

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้ของไหลยิ่งยวดเหนือวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์

ร่วมกับการทำแห้งแบบระเหิด เพื่อการอบแห้งกึ่งคุณภาพสูง

Integration of supercritical CO₂ and freeze drying

for premium quality dry shrimp product



วันที่
พิมพ์
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62465
วัน,เดือน,ปี..... 18 ส.ค. 2549

b. 11625520
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้ของไหลยิ่งยวดเหนือวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์

ร่วมกับการทำแห้งแบบระเหิดเพื่อการอบแห้งกึ่งคุณภาพสูง

Integration of supercritical CO₂ and freeze drying

for premium quality dry shrimp product

ผู้จัดทำ

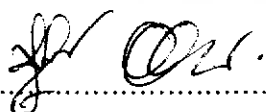
นาย พงศ์ศิริ เต็มวิริยะนุกูล

นางสาว ภัชชา ผู่ชมเชย

นางสาว สไบทิพย์ บุญยงค์

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงษ์)

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้ของไหลยิ่งยวดเหนือวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ ร่วมกับการทำแห้งแบบระเหิด เพื่อการอบแห้งกึ่งคุณภาพสูง

นาย พงศ์ศิริ เต็มวิริยะนุกูล
นางสาว กัชชา ผ่องชมเชย
นางสาว สไบทิพย์ บุญยงค์

ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

การศึกษาผลการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ กับกึ่งขาวที่ระดับความดัน 1100 – 1400 psi อุณหภูมิ 35 – 50 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 35 °C มีความเหมาะสมช่วยทำให้กึ่งอบแห้งขยายตัวร้อยละ 21.36 เมื่อเทียบกับกึ่งสด และที่อุณหภูมิ 40 – 50 °C ปริมาณความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เนื้อกึ่งแข็งและต้านทานการขยายตัวของฟองก๊าซทำให้ร้อยละการขยายตัวลดลงเหลือประมาณ 15 – 20 เมื่อพิจารณาฐานฐานวิทยาของเนื้อกึ่งอบแห้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าภายในเนื้อกึ่งอบแห้งที่ผ่านกระบวนการทำโฟม โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติสามารถสร้างรูพรุนขนาดเล็กระดับไมครอนเป็นจำนวนมากภายในเนื้อกึ่งอบแห้ง ทำให้กึ่งเกิดการขยายตัว ซึ่งวิธีนี้จะทำให้กึ่งมีปริมาตรเพิ่มขึ้นหลังจากการทำแห้ง อีกทั้งทำให้ประหยัดพลังงานและเวลาในการทำให้กึ่งอบแห้งสูง เนื่องจากรูพรุนจำนวนมากภายในเนื้อกึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน จัดได้ว่าการประยุกต์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติร่วมกับการทำแห้งแบบระเหิด เป็นนวัตกรรมใหม่ที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับกึ่งและเป็นแนวทางที่สามารถพัฒนาไปสู่อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Integration of supercritical carbon dioxide and freeze drying for premium quality dry shrimp product

Mr. Phongsiri Temviriyangul

Ms. Patchar Fungchomchey

Ms. Sabaitip Boonyong

Dr. Pimpen Pornchaloempong Advisor

Dr. Surat Areerat Advisor

Abstract

This project presents an integration of supercritical carbon dioxide treatment and freeze drying for production of premium quality dry shrimp. The fresh shrimps were submitted into a high pressure vessel in which supercritical carbon dioxide was directly diffused and dissolved into water phase of shrimp tissue. Abundant of molecular bubbles were formed in shrimp tissue by abruptly changing of pressure resulting in volume expansion. After that the volume of the treated shrimp was maintained by freeze drying.

Effects of temperature and pressure of SC-CO₂ within the range of 35-50 °C and 1100-1400 psi. On qualities of the shrimps were evaluated. The result indicated that treating shrimp with SC- CO₂ at 35 °C and 1100 psi for 23 min before freeze drying was the suitable condition. Dried shrimps of this condition have the highest expansion ratio of % without destruction of structure . The morphology of dry shrimp observed by scanning electron microscopy was clearly demonstrated the bubbles within dried shrimp structure.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณผู้มีส่วนช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่างๆ ในโครงการ ดังต่อไปนี้

- ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้ความคำปรึกษา ให้ความรู้ในเรื่องการประยุกต์คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ ตลอดจนเทคนิคและวิธีการ
- ผศ.ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้ความรู้และคำติชมให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์
- คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สจล.ทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้พื้นฐานให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโครงการได้
- เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์
- โครงการ IRpus ที่ให้การสนับสนุนโครงการ
- คุณพ่อ คุณแม่ และเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจให้
- รวมถึงบุคคลทุกท่านๆ ที่ไม่ได้กล่าว ณ ที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| สารบัญ | หน้า |
|--|------|
| สารบัญรูปภาพ | ก |
| สารบัญตาราง | ง |
| สารบัญสัญลักษณ์ | จ |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 1 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี | |
| 2.1 ความหมายของการพองตัวหรือการเกิดโฟมในเนื้อวัสดุ | 3 |
| 2.2 สารสำหรับการผลิตโฟมในเนื้อวัสดุ | 4 |
| 2.3 กลไกในการพองตัวหรือเกิดโฟมของเนื้อวัสดุ | 5 |
| 2.4 สภาวะของกระบวนการพองตัวหรือเกิดโฟมในเนื้อวัสดุ | 6 |
| 2.5 การอบแห้ง | 16 |
| 2.6 การคงสภาพการพองตัวของกึ่งด้วยการแช่เยือกแข็ง แบบ ไครโอเจนิค(Cryogenic freezing) | 20 |
| บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง | |
| 3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 22 |
| 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 22 |
| 3.3 วิธีการทดลอง | 23 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง | |
| 4.1 การหาปริมาณน้ำในตัวกึ่ง | 30 |
| 4.2 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และเวลาในการแพร่ ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในกึ่งอย่างสมบูรณ์ | 30 |
| 4.3 การประมาณค่าการละลายและค่า pH ในกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ความดันต่าง ๆ | 31 |
| 4.4 ผลของการทดสอบการเกิดพองตัวในกึ่งที่สภาวะต่างๆ | 31 |
| 4.5 ผลของการลดเวลากระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตแพร่ในกึ่ง | 36 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | |
|------------------------|------|
| สารบัญ | หน้า |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง | |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 39 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 39 |
| ภาคผนวก ก | 40 |
| ภาคผนวก ข | 42 |
| ภาคผนวก ค | 43 |
| ภาคผนวก ง | 47 |
| กิตติกรรมประกาศ | 53 |
| เอกสารอ้างอิง | 54 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอน ไดออกไซด์บริสุทธิ์ | 3 |
| รูปที่ 2.2 แสดงการแพร่จากคาร์บอน ไดออกไซด์ในน้ำและน้ำสู่น้ำแข็ง | 9 |
| รูปที่ 2.3 แผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสภาวะไม่คงที่ในวัสดุทรงกระบอกยาว | 15 |
| รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง | 16 |
| รูปที่ 2.5 เฟสไดอะแกรมของน้ำ แสดงการระเหิดของน้ำแข็ง | 17 |
| รูปที่ 2.6 การถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างการอบแห้งแบบระเหิด | 19 |
| รูปที่ 3.1 แผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสภาวะไม่คงที่ในวัสดุทรงกระบอกยาว | 24 |
| รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง | 26 |
| รูปที่ 3.3 การเตรียมกึ่ง ร้อยเชือกคิคหมายเลข | 27 |
| รูปที่ 3.4 การขึ้นน๊อตเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง | 27 |
| รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ เวลาและสัมประสิทธิ์การแพร่รวมของกึ่ง | 30 |
| รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการละลายและค่า pH | 31 |
| รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบกึ่งที่กำลังขยาย 50 เท่าสภาวะ 35 °C เวลา 50 นาที | 33 |
| รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบกึ่งที่กำลังขยาย 1000 เท่า สภาวะ 35 °C เวลา 50 นาที | 34 |
| รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความดัน, อุณหภูมิ และอัตราการพองตัว | 35 |
| รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบเปรียบเทียบระหว่างค่า pH กับความดันกับอุณหภูมิ | 35 |
| รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่า pH ของกึ่งระหว่างและหลังกระบวนการ | 36 |
| รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 50 เท่า ณ สภาวะความดัน 1100 psi 35 °C | 37 |
| รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่า ณ สภาวะ ความดัน 1100 psi 35 °C เป็นเวลา 14, 23 และ 50 นาที ตามลำดับ | 37 |
| รูปที่ 4.10 แสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการพองตัว เวลา และ pH | 38 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 | |
| เปรียบเทียบความหนาแน่น ความหนืดและความสามารถในการแพร่ของก๊าซ ของไหลเหนือวิกฤติและของเหลว ของคาร์บอนไดออกไซด์ | 4 |
| ตารางที่ 2.2 | |
| ตัวอย่างของของไหลเหนือวิกฤติ ที่อุณหภูมิวิกฤติและความดันวิกฤติ | 5 |
| ตารางที่ 2.3 | |
| แสดงสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพสถานะ ไม่คงที่ | 14 |
| ตารางที่ 4.1 | |
| แสดงลักษณะทางกายภาพของกึ่งหลังออกจากระบบ | 32 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

