโครลิตร จากนั้นเขย่าเบาๆ เพื่อให้สารผสมกันประมาณ 30 วินาที
5. ปิด microplate ด้วยถุงซีลล๊อคและนำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที
6. ทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง และนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 492 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง microplate reader และนำค่าที่ได้ไปทำกราฟมาตรฐานดังแสดงในภาพประกอบที่ 62



ภาพประกอบที่ 62 กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์น้ำตาลทั้งหมด

3. วิเคราะห์หาชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

ประยุกต์วิธีทดสอบมาจาก Tiekling, M *et al.*, 2005 และ Schwab, C. and Ganzle, MG., 2006

สารเคมี

1. Acetonitrile HPLC grade
2. Water HPLC grade
3. Iso-propanol HPLC grade
4. H₂SO₄ concentration
5. 1 N NaOH

เครื่องมือ

Column: Agilent Zorbax LC- NH₂, 4.6 mm x 250 mm, 5µm

Mobile phase: acetonitrile : water, 75:25

Flow rate: 1 ml/min

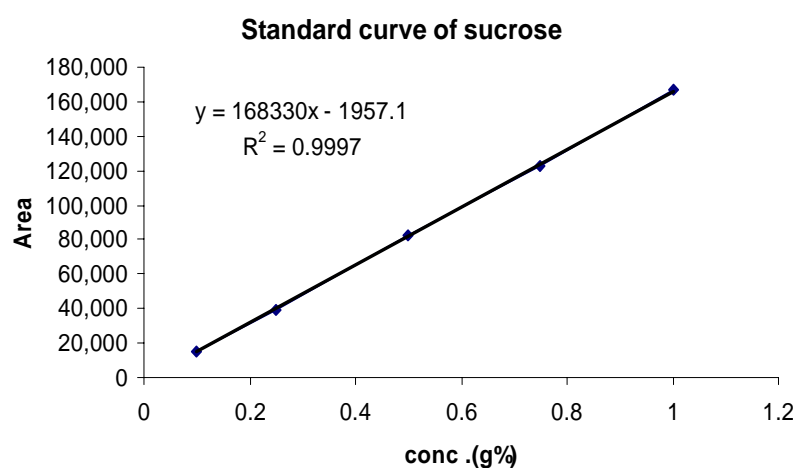
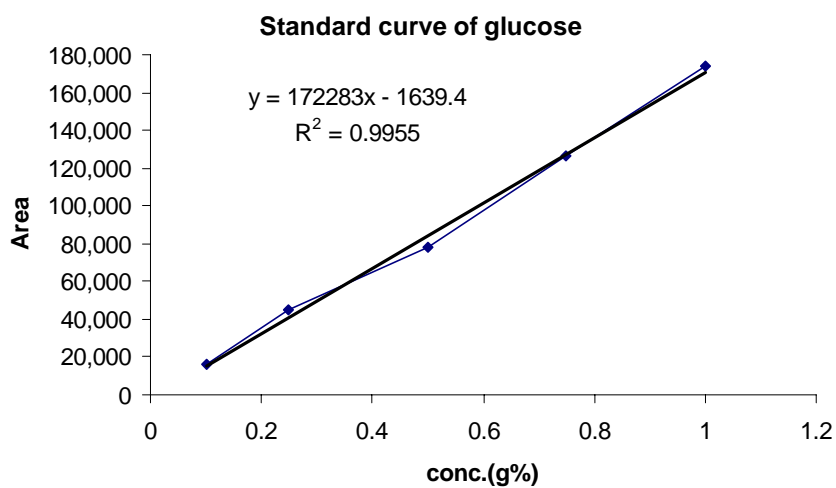
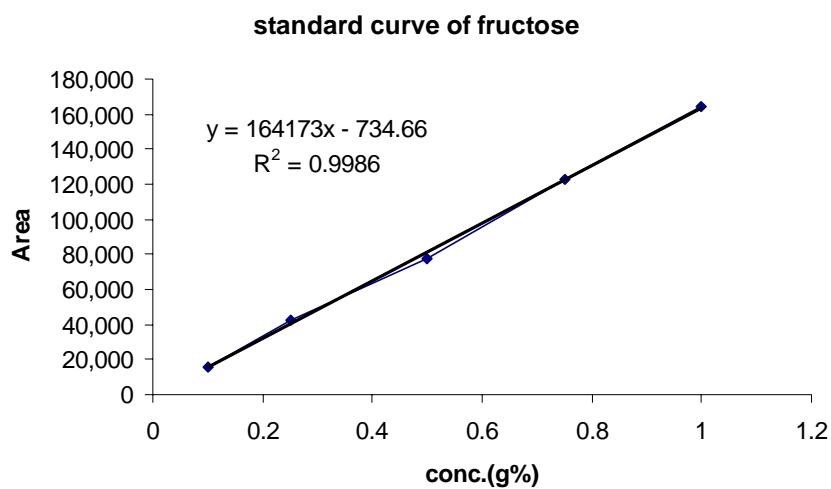
Temp.: ambient

