รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

กรณีศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสกัดน้ำมันจากรำข้าวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

Case study of optimized condition for extracting rice bran oil using Supercritical Carbon dioxide

นายธนภัทร วัฒนพิทักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงงานสหกิจศึกษา กรณีศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสกัดน้ำมันจากรำข้าวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายธนภัทร วัฒนพิทักษ์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ **ภาควิชา** วิศวกรรมอาหาร

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ผศ. ดร.เกียรติศักดิ์ รุ่นพระแสง

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายวรท ล้ำเลิศพงศ์พนา

สถานประกอบการ บริษัท ไอ.ที.ซี. (1993) จำกัด

บทคัดย่อ

การสกัดน้ำมันรำข้าวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด สำหรับเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความดันสกัดที่มีผลต่อปริมาณสารสกัด โดยใช้รำข้าวเป็นวัตถุดิบในการสกัด ใช้ความดันสกัดที่ 200 และ 300 บาร์ สกัดรำข้าวเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง และใช้ความดันสกัด 100 , 200 และ 300 บาร์ สกัดรำข้าวเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังกระบวนการสกัดจะได้สารสกัดเป็นน้ำมันรำข้าว ปริมาณน้ำมันรำข้าวสูงสุดที่ได้จากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด คือ 47.63 กรัม สำหรับระยะเวลาการสกัด 5 ชั่วโมงที่ความดันสกัด 300 บาร์ และ 237.60 กรัม สำหรับระยะเวลาการสกัด 24 ชั่วโมงที่ความดันสกัด 300 บาร์ สรุปได้ว่า การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดที่ความดันสกัดสูงกว่า ทำให้ได้สารสกัดในปริมาณที่มากกว่าในระยะเวลาการสกัดที่เท่ากันและสภาวะการสกัดเหมือนกัน

คำสำคัญ : การสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด , คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด , น้ำมันรำข้าว , ความดันสกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cooperative Title: Case study of optimized condition for extracting rice bran oil using Supercritical Carbon dioxide

Student intern name: Mr.Thanapatr Watanapitak

Faculty: Engineering **Department:** Food Engineering

Advisor name: Asst. Prof.Dr.Kiattisak Roonprasang

Mentor name: Mr.Warot Lamlertpongpana

Company: I.T.C. (1993) Co., LTD.

ABSTRACT

Extracting rice bran oil by Supercritical fluid extraction using carbon dioxide as organic solvent for comparison of yield and analysis relative of extracting pressure and extracted yield. Rice bran used as starting material in the experiment. The experiment was vary extracting pressure at 200 and 300 bar for extraction time 5 hr and operated extracting pressure at 100, 200 and 300 bar for extraction time 24 hr. Finally we get extracted is rice bran oil. Maximum yield of the experiment is 47.63 g for extraction time 5 hr at extracting pressure 300 bar and 237.60 g for extraction time 24 hr at extracting pressure 300 bar. We concluded that extracting rice bran oil by Supercritical fluid extraction using carbon dioxide at higher extracting pressure will get better yield than lower extracting pressure at the same extracting condition and same extraction time.

Keywords : Supercritical Fluid Extraction (SFE) , Supercritical Carbon dioxide , Rice bran oil , Extracting pressure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานสหกิจศึกษา “กรณีศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสกัดน้ำมันจากรำข้าวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด” สำเร็จไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคำแนะนำของอาจารย์ที่ปรึกษา , วิศวกรประจำโปรเจค และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ผมจึงขอขอบคุณอาจารย์ และบุคคลที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน ดังนี้

1. คุณอภิชัย ล้ำเลิศพงศ์พนา ตำแหน่ง กรรมการผู้จัดการ (ผู้บริหารสูงสุด)
2. คุณวรท ล้ำเลิศพงศ์พนา ตำแหน่ง วิศวกรสนาม
3. คุณวัลลภ ล้ำเลิศพงศ์พนา ตำแหน่ง วิศวกรประเมินราคา
4. คุณพรทิพย์ เขียวน้ำชุ่ม ตำแหน่ง หัวหน้าแผนกประเมินราคา
5. คุณสริต ปลิวมา ตำแหน่ง วิศวกรแผนกวิจัยและพัฒนา
6. อัจฉริยะ จันทะขึ้น ตำแหน่ง วิศวกร QA และพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต
7. คุณอำพล กะพูพันธ์ ตำแหน่ง ช่างประจำเครื่องสกัด
8. ผศ. ดร.เกียรติศักดิ์ รุ่นพระแสง ตำแหน่ง อาจารย์ที่ปรึกษา

และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ทั้งในบริษัท โรงงาน ตั้งแต่เริ่มการวางแผน ออกแบบ และปฏิบัติในการทำโครงงานครั้งนี้ นอกจากนี้ยังสอนให้ข้าพเจ้าได้เรียนรู้ถึงลักษณะการทำงานจริงๆที่ต้องเจอในอนาคต การทำงานร่วมกับผู้อื่น และการอบรมเพื่อพัฒนาศักยภาพของตนเอง ทำให้ข้าพเจ้าได้เห็นและสัมผัสถึงการทำงานในสาขาที่ข้าพเจ้ากำลังศึกษาอยู่จริง ๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ ผศ. ดร.เกียรติศักดิ์ รุ่นพระแสง ผู้ที่คอยให้คำแนะนำ และชี้แนวทางการให้คำปรึกษา รวมทั้งแนวทางการแก้ไขปัญหาระหว่างการวางแผนและดำเนินงานโครงงานสหกิจศึกษา ทำให้โครงงานประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี ตลอดจนทำรายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ธนภัทร วัฒนพิทักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง **หน้า**

บทคัดย่อภาษาไทย II

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ III

กิตติกรรมประกาศ IV

สารบัญ V

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย 2

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.6 ข้อมูลเกี่ยวกับบริษัท 5

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5

2.1.1 Supercritical fluid 5

2.1.2 Refrigeration system 9

2.1.3 CO_2 Transcritical Refrigeration system 14

2.1.4 Extraction 19

2.1.4.1 การสกัดแบบของแข็ง-ของเหลว (Solid - Liquid extraction) 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

2.1.4.2 เครื่องสกัดสำหรับการสกัดแบบของแข็ง-ของเหลว 25

2.1.4.3 การสกัดแบบของเหลว-ของเหลว (Liquid - Liquid extraction) 30

2.1.4.4 เครื่องสกัดสำหรับการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว 31

2.1.5 Supercritical fluid Extraction 33

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 38

3.1 ศึกษากระบวนการสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด 38

3.2 ศึกษาวิธีการใช้งานและความปลอดภัยของเครื่องสกัด 38

3.3 ปัญหาและการพัฒนาระหว่างการใช้งานเครื่องสกัด 42

3.4 การออกแบบการทดลอง 44

3.5 วัตถุดิบและวัสดุ 45

3.6 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง 47

3.7 ขั้นตอนการทดลอง 49

3.8 วิธีการคำนวณ 52

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน 54

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 62

5.1 สรุปผลการวิจัย 62

5.2 ข้อเสนอแนะ 63

เอกสารอ้างอิง 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แผนการดำเนินโครงงานสหกิจ 3

2.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่น , การแพร่ , ความหนืด สำหรับของเหลว , ก๊าซ 6
และของไหลเหนือจุดวิกฤตยิ่งยวดทั่วไป

2.2 ค่าวิกฤตของสารประกอบ 7

2.3 สมบัติทางกายภาพของของไหล ณ สภาวะเหนือจุดวิกฤต 9

3.1 เงื่อนไขการทดลองในการสกัดน้ำมันจากรำข้าวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ 44

4.1 ผลการใช้ไฟฟ้าในการสกัดน้ำมันรำข้าวระยะเวลา 5 ชั่วโมง 54

4.2 ผลการลดปริมาณรำข้าวในการสกัด 55

4.3 ผลการทดลองการสกัดน้ำมันรำข้าวระยะเวลา 5 ชั่วโมง 56

4.4 ผลการใช้ไฟฟ้าในการสกัดน้ำมันรำข้าวระยะเวลา 24 ชั่วโมง 59

4.5 การคิดค่าใช้จ่ายในการสกัดเชิงของ CO_2 60

4.6 ต้นทุนโดยรวมในการสกัดน้ำมันแต่ละครั้ง 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 CO_2 Phase diagram 5

2.2 รูปร่างของ Supercritical CO_2 ใน Pressure vessel 6

2.3 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอชั้นเดียว 10

2.4 ตัวอย่างคอมเพรสเซอร์ (Compressor) 11

2.5 ตัวอย่างคอนเดนเซอร์ (Condenser) 11

2.6 ตัวอย่างอุปกรณ์ควบคุมสารทำความเย็น (Expansion Valve) 13

2.7 ตัวอย่างอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) 13

2.8 P-h diagram of Carbon dioxide 14

2.9 กระบวนการการทำความเย็นแบบใต้จุดวิกฤตและแบบระหว่างจุดวิกฤต 16

2.10 อุปกรณ์และรายละเอียดของระบบทำความเย็นแบบระหว่างจุดวิกฤต 17

2.11 Air Compressor 17

2.12 Gas cooler 18

2.13 Expansion valve 18

2.14 Evaporator 19

2.15 วิธีการสกัดแบบหน่วยเดียว 23

2.16 วิธีการสกัดหลายหน่วยแบบไหลตามกัน 24

2.17 วิธีการสกัดหลายหน่วยแบบไหลผ่านในแต่ละหน่วย 24

2.18 วิธีการสกัดหลายหน่วยแบบไหลตามกัน 24

2.19 เครื่องสกัดและกรองแบบกะ 25

2.20 เครื่องสกัดแบบ Rotocel 26

2.21 เครื่องสกัดแบบ Bollman bucket 26

2.22 เครื่องสกัดแบบเบดเคลื่อนที่ 27

2.23 เครื่องสกัดแบบ screw-conveyor 28

2.24 เครื่องสกัดแบบ Soxhlet 29

2.25 เครื่องสกัดแบบ Supercritical fluid extraction 30

2.26 หลักการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.27 การสกัดแบบของเหลว-ของเหลว 31

2.28 เครื่องสกัดแบบ mixer-settlers (a) แบบแยกถัง (b) แบบถังเดียว 32

2.29 เครื่องสกัดแบบ tower (a) แบบแผ่นวัสดุพรุน หรือตะแกรงกั้น (b) แบบมีใบกวนผสม 32

2.30 เครื่องสกัดแบบพ่นฝอย 33

2.31 ร้อยละของน้ำมันที่สกัดได้ที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ 35

2.32 ผลการทดลองของ Juliana Ferreira Soares et al. (2015) 35

2.33 ผลการทดลองของ Darius Povilaitis และ Petras Rimantas Venskutonis 36

2.34 ผลการทดลองของ Darius Povilaitis และ Petras Rimantas Venskutonis (2) 37

3.1 ผังเครื่องสกัดด้วย Supercritical CO_2 38

3.2 แผงวงจรของเครื่องทำความเย็นและสวิตช์ที่ใช้งาน 39

3.3 ตำแหน่งของแถบล็อกอินบนมอนิเตอร์ 39

3.4 หน้าต่างล็อกอินของระบบเครื่องทำความเย็นและเครื่องสกัด 40

3.5 Data logger ของระบบเครื่องทำความเย็นและเครื่องสกัด 40

3.6 สวิตช์ปั๊มน้ำ และ ลวดความร้อนบนแผงวงจรเครื่องสกัด 41

3.7 รำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 80 46

3.8 ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 46

3.9 เทอร์โมมิเตอร์ ชนิดอินฟาเรด 47

3.10 NTC double insulation IP68 47

3.11 Nuova Fima Pressure guage 47

3.12 Hioki 3280-10f AC Clamp Meter 48

3.13 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น SF-400D 48

3.14 การใส่รำข้าวลงกระบอกถังใน 49

3.15 การขันฝาถังใน 49

3.16 การใส่ถังทรงกระบอกลงในถังสกัด 50

3.17 การเปิดถังคาร์บอนไดออกไซด์ 50

3.18 วาล์วเปิด-ปิดตัวผสมความดันถังก๊าซ 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

3.19 การเปิดตัวผสมความดันถังก๊าซ 51
3.20 ใบบันทึกผลการทดลอง 52
4.1 ตัวอย่างน้ำมันรำข้าวที่ได้จากการสกัด 54
4.2 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ที่ความดันถังสกัด 100 และ 200 บาร์ 57
ที่ระยะเวลาสกัด 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การเลือกสารทำความเย็น เป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับระบบทำความเย็น นอกจากการดูประสิทธิภาพในการทำความเย็นแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสมบัติและข้อควรระวังในการใช้งานสารทำความเย็นด้วย ในปัจจุบันสารทำความเย็นในโซนเอเชียที่ใช้กันอยู่ ได้แก่ สารทำความเย็น R134a , Ammonia (R717) , Freon (R507) เป็นต้น แต่เนื่องจากสารทำความเย็นบางชนิดมีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน ดังนั้น ประชากรจึงให้ความสำคัญกับเรื่องนี้ ในตอนแรกประชากรอาจนิยมใช้สารทำความเย็นประเภท Hydrofluorocarbon (HFC) เช่น R-134a ต่อมา สาร HFC มีค่า GWP สูง ทำให้การใช้สารทำความเย็นประเภทนี้ ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนมากขึ้น จึงหันมาใช้สารทำความเย็นจากธรรมชาติ เช่น แอมโมเนีย (Ammonia : R717) , โพรเพน และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 : R-744) เป็นต้น แอมโมเนีย เป็นสารทำความเย็นที่ไม่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP = 0) จึงเป็นสารทำความเย็นตัวหนึ่งที่นิยมใช้ในระบบทำความเย็น ในปัจจุบัน ประชากรเพิ่มมากขึ้น ทำให้ชุมชนขยายเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมาถึงเขตที่มีโรงงานตั้งอยู่ จึงมีกฎกระทรวง กำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นในโรงงาน พ.ศ. ๒๕๕๔ เพื่อความปลอยภัยของประชาชนที่อยู่อาศัยในเขตที่มีโรงงาน แต่มีประชาชนบางส่วนต่อต้านการใช้แอมโมเนียของโรงงานในเขตชุมชนเนื่องจากอันตรายจากการรั่วไหลของแอมโมเนียที่เป็นสารก่อให้เกิดมลพิษ ด้วยลักษณะความเป็นก๊าซไวไฟ ทำให้ผิวหนังไหม้และทำลายดวงตาอย่างรุนแรง ดังนั้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็เป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจและเริ่มนำกลับมาใช้เป็นสารทำความเย็นอีกครั้ง โดยระบบทำความเย็นที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นสารทำความเย็นนั้น เรียกว่า CO_2 Transcritical refrigeration system ซึ่งเป็นที่นิยมในประเทศโซนยุโรป เนื่องจากก๊าคาร์บอนไดออกไซด์มี Global Warming Potential (GWP) เท่ากับ 1 หมายความว่า มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนน้อยกว่าสารทำความเย็น เช่น R-22 , R-134a เป็นต้น และเป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ ซึ่งระบบทำความเย็นนี้ เป็นที่นิยมในโซนประเทศยุโรป เนื่องจากทำให้ภาวะโลกร้อนน้อยลง (Lower GWP) แต่ในประเทศโซนเขตร้อนชื้นอย่างภูมิภาคเอเชีย ด้วยอุณหภูมิแวดล้อมของประเทศนั้น ๆ มีค่าสูง คาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำงานในระบบจะมีความดันทำงานสูงขึ้น ถึงขั้นที่เปลี่ยนเป็นสถานะ วิกฤตยิ่งยวด หรือ เหนือจุดวิกฤต (Supercritical) ทำให้ยากต่อการออกแบบระบบ แต่ในที่สุด เมื่อปี 2018 ที่ผ่านมา บริษัท ไอ.ที.ซี. (1993) จำกัด ประสบความสำเร็จในการออกแบบและผลิตระบบทำความเย็นโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารทำความเย็นในประเทศไทยได้สำเร็จ ล่าสุด ทางบริษัทได้รับรางวัล Lower-GWP Refrigeration and Air-Conditioning Innovation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Awards ด้านการใช้งานเชิงพาณิชย์ / อุตสาหกรรม โดย ASHRAE-UNEP เมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน ค.ศ. 2019 ที่ประเทศอิตาลี ระบบที่ได้รับรางวัล มีชื่อว่า The Crocodile Project CO2 Transcritical Refrigeration System for a Hot-and-Humid Region implemented in Thailand ซึ่งเป็นระบบทำความเย็นขนาดใหญ่ที่ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในขณะนี้ ทางบริษัทกำลังพัฒนาระบบสกัดที่สามารถนำมาใช้งานร่วมกับระบบทำความเย็น CO_2 Transcritical ที่บริษัทออกแบบไว้เพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยนำก๊าซ CO_2 และความร้อนที่ได้จาก Gas cooler ในระบบทำความเย็นด้วย CO_2 ในสถานะ Supercritical มาประยุกต์ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดสารจากวัตถุดิบหรือสมุนไพรต่าง ๆ ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Supercritical fluid Extraction สามารถสกัดสารสำคัญออกมาได้เป็นผลิตภัณฑ์อีกรูปแบบ ถือว่าเป็น Waste Recovery อย่างหนึ่งของระบบทำความเย็น หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสกัด คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำกลับไปใช้ในระบบทำความเย็นวนไป ทำให้ไม่มีการสูญเสียหรือสูญเสีย CO_2 เพียงเล็กน้อยในกระบวนการสกัด เรียกว่า CO_2 Recovery ส่วนวัตถุดิบที่มาใช้ทดลองการสกัด คือ รำข้าวที่เป็น Waste จากโรงสีข้าวมาทดลอง เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย และมีราคาที่ไม่แพง เป็นการเพิ่มมูลค่าของรำข้าวโดยใช้กระบวนการทางวิศวกรรมอาหาร และสามารถเพิ่มมูลค่าของสมุนไพรอื่น ๆ ได้ด้วยเช่นกัน และอาจมีการขยายกำลังผลิตในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากรำข้าวด้วยเทคนิค Supercritical Fluid Extraction (SFE)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการสกัดรำข้าวด้วยวิธี Supercritical Fluid Extraction โดยใช้ Carbon Dioxide เป็น Supercritical fluid

1.3.2 ศึกษาการใช้เครื่องสกัดและทำการทดลองที่โรงงาน ไอ.ที.ซี. ตั้งอยู่ที่ 84/12 โครงการอรดาแฟคตอร์รี่ หมู่ 4 ถนนลำลูกกา (คลอง 8) ตำบลลำลูกกา อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150

1.3.3 ศึกษาความดันสกัด (Extracting Pressure) 3 ระดับ ที่มีผลต่อผลผลิต (Yield) ที่ได้จากการสกัด ณ สภาวะการสกัดเดียวกัน

1.3.4 ระยะเวลาการดำเนินโครงงานสหกิจที่บริษัท ไอ.ที.ซี. (1993) จำกัด ตั้งแต่วันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ. 2562 – 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2562

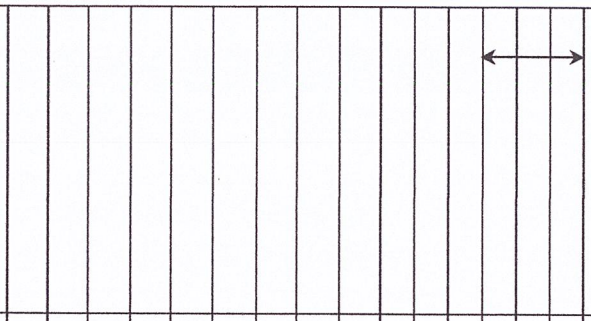
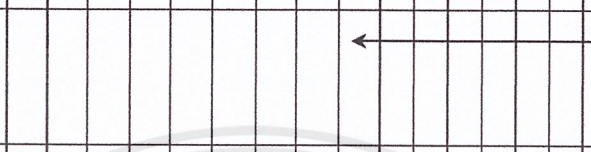
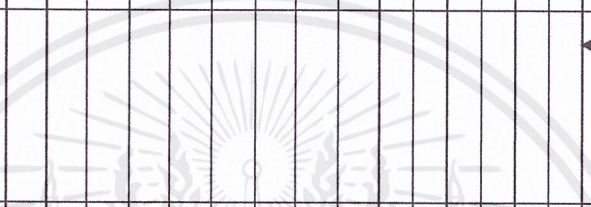
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงงานสหกิจ

หัวข้อ	ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.				ม.ค.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ตกลงหัวข้อสหกิจกับทางบริษัทและศึกษาลักษณะของโครงงานที่จะทำ	↔																							
2. ศึกษาสมบัติของรำข้าวและสารที่เป็นประโยชน์	↔	↔																						
3. ศึกษาวิธีการสกัดด้วยวิธี SFE และสภาวะการสกัด		↔	↔																					
4. ศึกษาสมบัติของ Supercritical fluid , ระบบ CO2 Transcritical Refrigeration systems และทำโปรแกรมคำนวณด้วย Excel						↔	↔		↔															
5. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม SPSS และการคำนวณ Specific Energy Consumption										↔	↔													
6. ทำการทดลองการสกัดรำข้าวด้วย sc-CO2										↔	↔	↔	↔											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการคำนวณและเปรียบเทียบ %Yield จากค่าผลของการทดลองทั้งหมดด้วย Excel และโปรแกรมคอมพิวเตอร์	
8. เขียนรูปเล่มรายงานสหกิจศึกษา	
9. วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	
10. เตรียมการนำเสนอรายงานสหกิจฉบับสมบูรณ์	
11. ปรับรูปเล่มและเรียบเรียงการเขียนรายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ความรู้เกี่ยวกับระบบทำความเย็นและข้อควรระวังของ CO_2 Transcritical Refrigeration system เป็นระบบที่ใช้งานได้จริงในประเทศเขตร้อน และได้ความรู้เกี่ยวกับการสกัดด้วยวิธี Supercritical Fluid Extraction (SFE) โดยของไหลทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย คือ คาร์บอนไดออกไซด์ และ วิธีการใช้เครื่องสกัดซึ่งเป็นการทำงานทางด้านการทดลองในบริษัทจริง ๆ นอกจากนี้ยังได้รู้จักการแก้ปัญหาหน้างานจริง เนื่องจากว่าเป็นเครื่องต้นแบบ (Prototype) จึงมีการปรับแก้เครื่องจักรเมื่อเกิดปัญหาในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ข้อมูลเกี่ยวกับบริษัท