| | |
|--------------|--|
| C | ค่าการละลาย (Solubility)(mol/kg) |
| k_D | ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี(mol/kg×bar) |
| p | ค่าความดัน(psi) |
| ΔH_D | ค่าเอนทัลปีของการละลาย(kcal/g mol) |
| R | ค่าคงที่ของก๊าซ |
| T | อุณหภูมิของระบบ (K) |
| N | ความเข้มข้นของสาร (mol/kg) |
| d | ความหนาแน่นของสาร (kg/l) |
| D | สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm ² /s) |
| X_w | ปริมาณน้ำของกึ่ง |
| T | อุณหภูมิ(K) |
| D_w | สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อของกึ่ง (cm ² /s) |
| D_{AB} | สัมประสิทธิ์การแพร่รวมของกึ่ง (cm ² /s) |
| L | ความหนาของวัสดุ(m) |
| X_D | อัตราของเวลาสัมพัทธ์ |
| c_A | ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบ |
| c_{As} | ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่พื้นผิวของกึ่ง |
| c_{Ao} | ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่เวลาเริ่มต้น |
| x | ระยะจากจุดกึ่งกลางของกึ่งถึงตำแหน่งที่ต้องการทราบ(m) |
| x_1 | ระยะจากจุดกึ่งกลางถึงพื้นผิวของกึ่ง(m) |
| t | เวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองละลายในกึ่งจนอิ่มตัว(sec) |
| k_c | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective transfer coefficient)(W×m ⁻² ×K ⁻¹) |
| D_{AB} | ค่าความสามารถในการแพร่ของมวล (Mass diffusivity) (cm ² /s) |
| ϕ | อัตราการพองตัว |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

กุ้งเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญอย่างยิ่งของประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกแต่ละปีกว่าหมื่นล้านบาท ตั้งแต่ปี 2547 เป็นต้นมา ปริมาณการส่งออกกุ้งลดลงเมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีที่ผ่านมา เนื่องจากการกีดกันทางการค้า และเกษตรกรหันมาเพาะเลี้ยงกุ้งมากขึ้น โดยเฉพาะกุ้งขาวเพราะเลี้ยงง่าย โตไว มีความทนต่อโรคสูง ทำให้ปริมาณกุ้งล้นตลาดและราคากุ้งมีแนวโน้มลดลง [1]

การแปรรูปกุ้งด้วยการทำแห้งทั่วไป เช่น การตากแห้งหรืออบแห้ง จะทำให้เซลล์เนื้อเยื่อของกุ้งถูกทำลาย สูญเสียโครงสร้างระดับเซลล์ ปริมาตรลดลง และการคืนตัวไม่คืนกทำให้การนำกลับมาใช้ประโยชน์มีข้อจำกัด นอกจากนี้คุณลักษณะของกุ้งตลอดจนคุณค่าทางโภชนาการจะลดลงอันเนื่องมาจากความร้อนในกระบวนการผลิตแม้จะมีเทคโนโลยีการอบแห้งแบบระเหิด (Freeze drying) เพื่อช่วยลดข้อด้อยของการอบแห้งแบบทั่วไปแล้ว แต่การอบแห้งแบบระเหิดก็ยังไม่ทำให้โครงสร้างของกุ้งหลังผ่านกระบวนการมีปริมาตรลดลงเมื่อเทียบกับอาหารที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป [2]