Detector: RI

Inject. 20 µl

การเตรียมสารมาตรฐาน

ตัวอย่างน้ำตาลมาตรฐานที่ใช้ประกอบด้วยน้ำตาล D-Fructose, D-Glucose, Sucrose โดยเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 น้ำหนักต่อปริมาตร โดยทำการชั่งน้ำตาลมาตรฐานชนิดละ 500 มิลลิกรัม ละลายกับน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 5 มิลลิลิตร คูตสารละลายมาตรฐานอย่างละ 1 มิลลิลิตร มารวมกันปรับปริมาตรให้ได้ 10 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น ได้สารละลายน้ำตาลมาตรฐานความเข้มข้นร้อยละ 1 น้ำหนักต่อปริมาตร ก่อนฉีดเข้าเครื่อง HPLC เจือจางสารละลายมาตรฐานด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 น้ำหนักต่อปริมาตร



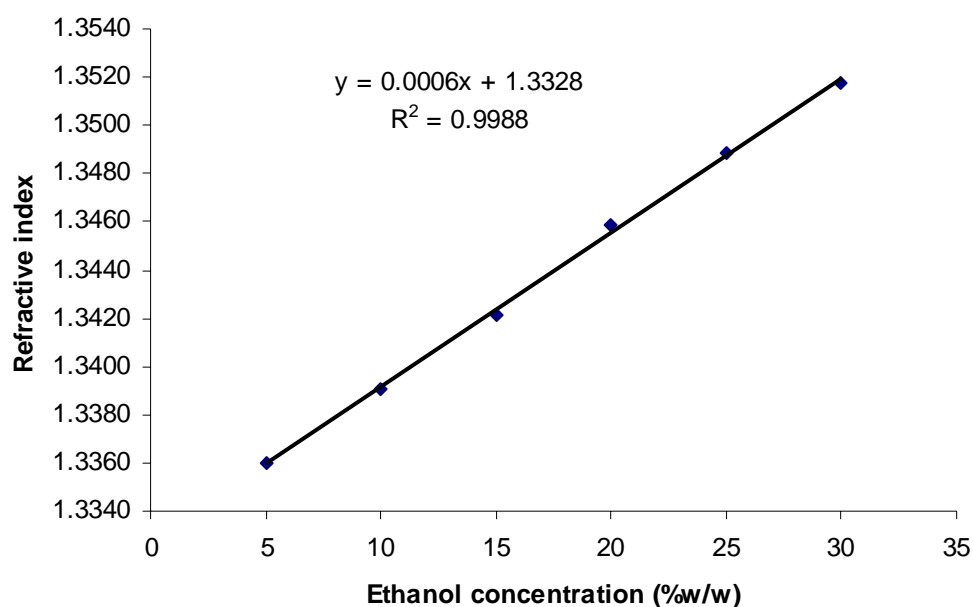
ภาพประกอบที่ 63 กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ HPLC ของน้ำตาลแต่ละชนิด

4. การเตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับหาความเข้มข้นของเอทานอลที่ระเหยได้

หาความเข้มข้นของ Ethanol recovery ด้วยเครื่อง Refractometer วัดค่าดัชนีหักเห โดยเตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นต่างกัน จากเอทานอล 99.9% ดังนี้

ตารางที่ 22 น้ำหนักเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆสำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้น (%w/w)	น้ำหนักเอทานอล 99.9% (g)	น้ำหนักน้ำกลั่น (g)
5	0.5	9.5
10	1	9
15	1.5	8.5
20	2	8
25	2.5	7.5
30	3	7