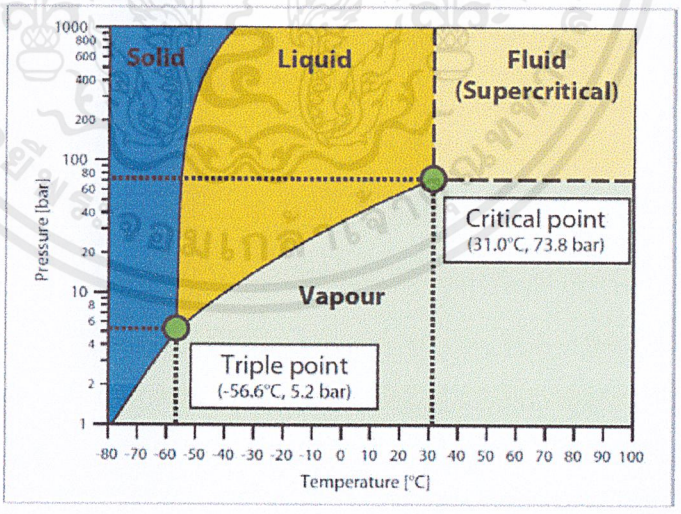
บริษัท ไอ.ที.ซี. (1993) จำกัด เป็นบริษัทฯ ที่ดำเนินกิจการเกี่ยวกับด้านอุตสาหกรรมทำความเย็น แช่แข็ง และถนอมอาหาร ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินธุรกิจตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 เป็นต้นมา ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของบริษัท เช่น Fanless Evaporative Condenser , Spiral Freezer , Condensing Unit , Pipe Insulation & Cladding Materials เป็นต้น นอกจากจะรับเหมาติดตั้งงานธุรกิจเกี่ยวกับระบบเครื่องทำความเย็นแล้ว ยังดำเนินธุรกิจจำหน่ายเครื่องจักร อะไหล่ อุปกรณ์ควบคุม และซ่อมแซมเครื่องจักรที่ใช้ในขบวนการผลิตเกี่ยวกับอุตสาหกรรมทำความเย็น แช่แข็ง และถนอมอาหารต่าง ๆ อีกด้วย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 Supercritical fluid

ของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical fluids) เป็นสารใด ๆ ที่มีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าจุดวิกฤติ ณ สภาวะนี้



รูปที่ 2.1 CO_2 Phase diagram

(Ref. Transcritical Refrigeration Systems with Carbon Dioxide (CO_2), Danfoss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

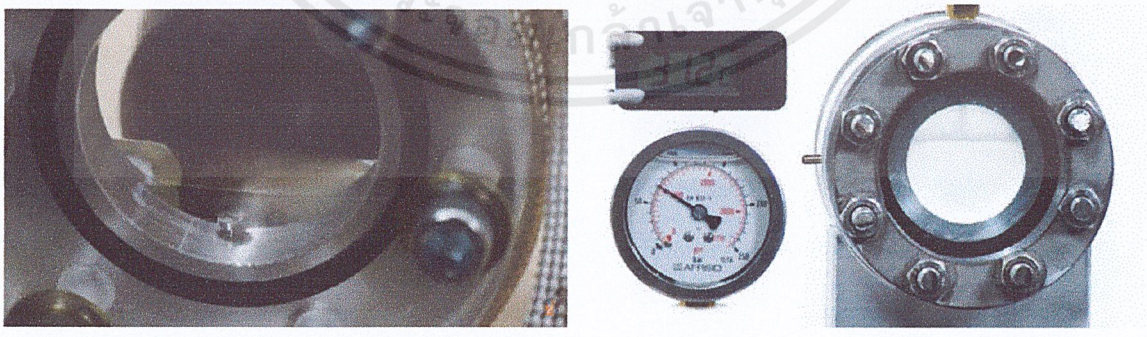
ของไหลเหนือจุดวิกฤต (Supercritical fluids) มีความสามารถในการแพร่กระจายผ่านของแข็งได้เหมือนก๊าซและสามารถละลายสารได้เหมือนของเหลว ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่น , การแพร่ , ความหนืด สำหรับของเหลว , ก๊าซ และของไหลเหนือจุดวิกฤตยิ่งยวดทั่วไป

	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความหนืด ($\mu Pa \cdot s$)	การแพร่ (mm^2/s)
ก๊าซ	1	10	1 - 10
ของไหลเหนือจุดวิกฤต	100 - 1000	50 - 100	0.01 – 0.1
ของเหลว	1000	500 - 1000	0.001

(Ref. SUPERCRITICAL FLUID EXTRACTION G. N. SAPKALE*, S. M. PATIL, U. S. SURWASE and P. K. BHATBHAGE)

นอกจากนี้ช่วงที่ใกล้กับจุดวิกฤติ การเปลี่ยนแปลงความดันหรืออุณหภูมิเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้สมบัติหลายอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เช่น ความหนาแน่น สมบัติเหล่านี้ต้องค่อย ๆ ปรับความดันหรืออุณหภูมิอย่างละเอียด Supercritical fluids เหมาะสำหรับใช้แทนตัวทำละลายอินทรีย์ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการ โดย Supercritical fluids ที่ใช้กันมากที่สุดก็คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ถูกนำมาใช้สำหรับสกัดคาเฟอีนออกมา (decaffeination) และการผลิตกระแสไฟฟ้าตามลำดับ ก๊าซ CO_2 เป็นตัวทำละลายสกัดสำหรับพืช และไม่มีตัวทำละลายตกค้างหลังการสกัด ด้วยคุณสมบัติการสกัดของ CO_2 การเปลี่ยนความดันและอุณหภูมิอย่างละเอียด สามารถใช้สกัดได้หลายอย่างและได้ผลผลิตที่แน่นอน (G.N. SAPKALE et al) ถ้ามองทางโครงสร้างโมเลกุลภายในหรือจากมุมมองด้วยกล้องจุลทรรศน์พวกเขาอยู่ในสถานะใกล้เคียงกับของเหลว ถ้ามีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะสามารถสังเกตได้ชัดเจน สันนิษฐานการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วเหมือนในสถานะก๊าซ แต่เมื่อสังเกตในรูปภาพทางกล้องมันอาจคล้ายกับของเหลว (Yoshiaki Fukushima, 1999)



รูปที่ 2.2 รูปร่างของ Supercritical CO_2 ใน Pressure vessel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Ref1. Applied Science , Supercritical CO_2 does not help visualize ionizing alpha particles, URL : https://www.youtube.com/watch?v=w2pMDqQAAzI)

(Ref2. Western Norway University of Applied Sciences , Thermodynamics - Explaining the Critical Point, URL : https://www.youtube.com/watch?v=RmaJVxafesU)

สมบัติทั่วไปของ Supercritical fluid

1) Supercritical fluid มีความเป็นก๊าซอัดตัวสูง (Compressed gas) ซึ่งมีทั้งคุณสมบัติของก๊าซและของเหลว

2) Supercritical fluid สามารถทำปฏิกิริยาที่ยากต่อการเกิด ซึ่งตัวทำละลายทั่วไปทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ค่อนข้างยาก

3) มีความเป็นตัวทำละลายคล้ายกับสารพวกไฮโดรคาร์บอนแบบเบา สำหรับตัวทำละลายส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามสารประกอบฟลูออไรด์มักละลายได้ใน Supercritical CO_2 ดีกว่าสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอน ความสามารถในการละลายที่เพิ่มขึ้นมีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

4) ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น (เมื่อเพิ่มความดัน) การขยายตัวอย่างรวดเร็วของ Supercritical solutions นำไปสู่การแบ่งของแข็งอย่างละเอียดและรวดเร็ว นี่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของตัวทำปฏิกิริยาแบบไหล (Flow reactors)

5) ของไหลโดยทั่วไปจะละลายเข้ากับก๊าซถาวร (ก๊าซถาวรเป็นก๊าซที่ เมื่อบรรจุลงท่อจะมีสถานะเป็นก๊าซที่ทุก ๆ ระดับความดัน เช่น ออกซิเจน ฮีเลียม อากาศทางการ แพทย์ (medical air) เป็นต้น (ref. www.fda.moph.go.th) และนำไปสู่ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายได้สูงกว่าที่ทำได้ในตัวทำละลายทั่วไป (สามารถแพร่ได้มากกว่าเนื่องจากมีความเข้มข้นสูงกว่าตัวทำละลายทั่วไป)

ซึ่งของไหลแต่ละสาร จะมีความดันอุณหภูมิวิกฤตที่ต่างกัน ดังตารางนี้

ตารางที่ 2.2 ค่าวิกฤตของสารประกอบ

Compounds	Critical Temperature (°C)	Critical Pressure (atm)	Critical Density (g/ml)
Carbon dioxide	31.3	72.9	0.448
Ammonia	132.4	112.5	0.235

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Water	374.2	218.3	0.315
Nitrous Oxide	36.5	71.7	0.45
Xenon	16.6	57.6	0.118
Krypton	-63.8	54.3	0.091
Methane	-82.1	45.8	0.2
Ethane	32.3	48.1	0.203
Ethylene	9.2	49.7	0.218
Propane	96.7	41.9	0.217
Pentane	196.6	33.3	0.232
Methanol	240.5	78.9	0.272
Ethanol	243.0	63.0	0.276
Isopropanol	235.3	47.0	0.273
Isobutanol	275.0	41.4	0.272
Chlorotrifluoromethane	28.0	38.7	0.579
Monofluoromethane	44.6	58.0	0.3
Cycrohexanol	356.0	38.0	0.273

(Ref . Table 1 Critical point of typical solvents , Yoshiaki Fukushima, 1999)

ด้วยสมบัติของของไหลวิกฤตยิ่งยวด จะมีการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ดังตารางข้างล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของของไหล ณ สภาวะเหนือจุดวิกฤต

Table 3. Apparent physical properties for various supercritical fluids [22–24].

SCF	Molecular Weight	Critical Temperature	Critical Pressure	Density at CP †	Notes
	g·mol⁻¹	°C	bar (psi) *	kg·m⁻³	
Air	n/a	−140.6	37.7 (546.8)	319.9	Green technology fluids and relatively higher CP densities
Ammonia (NH_3)	17.03	132.2	113.3 (1643.2)	225	
Nitrogen (N_2)	28.01	−147	34 (493.1)	313.3	
Water (H_2O)	18.02	373.9	220.6 (3166)	322	
Carbon dioxide (CO_2)	44.01	30.9	73.7 (1056)	467.6	Greener ** technology and high CP density
Chlorotrifluoromethane ($CCIF_3$)	104.5	28.8	38.8 (563.3)	582.9	Higher CP densities but environmentally hazardous
Dichlorofluoromethane ($CHCl_2F$)	102.9	178.3	51.8 (751.3)	526.1	
Octafluoropropane (C_3F_8)	188	71.9	26.8 (388.7)	629	
Acetone (C_3H_6O)	58.08	235.1	46.4 (672.9)	278	Lower CP densities and environmentally hazardous
Benzene (C_6H_6)	78.11	289	49 (710.7)	30.9	
Dimethyl Ether ($(CH_3)_2O$)	46.1	127.1	53.4 (774.5)	277	
Ethane (C_2H_6)	30.07	32.2	48.7 (697.6)	206.2	
Ethanol (C_2H_5OH)	46.07	240.9	60.6 (878.9)	276	
Ethylene (C_2H_4)	28.05	9.2	50.4 (720.9)	214.2	
Methane (CH_4)	16.04	−82.6	45.9 (658.5)	162.7	
Methanol (CH_3OH)	32.04	239.4	81 (1157.4)	275.5	
n-Propane (C_3H_8)	44.1	96.7	42.5 (761.4)	220.5	
Propylene (C_3H_6)	42.08	91.9	45.5 (658.5)	230.1	

Key: * Pressure conversions: 1 MPa = 10 atm or bar = 145 psi = 2059 kg·cm⁻². Pressure will be presented in bar hereafter. ** Greener = being extracted from the atmosphere for SCF processing and where $scCO_2$ acts as a solvent it can replace organic solvents. † CP = critical point.

(Ref. Solvent Supercritical Fluid Technologies to Extract Bioactive Compounds from Natural Sources: A Review, Molecules.)

Supercritical fluids ที่นำมาใช้ในการสกัดครั้งนี้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ มีสถานะเป็นก๊าซ ที่ความดันบรรยากาศ เป็นสารที่ไม่มีขั้ว

- Critical point of CO_2 : P_c 73.773 bar , T_c 30.9782 °C (Data from NIST)
- Triple point of CO_2 : P 5.2 bar , T -56.6 °C (Data from NIST)

2.1.2 Refrigeration system

ระบบทำความเย็น เป็นกระบวนการดึงความร้อนออกจากวัตถุหรืออากาศเพื่อรักษาให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศแวดล้อมภายนอก อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้ เรียกว่า เครื่องทำความเย็น (Refrigerator) การจะสร้างระบบทำความเย็นได้นั้นต้องอาศัยหลักการ 2 อย่าง คือ การเดือดกลายเป็นไอของของเหลว และการถ่ายเทความร้อนออกจากไอของของเหลว ซึ่งของเหลวจะเดือดกลายเป็นไอเนื่องจากได้รับความร้อน และถ่ายเทความ

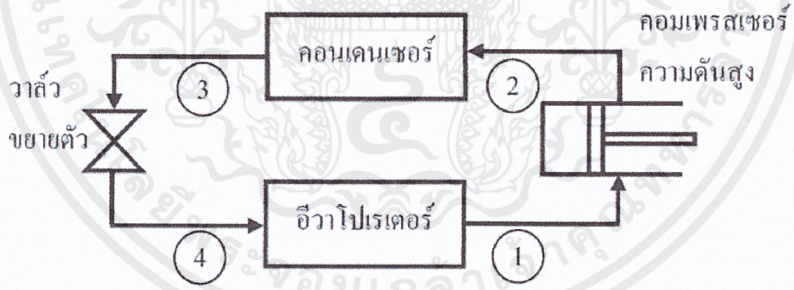
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนออกจากไอให้กลายเป็นของเหลว เรียกว่าสารทำความเย็น (Refrigerant) ส่วนในเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมจะใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นร่วมกับการใช้สารในกลุ่มน้ำเกลือ เช่น ลิเทียมโบรไมด์ เป็นสารดูดซึม (Absorbent) ในปัจจุบันสารทำความเย็นหลายชนิดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม

วัฏจักรการทำความเย็น จำแนกได้เป็น ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration Unit) มีทั้งแบบชั้นเดียว (Single stage) แบบหลายชั้น (Multi stage) และระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorption Refrigeration Unit) ในที่นี้จะกล่าวถึงระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration Unit)

ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration System)

ระบบการอัดไอโดยทั่วไปใช้หลักการอัดไอสารทำความเย็นให้มีอุณหภูมิและความดันสูง ก่อนถ่ายโอนความร้อนออก เพื่อให้เกิดการกลั่นตัวแล้วลดความดันให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะอีกครั้ง แล้วใช้คอมเพรสเซอร์อัดเพื่อป้อนงานให้กับระบบสำหรับกระบวนการและการนำไปใช้งานกับระบบเครื่องปรับอากาศ โดยการนำสารทำความเย็นอุณหภูมิต่ำไปรับความร้อนออกมาจากพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็น สารทำความเย็นที่ใช้กันมาก ได้แก่ แอมโมเนีย, คาร์บอนไดออกไซด์ และเมทิลคอลไรด์ ระบบทำความเย็นแบบอัดไอประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ตัว ดังรูปที่ 2.3

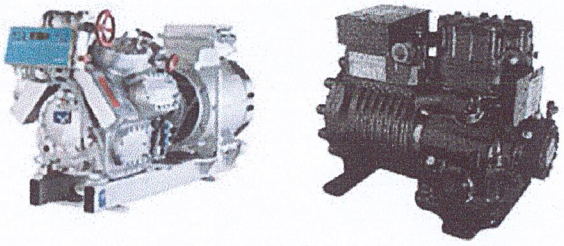


รูปที่ 2.3 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอชั้นเดียว

องค์ประกอบหลัก 4 ชนิดของระบบทำความเย็น ได้แก่

1. คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างคอมเพรสเซอร์ (Compressor)

คอมเพรสเซอร์ ทำหน้าที่สร้างความดันในระบบโดยอัดสารทำความเย็นในสถานะไอ ทำให้เกิดการไหลเวียนไปยังอุปกรณ์ต่าง ๆ สารทำความเย็นจะถูกอัดด้วยคอมเพรสเซอร์ให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น สารทำความเย็นจะอยู่ในสถานะความร้อนยิ่งยวด (superheated) จากนั้นคอมเพรสเซอร์จะส่งจ่ายไอสารทำความเย็นเข้าไปในคอนเดนเซอร์ (Condenser) ต่อไป สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะโครงสร้าง ดังนี้

1) คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ (Reciprocating compressor)

มีราคาไม่สูง มีขนาดตั้งแต่ไม่ถึง 1 แรงม้า จนถึงหลายร้อยตันความเย็น แต่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่มากชิ้นและต้องการการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง

2) คอมเพรสเซอร์แบบสกรู (Screw compressor)

คอมเพรสเซอร์แบบนี้เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากมีความเชื่อถือได้ในการทำงาน ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง ไม่ยุ่งยากในการบำรุงรักษา มักจะถูกใช้ในระบบทำความเย็นที่มีขนาดใหญ่

3) คอมเพรสเซอร์แบบหอยโข่ง (Centrifugal compressor)

เหมาะกับระบบทำความเย็นขนาดใหญ่มาก ๆ เพราะสามารถส่งจ่ายสารทำความเย็นได้ปริมาณมาก และมีประสิทธิภาพสูง

2. คอนเดนเซอร์ (Condenser)

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างคอนเดนเซอร์ (Condenser)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ref. https://www.itc-group.co.th/product_details.php?pid=P3004)

ทำหน้าที่ระบายความร้อนสารทำความเย็นหลังผ่านการอัดจากคอมเพรสเซอร์ ซึ่งสารทำความเย็นดังกล่าวจะมีสถานะเป็นไอความดันสูง อุณหภูมิสูง เมื่อผ่านเครื่องควบแน่นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลงและกลั่นตัวเป็นของเหลวที่อยู่ภายใต้ความดันสูง ซึ่งแบ่งประเภทเครื่องควบแน่นได้ 3 แบบคือ

1) แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air Cooled)

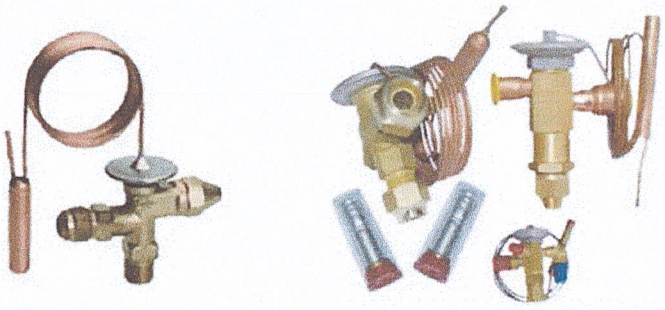
2) แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooled) เป็นตัวระบายความร้อนจะมีประสิทธิภาพดีกว่าคอนเดนเซอร์แบบใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อน มักจะใช้ในระบบขนาดใหญ่

3) แบบระเหยตัวของน้ำ (Evaporative Condenser) คอนเดนเซอร์แบบนี้จะใช้ประโยชน์ของความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำมาใช้งาน โดยฉีดน้ำเป็นละออง ให้สัมผัสตรงกับขดท่อของสารทำความเย็น โดยมีพัดลมคอยเติมอากาศเข้าสู่คอนเดนเซอร์ตลอดเวลา เพื่อพัดเอาไอน้ำที่รับความร้อนมาจากการกลั่นตัวของสารทำความเย็นไประบายออกข้างนอก

3. อุปกรณ์ควบคุมสารทำความเย็น (Expansion Valve)

อุปกรณ์ควบคุมสารทำความเย็น หรือวาล์วลดความดัน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมความดัน ทำหน้าที่ลดความดันสารทำความเย็นที่มีความดันและอุณหภูมิสูง ให้ไหลผ่านไปในอัตราที่พอเหมาะ สารที่ออกมาจากวาล์วลดความดันจะมีความดันและอุณหภูมิต่ำ โดยวาล์วลดความดันจะนิยมใช้กับระบบทำความเย็นที่มีขนาดเล็กควบคุมอุณหภูมิการทำงานโดยอาศัยการเดิน-หยุดของเครื่องอัด หากเป็นระบบขนาดใหญ่จะต้องใช้การควบคุมอัตราการไหลของสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องระเหยให้เพียงพอกับความต้องการในการทำความเย็นหรือควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ เพื่อมิให้สารทำความเย็นซึ่งเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นไอมีความดันมากเกินไป เพื่อป้องกันการระเบิด ในทางทฤษฎีอุปกรณ์นี้จะไม่มีการถ่ายเทความร้อน อุปกรณ์ลดความดันสามารถแบ่งตามวิธีการปรับความดันเป็น 2 แบบ คือ แบบอัตราการไหลไม่คงที่ โดยจะใช้ท่อทองแดงขนาดเล็กและแบบอัตราการไหลแปรเปลี่ยน ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลเพื่อให้เหมาะสมกับความดันและการลดอุณหภูมิของสารทำความเย็น