คณะผู้วิจัย จึงเกิดแนวความคิดที่จะประยุกต์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ (Supercritical Carbon dioxide) ที่มีความดันและอุณหภูมิเหนือจุดวิกฤติ สถานะดังกล่าว คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกอัดให้มีความดันสูง มีผลทำให้คาร์บอนไดออกไซด์แพร่และละลายเข้าไปในเนื้อกุ้งได้อย่างสม่ำเสมอ เกิดฟองขนาดเล็ก (Bubble) ค้างรังเนื้อเยื่อกุ้งไม่ให้ยุบตัวลง นอกจากนี้ คาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าไปแทนที่น้ำ ในตัวกุ้งจึงเป็นการกำจัดน้ำในกุ้งก่อนการทำแห้งได้บางส่วน หลังจากนั้นจึงผ่านการอบแห้งแบบระเหิด

การคงรูปร่างของกุ้ง หลังจากผ่านการอบแห้งแบบระเหิดแล้ว จะทำให้มูลค่าของกุ้งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งน้ำหนักเท่ากันที่ผ่านการทำแห้งโดยการดึงน้ำออกทั่วไป ซึ่งการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติมีข้อดีที่เป็นเทคโนโลยีสะอาด (Green - Technology) จึงมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และทำนายเวลาในการแพร่จนอิ่มตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติในกุ้ง

1.2.2 เพื่อหาค่าการละลายของ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติเข้าเนื้อเยื่อกุ้งและศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการละลาย ความดันและค่า pH ของกุ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อหาความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ที่เหมาะสมของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติซึ่งมีผลโดยตรงต่อการพองตัวและการเกิดฟองของกึ่ง ตลอดจนสมบัติพื้นฐานวิทยา (Morphology) เกี่ยวกับการเสียหายของเซลล์เนื่องจากฟองก๊าซ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาสภาวะของกระบวนการพองตัวในเนื้อกึ่ง ซึ่งมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา อันได้แก่ ผลของอุณหภูมิในช่วง 35-50 องศาเซลเซียส ผลของความดันในช่วง 1100-1400 psi และ เวลาที่เหมาะสม

1.3.2 หาค่าการละลาย (Solubility) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าเนื้อเยื่อกึ่ง จากการดูดซึมแบบปกติ ตามกฎของเฮนรี (Henry's Law)

1.3.3 หาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในกึ่งและเวลาในการแพร่จนอิ่มตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติในกึ่ง

1.3.4 เปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานวิทยาที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดระหว่างตัวแปรควบคุม 2 แบบ คือ แบบแรกกึ่งที่อบแห้งแบบระเหิดทั่วไป และแบบที่สอง คือ กึ่งที่ผ่านสภาวะของไหลยิ่งยวดเหนือวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์แล้วทำแห้งแบบระเหิด (Supercritical Carbon dioxide)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้นวัตกรรมการผลิตกึ่งแห้งคุณภาพสูง ที่ทำให้เพิ่มมูลค่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมนั้น สามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตติลงน้ำในกึ่ง ไม่ต้องคำนึงถึงสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อมีค่าเท่ากับ 8.1×10^{-10} cm²/s ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และเวลาในการแพร่จนอิ่มตัวในกึ่งคือ 48 นาที

2. ความดัน 1100 psi อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เวลา 23 นาทีเป็นสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตติ ในกึ่งซึ่งมีค่าการพองตัวเท่ากับ 21.36 % และค่า pH 6.94

3. ค่าการละลาย ระหว่างกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตติที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส คือ 2.58 mol/kg สามารถลด pH ระหว่างกระบวนการเหลือ 2.7 ทำให้เชื้อจุลินทรีย์ถูกทำลาย อีกทั้งอากาศในกระบวนการจะถูกไล่ออกจากระบบทำให้ภายในระบบมีภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic) [2]

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของสารช่วยให้เกิดฟองตัวอื่น (Blowing agent) เช่น ไนโตรเจน โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่ออาหาร