ภาพประกอบที่ 64 กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการระเหย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 23 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของสารสกัด โดยสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้งโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

อุณหภูมิในการสกัด (°C)	Yield (%)
30	17.5
50	20.85
60	20.1

ตารางที่ 24 ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

อุณหภูมิสกัด (°C)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 nm			
	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.343	0.330	0.331	0.335
50	0.399	0.378	0.390	0.389
60	0.433	0.399	0.438	0.423

ตารางที่ 25 ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

อุณหภูมิสกัด (°C)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 492 nm			
	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.348	0.342	0.386	0.359
50	0.349	0.356	0.386	0.363
60	0.364	0.381	0.387	0.377

ตารางที่ 26 ผลของเวลาต่อผลได้ของสารสกัด ที่ได้จากการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

เวลาในการสกัด (นาที)	Yield (%)
30	17.5
60	20.85
120	20.1

ตารางที่ 27 ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของเวลาต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

เวลาสกัด (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 nm			
	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.408	0.410	0.414	0.411
60	0.433	0.399	0.438	0.423
120	0.445	0.450	0.455	0.450

ตารางที่ 28 ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของเวลาต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

เวลาสกัด (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 492 nm			
	1	2	3	เฉลี่ย
30	0.334	0.357	0.417	0.369
60	0.364	0.381	0.387	0.377
120	0.463	0.479	0.479	0.474

ตารางที่ 29 ผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อผลได้ของสารสกัด ทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ เวลาในการสกัด 60 นาที

อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย	Yield (%)
1:8	17.3
1:10	20.1
1:15	21.7

ตารางที่ 30 ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

ratio	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 nm			
	1	2	3	เฉลี่ย
1:8	0.464	0.444	0.450	0.453
1:10	0.433	0.399	0.438	0.423
1:15	0.438	0.423	0.411	0.424

ตารางที่ 31 ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

ratio	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 492 nm			
	1	2	3	เฉลี่ย
1:8	0.452	0.458	0.438	0.449
1:10	0.364	0.381	0.387	0.377
1:15	0.471	0.486	0.465	0.474

ตารางที่ 32 ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อผลได้ของสารสกัด เมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

ชนิดตัวทำละลาย	Yield (%)
น้ำกลั่น	20.1
เอทานอล 95%	9.2

ตารางที่ 33 ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C และอัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

ชนิดตัวทำละลาย	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 nm			
	1	2	3	เฉลี่ย
น้ำกลั่น	0.433	0.399	0.438	0.423
เอทานอล 95%	0.398	0.408	0.406	0.404

ตารางที่ 34 ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการสกัดเปลือกลูกตาลอบแห้ง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด 60 °C เวลาในการสกัด 60 นาที และ อัตราส่วนระหว่างเปลือกตาลกับตัวทำละลาย 1:10 w/v

ชนิดตัวทำละลาย	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 492 nm			
	1	2	3	เฉลี่ย
น้ำกลั่น	0.364	0.381	0.387	0.377
เอทานอล 95%	0.366	0.384	0.377	0.376

ตารางที่ 35 ผลได้ของสารสกัดจากเมล็ดขนุนเมื่อทำการทดลองด้วยชุดทดลองขนาดเล็กเพื่อศึกษาผลของชนิดตัวทำละลาย ขนาดอนุภาค และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการสกัดเป็น 30 °C (อุณหภูมิห้อง) และ 60 นาที ตามลำดับ

ตัวอย่าง	Yield (%)			
	1	2	3	เฉลี่ย
95JS #1.0, 1:2	2.34	2.40	4.12	2.96
95JS #1.0, 1:4	2.88	2.44	4.27	3.20
95JS #1.0, 1:6	2.73	2.53	4.43	3.23
95JS #1.0, 1:8	3.99	2.73	4.58	3.77
95JS #2.0, 1:2	2.18	2.46	4.00	2.88
95JS #2.0, 1:4	2.28	2.64	4.14	3.02
95JS #2.0, 1:6	2.37	3.10	4.22	3.23
95JS #2.0, 1:8	3.34	3.20	4.53	3.69
95JS #2.8, 1:2	1.82	2.60	2.66	2.36
95JS #2.8, 1:4	1.77	2.52	2.83	2.37
95JS #2.8, 1:6	1.74	2.36	2.73	2.28
95JS #2.8, 1:8	2.29	2.28	2.94	2.50
50JS #1.0, 1:2	2.85	4.11	5.56	4.17
50JS #1.0, 1:4	3.45	4.86	6.35	4.89
50JS #1.0, 1:6	3.67	4.77	6.78	5.07
50JS #1.0, 1:8	6.31	5.11	7.12	6.18
50JS #2.0, 1:2	2.85	4.10	3.96	3.64
50JS #2.0, 1:4	3.43	4.75	4.60	4.26
50JS #2.0, 1:6	4.05	4.90	5.15	4.70
50JS #2.0, 1:8	5.78	5.27	5.23	5.43
50JS #2.8, 1:2	2.40	3.61	4.26	3.43
50JS #2.8, 1:4	3.01	4.06	5.34	4.14
50JS #2.8, 1:6	3.54	4.36	5.78	4.56