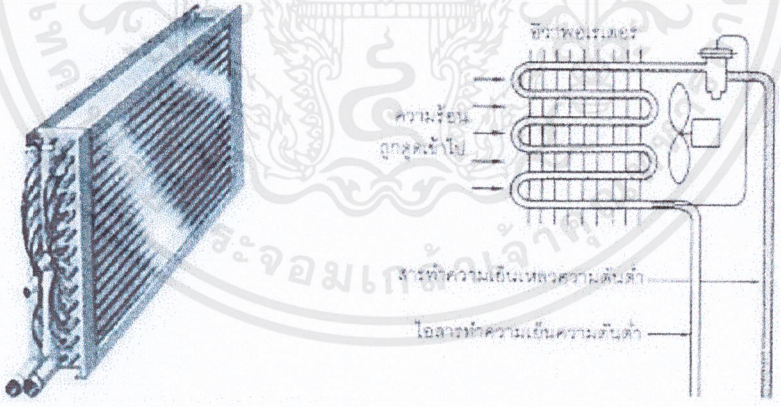
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างอุปกรณ์ควบคุมสารทำความเย็น (Expansion Valve)

4. อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator)

อีวาพอเรเตอร์หรือที่เรียกกันอีกชื่อว่าเครื่องทำระเหย เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างสารทำความเย็นกับภาระความร้อนในระบบ โดยความร้อนในระบบจะทำให้สารทำความเย็นในสถานะของเหลวเดือดกลายเป็นไอที่ความดันต่ำแล้วส่งผ่านไปยังด้านดูดของคอมเพรสเซอร์ต่อไป เมื่อสารทำความเย็นเหลวถูกลดความดันลงจะดูดความร้อนจากบริเวณโดยรอบเครื่องระเหยเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ จึงส่งผลให้อุณหภูมิในบริเวณที่ต้องการลดต่ำลง โดยปกติการดึงความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับเครื่องระเหยมักไม่สามารถทำได้โดยตรงจึงมักจะมีสารทุติยภูมิเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม เช่น อากาศที่อาศัยการเคลื่อนที่ด้วยพัดลมในห้องเย็น หรือชั้นโชว์อาหารในซุปเปอร์มาเกต



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator)

หากแยกระบบทำความเย็นตามลักษณะของการนำความเย็นไปใช้ประโยชน์ แบ่งได้ดังนี้

<u>ห้องเย็น (Cool Room)</u> นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมอาหารหมายถึงห้องซึ่งได้รับการควบคุมอุณหภูมิ ตลอดจนความชื้นที่เหมาะสมกับสินค้าที่จะจัดเก็บ ซึ่งช่วยชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องแช่แข็ง (Frozen Room) จะเป็นห้องที่ใช้ลดอุณหภูมิของสินค้าในระยะเวลาอันสั้น ตามหลักการถนอมอาหาร เช่น กุ้ง อุณหภูมิเริ่มต้น 5°C จะลดจนถึง –18°C ภายใน 10 ชั่วโมง เป็นต้น

2.1.3 CO_2 Transcritical Refrigeration system

CO_2 Transcritical Refrigeration System เป็นระบบทำความเย็นโดยใช้สารทำความเย็นคือ CO_2 โดยในระบบจะมีการเปลี่ยนสถานะ (Phase) กลับไปกลับมาระหว่าง สถานะทั่วไป (Mixture & Vapor) กับ สถานะที่เรียกว่า “Supercritical”

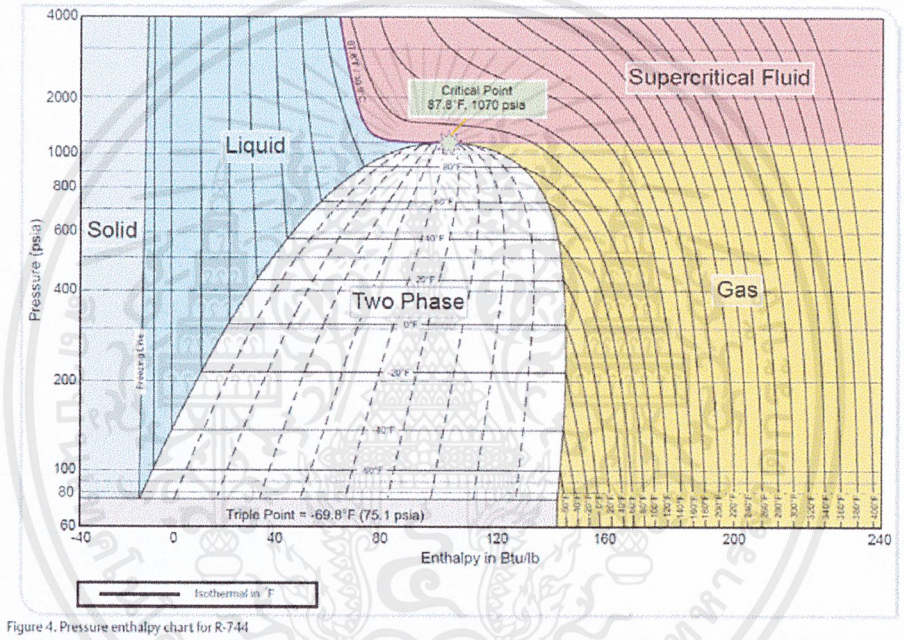


Figure 4. Pressure enthalpy chart for R-744

รูปที่ 2.8 P-h diagram of Carbon dioxide

(Ref. Commercial CO2 Refrigeration Systems, EMERSON)

โดยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในระบบทำความเย็นมีคุณสมบัติทางภายภาพและทางเคมี ดังนี้

Physical and chemical properties of CO_2 for refrigeration system

Appearance	:	Colorless liquid
Odor	:	Odorless. Felt by some to have a slight, pungent odor and biting taste.
Odor Threshold	:	Not applicable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical State	:	Not available
pH	:	3.7 (for carbonic acid)
Sublimation Point at 1 atm	:	-109.3 (-78.5 °C)
Boiling Point at 1 atm	:	Not applicable
Flash Point at 1 atm	:	Not applicable
Evaporation Rate (Butyl Acetate = 1)	:	High
Flammability	:	Non-flammable
Flammable Limits in Air, % by Volume	:	**Lower** : Not applicable
		Higher : Not applicable
Vapor Pressure at 70 °F (21.1 °C)	:	838 psig (5778 kPa; 57.8 barg)
Liquid Density (saturated) at 70 °F (21.1 °C) and 1 atm	:	47.6 lb/ft^3 (762 kg/m^3)
Specific Gravity (H_2O = 1) at 19.4 °F (-7 °C)	:	1.22
Specific Gravity (Air = 1) at 70 °F (21.2 °C) and 1 atm	:	1.52
Solubility in Water vol/vol at 68 °F (20 °C) and 1 atm	:	0.90
Partition Coefficient: n-octanol/water	:	Not available
Autoignition Temperature	:	Not available
Decomposition Temperature	:	Not available
Percent Volatiles by Volume	:	100
Molecular Weight	:	44.01
Molecular Formula	:	CO_2

Ref. Carbon dioxide refrigerated liquid, SAFETY DATA SHEET (SDS) – The CO_2 Handbook, IIAR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในประเทศโซนยุโรปส่วนใหญ่ จะนิยมใช้ระบบทำความเย็นโดยใช้ CO_2 เป็นสารทำความเย็น ได้แก่ CO_2 subcritical refrigeration system และ CO_2 transcritical refrigeration system โดยแต่ละที่จะออกแบบระบบทำความเย็นต่างกัน ตามอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) ของประเทศนั้น ๆ

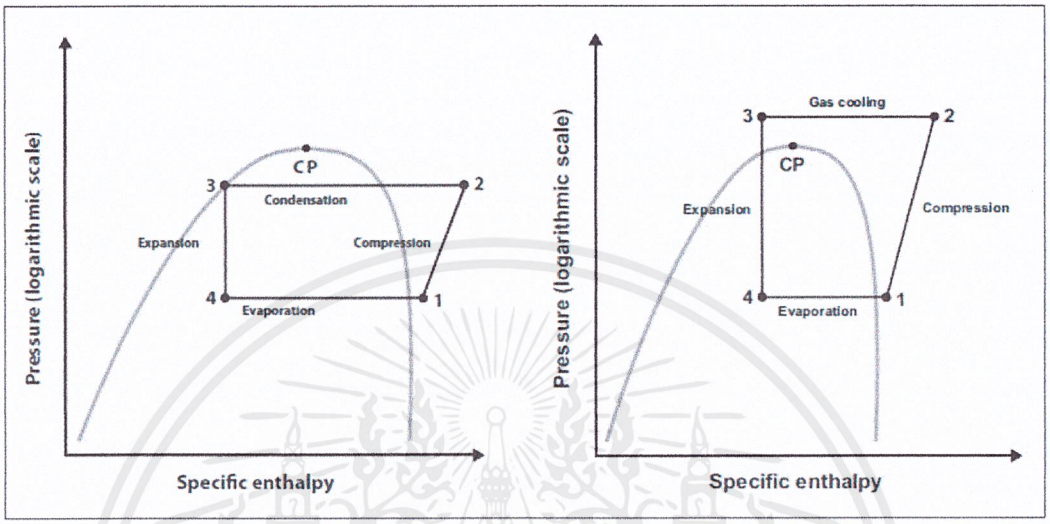


Figure 2: Subcritical and transcritical refrigeration cycle processes

รูปที่ 2.9 กระบวนการการทำความเย็นแบบใต้จุดวิกฤตและแบบระหว่างจุดวิกฤต

ประเทศที่อยู่ในเขตอบอุ่นหรือเย็นกว่าจะใช้ระบบ Subcritical refrigeration system เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมที่เย็นจะทำให้ง่ายต่อการออกแบบระบบและการใช้งาน ส่วนประเทศไทยที่อยู่ในแถบของประเทศโซนร้อน มีอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 27.5 °C (ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา-สรุปสภาวะอากาศปี 2561) ซึ่งมีอุณหภูมิที่ใกล้กับอุณหภูมิวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ 30.9782 °C ซึ่งมีโอกาสสูงที่ก๊าซ CO_2 จะเปลี่ยนเป็นสถานะ Supercritical ที่มีความดันสูงถึง 73.773 bar ซึ่งทำให้ยากต่อการดีไซน์และเสี่ยงต่อความปลอดภัยในการใช้งาน แต่ก็สามารถทำได้ ซึ่งระบบทำความเย็นนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

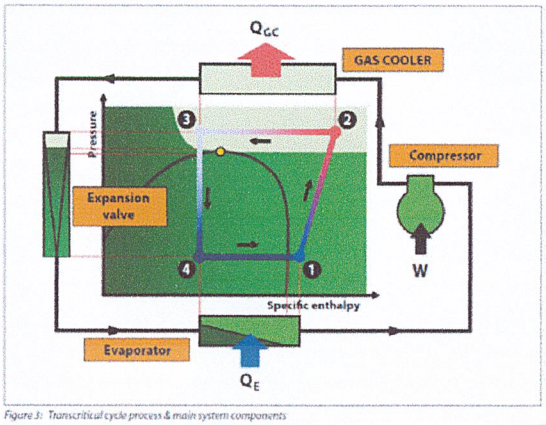


Figure 3: Transcritical cycle process & main system components

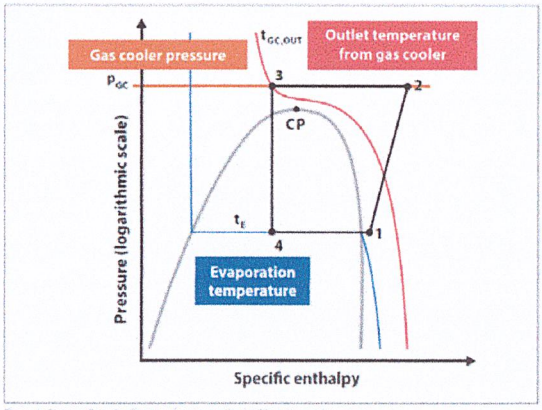
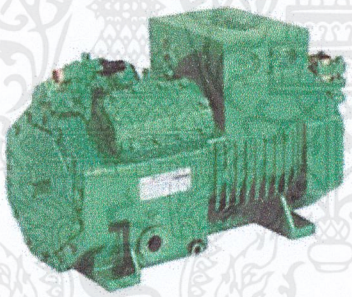


Figure 4: Pressure-Enthalpy Diagram for a transcritical refrigeration cycle process

รูปที่ 2.10 อุปกรณ์และรายละเอียดของระบบทำความเย็นแบบระหว่างจุดวิกฤต

Ref. Danfoss Transcritical Refrigeration Systems with Carbon Dioxide (CO_2)

1. Air Compressor ทำหน้าที่อัดความดันของของไหลที่เป็นไอให้เพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่สถานะ Supercritical (ความดันสูงและอุณหภูมิสูงเหนือจุดวิกฤต (Critical point))

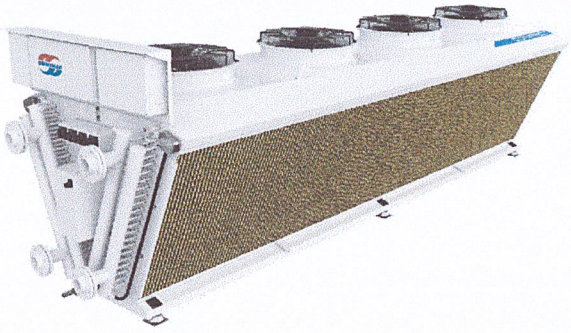


รูปที่ 2.11 Air Compressor

(ref. https://www.indiamart.com/proddetail/bitzer-compressor-14877532933.html)

2. Gas cooler ทำหน้าที่ ลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นลงมาโดยใช้อากาศภายนอกมาแลกเปลี่ยนความร้อน หลังจากผ่าน Gas cooler แล้ว สารทำความเย็นจะมีความดันสูงแต่อุณหภูมิต่ำ (สถานะของสารทำความเย็นที่ออกจาก Gas cooler จะเป็น Supercritical หรือ Liquid phase ก็ได้ แล้วแต่การออกแบบ แต่จะต้องลดอุณหภูมิเลยจุดวิกฤตมาซึ่งสังเกตได้จากกราฟ P-h diagram)

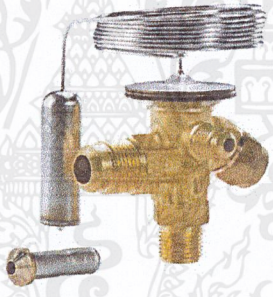
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 Gas cooler

(ref. http://www.r744.com/products/view/guentner_v_shape_compact_gas_cooler_for_co2)

3. Expansion valve ลดความดันของสารทำความเย็นลงมาเปลี่ยนมาเป็นสถานะ Mixture (ความดันต่ำ อุณหภูมิต่ำ)

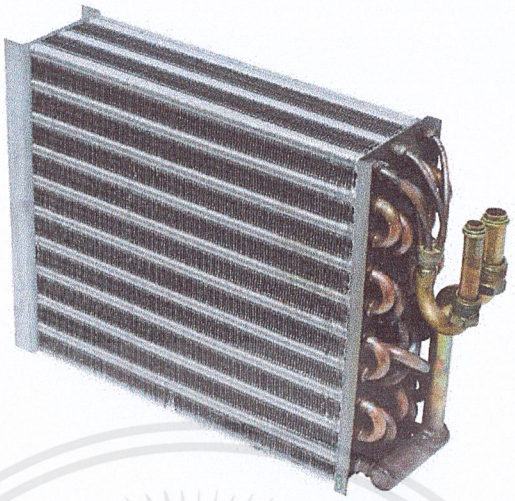


รูปที่ 2.13 Expansion valve

(ref. https://www.danfoss.com/en/products/valves/dcs/thermostatic-expansion-valves/t2-te2/)

4. Evaporator ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอก(ห้องจะเย็นลง) ก๊าซ CO_2 ได้รับความร้อนจนเกิดการระเหยเป็นไออิ่มตัว (Saturated Vapour)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 Evaporator

(ref. https://www.acparts.com/product/evaporator-78/)

2.1.4 Extraction

การสกัด (Extraction) เป็นการแยกสารที่ละลายได้ (Solute) ออกจากวัตถุดิบโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent) การสกัดเป็นการแยกโดยอาศัยการสัมผัส Contact equilibrium separation process คือการทำให้ตัวทำละลายสัมผัสกับวัตถุดิบและเกิดการถ่ายโอนเงินของตัวถูกละลายจากวัตถุดิบมาสู่ตัวทำละลายจนเข้าสู่สมดุล การแบ่งออกเป็น 2 แบบหลัก ๆ ได้แก่ 1. การสกัดของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid extraction) เป็นการสกัดสารจากวัตถุดิบที่เป็นของแข็ง โดยมีตัวทำละลายเป็นของเหลว ซึ่งในวัตถุดิบจะประกอบด้วยส่วนที่ละลายและส่วนที่ไม่ละลาย (Inert materials) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ ส่วนของของแข็งที่เหลือจากการสกัดเรียกว่า กาก (residue or waste) ที่มีทั้งส่วนที่ไม่ละลายและสารละลาย (ตัวถูกและตัวทำละลาย) อยู่ในนั้น ส่วนของเหลวที่ได้จากการสกัด เรียกว่า สารสกัด (Extract) ที่ประกอบด้วยตัวถูกละลายและตัวทำละลาย แต่อาจจะมีของแข็งส่วนที่ไม่ละลายปะปนมาบ้าง ตัวอย่างเช่น การสกัดน้ำมันออกจากถั่วเหลืองโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น 2. การสกัดแบบของเหลว-ของเหลว (Liquid-liquid extraction) เป็นการสกัดวัตถุดิบที่เป็นของเหลว และมีตัวทำละลายอยู่ในวัตถุดิบ ตัวทำละลายที่ใช้สกัดจะต้องมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายหรือผสม (Immiscible liquids) เข้ากับตัวทำละลายในวัตถุดิบที่ใช้ เป็นการแยกหรือย้ายตัวถูกละลายในตัวทำละลายชนิดหนึ่ง (ของสารละลายเริ่มต้น) มาอยู่ในตัวทำละลายอีกชนิด (solvent) โดยอาศัยหลักการกระจายตัวของตัวถูกละลายในตัวทำละลายต่างชนิดกัน เช่น การแยกกรด acetic acid ออกจากน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทั่วไปของการสกัด (General principles of extraction)

1. การแพร่ (Diffusion)

การสกัดเกิดจากตัวทำละลายแพร่เข้าไปในของแข็ง เพื่อละลายตัวถูกละลายออกมา เป็นผลให้ตัวถูกละลายแพร่ออกมาจากของแข็ง ไปที่เฟสของตัวทำละลาย

โดยอัตราการแพร่ = $\frac{1}{x^2}$ (x หมายถึงระยะทางของการแพร่)

2. ความสามารถในการละลาย (Solubility)

หลังจากการสกัดเสร็จสิ้นตัวถูกละลายในชั้นที่สกัดได้ (extract) ที่ออกมามีความเข้มข้นอิ่มตัว ดังนั้นอัตราส่วนของตัวทำละลายที่ใช้ต่อของแข็งต้องสูง และในกรณีที่ต้องการกำจัดตัวถูกละลายในระดับที่ต้องการจะต้องทำการลดจำนวนครั้งของการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ คุณสมบัติของตัวทำละลายที่เลือกใช้ในกระบวนการสกัด คือ ตัวทำละลายต้องมีความหนืดต่ำ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนนำมาใช้อีก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายของตัวทำละลายต้องเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{eff}) เพิ่มขึ้น การเพิ่มการแพร่สามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งคือการใช้การกวนร่วมด้วย เป็นผลทำให้เกิด “eddy diffusivity”

3. สมดุล (Equilibrium)

ในกระบวนการสกัดนั้น การสกัดจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อระบบนั้นเข้าสู่สภาวะสมดุล แต่การเกิดสภาวะสมดุลในกระบวนการสกัดนั้นจะมีความแตกต่างกันไปตามปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการสกัด ดังต่อไปนี้

- กรณีที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็งสูง

สภาวะสมดุล = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็ง เท่ากับ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสตัวทำละลาย

- ถ้าปริมาณตัวทำละลายไม่เพียงพอ

สภาวะสมดุล = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไปทั้งสองเฟส ไม่ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีการสัมผัสกันนานขึ้นก็ตาม

นอกจากในกระบวนการสกัดที่เกิดขึ้นแบบหลายขั้น การพิจารณาความสามารถในการสกัดของแต่ละขั้น ดูได้จาก “ประสิทธิภาพของขั้น” (stage efficient) คือปริมาณที่บ่งบอกความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกละลายในเฟสของตัวทำละลายในขั้นของการสกัดหนึ่งๆ ถ้าขั้นใดขั้นหนึ่งเกิดสมดุลขั้นนั้นจะมีประสิทธิภาพ 100% เรียกว่าขั้นจินตภาพ (ideal stage)

ตัวอย่างกระบวนการสกัดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

- การสกัดน้ำมันจาก ถั่วเหลือง ข้าวโพด ถั่วลิสง รำข้าว (ในบางกรณีใช้แรงอัดร่วมในกระบวนการสกัด)
- สกัดกลิ่นรสธรรมชาติจากสมุนไพรและเครื่องเทศ (spice and herb)
- แยกน้ำตาลออกจากอ้อย (โดยใช้แรงอัดร่วมกับการใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย)
- สกัดคาเฟอีนออกจากกาแฟ (โดยใช้สารละลายอินทรีย์หรือน้ำเป็นตัวทำละลาย)
- สกัดชาและกาแฟ
- สกัดคาเฟอีนออกจากกาแฟ หรือ ลดคลอเรสเตอรอลในไข่ ไข่แดง เนย