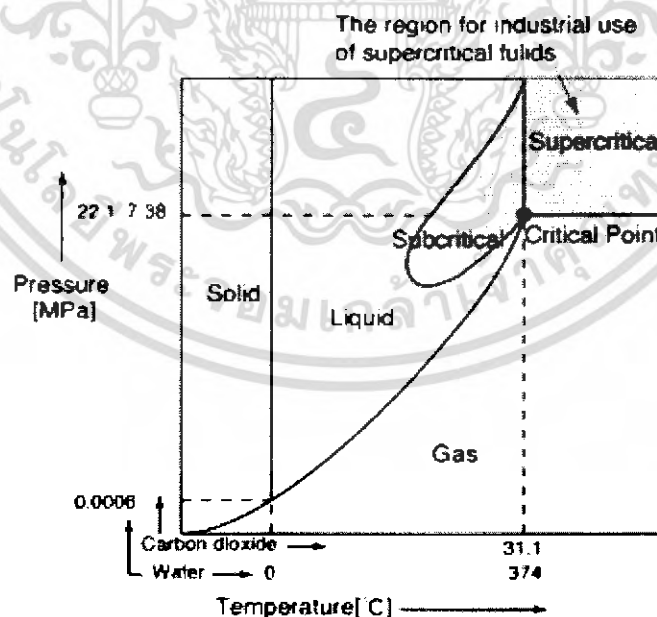
2. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตติ

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 ความหมายของการพองตัวหรือการเกิดโฟมในเนื้อวัสดุ

การพองตัวหรือการเกิดโฟม[4] หมายถึง วัสดุที่ขยายตัวหรือพองฟูคล้ายฟองน้ำจะมี ส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคที่เป็นของแข็ง และวัฏภาคของก๊าซ ซึ่งเกิดขึ้นจาก สารที่เรียกว่า สารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing agent) โดยทั่วไปแล้วการเกิดโฟมสามารถแบ่งได้ ออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีการพองทางกายภาพ (Physical blowing agent) และวิธีการใช้สารช่วยให้ เกิดฟองทางเคมี (Chemical blowing agent) อย่างไรก็ตามการเกิด โฟมทางเคมีนั้นไม่เหมาะสม ที่จะ ใช้กับอาหาร เนื่องจากสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี อาจมีสารพิษตกค้างหรือมีผลกระทบต่อคุณภาพ อาหาร

ของไหลเหนือวิกฤติ (Supercritical Fluid, SCF) คือสถานะที่สารบริสุทธิ์ใด ๆ มีอุณหภูมิ และความดันค่าหนึ่ง ที่สามารถเป็นได้ทั้งของเหลวอัดตัวและไออัดตัว โดยเรียกจุดนี้ว่า จุดวิกฤติ (Critical point) สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิได้ใน รูปที่ 2.1 หากเพิ่มอุณหภูมิและความดันให้สูงกว่าจุดวิกฤตินี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ ของของไหลนี้ [5]



รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลเหนือวิกฤติ (Supercritical fluid) มีองค์ประกอบที่ไม่ใช่ของเหลวหรือก๊าซ แต่เป็นของไหลกึ่งของเหลวและก๊าซ ทำให้ของไหลเหนือวิกฤติมีสัมประสิทธิ์การแพร่และความหนืดใกล้เคียงกับสถานะก๊าซ มีแรงตึงผิวต่ำทำให้สามารถทะลุผ่านเข้าไปในรูพรุนได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติการส่งถ่ายมวลรวดเร็วคล้ายก๊าซแสดงในตารางที่ 2.1 ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ของไหลเหนือวิกฤติเป็นตัวทำละลายที่ดี อาจเรียกสารนี้ว่า “ตัวทำละลายเหนือวิกฤติ”

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความหนาแน่น ความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซของไหลเหนือวิกฤติและของเหลว ของคาร์บอน ไดออกไซด์

| คุณสมบัติ | ก๊าซ | ของไหลเหนือวิกฤติ | ของเหลว |
|--|-----------|-------------------|--------------------|
| ความหนาแน่น (g/mL) | 10^{-3} | 0.3 | 1 |
| ความหนืด (Pa.s) | 10^{-5} | 10^{-4} | 10^{-3} |
| สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2/s) | 0.1 | 10^{-1} | 5×10^{-3} |

2.2 สารสำหรับการผลิตโฟมในเนื้อวัสดุ

สารช่วยให้เกิดฟองที่ใช้ได้ผลดีจะต้องละลายเข้าสู่เนื้อวัสดุในปริมาณที่เพียงพอในสภาวะที่ความดันสูงพอเหมาะ ซึ่งชนิดของของไหลเหนือวิกฤติที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด แสดงในตารางที่ 2.2 แต่ส่วนใหญ่แล้วในอุตสาหกรรมอาหารมักใช้คาร์บอน ไดออกไซด์ ที่มีอุณหภูมิวิกฤติต่ำที่ 31.06 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤติที่ 73.8 บาร์ นอกจากนี้ยังข้อได้เปรียบทางด้านเคมีชีวภาพและกายภาพ ได้แก่