ตารางที่ 35 (ต่อ)

ตัวอย่าง	Yield (%)			
	1	2	3	เฉลี่ย
50JS #2.8, 1:8	4.63	4.69	4.83	4.72
WJS #1.0, 1:2	2.99	5.55	3.23	3.92
WJS #1.0, 1:4	3.80	6.04	3.93	4.59
WJS #1.0, 1:6	4.12	6.12	4.27	4.83
WJS #1.0, 1:8	3.14	6.29	4.89	4.77
WJS #2.0, 1:2	2.57	4.46	3.26	3.43
WJS #2.0, 1:4	2.63	4.77	3.61	3.67
WJS #2.0, 1:6	2.68	5.45	3.79	3.98
WJS #2.0, 1:8	2.56	6.18	4.56	4.43
WJS #2.8, 1:2	1.40	4.31	3.24	2.98
WJS #2.8, 1:4	2.05	4.77	3.61	3.47
WJS #2.8, 1:6	1.90	5.12	4.19	3.74
WJS #2.8, 1:8	1.75	5.26	4.29	3.77

ตารางที่ 36 ผลได้ของสารสกัด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขุ่น 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขุ่นกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน

เวลาสกัด (นาที)	Yield (%)		
	1	2	เฉลี่ย
0	1.85	4.97	3.41
30	2.11	4.69	3.40
60	2.58	4.54	3.56
90	2.53	4.72	3.62
120	2.47	4.67	3.57
150	2.56	4.86	3.71
180	2.63	5.00	3.81
360	2.55	5.31	3.93
480	2.31	5.81	4.06

ตารางที่ 37 ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C
ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำ
ละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 1)

เวลาสกัด (นาที)	dilution factor	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 nm			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	5	0.782	0.786	0.785	0.784
30	5	0.785	0.833	0.840	0.819
60	5	0.799	0.881	0.896	0.859
90	5	0.845	0.876	0.842	0.854
120	5	0.775	0.791	0.826	0.797
150	5	0.865	0.884	0.870	0.873
180	5	0.778	0.796	0.798	0.791
360	5	0.858	0.840	0.881	0.860
480	5	0.811	0.782	0.748	0.780

ตารางที่ 38 ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C
ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำ
ละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 2)

เวลาสกัด (นาที)	dilution factor	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 nm			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	5	0.837	0.847	0.845	0.843
30	5	0.867	0.898	0.897	0.887
60	10	0.343	0.379	0.365	0.362
90	10	0.307	0.332	0.328	0.322
120	5	0.883	0.943	0.911	0.912
150	5	0.890	0.968	0.940	0.933
180	10	0.330	0.350	0.334	0.338
360	10	0.323	0.346	0.329	0.333
480	10	0.394	0.363	0.368	0.375

ตารางที่ 39 ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 1)

เวลาสกัด (นาที)	dilution factor	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 492 nm			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	80	0.285	0.283	0.198	0.255
30	80	0.253	0.277	0.194	0.241
60	80	0.263	0.284	0.213	0.253
90	80	0.276	0.401	0.343	0.340
120	80	0.281	0.281	0.286	0.283
150	80	0.301	0.297	0.325	0.308
180	80	0.291	0.294	0.291	0.292
360	80	0.446	0.391	0.388	0.408
480	80	0.289	0.298	0.266	0.284

ตารางที่ 40 ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 2)