2.1.4.1 การสกัดแบบของแข็ง-ของเหลว (Solid - Liquid extraction)

เป็นการสกัดตัวถูกละลายที่อยู่ในวัตถุดิบ โดยใช้ของเหลวเป็นตัวทำละลายในการสกัด

กลไกการสกัด

แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

- การสัมผัส (Contacting step) หรือเรียกว่า ขั้นการถ่ายโอนมวล เป็นช่วงที่สารละลายในวัตถุดิบเกิดการละลายและแพร่เข้าสู่ตัวทำละลาย โดยที่ตัวถูกละลายจะเกิดการละลายที่บริเวณผิวของวัตถุดิบ และแพร่เข้าสู่ตัวทำละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างในวัตถุดิบ เนื่องจากตัวถูกละลายเคลื่อนย้ายออกจากวัตถุดิบ ทำให้ตัวทำละลายเข้าไปละลายกับตัวถูกละลายภายในวัตถุดิบ โดยที่ภายในรูพรุนจะทำหน้าที่คล้ายกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวใหม่ของวัตถุดิบ ตัวถูกละลายที่อยู่ภายในรูพรุนถือว่าอยู่นิ่ง (static) สามารถคำนวณอัตราการถ่ายโอนมวลในขั้นนี้ เทียบกับพื้นผิวของวัตถุดิบได้จาก

$$N_s = -D_L \frac{dC}{dz}$$

เมื่อ N_s คือ อัตราการถ่ายโอนมวลต่อพื้นที่ผิววัตถุดิบ (mass flux; $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

D_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายสู่ตัวทำละลาย ($m^2 \cdot s^{-1}$)

C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ($kg \cdot m^{-3}$)

z คือ ระยะทางในรูพรุนของวัตถุดิบ (m)

สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลได้โดย

- เพิ่มอัตราการกวนผสม เพื่อให้ความหนาของชั้นฟิล์มที่ผิววัตถุดิบลดลง

- เพิ่มอุณหภูมิ ทำให้การละลายดีขึ้น เป็นผลให้การแพร่สู่ตัวทำละลายดีขึ้นด้วย และยังทำให้ความหนืดของตัวทำละลายน้อยลง ทำให้ตัวทำละลายสามารถเคลื่อนเข้ารูพรุนของวัตถุดิบได้ดี

- การลดขนาดของวัตถุดิบ ช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับตัวทำละลาย

• การแยก (Separation step) หรือเรียกว่า ขั้นการถ่ายโอนโมเมนตัม เป็นการแยกสารที่ถูกละลายออกจากวัตถุดิบ โดยที่ตัวถูกละลายจะเคลื่อนเข้าสู่ตัวทำละลาย หลังจากขั้นตอนการสัมผัส เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น จุดสมดุลของการสกัด ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ทำให้ตัวทำละลายสัมผัสกับตัววัตถุดิบ ซึ่งส่วนมากจะหยุดก่อนการสกัดก้อนถึงจุดสมดุล ซึ่งประสิทธิภาพของการสกัดจะไม่ถึงร้อยละ 100 โดยหาประสิทธิภาพการสกัดได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพการสกัด} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสารละลายที่ได้}}{\text{ความเข้มข้นของสารละลายสกัดถ้าสกัดถึงจุดสมดุล}} \times 100$$

เมื่อการสกัดเข้าถึงจุดสมดุล จะแยกสารออกมาได้ แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) Overflow หรือ สารละลายของสารสกัด คือสารละลายที่ประกอบด้วยตัวถูกละลายและตัวทำละลาย ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ใน slurry or underflow stream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Underflow or slurry stream หรือ ของแข็งที่เหลือจากการสกัด คือ กากที่ประกอบด้วยส่วนที่ละลายไม่ได้ ตัวทำละลาย และตัวถูกละลายที่ค้างอยู่ในกาก (residue)

วิธีการสกัด

แบ่งตามจำนวนการสัมผัสของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ดังนี้

1) การสกัดหน่วยเดียว

เป็นการสกัดที่ตัวทำละลายและวัตถุดิบสัมผัสกันครั้งเดียวแล้วแยกกัน เช่นการกรอง ส่วนกากที่ได้ยังคงมีตัวถูกละลายเหลืออยู่ จึงนิยมสกัดซ้ำโดยใช้ตัวทำละลายใหม่ ปกติแล้วการสกัดอาจจะใช้ตัวทำลายปริมาณเท่า ๆ กันในแต่ละรอบ หรือใช้ปริมาณลดลงเนื่องจากปริมาณของตัวถูกละลาย เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยตัวทำละลายเท่ากัน ดังนั้น การแบ่งตัวทำละลายออกแล้วสกัดซ้ำหลาย ๆ รอบจะให้ผลการสกัดที่มากกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายทั้งหมดในครั้งเดียว

รูปที่ 2.15 วิธีการสกัดแบบหน่วยเดียว

พิจารณาตามทฤษฎีการสกัด เมื่อวัตถุดิบเริ่มต้น (F) ที่มีตัวถูกละลายในสัดส่วน x_0 สัมผัสกับตัวทำละลายที่มีความเข้มข้น y_0 หลังจากการสกัด สารสกัด (E) ที่ได้ จะมีสัดส่วนความเข้มข้น x_1 ส่วนกากหลังการสกัดจะมีความเข้มข้นเป็น y_0

2) การสกัดหลายหน่วย

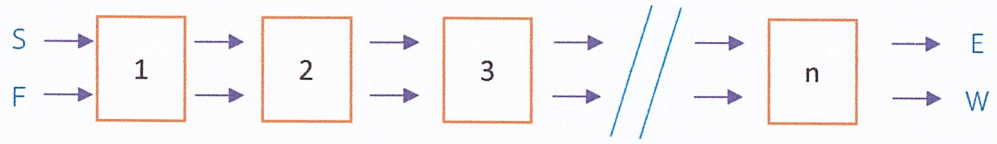
เป็นการสกัดที่วัตถุดิบสัมผัสกับตัวทำละลายหลายครั้งอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่ได้สูงกว่าการสกัดแบบหน่วยเดียว แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

2.1) ตัวทำละลายและวัตถุดิบเข้าหน่วยสกัดในทางเดียวกัน (Co-current extraction)

ตัวทำละลาย (Solvent, S) และวัตถุดิบ (Feed, F) ถูกป้อนเข้ามาในหน่วยสกัดที่ 1 แล้วให้วัตถุดิบจากหน่วยที่ สัมผัสกันใหม่กับสารทำละลายจากหน่วยที่ 1 หรือที่ผ่านการใช้มาแล้ว 1 ครั้ง ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

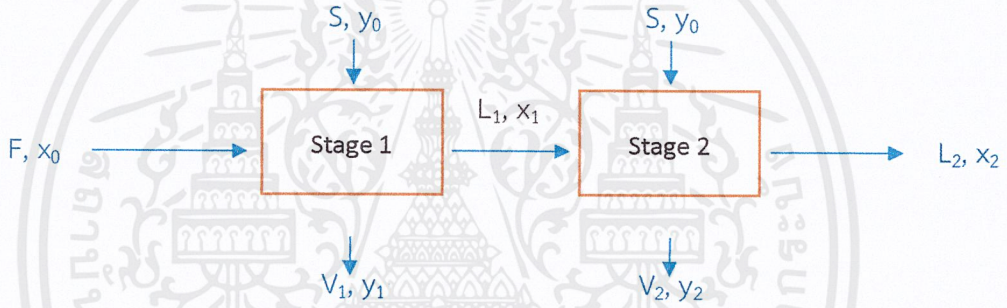
หน่วยที่ 2 ทำต่อไปเรื่อย ๆ จนได้สารสกัด (Extract, E) และกาก (Waste, W) จากหน่วยสุดท้าย (หน่วยที่ n)



รูปที่ 2.16 วิธีการสกัดหลายหน่วยแบบไหลตามกัน

2.2) วัตถุดิบสัมผัสกับตัวทำละลายบริสุทธิ์ในแต่ละหน่วย (Cross-current extraction)

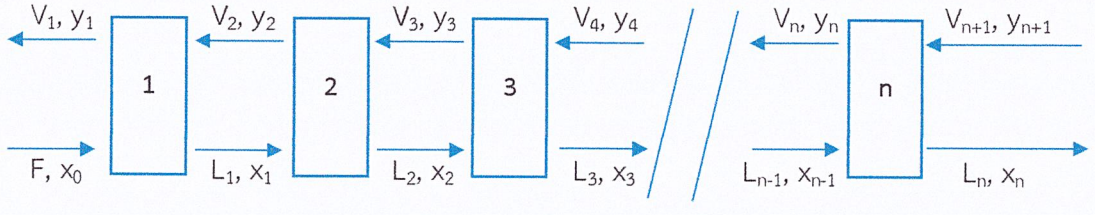
เมื่อการสกัดเข้าสู่สมดุลในหน่วยที่ 1 จะถูกนำมาสกัดต่อเพื่อให้เกิดสมดุลใหม่ในหน่วยที่ 2 และต่อ ๆ ไปจนความเข้มข้นกากเหลือน้อยลง



รูปที่ 2.17 วิธีการสกัดหลายหน่วยแบบไหลผ่านในแต่ละหน่วย

2.3) ตัวทำละลายและวัตถุดิบเข้าหน่วยสกัดสวนทางกัน (Countercurrent extraction)

ตัวทำละลายถูกป้อนเข้าที่หน่วยสุดท้าย สวนทางกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้ามาอีกด้าน ซึ่งการสกัดแบบนี้จะได้กากจากหน่วยสุดท้าย และสารละลายสกัดจากหน่วยที่ 1 การสกัดแบบนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เพราะให้ผลสกัดที่ดี



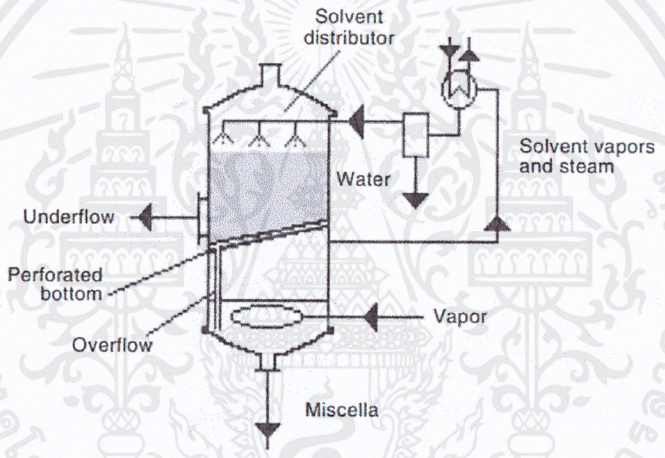
รูปที่ 2.18 วิธีการสกัดหลายหน่วยแบบไหลตามกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.2 เครื่องสกัดสำหรับการสกัดแบบของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid Extraction Equipment)

1) เครื่องสกัดและกรองแบบกะ (Batch Percolators)

เป็นภาชนะที่ให้วัตถุดิบและตัวทำละลายสัมผัสกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง แล้วกรองแยกสารละลายสกัดและกากออกจากกัน ดังรูปที่ 2.19 เป็นถังทรงกระบอก แบ่งเป็น 2 ส่วน ด้วยตะแกรงที่วางเอียงการสกัดทำได้โดยใส่วัตถุดิบในถังช่วงบน แล้วฉีดตัวทำละลายผ่านวัตถุดิบ ทำให้เกิดการสกัด จากนั้นสารละลายสกัดจะไหลผ่านตะแกรงลงมาด้านล่างของเครื่อง มีการให้ความร้อนให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยลอยขึ้นผ่านเครื่องควบแน่น แล้วจะถูกฉีดกลับลงมาทำการสกัดต่อ สกัดเรื่อย ๆ จนเหลือตัวถูกละลายในวัตถุดิบน้อยที่สุด เครื่องสกัดประเภทนี้จะใช้ในกระบวนการผลิตระดับเล็ก เช่น การสกัดน้ำตาลจากหัวบีท น้ำมันจากน้ำมันพืช กาแฟจากเมล็ดกาแฟ และน้ำชาจากใบชาแห้ง



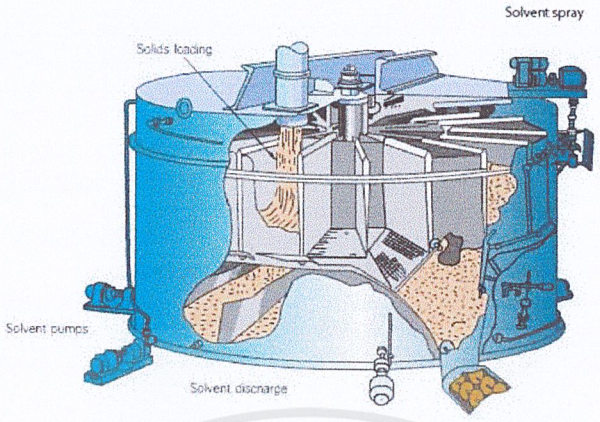
รูปที่ 2.19 เครื่องสกัดและกรองแบบกะ

(ที่มา: Albert and Gustavo, 2003)

2) เครื่องสกัดแบบ Rotocel

ประกอบด้วยเครื่องสกัดหลายหน่วยทำงานต่อเนื่องกัน โดยมีการลำเลียงตัวทำละลายจากหน่วยหนึ่งไปสัมผัสกับวัตถุดิบในอีกหน่วยหนึ่ง มีการไหลแบบสวนทางกัน (Countercurrent) ดังรูปที่ 2.20 ในแต่ละช่องคือหน่วยสกัดย่อย ตัวทำละลายจะถูกฉีดเข้าแต่ละหน่วยทางด้านบน สารกัดที่ได้จะไหลผ่านตะแกรงลงมายังชั้นล่า แล้วถูกสูบกลับไปฉีดบนวัตถุดิบชั้นบนในหน่วยถัดไปที่เคลื่อนที่มาแทน โดยการสกัดด้วยเครื่องจักรนี้วัตถุดิบจะถูกสกัดจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงก่อนที่จะมาสกัดด้วยสารละลายบริสุทธิ์ในหน่วยสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

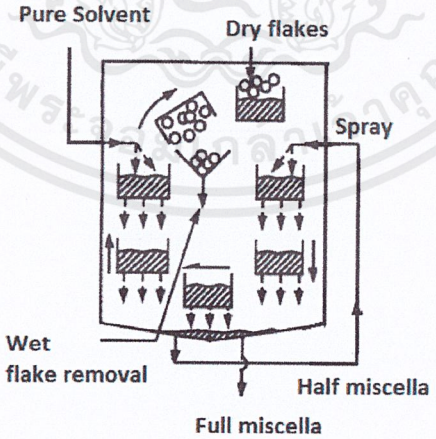


รูปที่ 2.20 เครื่องสกัดแบบ Rotocel

(ที่มา: http:// www.htoilmachine.com)

3) เครื่องสกัดแบบ Bollman bucket

เป็นเครื่องสกัดที่วัตถุดิบและตัวทำละลายไหลไปทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.21 เครื่องสกัดประกอบด้วยถังบรรจุวัตถุดิบที่มีพื้นเป็นตะแกรง และติดอยู่กับสายพานที่หมุนช้า ๆ วัตถุดิบจะถูกป้อนลงในถังที่อยู่ด้านบน จากนั้น ถังจะค่อย ๆ เลื่อนตามเข็มนาฬิกาลงมาทางด้านล่าง เพื่อให้สัมผัสกับตัวทำละลายที่ถูกฉีดมา ขณะที่ถังเลื่อนลงมา ก็จะรับสารละลายที่สกัดจากถังด้านบน เมื่อเคลื่อนที่ขึ้นอีกครั้ง จะเป็นการสกัดแบบวัตถุดิบและตัวทำละลายไหลสวนทางกัน (Countercurrent) เนื่องจากมีการป้อนตัวทำละลายบริสุทธิ์อีกด้านเช่นกัน และเมื่อถังเคลื่อนที่ขึ้นถึงด้านบนสุดอีกครั้ง ถือว่าสิ้นสุดการสกัด



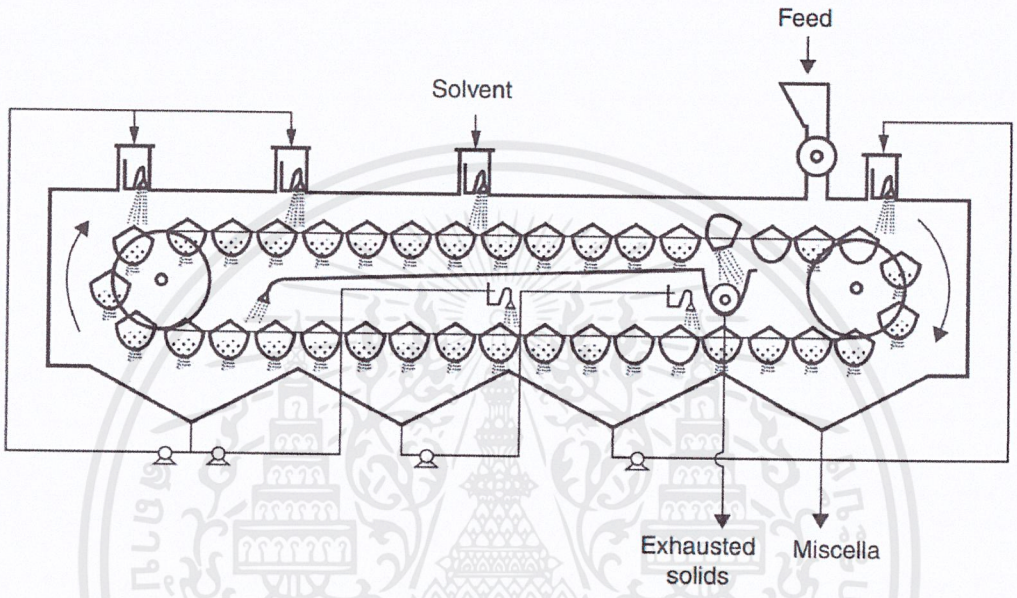
รูปที่ 2.21 เครื่องสกัดแบบ Bollman bucket

(ที่มา: Geankoplis, 2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เครื่องสกัดแบบเบดเคลื่อนที่ (Moving-bed percolation extractor)

วัตถุดิบจะถูกป้อนใส่ถัง และฉีดสารละลายที่ได้จากการสกัดซึ่งถูกสูบมาจากด้านล่างดังรูปที่ 2.22 ในขณะที่ถังบรรจุวัตถุดิบนั้นเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ เมื่อใกล้สิ้นสุดรอบการสกัด ของแข็งที่เหลือ จะถูกฉีดด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ และนำกากที่ได้ออก เพื่อเติมวัตถุดิบใหม่ในรอบต่อไป



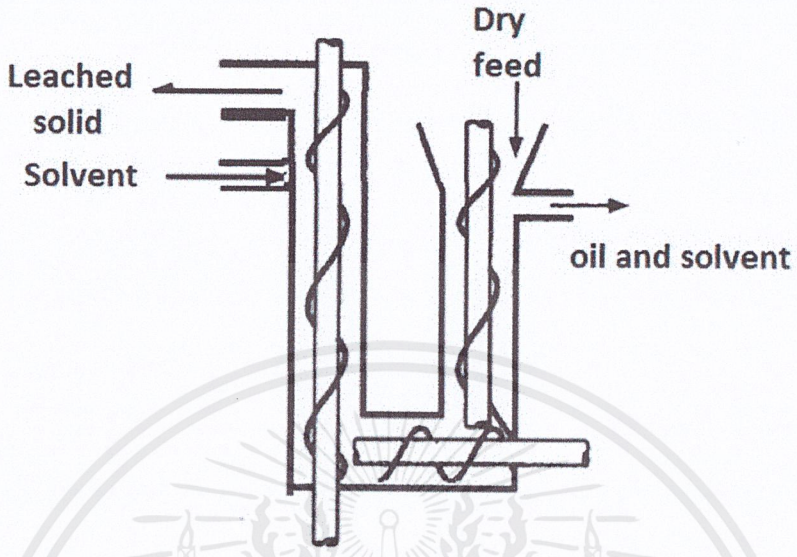
รูปที่ 2.22 เครื่องสกัดแบบเบดเคลื่อนที่

(ที่มา: Albert and Gustavo, 2003)

5) เครื่องสกัดแบบ Hildebrandt screw-conveyor

ประกอบด้วยสายพานลำเลียง 3 ส่วนวางเรียงกันเป็นตัว U ดังรูปที่ 2.23 ทำการสกัดโดยป้อนวัตถุดิบทางด้านบน แล้วสายพานจะค่อย ๆ เคลื่อนลงมาด้านขวาแล้วค่อย ๆ ขึ้นทางด้านซ้าย ส่วนตัวทำละลายจะถูกป้อนทางด้านตรงข้าม และเคลื่อนที่สวนทางกับวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