1. ไม่ติดไฟ ไม่กัดกร่อน มีความเป็นพิษต่ำ
2. ราคาถูก
3. อุณหภูมิวิกฤติต่ำ สามารถป้องกันการสลายตัวของสารเนื่องจากความร้อน (Thermal Degradation)
4. การควบคุมง่ายไม่ยุ่งยาก
5. สามารถชะลอการเพิ่มของจุลินทรีย์ได้โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับคาร์บอน ไดออกไซด์เป็นกรดคาร์บอนิก

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของของไหลเหนือวิกฤติ ที่อุณหภูมิวิกฤติและความดันวิกฤติ

| ชนิดของของไหลเหนือวิกฤติ | อุณหภูมิวิกฤติ(°C) | ความดันวิกฤติ(bar) |
|--------------------------|---------------------|--------------------|
| CO ₂ | 31.06 | 73.8 |
| N ₂ O | 36.4 | 72.5 |
| Ethane | 32.3 | 48.8 |
| Ethane | 9.2 | 50.5 |
| Propane | 96.7 | 42.5 |
| Propane | 91.7 | 46 |
| Ammonia | 132.4 | 113.5 |
| Methanol | 239.5 | 81 |
| Water | 374 | 220.6 |
| CHF ₃ | 26.2 | 48.5 |
| CClF ₃ | 28.9 | 38.7 |
| SF ₆ | 45.5 | 37.7 |

2.3 กลไกในการฟองตัวหรือเกิดโฟมของเนื้อวัสดุ

การฟองตัวหรือการเกิดโฟมเป็นปรากฏการณ์การเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องทางฟิสิกส์และทางเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่สามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเองหรือจากสารอื่นแพร่เข้ามา พื้นฐานของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซ (Bubble nucleation) และการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ฟองตัว

การเกิดโฟมมีหลักการที่สำคัญคือ โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจายในวัฏภาคของของแข็งหรือของเหลว และมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันภายนอก เพื่อขยายขนาด หากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic instability) เกิดขึ้นมาก ก็จะไปกระตุ้นการเกิดนิวเคลียสทำให้เกิดกลุ่มของฟองก๊าซจำนวนมากภายในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งวิธีการในการทำให้เกิดการไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างเพียงพอ สำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธีการคือ การลดความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ แต่สำหรับกึ่งหากมีการเพิ่มอุณหภูมิมากเกินไปจะทำให้โปรตีนเสียสภาพ (Denature) จึงเลือกที่จะใช้วิธีการลดความดัน

หลังจากการเกิดนิวเคลียสแล้ว ส่วนของเนื้อวัสดุที่อยู่รอบ ๆ ฟองก๊าซจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายก๊าซที่ละลายในเนื้อวัสดุให้แก่ฟองก๊าซ ทำให้ฟองก๊าซสามารถขยายตัวได้ เรียกว่า การเอกสารถนเป็นเอกสารที่สละวงวิสาหรับการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นเบเซบระเช่นดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) จากนั้นจะมีการทำให้วัสดุพองตัวคงสภาพด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งไครโอเจนิค (Cryogenic Freezing) ด้วยไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen)

หากพิจารณาเป็นขั้นตอนของการเกิดโฟมแล้ว กระบวนการเกิดโฟมประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเริ่มเกิดฟองก๊าซ (Bubble initiation) หรือการเกิดนิวเคลียส (Nucleation)
2. การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth)
3. การคงสภาพของโฟม (Stabilization)

2.4 สภาพของกระบวนการพองตัวหรือเกิดโฟมในเนื้อวัสดุ

2.4.1 ความดันที่เหมาะสมสำหรับการเกิดนิวเคลียส

การหาภาวะพองตัวของเนื้อวัสดุในสภาวะของไหลเหนือวิกฤตนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ฟองก๊าซเหล่านี้เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของความดัน ซึ่งความแตกต่างของความดันนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของฟองก๊าซ หากความแตกต่างของความดันมีค่าเพิ่มขึ้นขนาดของฟองก๊าซก็จะมีขนาดเล็กลง โดยทั่วไปทฤษฎีการเกิดฟองแบบพื้นฐานที่มีการศึกษาโดยทั่วไปนั้นยังไม่สามารถอธิบายการเกิดฟองก๊าซในอาหารได้ชัดเจนนัก เนื่องจากอาหารมีคุณสมบัติทางเคมีและทางชีวภาพแตกต่างจากวัสดุโดยทั่วไป โดยอาศัยสมมติฐานดังนี้