เวลาสกัด (นาที)	dilution factor	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 492 nm			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	40	0.604	0.535	0.603	0.581
30	40	0.561	0.555	0.552	0.556
60	40	0.594	0.712	0.577	0.628
90	40	0.523	0.491	0.509	0.508
120	40	0.597	0.657	0.538	0.597
150	40	0.536	0.562	0.527	0.542
180	40	0.605	0.541	0.378	0.508
360	40	0.552	0.548	0.499	0.533
480	40	0.446	0.508	0.436	0.463

ตารางที่ 41 ผลได้ของสารสกัด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน

เวลาสกัด (นาที)	Yield (%)		
	1	2	เฉลี่ย
0	3.31	3.55	3.43
30	3.38	3.65	3.52
60	3.50	3.83	3.67
90	3.84	4.15	3.99
120	3.90	4.15	4.03
150	4.13	4.05	4.09
180	4.26	4.24	4.25
360	4.20	4.51	4.35
480	4.24	4.30	4.27

ตารางที่ 42 ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 1)

เวลาสกัด (นาที)	dilution factor	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 nm			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	5	0.762	0.735	0.779	0.759
30	5	0.856	0.860	0.841	0.852
60	10	0.684	0.700	0.678	0.687
90	10	1.159	1.190	1.100	1.150
120	10	1.117	1.124	1.148	1.130
150	10	1.242	1.158	1.233	1.211
180	10	0.877	0.899	0.894	0.890
360	10	1.143	1.194	1.175	1.171
480	10	0.928	0.961	0.925	0.938

ตารางที่ 43 ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 2)

เวลาสกัด (นาที)	dilution factor	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 nm			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	40	0.21	0.21	0.21	0.21
30	20	0.57	0.57	0.55	0.56
60	40	0.45	0.44	0.41	0.43
90	20	0.56	0.62	0.61	0.60
120	40	0.53	0.50	0.54	0.52
150	20	0.66	0.70	0.69	0.68
180	20	0.60	0.65	0.63	0.63
360	40	0.43	0.46	0.44	0.44
480	20	0.79	0.79	0.76	0.78

ตารางที่ 44 ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 1)

เวลาสกัด (นาที)	dilution factor	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 492 nm			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	80	0.268	0.223	0.226	0.239
30	80	0.275	0.286	0.271	0.277
60	200	0.217	0.222	0.214	0.218
90	200	0.383	0.380	0.358	0.374
120	200	0.374	0.333	0.318	0.342
150	200	0.299	0.332	0.301	0.311
180	200	0.236	0.240	0.271	0.249
360	200	0.386	0.342	0.331	0.353
480	200	0.297	0.316	0.273	0.295

ตารางที่ 45 ค่าการดูดกลืนแสงของการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ตัวทำละลายเอทานอล 50% ขนาดเมล็ดขนุน 1.0-2.0 mm และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดขนุนกับตัวทำละลาย 1:8 ที่เวลาในการสกัดต่างๆกัน (ครั้งที่ 2)

เวลาสกัด (นาที)	dilution factor	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 492 nm			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	100	0.456	0.466	0.437	0.453
30	100	0.416	0.402	0.399	0.406
60	200	0.511	0.569	0.491	0.524
90	200	0.504	0.440	0.475	0.473
120	200	0.453	0.470	0.477	0.467
150	200	0.398	0.345	0.352	0.365
180	100	0.579	0.693	0.525	0.599
360	200	0.486	0.454	0.484	0.475
480	100	0.600	0.701	0.815	0.705

ตารางที่ 46 ผลการวัดค่า pH ของตัวอย่างสารสกัดที่อุณหภูมิในการสกัด 30 °C

เวลาในการสกัด (นาที)	pH	
	1	2
0	5.63	5.87
30	5.71	5.91
60	5.71	5.91
90	5.72	5.9
120	5.73	5.89
150	5.74	5.87
180	5.66	5.85
360	5.65	5.81
480	5.58	5.76

ตารางที่ 47 ผลการวัดค่า pH ของตัวอย่างสารสกัดที่อุณหภูมิในการสกัด 60 °C

เวลาในการสกัด (นาที)	pH	
	1	2
0	5.91	5.64
30	5.93	5.63
60	5.89	5.65
90	5.87	5.66
120	5.84	5.63
150	5.79	5.6
180	5.72	5.6
360	5.59	5.51
480	5.62	5.54