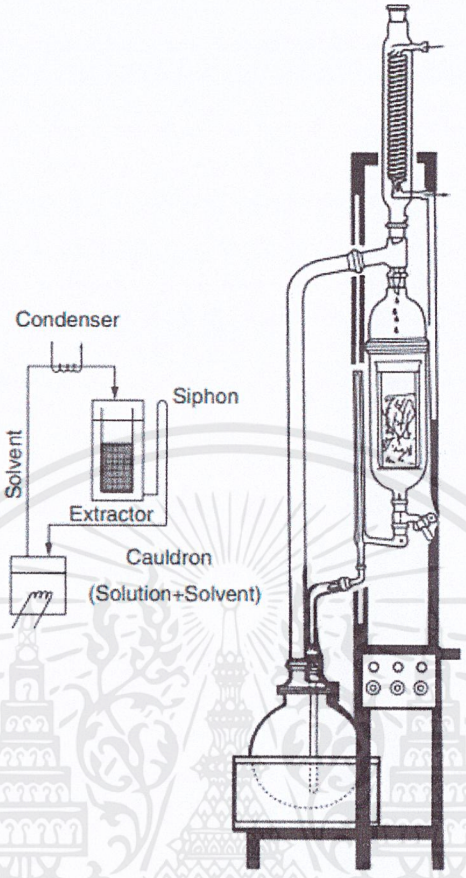
รูปที่ 2.23 เครื่องสกัดแบบ screw-conveyor

(ที่มา: McCabe, 1991)

6) เครื่องสกัดแบบ Soxhlet

นิยมใช้ในการศึกษากระบวนการสกัด แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เพราะความสามารถในการสกัดค่อนข้างต่ำ มีหลักการทำงานดังนี้ เริ่มจากการให้ความร้อนตัวทำละลายเพื่อให้เกิดการเดือดและกลายเป็นไอ จากนั้นให้ความเย็นเพื่อให้เกิดการควบแน่น ได้ตัวทำละลายบริสุทธิ์หยดลงบนวัตถุดิบ เมื่อสกัด 1 รอบ ตัวทำละลายในสารละลายที่สกัดได้จะเดือด ระเหย และควบแน่นเพื่อทำการสกัดในรอบต่อไป ทำให้วัตถุดิบและกากถูกสกัดด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ทุกรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



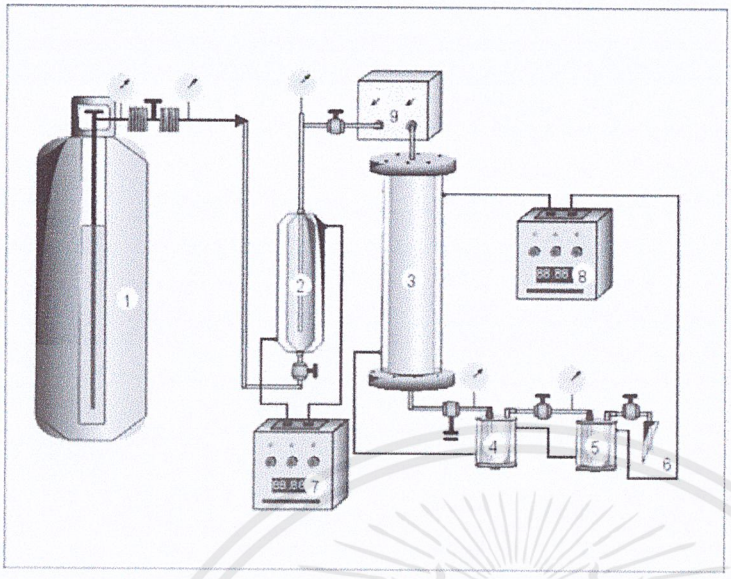
รูปที่ 2.24 เครื่องสกัดแบบ Soxhlet

(ที่มา: Albert and Gustavo, 2003)

7) เครื่องสกัดแบบ Supercritical fluid extraction (SFE)

เป็นการสกัดโดยใช้ของไหล (fluid) ที่ได้รับการปรับความดันและอุณหภูมิ ให้อยู่ในสถานะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical phase) ที่สถานะนั้น ของไหลจะมีคุณสมบัติของตัวทำละลาย สามารถนำมาสกัดสารออกมาจากวัตถุดิบได้ วิธีนี้มีการใช้ความดันมาเกี่ยวข้อง ดังนั้น ต้องมีความระมัดระวังในการใช้งาน เนื่องจากใช้ความดันสูงในการสกัด อาจเกินอันตรายได้ เริ่มจากการทำให้ของไหลมีสภาวะเหนือจุดวิกฤต จากนั้นป้อนเข้าถังสกัดที่มีวัตถุดิบใส่ไว้ตั้งแรก ทำให้เกิดการสกัด แล้วผ่านวาล์วลดความดัน ทำให้สารละลายมีความดันต่ำลง แล้วนำไปเข้าถังแยก เพื่อทำการแยกตัวทำละลายกับตัวถูกละลายออกจากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 เครื่องสกัดแบบ Supercritical fluid extraction

(ที่มา: C. M. P. Sarmento et al., 2006)

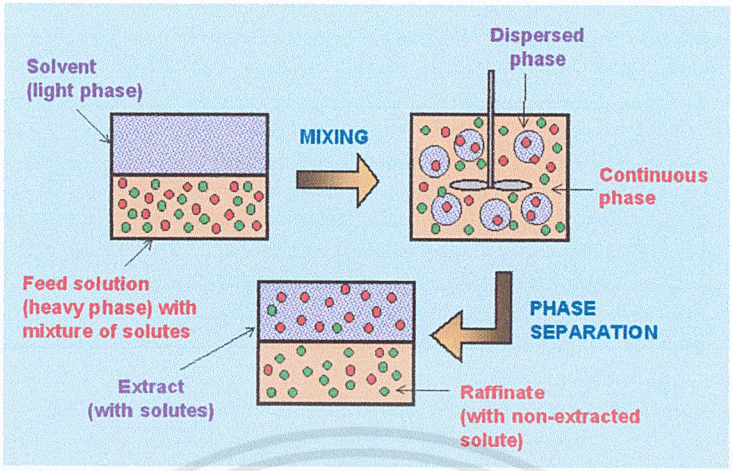
2.1.4.3 การสกัดแบบของเหลว-ของเหลว (Liquid - Liquid extraction)

เป็นการแยกตัวถูกละลายที่อยู่ในของเหลวชนิดหนึ่ง ด้วยตัวทำละลายอีกชนิดหนึ่ง โดยอาศัยความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายที่ดีกว่า มาใช้ในการสกัด

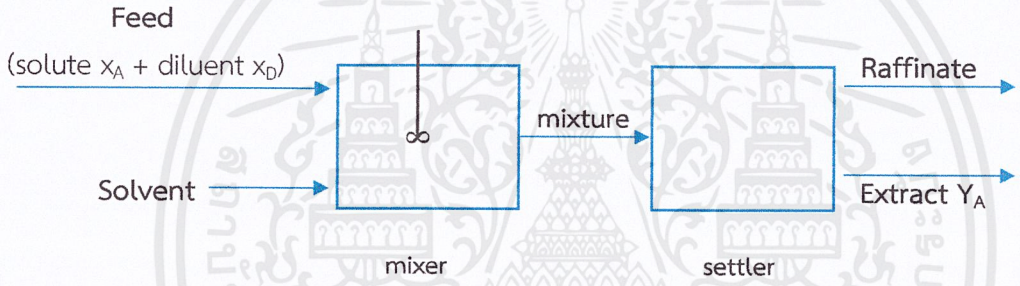
กลไกการสกัด

มี 2 ขั้นตอนหลัก ๆ เหมือนกับการสกัดแบบของแข็งของเหลว คือ ขั้นการผสม (Mixing) ต้องให้ตัวทำละลายทั้งสองสัมผัสกัน เนื่องจากองค์ประกอบที่สามารถละลายได้ เคลื่อนที่จากตัวทำละลายชนิดหนึ่งไปยังตัวทำละลายอีกชนิด ซึ่งตัวทำละลายทั้งสองจะต้องไม่ผสมกันหรือผสมกันเล็กน้อยเท่านั้น และตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการแยก (Settling) ดังรูปที่ 2.26 หรือแผนผังการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบของมวลดังรูปที่ 2.26 ส่วนมากการสกัดในสภาวะที่มีความดันและอุณหภูมิคงที่ สำหรับสารที่ไม่ทนต่ออุณหภูมิจะนิยมสกัดที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 หลักการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว



รูปที่ 2.27 การสกัดแบบของเหลว-ของเหลว

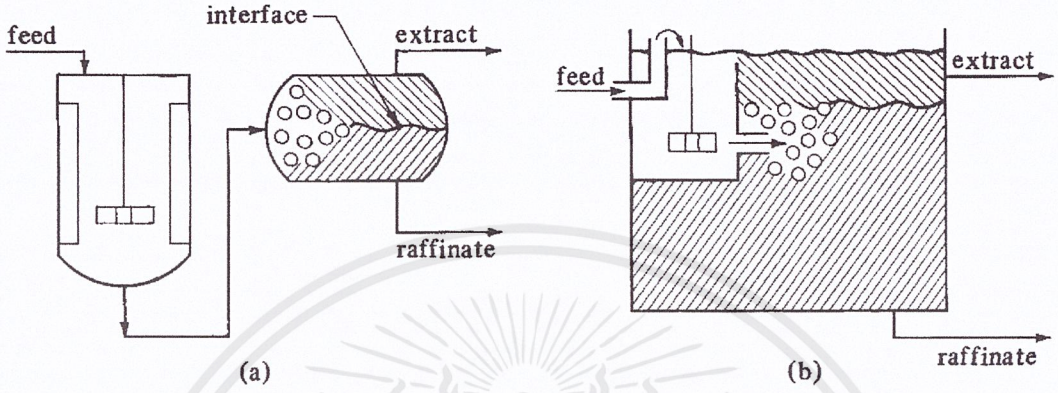
2.1.4.4 เครื่องสกัดสำหรับการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว (Liquid-liquid Extraction Equipment)

เรื่องการออกแบบ จะต้องคำนึงถึงการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารที่มากขึ้น เพราะสมบัติของตัวทำละลายจะต้องไม่ผสมกับตัวทำละลายในวัตถุดิบ ทำให้ยากต่อการถ่ายโอนมวล ซึ่งลักษณะการทำงานของเครื่องจักรทั่วไปจะมี 2 แบบ คือ 1) การผสมที่เกิดจากการใช้ใบกวน เพื่อให้การผสมนั้นดีขึ้น และ 2) เป็นการผสมที่เกิดจากการไหลของสารละลายในระบบ ตัวอย่างเครื่องสกัด เช่น

1) เครื่องสกัดแบบ Mixer-settlers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเครื่องสกัดที่มีหลักการทำงานตามหลักการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว โดยมีถังกวนไว้ผสมและมีอีกถัง เอาไว้ให้ตัวถูกละลายเกิดการแยกจากวัตถุดิบไปผสมกับตัวทำละลายที่นำมาใช้ในการสกัด แล้วไหลออกมาตามท่อ ดังรูปที่ 2.28

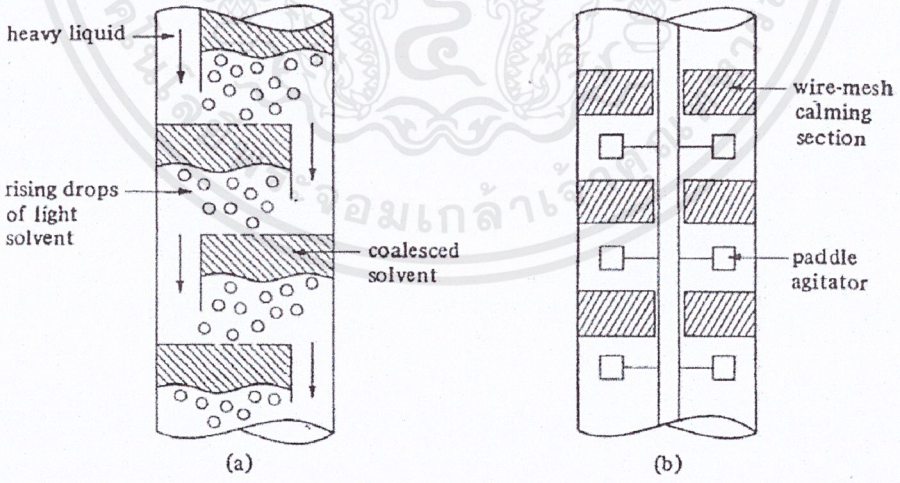


รูปที่ 2.28 เครื่องสกัดแบบ mixer-settlers (a) แบบแยกถัง (b) แบบถังเดียว

(ที่มา: Geankoplis, 2003)

2) เครื่องสกัดแบบ Tower

เป็นเครื่องสกัดทรงสูง แบบมีแผ่นวัสดุพรุนกั้น เพื่อให้สารละลายกระจายออก เพิ่มพื้นที่การสัมผัส และมีการไหลสวนทางกันดังรูปที่ 2.29 (a) หรืออาจติดตั้งใบกวนเพื่อเพิ่มการถ่ายโอนมวลสารดังรูปที่ 2.29 (b)



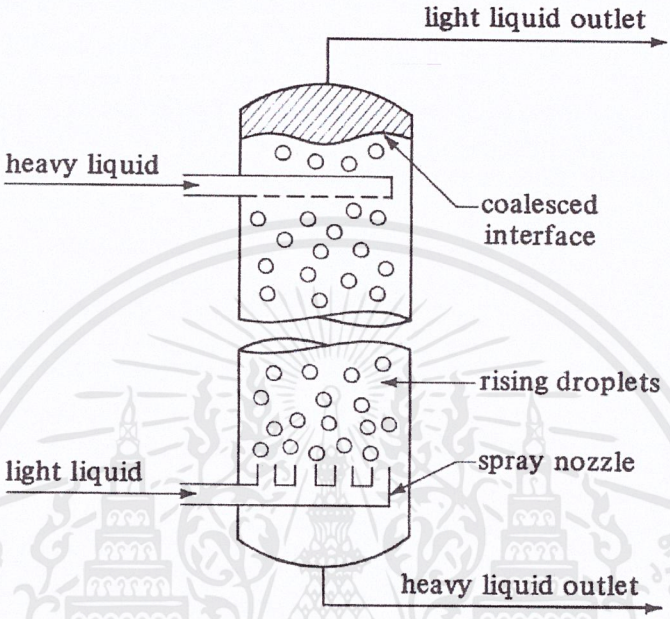
รูปที่ 2.29 เครื่องสกัดแบบ tower (a) แบบแผ่นวัสดุพรุน หรือตะแกรงกั้น (b) แบบมีใบกวนผสม

(ที่มา: Geankoplis, 2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เครื่องสกัดแบบพ่นฝอย (Spray extractor tower)

หลักการทำงาน คือ การพ่นสารละลายที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าด้านล่างของถังสกัด เพื่อเพิ่มการสัมผัสระหว่างสารละลายทั้ง 2 ชนิด ทำให้อัตราการถ่ายโอนสูงขึ้น



รูปที่ 2.30 เครื่องสกัดแบบพ่นฝอย

(ที่มา: Geankoplis, 2003)

2.1.5 Supercritical fluid Extraction

Supercritical fluid Extraction (SFE) เป็นกระบวนการสกัดสารที่ต้องการออกจากวัตถุดิบ โดยใช้ของไหล ณ สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical fluid) เป็นตัวทำละลาย โดยปกติแล้วการสกัดจะสกัดจากตัวทำละลายที่เป็นของเหลว SFE สามารถใช้เป็นขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หรือในกระบวนการที่ใหญ่ขึ้นเพื่อเอาสารที่ไม่ต้องการออกจากตัวผลิตภัณฑ์ (เช่นการแยกคาเฟอีนออก) หรือรวบรวมผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (เช่นน้ำมันหอมระเหย) โดย Supercritical fluid ที่ใช้กันมากที่สุด คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งบางครั้งถูกใช้รวมกับตัวทำละลายร่วม (Co-solvents) เช่น เอทานอลหรือเมทานอล สภาวะการสกัดสำหรับ Supercritical CO_2 อุณหภูมิต้องสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ 31 °C และความดันวิกฤต 73.8 บาร์ การเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-solvents อาจทำให้ความดันและอุณหภูมิวิกฤติเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การสกัด Supercritical ส่วนใหญ่จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูงเพื่อสกัดผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงจากวัตถุดิบ ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการอื่น ๆ เนื่องจากไม่มีสารตกค้างหลังกระบวนการสกัด ยิ่งไปกว่านั้น CO_2 นั้นไม่เป็นพิษ , ไม่ติดไฟ , ไม่มีกลิ่น , ไม่มีรส , มีความเฉื่อยและไม่แพง เนื่องจากมีอุณหภูมิวิกฤติต่ำที่ 31 °C จึงเป็นที่ทราบกันว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหมาะสมอย่างยิ่งกับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร , สารให้กลิ่น , น้ำมันหอมระเหยและผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร (G.N. SAPKALE et al)

กระบวนการสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด

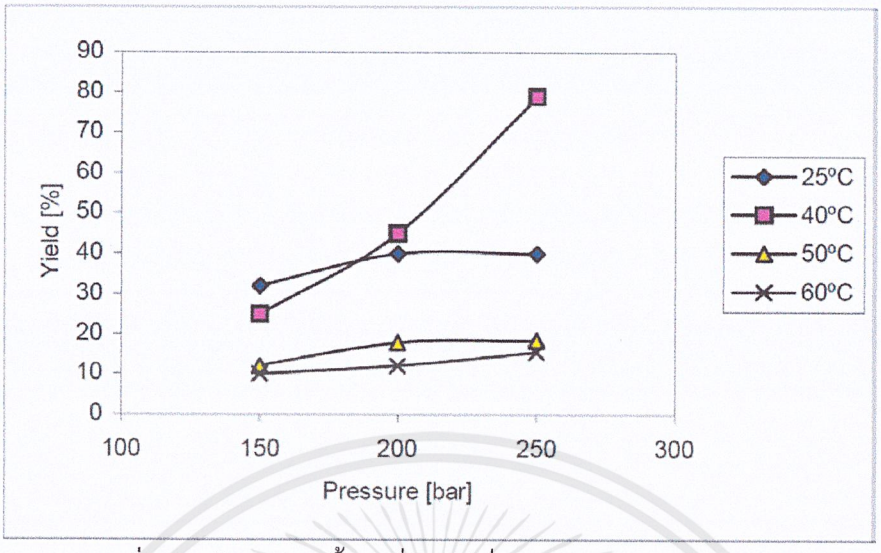
ของไหลจะถูกสูบไปยังโซนให้ความร้อนซึ่งจะถูกให้ความร้อนจนของไหลอยู่ในสภาวะเหนือจุดวิกฤต จากนั้นจะผ่านเข้าสู่ถังสกัดซึ่งจะเกิดการแพร่กระจายอย่างรวดเร็วในเมทริกซ์ที่เป็นของแข็งและละลายสารที่จะสกัดออกมา สารที่ละลายจะถูกเซลล์สกัดพาไปยังถังแยกที่มีความดันที่ต่ำกว่าและสารละลายนั้น จะถูกแยกออกเป็นสารที่สกัดออกมาและก๊าซ CO_2 จากนั้นก๊าซ CO_2 จะถูกทำให้เย็นลงบีบอัดใหม่และรีไซเคิลหรือปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ

ข้อดีของการสกัดด้วยวิธีนี้ มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและผู้บริโภคมากกว่าวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ที่อาจไม่สามารถแยกตัวทำละลายออกมาได้หมดโดยสมบูรณ์ จึงอาจทำให้มีตัวทำละลายตกค้าง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C. M. P. Sarmento et al. (2006) ได้ทำการทดลองสกัดรำข้าวนึ่งโดยใช้ Supercritical CO_2 ณ สภาวะที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสและความดันตั้งแต่ 150 ถึง 250 bar เริ่มจากนำรำข้าวนึ่งที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตรำข้าวนึ่งจากโรงงานมาใช้ในการทดลองปริมาณ 40 กรัมต่อการทดลองในแต่ละรอบ มีขนาดอนุภาค 0.20 – 0.22 มิลลิเมตร ใส่เข้าไปในถังสกัดที่มีความจุ 140 ลบ.ซม. แล้วทำการทดลองในส่วนแรก คือ ส่วนของกระบวนการสกัด เพื่อที่จะเลือกอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมกับการสกัดรำข้าวนึ่งเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตมากและกลุ่มวิตามินอี (Vitamin E) ในน้ำมันรำข้าวในปริมาณที่สูงที่สุด โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ความดัน 150 , 200 , 250 บาร์ และอุณหภูมิ 25 , 40 , 50 , 60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหลของตัวทำละลายโดยเฉลี่ย 0.0756 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยบันทึกผลผลิตจากการทดลองการสกัดทั้งหมด 8 ชั่วโมง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 ร้อยละของน้ำมันที่สกัดได้ที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ

Juliana Ferreira Soares et al. (2015) ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการสกัดรำข้าวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical CO_2) กับก๊าซปิโตรเลียมเหลวเหลวอัด โดยทดลองการสกัดเมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (ความบริสุทธิ์ 99.9%) ที่ความดัน 150 – 250 บาร์ และอุณหภูมิ 40 - 80 องศาเซลเซียส และทดลองการสกัดโดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเหลวอัด ที่ความดัน 5 - 25 บาร์ และอุณหภูมิที่ 20 – 40 องศาเซลเซียส ใช้รำข้าว 10 กรัมต่อหนึ่งการทดลอง ใส่เข้าไปในถังสกัดความจุ 100 ลบ. ซม. โดยให้อัตราการไหลของ CO_2 เท่ากับ 4 กรัมต่อนาที ได้ผลตามรูปที่ 2.32 ผลผลิตสูงสุด (The highest yields) ที่สกัดได้โดยใช้ Supercritical CO_2 และก๊าซปิโตรเลียมเหลวเหลวอัดสกัดได้ 12.68 และ 12.07 wt%

Extraction yields and antioxidant activities of extracts from rice bran obtained with supercritical CO_2 and compressed LPG as solvents.

Temperature/Pressure (°C/bar)	CO_2 density (kg m^{-3})	Yield (wt%)	Oil recovery (%)	Antioxidant activity (%)
Supercritical CO_2				
40/150	792.33	9.89	64.05	56.0 ± 2.0
80/150	432.19	0.70	4.53	Nd
40/250	892.86	12.68	82.12	55.0 ± 2.0
80/250	691.82	12.24	79.27	68.0 ± 3.0
60/200	732.43	10.19	66.00	72.0 ± 2.0
60/200	732.43	9.88	63.99	72.0 ± 2.0
60/200	732.43	10.14	67.62	72.0 ± 2.0
Compressed LPG				
20/5	Nd	9.99	64.70	65.3 ± 0.8
40/5	Nd	<0.01	Nd	Nd
20/25	Nd	11.45	74.16	64.0 ± 3.0
40/25	Nd	12.07	78.17	67.0 ± 2.0
30/15	Nd	11.75	76.10	65.0 ± 3.0
30/15	Nd	12.66	81.99	65.0 ± 3.0
30/15	Nd	11.79	76.36	65.0 ± 3.0

Nd – not determined.

รูปที่ 2.32 ผลการทดลองของ Juliana Ferreira Soares et al. (2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Darius Povilaitis และ Petras Rimantas Venskutonis (2015) นำรำข้าวไรซ์มาทดลองการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสกัด โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ในการทดลอง จะใช้ความดันสกัดที่15 MPa , 35 MPa และ 55 MPa กับอุณหภูมิสกัด 70°C ใช้เวลาการสกัด (dynamic extraction time) ในช่วง 60 – 120 นาที โดยใช้วัตถุดิบ คือ รำข้าวไรซ์ที่บดแล้ว 10 กรัม ใส่ลงในถังสกัดความจุ 50 มิลลิลิตร ในระดับแลป และทดลองการสกัดรำข้าวด้วยสภาวะที่เหมาะสมในระดับ pilot scale ใช้ปริมณรำข้าว 3650 กรัม ใส่ลงในถังสกัดสแตนเลสที่มีความจุ 10 ลิตร ปริมาณสารสกัดสูงสุดที่ได้จากกระบวนการ ประมาณ 2.5% โดยมีสภาวะการสกัดดังนี้ ความดันสกัด 55 MPa อุณหภูมิสกัด 70 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการสกัด 120 นาที และลองนำไปสกัดในระดับ Pilot scale พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ที่ระยะเวลาการสกัด 210 นาที แต่ในช่วงแรก พบว่า มีอัตราการสกัดที่สูงกว่าระดับ Lab scale ดังรูปที่ 2.33 และ 2.34

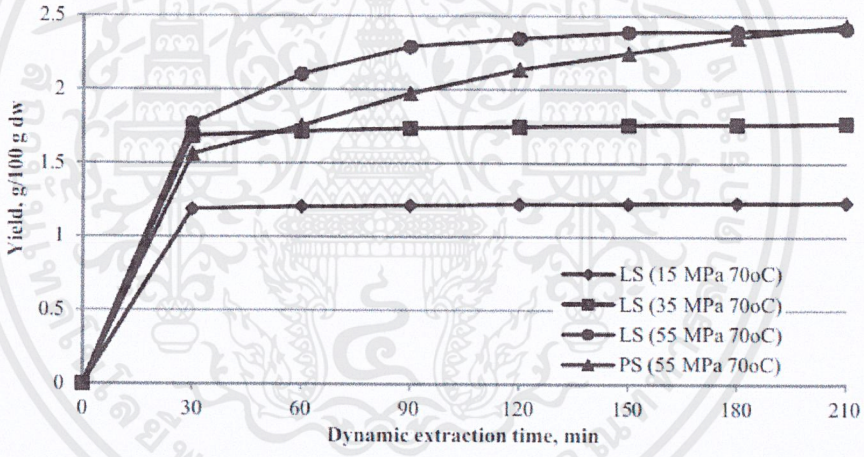


Fig. 1. Influence of dynamic extraction time on the rye bran extract yield (LS, laboratory scale extractor; PS, pilot scale extractor).

รูปที่ 2.33 ผลการทดลองของ Darius Povilaitis และ Petras Rimantas Venskutonis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1
Parameter values and results of rye bran extraction optimization; 1–8 are experimental runs, 9–14 axial point runs and 14–20 are central point runs.

Variation levels	Variables		
	Extraction pressure (MPa)	Extraction temperature (°C)	Dynamic extraction time (min)
Low level (−1)	25	30	60
Max level (+1)	55	70	120
Medium level (0)	40	50	90

Run	Coded factor			Uncoded factor			Yield (g/100 g DW)
	Extraction pressure (MPa)	Extraction temperature (°C)	Dynamic extraction time (min)	Extraction pressure (MPa)	Extraction temperature (°C)	Dynamic extraction time (min)	
1	−1	−1	−1	25	30	60	1.43 ± 0.05
2	1	−1	−1	55	30	60	1.67 ± 0.09
3	−1	1	−1	25	70	60	1.85 ± 0.04
4	1	1	−1	55	70	60	2.16 ± 0.05
5	−1	−1	1	25	30	120	1.68 ± 0.04
6	1	−1	1	55	30	120	1.92 ± 0.09
7	−1	1	1	25	70	120	2.03 ± 0.02
8	1	1	1	55	70	120	2.49 ± 0.01
9	−1.682	0	0	14.77	50	90	1.49 ± 0.09
10	1.682	0	0	65.23	50	90	2.16 ± 0.06
11	0	−1.682	0	40	16.36	90	1.53 ± 0.07
12	0	1.682	0	40	83.64	90	2.27 ± 0.09
13	0	0	−1.682	40	50	39.55	1.70 ± 0.07
14	0	0	1.682	40	50	140.45	2.23 ± 0.05
15	0	0	0	40	50	90	2.06 ± 0.05
16	0	0	0	40	50	90	2.13 ± 0.04
17	0	0	0	40	50	90	2.18 ± 0.02
18	0	0	0	40	50	90	2.08 ± 0.03
19	0	0	0	40	50	90	2.20 ± 0.08
20	0	0	0	40	50	90	2.08 ± 0.08

Results are expressed as mean ± standard deviation of triplicate determinations.

รูปที่ 2.34 ผลการทดลองของ Darius Povilaitis และ Petras Rimantas Venskutonis (2)

Siti Machmudah et al. (2007) ศึกษาผลของแรงดันต่อการสกัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่วิกฤตยิ่งยวดจากเมล็ดต่าง ๆ ใช้เมล็ดสามชนิด (rosehip loquat และ physic nut) เป็นวัตถุดิบ ทำการสกัดที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80°C โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% และควบคุมอัตราการไหลของ CO_2 อยู่ที่ 3 ml/min และทำการสกัดที่ความดัน 15–49 MPa เปรียบเทียบ %recovery ของสารสกัดกับการสกัดแบบ soxhlet โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย จากผลลัพธ์ที่อุณหภูมิคงที่ %recovery ของน้ำมันเมล็ดโรสฮิปเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาการสกัดสั้น ๆ แต่ลดลงเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการสกัดด้วย soxhlet การสกัด SC-CO2 สามารถสกัดน้ำมันโรสฮิปได้มากกว่าการสกัดด้วย soxhlet โดยใช้เฮกเซน ในการสกัดน้ำมันเมล็ดโรสฮิปพบว่ามีการข้ามพื้นที่ %recovery ของน้ำมันเมล็ด loquat เพิ่มขึ้นเมื่อความดันลดลงที่ 60 และ 80 °C แต่ที่ 40°C การสกัดกลับคืนมานั้นไม่ขึ้นอยู่กับความดัน สำหรับ physic nut แรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ %recovery สูงขึ้นจาก 83.7 เป็น 88.7% ณ อุณหภูมิสกัดคงที่

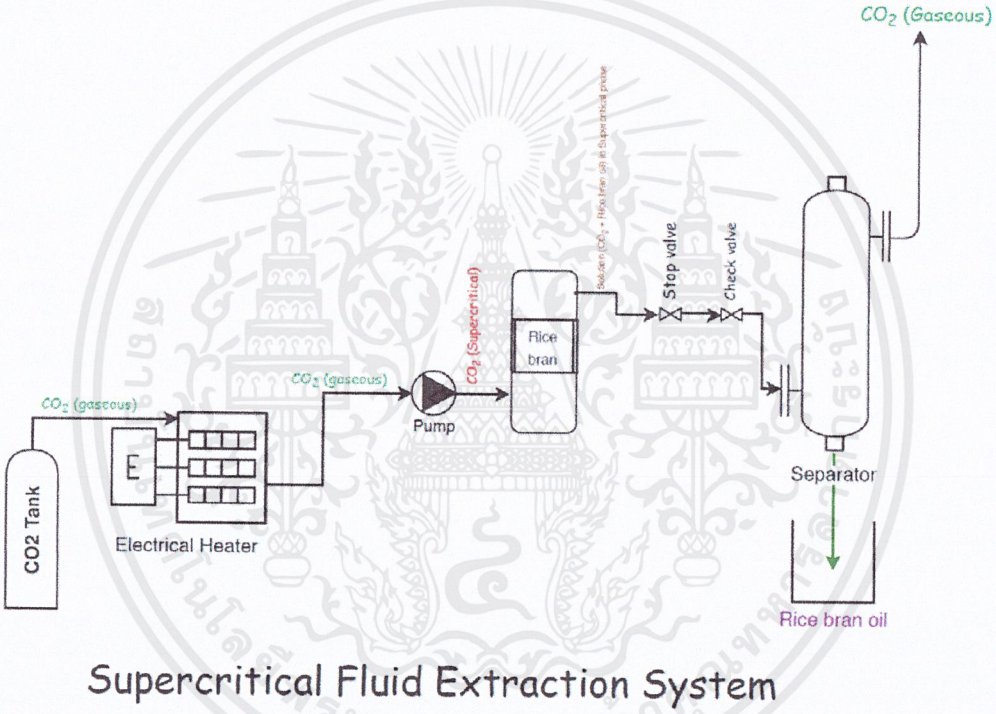
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 ศึกษากระบวนการสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด

ศึกษากระบวนการสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวดโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายสกัดน้ำมันออกจากรำข้าว เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการสกัดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้จริง

3.2 ศึกษาวิธีการใช้งานและความปลอดภัยของเครื่องสกัด



รูปที่ 3.1 ผังเครื่องสกัดด้วย Supercritical CO_2

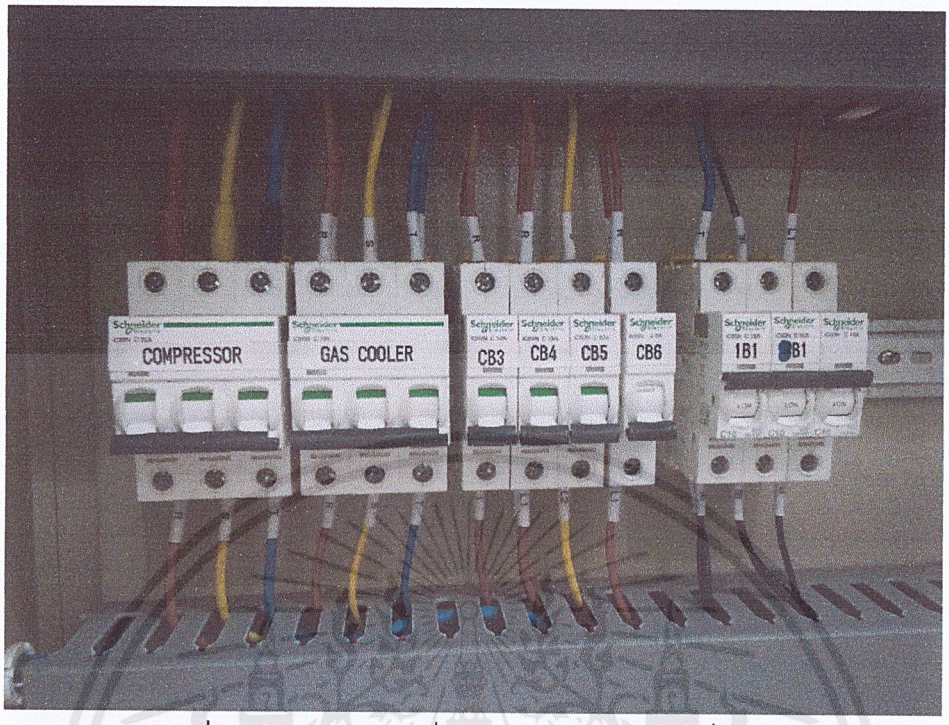
วิธีการใช้งานเครื่องสกัด แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ วิธีการรันระบบไฟฟ้า และ วิธีเตรียมการเครื่องสกัด มีรายละเอียด ดังนี้

<u>ส่วนระบบไฟฟ้า</u>

<u>• ขั้นตอนการรันระบบเครื่องทำความเย็นด้วย CO_2</u>

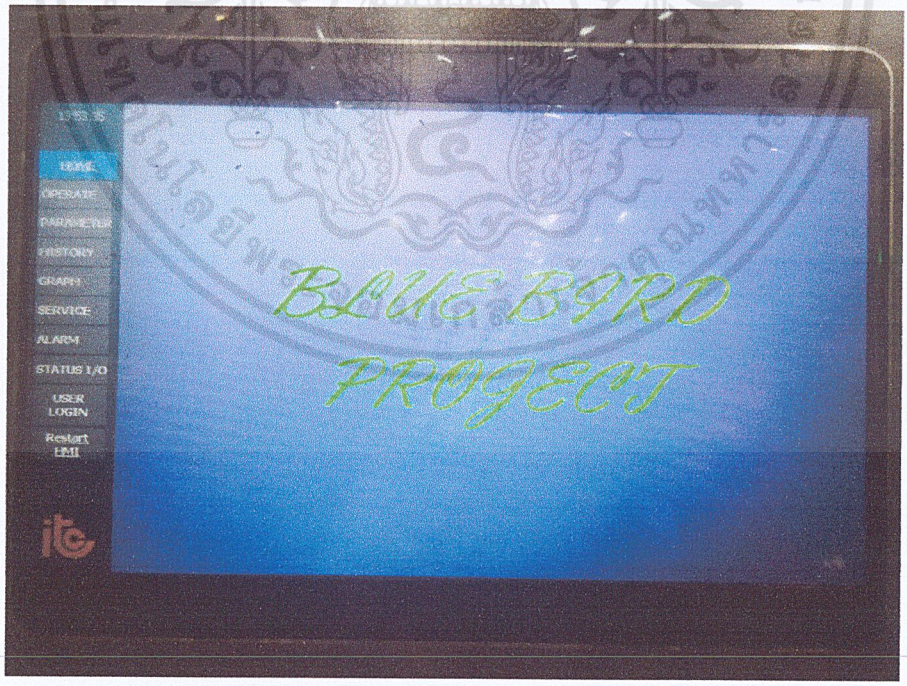
1. สับคัตเอาท์ 1B1 , B1 และคัตเอาท์ทางขวาขึ้นเพื่อเปิดเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผงวงจรของเครื่องทำความเย็นและสวิตช์ที่ใช้งาน

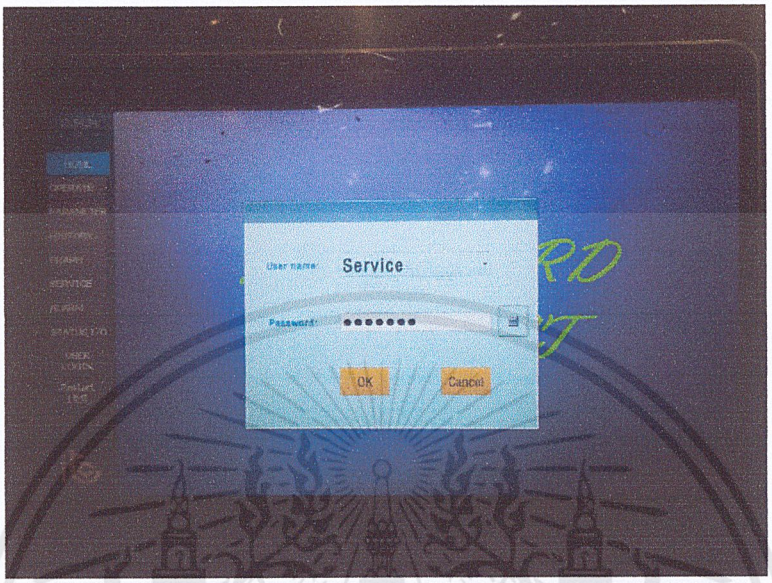
2. กดแถบ USER LOGIN อยู่ทางซ้ายมือของหน้าจอ แถบล่างสุด



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของแถบล็อกอินบนมอนิเตอร์

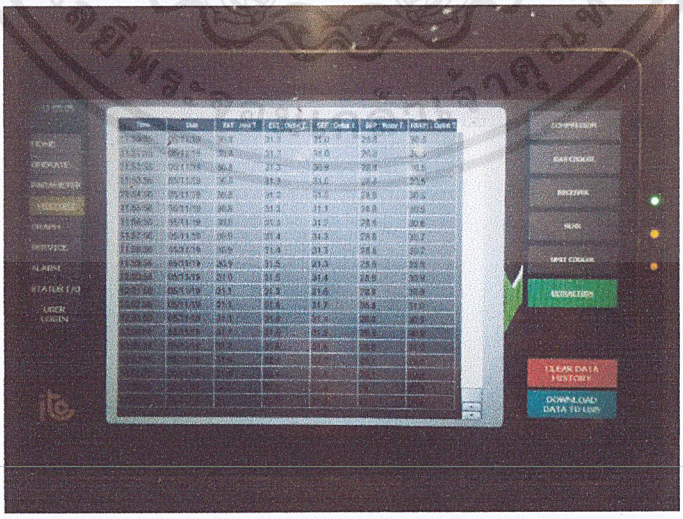
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Log in เข้าสู่ระบบ ด้วยการเลือก Username เลือกชื่อ Service และกรอกรหัสผ่าน



รูปที่ 3.4 หน้าต่างล็อกอินของระบบเครื่องทำความเย็นและเครื่องสกัด

4. หลังจากการเข้าสู่ระบบสำเร็จ ให้กดไปที่แถบ OPERATE อีกครั้ง หน้าจอจะมีการวัดอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ทุก ๆ 1 นาที ทั้งระบบทำความเย็นและระบบสกัด นอกจากนี้ระบบยังมี Data Logger สามารถบันทึกผลของอุณหภูมิได้ทุก ๆ 1 นาทีเช่นกัน สามารถดูได้จากแถบ History ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Data logger ของระบบเครื่องทำความเย็นและเครื่องสกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• ขั้นตอนการรันระบบไฟของเครื่องสกัด

1. สับคัตเอาท์ COMPRESSOR กับ CB8 ขึ้น

รูปที่ 3.6 สวิตช์ปั๊มน้ำ และ ลวดความร้อนบนแผงวงจรเครื่องสกัด

2. เช็คการทำงานของปั๊มน้ำและ Heater

วิธีเตรียมการเครื่องสกัด

1. เปิดวาล์วบนถัง CO_2 และวาล์วที่จุดรวมก๊าซ (รถเข็น - Header) เช็คการไหลเข้าของ CO_2 ได้จากเกจวัดความดัน และเปิดวาล์วที่ Air Compressor
2. เช็ควาล์วทั้ง 6 วาล์วก่อนเปิด Gas inlet valve ว่าเปิด/ปิด ดังนี้ กำหนดให้

   Valve No.1 เป็น วาล์วของไลน์ท่อที่ไว้ควบคุมความดัน

   Valve No.2 เป็น วาล์วทางขาเข้าถังสกัด

   Valve No.3 เป็น วาล์วทางขาออกถังสกัด

   Valve No.4 เป็น วาล์วทางขาออก Booster pump

   Valve No.5 เป็น Unloading valve ที่ Booster pump

   Valve No.6 เป็น High pressure outlet valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวาล์วทั้ง 6 มีสถานะการเปิดปิดเริ่มต้น ดังนี้

Valve No.1 : เปิด	Valve No.4 : ปิด
Valve No.2 : ปิด	Valve No.5 : ปิด
Valve No.3 : ปิด	Valve No.6 : เปิด

3. เปิด Gas inlet valve เพื่อให้ก๊าซ CO_2 ไหลเข้ามาในระบบ Booster pump
4. จากนั้นทำการอัด Pressure เข้าไปในไลน์ท่อควบคุมความดัน โดยเปิดวาล์ว No.1 , No.6 และปิดวาล์ว No.2 , No.3 , No.4 และ No.5 ดังรูป แล้วเปิดสวิตช์ Driven Air หลังจากที่ได้ความดันควบคุมที่ต้องการแล้วให้ปิดสวิตช์ , วาล์วตัวที่ 1 และ 6

5. เช็คให้แน่ใจก่อน ว่าวาล์ว No.6 ปิดแน่นแล้ว ให้เปิดวาล์ว No.5 (Unloading valve) และเปิดวาล์ว No.2 , No.3 และ No.4
6. เช็ควาล์วทั้งหมดให้แน่ใจว่า วาล์วที่ให้ก๊าซ CO_2 ที่เข้าถังสกัดตลอดจนถังแยกสาร เปิดหมด และ วาล์วที่ไลน์ท่อที่คุมความดันไว้ ปิดอยู่
7. เปิดสวิตช์ Driven Air เพื่อเริ่มกระบวนการสกัด

<u>อุปกรณ์ที่เกี่ยวกับความปลอดภัยของเครื่องสกัด</u>

เนื่องจากการดำเนินเครื่องสกัดแบบนี้มีความดันสูง ดังนั้น จึงต้องมีความปลอดภัยป้องกันอันตรายจากเครื่องสกัดโดย มี Releif valve เป็นอุปกรณ์ด้านความปลอยภัยในระบบสกัด โดยทำหน้าที่ระบายความดันที่ถังสกัดออกเมื่อความดันของถังสูงเกินที่กำหนดไว้

3.3 ปัญหาและการพัฒนาระหว่างการใช้งานเครื่องสกัด

3.3.1 ความดันสูงเกินขอบเขตความปลอดภัยของเครื่องสกัด

• ที่ถังสกัด

<u>วิเคราะห์ปัญหา</u> : สารละลายที่อยู่ภายในเครื่องสกัดเกิดการอัดอยู่ภายในถังโดยที่ไม่ผ่านวาล์วควบคุมความดัน เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของเกจวัดความดันทั้งสอง (เกจวัดที่ถังสกัดและเกจวัดที่วาล์วควบคุมความดันหรืออาจมีสาเหตุมาจากการใช้ก๊าซชนิดเดียวกันคุมความดัน ซึ่งเป็นก๊าซที่นำมาใช้สกัดเช่นกัน จึงไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับความร้อนที่วาล์วของก๊าซ ของกันและลดความดันอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิลดอย่างรวดเร็วด้วย เกิดปัญหาน้ำแข็งเกาะรอบ ๆ ท่อ การอุดตันในท่อทำให้เกิดความดันที่สูงเกินที่กำหนดไว้

วิธีแก้ไข : ตั้งความดันให้เกจที่วาล์วควบคุมความดันต้านกลับสมดุล ให้น้อยกว่าความดันที่ต้องการในถังสกัดประมาณ 3 – 5 bar และพันขดลวดความร้อนไว้ที่วาล์วคุมความดัน

• ที่วาล์วลดความดัน

วิเคราะห์ปัญหา สารละลายที่ผ่านวาล์วควบคุมความดันมา ทำให้สารละลายเกิดผลเช่นเดียวกับหลักของ Expansion valve เนื่องจากอีกฝั่งเป็นสภาวะความดันบรรยากาศ ทำให้สารละลายมีความดันลดลงอย่างรวดเร็วแล้วทำให้อุณหภูมิลดอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกันส่งผลให้ท่อมีอุณหภูมิลดลงเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศรอบ ๆ เมื่ออุณหภูมิต่ำทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการจับตัวเป็นน้ำแข็งบริเวณรอบท่อภายนอกทำให้สารละลายมีอุณหภูมิที่เย็นลงจนเกิดการเป็นไขสูงขึ้น ทำให้เกิดการอุดตันภายในท่อ ทำให้ความดันภายในเครื่องเพิ่มสูงขึ้นเสี่ยงต่อการเกิดอันตราย

วิธีแก้ไข : พันขดลวดความร้อนรอบ ๆ ท่อ ป้องกันการเกิดน้ำแข็ง สามารถกันไขอุดตันภายในท่อได้

3.3.2 เกิดการรั่วในระบบสกัด เช่น ข้อต่อของท่อ และฝาถังสกัด เป็นต้น

วิเคราะห์ปัญหา เกิดจากการพันเทปพันเกลียวไม่แน่น หรือการขันน็อตได้ไม่แน่นพอ ทำให้เกิดการรั่วขณะเครื่องสกัดกำลังทำงาน

วิธีแก้ไข : ถอดอุปกรณ์มาพันเกลียวใหม่อีกรอบ หรือขันเข้าไปใหม่อีกรอบให้แน่นกว่าเดิม

3.3.3 เกิดการปั่นป่วนกระแสการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนเข้า Booster pump เนื่องจากมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ย้อนกลับมาที่ถังก๊าซ สังเกตได้จากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของถัง (โดยปกติ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องลดลง เพราะถูกป้อนเข้า Booster pump ตลอดเวลา)

วิเคราะห์ปัญหา : เนื่องจากคุณสมบัติของก๊าซ มีการเคลื่อนที่รวดเร็วทำให้เมื่อก๊าซที่ถูกส่งไป มีโอกาสทำให้ก๊าซย้อนกลับมาที่ถัง

วิธีแก้ไข : เพิ่ม Check valve บริเวณก่อนเข้า Heater เนื่องจากทำให้ไม่เกิดการย้อนกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ และทำให้แรงดันเข้าระบบ Booster pump ได้อย่างเสถียรมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 O-ring เสียหายหลังจากการสกัด

<u>วิเคราะห์ปัญหา</u> : มีการใช้งานในช่วงความดันและอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมกับคุณสมบัติของ O-ring

<u>วิธีแก้ไข</u> : เพิ่มความแข็งของ O-ring ชนิด NBR ขึ้นเพื่อให้ทนต่อความดันและอุณหภูมิปฏิบัติการของเครื่องสกัด

3.4 การออกแบบการทดลอง

ที่มาของเงื่อนไขการทดลองที่ใช้ในครั้งนี้ เริ่มจาก จากนั้นเป็นช่วงการทดลองการใช้เครื่องสกัดครั้งแรก โดยใช้รำข้าว 3 kg สกัดที่ความดัน 170 bar เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แต่ยังไม่มีน้ำมันรำข้าวออกมาจากถังแยกสาร ต่อมาจึงเพิ่มความดันที่ถังสกัดจาก 170 เป็น 300 bar แล้วลดน้ำหนักรำข้าวจาก 3 kg ลงเหลือ 2 kg (จากคำแนะนำของพี่เลี้ยงที่ได้ข้อมูลมาจากแหล่งภายนอก) และเปลี่ยนความดันเป็น 200 bar เพื่อเพิ่มอัตราการไหลของ CO_2 และต่อถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2 ถัง เพื่อทำให้ flow rate เสถียรมากขึ้น ผลจากการปรับความดันเป็น 200 บาร์ ทำให้อุณหภูมิที่ถังสกัดลดลง 2 – 3 องศาเซลเซียส

โดยการทดลองมีรายละเอียด ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงความดันเพื่อดูปริมาณสารสกัดที่ได้หลังการสกัด***

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองในการสกัดน้ำมันจากรำข้าวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

Extracting pressure (bar)	Extracting temperature (°C)	Extraction time (hr)	Separator temperature (°C)	CO_2 flow rate (kg/10min)	Rice bran weight (kg)
200	32-35	5	32 – 33	0.2 – 0.5 @ 300 bar (Dynamic)	2 kg
300				0.6 – 1.4 @ 300 bar (Dynamic) (เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการลดความดันและใช้ถัง CO_2 จำนวน 2 ถังในการสกัด)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีที่มาและรายละเอียดของค่าในตาราง ดังนี้

- ความดันสกัด (Extracting pressure)
  มาจากการรวบรวมข้อมูลจากวารสารทางวิชาการต่าง ๆ ที่กล่าวไปดังบทที่ 2 กับข้อมูลรายละเอียดของเครื่องสกัดของบริษัท
- อุณหภูมิสกัด (Extracting temperature)
  มาจากข้อมูลรายละเอียดการใช้งานของเครื่องสกัดของบริษัท
- ระยะเวลาการสกัด (Extraction time)
  มาจากการประยุกต์จากวารสารทางวิชาการ และความสะดวกในการทำงานทั้งผู้ปฏิบัติงานกับพนักงานทางบริษัท
- อุณหภูมิถังแยกสาร (Separator temperature)
  มาจากข้อมูลรายละเอียดของเครื่องสกัดของบริษัท
- อัตราการไหลของ CO_2 (CO_2 flow rate)
  มาจากข้อมูลรายละเอียดของเครื่องสกัดของบริษัท
- ปริมาณรำข้าว (Rice bran weight)
  ประยุกต์มาจากข้อมูลจากวารสาร " Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of rye bran using response surface methodology and evaluation of extract properties " ที่ใช้รำข้าว 3650 กรัมใส่ลงในถังสกัดความจุ 10 ลิตรซึ่งเท่ากับความจุถังสกัดของเครื่องสกัดที่บริษัทสร้าง ร่วมกับการทดลองจากเครื่องสกัดเนื่องจากข้อมูลที่ได้มา สัดส่วนของรำข้าวต่อความจุของถังสกัดจะอยู่ในช่วง 10 – 37%

3.5 วัตถุดิบและวัสดุ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองการสกัด คือ รำข้าว พันธุ์ปทุมธานี 80 (ข้าวแข็ง) หรือ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กข.31 (RD 31)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 รำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 80

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.7 %

http://www.sn-oxygen.com/15875289/คาร์บอนไดออกไซด์-carbondioxiedco2

รูปที่ 3.8 ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

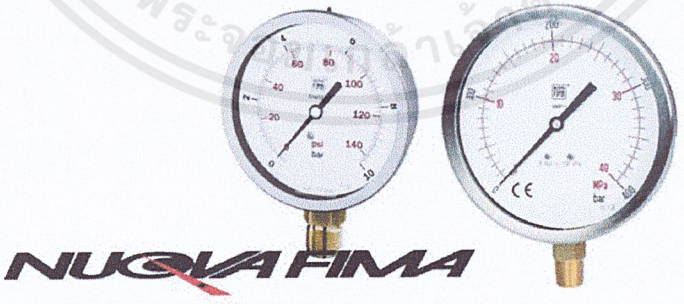
- เทอร์โมมิเตอร์ ชนิดอินฟาเรด (IR Thermometer) ใช้วัดและแสดงค่าอุณหภูมิตาม Probe ที่ติดตั้งไว้ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบสกัด

รูปที่ 3.9 เทอร์โมมิเตอร์ ชนิดอินฟาเรด

- Probe วัดอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ในระบบสกัด

รูปที่ 3.10 NTC double insulation IP68

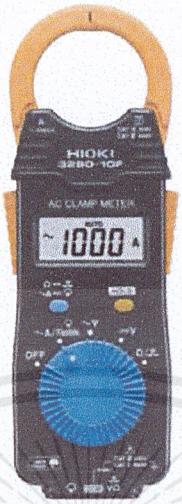
- Pressure guage วัดความดันตามจุดต่าง ๆ ในระบบสกัด เช่น ความดันที่ถังที่สกัด เป็นต้น



รูปที่ 3.11 Nuova Fima Pressure guage

- Clamp meter วัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้กับระบบสกัด ได้แก่ ปั๊มน้ำ, Electrical Heater เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 Hioki 3280-10f AC Clamp Meter

- เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง ชั่งน้ำหนักน้ำมันรำข้าวจากการสกัด

รูปที่ 3.13 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น SF-400D

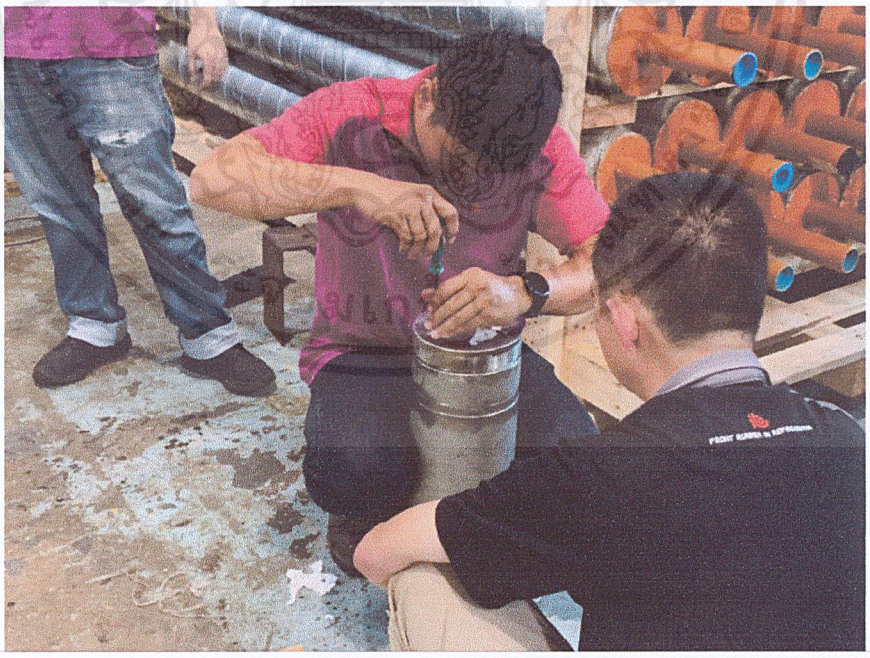
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ขั้นตอนการทดลอง

1) ใส่รำข้าวลงในถังสกัด

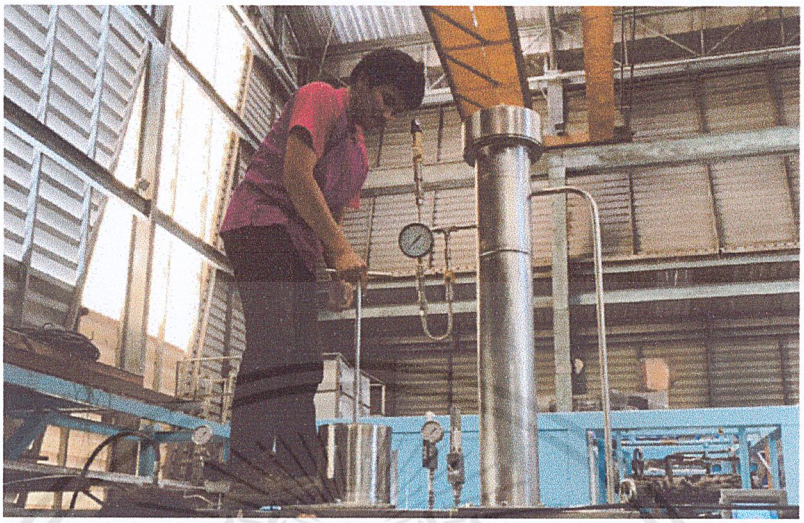
รูปที่ 3.14 การใส่รำข้าวลงกระบอกถังใน

2) ปิดฝาถังสกัดให้แน่น



รูปที่ 3.15 การขันฝาถังใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



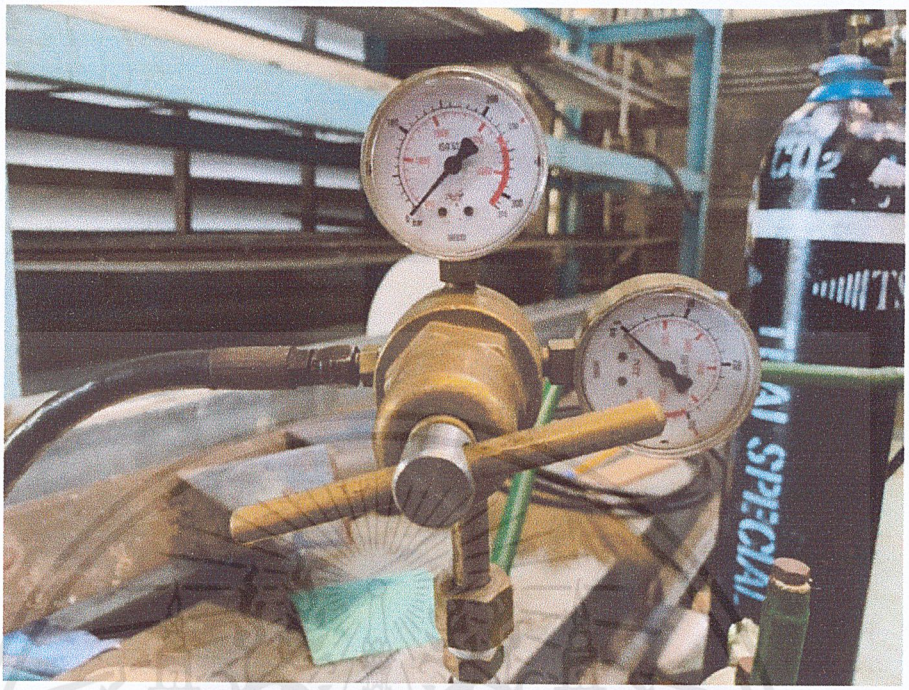
รูปที่ 3.16 การใส่ถังทรงกระบอกลงในถังสกัด

3) เช็คการเปิดปิดของวาล์วทุกครั้งก่อนทำการสกัด

4) เปิดวาล์วที่ถัง CO_2, ที่ Header และ Gas inlet valve

รูปที่ 3.17 การเปิดถังคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 วาล์วเปิด-ปิดตัวผสมความดันถังก๊าซ

รูปที่ 3.19 การเปิดตัวผสมความดันถังก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ทำการอัดแรงดันเข้าไปที่ท่อควบคุมความดันจนถึงระดับที่ต้องการ

6) เริ่มทำการสกัดน้ำมันรำข้าว จับเวลา และบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 3.20 ใบบันทึกผลการทดลอง

3.8 วิธีการคำนวณ

3.8.1 ปริมาณสารสกัด (%Yield) สามารถคำนวณได้จาก

$$Yield\ (\%) = \frac{Final\ rice\ bran\ oil\ (Extracted)\ (grams)}{initial\ rice\ bran\ weight\ (grams)} \times 100$$

3.8.2 พลังงานไฟฟ้า (Power) (W) สามารถคำนวณได้จาก

$$P = IVCOS\Theta \qquad \text{for 1 electrical phase}$$

$$P = \sqrt{3}IVCOS\Theta \qquad \text{for 3 electrical phase}$$

เมื่อ P คือ พลังงานไฟฟ้า (Power) มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I คือ กระแสไฟฟ้า (Current) มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere)

V คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt)

cos θ คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) ในการทดลองนี้มีค่า 0.8 โดยประมาณ

3.8.3 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Electrical cost) (Baht) สามารถคำนวณได้จาก

$$Electrical\ cost = \frac{P}{1000} \times t \times unit\ cost$$

เมื่อ Electrical cost คือ ค่าใช้จ่ายทางพลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น บาท (Baht)

P คือ พลังงานไฟฟ้า (Power) มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)

T คือ เวลาที่ใช้ในการทำงาน (Time use) มีหน่วยเป็นชั่วโมง (hour)

Unit cost คือ ค่ายูนิตของไฟฟ้า ตามประเภทของกิจการ มีหน่วยเป็น บาท/กิโลวัตต์อาวร์ (Baht/kWh) หรือ บาท/หน่วย (Baht/unit) ในที่นี้ คิดค่า Unit cost ละ 5.7982 บาท/หน่วย ตามเอกสารของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก โดยคิดอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

จากการปรับการใช้เครื่องสกัดและพัฒนาเครื่องสกัด จนสกัดน้ำมันรำข้าวด้วยวิธี Supercritical Fluid Extraction ได้สำเร็จ ดังรูปที่ 4.1 จากนั้นลองปรับปริมาณวัตถุดิบลดลงจาก 3 kg เหลือ 2 kg ตลอดจนการทดลองสกัดรำข้าวที่ความดัน 100 , 200 และ 300 บาร์ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารสกัดที่ได้หลังจากสิ้นสุดกระบวนการโดยสกัดสารที่สภาวะเดียวกัน ได้ผลการทดลองดังนี้ เริ่มจากการใช้ไฟฟ้าในการสกัด ดังตารางที่ 4.1

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างน้ำมันรำข้าวที่ได้จากการสกัด

ตารางที่ 4.1 ผลการใช้ไฟฟ้าในการสกัดน้ำมันรำข้าวระยะเวลา 5 ชั่วโมง

การคำนวณไฟฟ้าที่ใช้ต่อ 1 การทดลอง (5hr) โดยทั่วไป cos θ = 0.8 เนื่องจากไม่มี Power meter

Electric equipment	V (Volt)	I (Amp)	Electrical Phase	Power (kW)	Time use (hr)	kWh unit	Cost (บาท)
Pump	220	0.27	1	0.04752		0.2376	1.38
Heater	380	11.12	3	5.855163	5	29.27582	169.75
Air Compressor	380	11.78	3	6.202682		31.01341	179.82
Total Cost per hour					70.19	บาท	
Total Cost					350.95	บาท	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าในระบบสกัด ได้แก่ Pump , Heater และ Air Compressor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งไฟฟ้า 1 เฟส และไฟฟ้า 3 เฟส ในโรงงานขนาดเล็ก ดังนั้น ค่าใช้จ่ายของการสกัดในหนึ่งชั่วโมงคิดเป็นเงินประมาณ 70.19 บาท ถ้าทำการสกัดที่ 5 ชม.ต่อวัน จะเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 350.95 บาทต่อวัน

ในช่วงแรกที่ใช้งานเครื่องสกัด ใช้ปริมาณรำข้าวจากการตกลงกับทางบริษัทร่วมกับการอ้างอิงจากวารสารเกี่ยวกับการสกัดน้ำมันรำข้าว คือ 3 kg ใส่ลงในถังสกัดความจุ 10 ลิตร จากการสกัดที่ได้ลอง ทำให้รู้อัตราการไหลของน้ำมันรำข้าวโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 6.23 g/hr จากนั้น ลองลดปริมาณรำข้าวลงมา 1 kg เหลือ 2 kg จากข้อมูลที่วิศวกรประจำโปรเจคได้มา แล้วลองสกัดรำข้าว จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการลดปริมาณรำข้าว ทำให้อัตราการไหลของ CO_2 เพิ่มขึ้น และทำให้สกัดได้น้ำมันรำข้าวมากขึ้นด้วย หรือสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำมันรำข้าวเกือบ 50 % เมื่อเทียบกับการสกัดรำข้าวปริมาณ 3 kg

ตารางที่ 4.2 ผลการลดปริมาณรำข้าวในการสกัด

ปริมาณรำข้าว (kg)	CO2 flow rate (kg/hr)	ปริมาณสารสกัด (g)	Mean product flow rate (g/hr)
3	3.1	32.15	6.23
2	3.5	47.63	9.22

โดยควบคุมสภาวะการสกัดดังนี้ ความดันที่ถังสกัด 300 bar , อุณหภูมิที่ถังสกัด 33-35 °C , อุณหภูมิถังแยกสาร 32-34 °C , อุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 48 – 49 °C และระยะเวลาสกัด 5 ชั่วโมง

ต่อมาได้ทำการออกแบบสำหรับการทดลองโดยใช้รำข้าวปริมาณ 2 kg ในการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันรำข้าวที่ได้จากความดันสกัด 2 ระดับ ได้แก่ 200 และ 300 bar โดยควบคุมสภาวะสกัด ดังนี้ อุณหภูมิสกัด 32 – 35 °C , อุณหภูมิถังแยกสาร 32-34 °C , อุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 48 – 49 °C โดยระยะเวลาการสกัดรำข้าวอยู่ที่ 5 ชม. ระยะเวลาการสกัด ได้มาจากการอ้างอิงในวารสารร่วมกับความสะดวกในการทำงานทั้งผู้ทดลองและช่างประจำเครื่องสกัด รวมถึงพนักงานในบริษัท จากการทดลองได้ผลการสกัดดังตารางที่ 4.2 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการสกัดน้ำมันรำข้าวระยะเวลา 5 ชั่วโมง

ความดันสกัด (bar)	CO2 flow rate (kg/hr)	ปริมาณสารสกัด (g)
200	5.4±0.2[a]	22.15±1.47[a]
300	3.5±0.4[b]	47.63±13.41[b]

โดยควบคุมสภาวะการสกัดดังนี้ อุณหภูมิที่ถังสกัด 34-35 °C , อุณหภูมิถังแยกสาร 32-33 °C , อุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 48 – 49 °C และระยะเวลาสกัด 5 ชั่วโมง

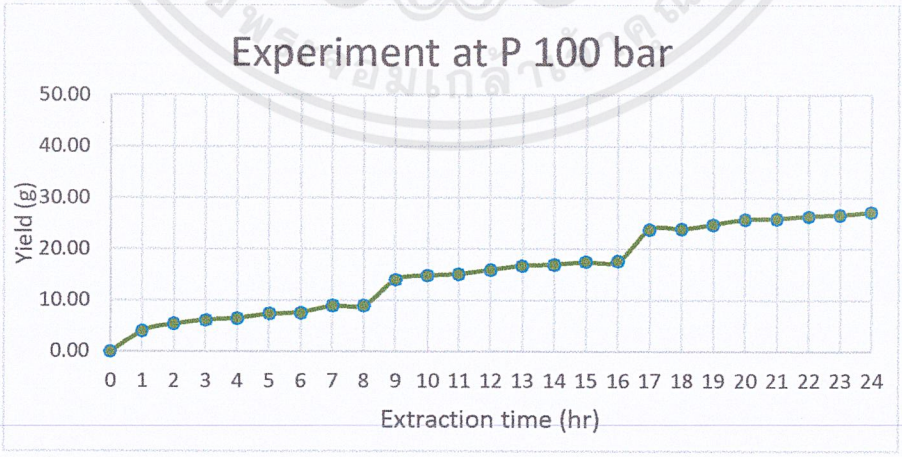
จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณสารสกัดที่สกัดได้ภายใต้สภาวะการสกัดเดียวกัน (อุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน , ถังแยกสาร และอุณหภูมิสกัดใกล้เคียงกัน) จะเห็นว่าการปรับความดันสกัดเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง แต่ได้สารสกัดในปริมาณที่มากขึ้น

จากนั้นทางบริษัทมีความสนใจในการทดลองสกัดรำข้าวระยะยาวโดยสกัดที่ความดัน 100 , 200 และ 300 บาร์ ที่สภาวะการสกัดเดียวกันโดยใช้ระยะเวลาการสกัดทั้งหมด 24 ชั่วโมง โดยแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของปริมาณสารสกัดที่สกัดได้จากรำข้าวได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

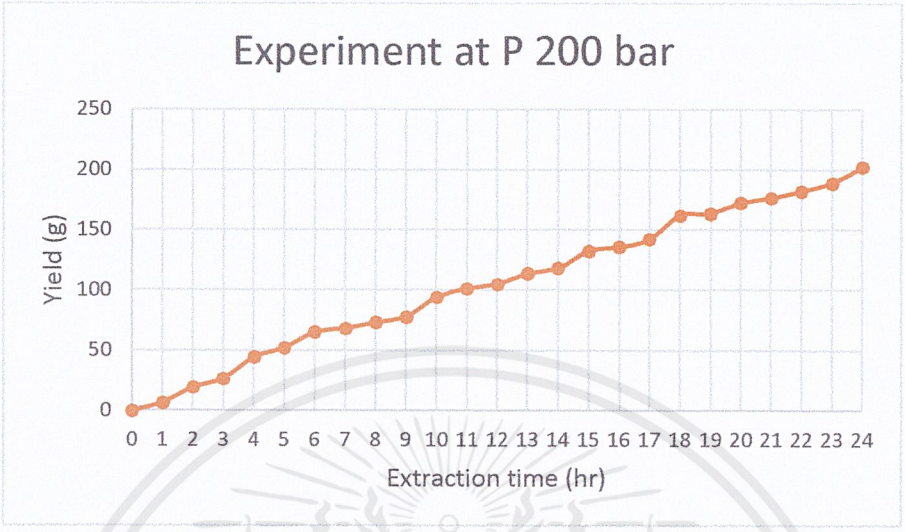
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ที่ความดันถังสกัด 100 และ 200 บาร์ที่ระยะเวลาสกัด 24 ชั่วโมง

เมื่อนำการสกัดรำข้าวในระยะยาวมาวิเคราะห์และแสดงผลการทดลองในรูปแบบของกราฟ และมีการเปรียบเทียบความดันสกัดในระดับต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันรำข้าวที่ได้จากการสกัด โดยมีการควบคุมสภาวะการสกัด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟเช่นกัน ดังนี้

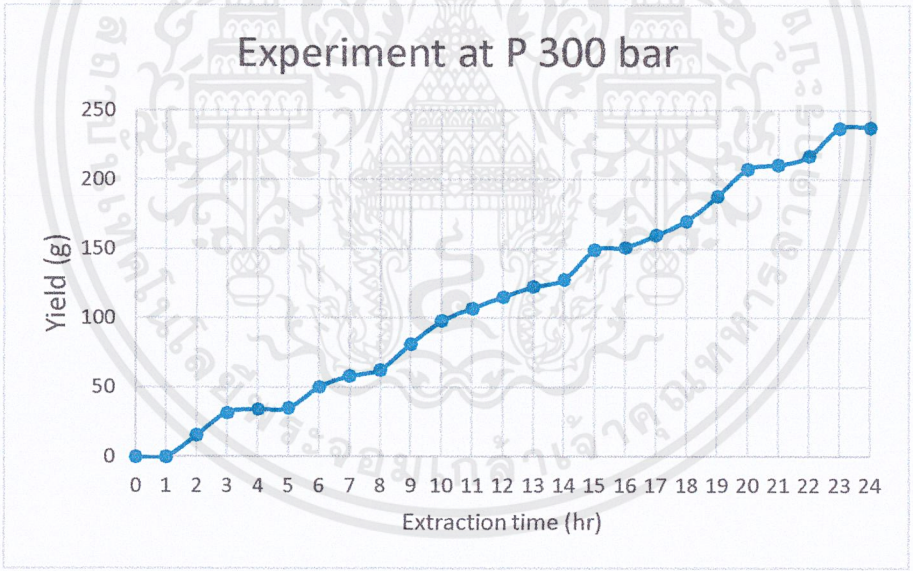


กราฟที่ 4.1 กราฟแสดงปริมาณสารสกัดที่ได้ในแต่ละชั่วโมง โดยใช้ความดันสกัดที่ 100 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

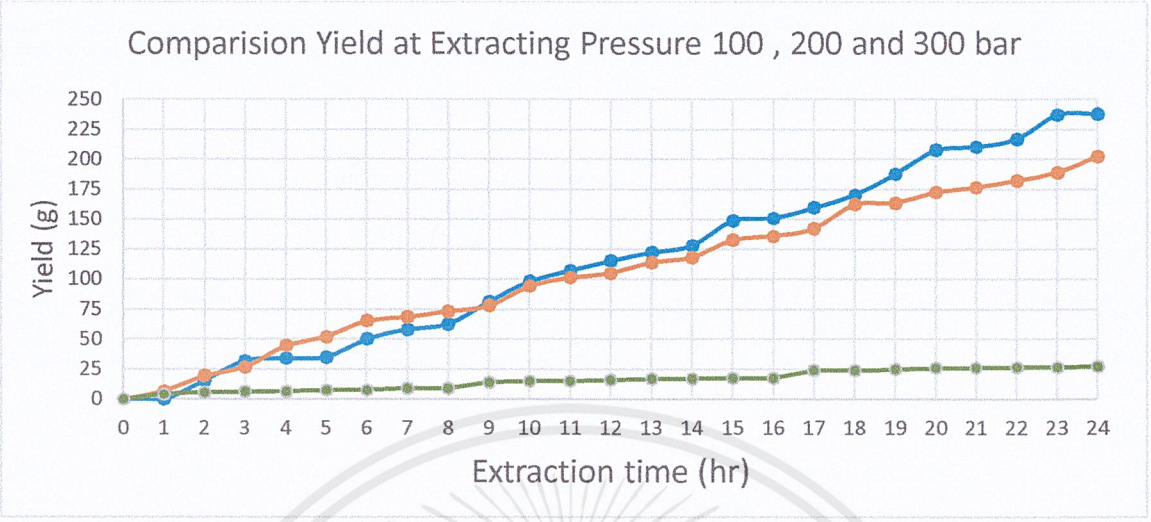


กราฟที่ 4.2 กราฟแสดงปริมาณสารสกัดที่ได้ในแต่ละชั่วโมง โดยใช้ความดันสกัดที่ 200 bar



กราฟที่ 4.3 กราฟแสดงปริมาณสารสกัดที่ได้ในแต่ละชั่วโมง โดยใช้ความดันสกัดที่ 300 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารสกัดระหว่างการสกัดในสภาวะที่ความดัน100 , 200 และ 300 bar

จากกราฟข้างบน แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันรำข้าวที่สกัดได้ ที่ความดันสกัดระดับต่าง ๆ ได้แก่ ความดัน 100 bar (เส้นสีเขียวเข้ม) , ความดัน 200 bar (เส้นสีส้ม) และความดัน 300 bar (เส้นสีน้ำเงิน) โดยใช้ระยะเวลาการสกัดทั้งหมด 24 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่า ที่สภาวะการสกัดเดียวกัน ความดันสกัด 300 bar ได้ปริมาณน้ำมันรำข้าวที่สูงกว่าปริมาณน้ำมันรำข้าวที่ความดันสกัด 200 bar และที่ความดันสกัด 100 bar ได้อย่างชัดเจน และค่าใช้จ่ายของการสกัดรำข้าวที่ใช้ระยะเวลาการสกัด 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานดังตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการใช้ไฟฟ้าในการสกัดน้ำมันรำข้าวระยะเวลา 24 ชั่วโมง

การคำนวณไฟฟ้าที่ใช้ต่อ 1 การทดลอง (24hr) โดยทั่วไป cos θ = 0.8 เนื่องจากไม่มี Power meter							
Electric equipment	V (Volt)	I (Amp)	Electrical Phase	Power (kW)	Time use (hr)	kWh unit	Cost (บาท)
Pump	220	0.27	1	0.04752	24	0.2376	6.61
Heater	380	11.12	3	5.855163		29.27582	814.78
Air Compressor	380	11.78	3	6.202682		31.01341	863.15
Total Cost per hour					70.19	บาท	
Total Cost					1684.54	บาท	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้างบน แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายที่เสียไปในหนึ่งชั่วโมง มีค่าเท่ากัน เนื่องจากเครื่องใช้ไฟฟ้าในระบบการสกัดเหมือนกัน ในระยะเวลาการสกัด 24 ชั่วโมง จะเสียค่าใช้จ่ายทั้งหมดเป็นเงินประมาณ 1,684.54 บาท

ถ้ามองในเชิงของต้นทุนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง ที่แสดงดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ายิ่งความดันสกัดต่ำ จะใช้ปริมาณ CO_2 มากขึ้นในระยะเวลาการสกัดเท่ากัน แต่กลับได้น้ำมันรำข้าวจากการสกัดน้อยลง ในขณะที่ความดันที่สูงกว่า ใช้ CO_2 ในปริมาณที่น้อยกว่า แต่กลับได้สารสกัดจากการทดลองที่มากกว่าการใช้ความดันสกัดต่ำ เมื่อมองในเชิงของต้นทุน การสกัดที่ความดันสูงกว่า จะประหยัดการใช้ CO_2 และสามารถผลิตสารที่มีมูลค่าได้มากกว่า

ตารางที่ 4.5 การคิดค่าใช้จ่ายในการสกัดเชิงของ CO_2

ความดันสกัด	CO2 Feed flow rate (kg/hr)	CO2 Feed cost flow (Baht/hr)	CO2 Feed cost flow (Baht/min)	Product flow rate (g/hr)	CO2 Feed cost flow (Baht/hr)	Product cost flow (Baht/min)
100	9.4	132.05	2.2008	1.18	0.07217	0.001203
200	4.3	60.67	1.0111	8.79	0.5363	0.008939
300	4.0	55.47	0.9245	10.33	0.6302	0.010503

การทดลองทั้งหมด สามารถสรุปค่าใช้จ่ายโดยรวมในแต่ละครั้ง แสดงในรูปแบบตาราง ดังตารางที่ 4.5 จะประกอบไปด้วย ต้นทุนด้านคาร์บอนไดออกไซด์ ด้านวัตถุดิบที่ใช้ และต้นทางไฟฟ้า ในระยะเวลาในการสกัดที่ต่างกัน มารวมกัน และยังแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของต้นทุนที่ใช้ในการสกัดน้ำมันรำข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ต้นทุนโดยรวมในการสกัดน้ำมันแต่ละครั้ง

Extracting pressure (bar)	CO_2 Cost per hour (Baht)	Electrical cost per hour (Baht)	Total cost per hour (Baht)	Time use (hr)	CO_2 Total Cost (Baht)	Total Electricity Cost (Baht)	Rice bran cost (10 Baht/kg)	Total cost (Baht)	Final Yield (g)	Cost per Extracted yield (Baht/g)	Future cost per extracted yield* (Baht/g)
200	76.44	70.1893	95.937	5	382.2	350.95	20	753.15	22.15	34.00	16.75
300	49.37		68.867		246.85			617.8	47.63	12.97	7.79
100	132.05		151.55	24	3169.20	1684.54		4873.74	27.21	179.12	62.64
200	60.67		80.16		1456.00			3160.54	202.22	15.63	8.43
300	55.47		74.97		1331.30			3035.84	237.60	12.78	7.17

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงต้นทุนโดยในการสกัดรำข้าว ที่ความดันสกัดต่างกัน และยังแสดงให้เห็นถึงจุดประหยัดในการสกัดจะอยู่ที่ความดันสกัด 300 bar สังเกตได้ว่าที่ความดัน 300 bar ในระยะเวลาการสกัด 5 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง มีต้นทุนที่ใกล้เคียงกัน เฉลี่ยอยู่ที่ 12.88 บาทต่อการสกัดน้ำมันรำข้าว 1 กรัม และในอนาคต หากระบบการสกัดเชื่อมต่อกับระบบทำความเย็นแล้ว เราสามารถตัดต้นทุนของคาร์บอนไดออกไซด์ออกได้ และสามารถลดต้นทุนได้ คงเหลือประมาณ 7.50 บาทโดยเฉลี่ยในการสกัดน้ำมันรำข้าว 1 กรัม ที่ความดันสกัด 300 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ยิ่งเพิ่มความดันในถังสกัด (Extracting Pressure) ทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ทำให้มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายสูงขึ้น ทำให้ในแต่ละครั้งที่สกัดออกมา จะได้น้ำมันรำข้าวจากการสกัดที่ความดัน 300 bar เยอะกว่าการสกัดที่ความดัน 200 bar (จากการทดลอง+ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง)

5.1.2 การลดน้ำหนักรำข้าวที่ใช้ในการสกัดลงมา 1 กิโลกรัม จาก 3 กิโลกรัม ทำให้อัตราการสกัดน้ำมันรำข้าวเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าโดยสกัดที่สภาวะเดียวกัน แสดงว่า น้ำหนักรำข้าว 2 กิโลกรัมเหมาะสำหรับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดมากกว่ารำข้าว 3 กิโลกรัม (จากช่วงการแก้ปรับเครื่องก่อนการทดลอง)

5.1.3 จากการทดลอง การสกัดที่ความดันที่สูงกว่า ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่า เนื่องจากใช้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า และได้ปริมาณสารสกัดที่มากขึ้น ถ้ามองในเชิงของต้นทุน กรสกัดที่ความดันสูงกว่าจะประหยัดต้นทุนด้านคาร์บอนไดออกไซด์ และทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดได้ดีขึ้นเชิงปริมาณ หากดูจากสารสกัดต่อต้นทุนในการสกัด จะเห็นว่า ที่ 300 bar จะใช้ต้นทุนในการสกัด 12.88 บาทโดยประมาณต่อการสกัดน้ำมัน 1 กรัม และในอนาคต ถ้าระบบสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical CO_2 extraction) เชื่อมต่อกับระบบทำความเย็นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Transcritical refrigeration system) แล้ว จะไม่เสียค่าใช้จ่ายด้าน CO_2 อีกต่อไป เนื่องจาก CO_2 ที่ใช้ในการสกัดนำมาจากระบบความเย็น และหลังจากกระบวนการสกัด CO_2 จะถูกนำเข้าไปใช้งานในระบบทำความเย็นเป็นระบบปิด (Closed loop) ดังนั้น สามารถลดต้นทุนในการสกัดลงเหลือ 7.50 บาทโดยประมาณต่อการสกัดน้ำมันรำข้าว 1 กรัม และสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกในแง่ของความเสถียรของเครื่องจักร ระบบด้านความปลอดภัย การแจ้งเตือนแบบอัตโนมัติ และความสะดวกสบายในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เรื่องเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เรื่องเครื่องมือการวัดต่าง ๆ เป็นเครื่องที่สำคัญในการพัฒนาเครื่องสกัดในแง่ของการวิจัย และสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับเครื่องจักรได้อีกด้วย อยากให้ทางบริษัทเพิ่มจำนวนขอเครื่องมือวัด สำหรับในกรณีฉุกเฉินหรือมีการใช้งานพร้อมกันต่างสถานที่

5.2.2 ในแง่เชิงการพัฒนาเครื่องสกัด เรื่องระบบการแจ้งเตือนและระบบตัดการทำงานของเครื่องจักรเมื่อความดันในถังสกัดเกินหรือเกิดการอุดตันในท่อส่วนต่าง ๆ

เครื่องสกัดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์สกัดที่ถูกสร้างโดยบริษัท ไอ.ที. ซี. (1993) จำกัด สามารถใช้งานได้แล้วในระดับหนึ่ง อยากให้ทางบริษัทพัฒนาส่วนของระบบแจ้งเตือนเมื่อมีอุปกรณ์ชำรุดขณะใช้งาน หรือ มีความผิดปกติในการทำงาน เช่น ความดันในถังสกัดเกิดจุดที่ควบคุมไว้ หรือเกิดปัญหาท่ออุดตันตามข้อต่อของระบบสกัด เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ความเสถียรในการสกัดและเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ผศ. ดร.ธีรินทร์ ฉายศิริโชติ . ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง . เอกสารประกอบการเรียน วิชา UNIT OPERATIONS IN FOOD ENGINEERING 2 . **การสกัด (Extraction) .**
2. C. M. P. Sarmento[1], S. R. S. Ferreira[2] and H. Hense[2*] . Brazilian Journal of ChemicalEngineering . Vol. 23, No. 02, pp. 243 - 249, April – June . **SUPERCRITICAL FLUID EXTRACTION (SFE) OF RICE BRAN OIL TO OBTAIN FRACTIONS ENRICHED WITH TOCOPHEROLS AND TOCOTRIENOLS** (2006)
3. Juliana Ferreira Soares a, Valéria Dal Prá , Matheus de Souza , Felipe Cavalheiro Lunelli , Ederson Abaide , Juliana R.F. da Silva , Raquel C. Kuhn , Julian Martínez , Marcio A. Mazutti . Journal of Food Engineering 170 (2016) 58 - 63 . **Extraction of rice bran oil using supercritical CO2 and compressed liquefied petroleum gas .**
4. Darius Povilaitis and Petras Rimantas Venskutonis . Department of Food Science and Technology, Kaunas University of Technology, Radvilėnų rd. 19, LT-50254, Lithuania . Journal of Supercritical Fluids 100 (2015) 194–200 . **Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of rye bran using response surface methodology and evaluation of extract properties .**
5. Siti Machmudah , Mikako Kondo , Mitsuru Sasaki , Motonobu Goto , Jun Munemasa , Masahiro Yamagata . Journal of Supercritical Fluids 44 (2008) 301–307 . **Pressure effect in supercritical CO_2 extraction of plant seeds .**
6. EMERSON . 2016 . **Commercial CO2 Refrigeration Systems .**
7. Yoshiaki Fukushima . Nov 8, 1999 . **Application of Supercritical Fluids .**
8. G. N. SAPKALE*, S. M. PATIL, U. S. SURWASE and P. K. BHATBHAGE . Int. J. Chem. Sci.: 8(2), 2010, 729-743 . **SUPERCRITICAL FLUID EXTRACTION – A REVIEW .**
9. Danfoss . July 2008 . **Transcritical Refrigeration Systems with Carbon Dioxide (CO2) .**
10. The CO_2 Handbook – IIAR . 2014 . **Carbon dioxide refrigerated liquid, SAFETY DATA SHEET (SDS) .**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้