1. การเกิดฟองในเนื้อวัสดุจะต้องมีการเกิดฟองก๊าซจำนวนมากพร้อมๆ กัน
2. ฟองก๊าซที่เกิดในเนื้อวัสดุมีการแบ่งพื้นที่การเจริญเติบโตอย่างชัดเจน
3. ปริมาณของก๊าซที่อยู่ในเนื้อวัสดุ จะถ่ายเทไปยังฟองก๊าซเมื่อเวลาผ่านไป

2.4.2 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะทางสัญญาณวิทยาโดย ณรงค์ และคณะ พบว่าขนาดของฟองก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าฟองก๊าซเกิดการขยายตัวไปในเนื้อวัสดุ และสามารถขยายตัวมาชนกันได้ ก่อนจะถูกกักไว้ภายในโครงสร้างของเซลล์

2.4.3 ค่าการละลาย (Solubility) ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในเนื้อวัสดุ

แบบจำลองการดูดซึม ในกระบวนการการดูดซึมสำหรับกรณีนี้จะพิจารณาโดยใช้กลไกของการดูดซึมแบบซึมตามปกติ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's Law)[6] กล่าวคือคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแพร่เข้าไปในเนื้อวัสดุจนเกิดสมดุล ตามสมการต่อไปนี้

$$C = k_D p \quad (2.1)$$

| | | |
|-------|-------|---|
| เมื่อ | C | คือ ค่าการละลาย (Solubility) (mol/kg) |
| | k_D | คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี่ (mol/kg×bar) |
| | p | คือ ค่าความดัน (bar) |

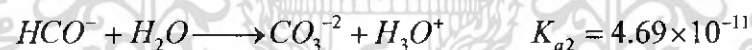
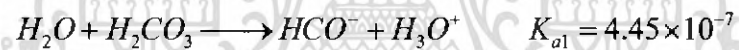
เมื่อค่าคงที่ในการละลายตามกฎของเฮนรี่ (k_D) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

$$k_D = k_{D_0} e^{-\Delta H_D / RT} \quad (2.2)$$

ซึ่งเป็นสมการของ Van't Hoff Expression

| | | |
|-------|--------------|---|
| เมื่อ | ΔH_D | คือ ค่าเอนทัลปีของการละลาย(kcal/g mole) |
| | R | คือ ค่าคงที่ของก๊าซ |
| | T | คือ อุณหภูมิของระบบ (K) |

จากสมการที่ จะเห็นว่า ค่าความดันเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งมีผลต่อค่าการละลายของก๊าซในเนื้อวัสดุ และค่าการละลายสามารถหาค่า pH ได้จากสมการเคมี



ซึ่งค่า K_{a2} จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้น สามารถหา pH ได้จาก

$$pH = -\log(\sqrt{K_{a1}Cd}) \quad (2.3)$$

เมื่อ N คือ ความเข้มข้นของสาร (Molal, mol/kg)

d คือ ความหนาแน่นของสาร (kg/l)

2.4.3 ต้นประสิทธิภาพแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อวัสดุ

การหาสภาวะการกระจายอุณหภูมิของของไหลเหนือวิกฤติ ในเนื้อวัสดุที่สภาวะใด ๆ นั้น ในอดีตสภาวะเหล่านี้จะได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและระยะเวลามาก ดังนั้น จึงมีการเสนอทฤษฎีต่าง ๆ มาอธิบายสภาวะการกระจายอุณหภูมิของของไหลเหนือวิกฤติ ได้แก่ การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) การถ่ายโอนมวล (Mass) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

transfer) และการดูดซับ (Adsorption) การคายออก (Desorption) เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับแต่ละกระบวนการ โดยสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Empirical model) และแบบจำลองสมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมดุลมวล (Differential mass balance model)

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Empirical Model)

Empirical model เป็นแบบจำลองที่อาศัยการพิสูจน์สมการทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานจากผลการทดลอง ซึ่งวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อเนื้อวัสดุ โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน คุณสมบัติของของไหลเหนือวิกฤติและขนาดอนุภาค โดยไม่พิจารณาถึงกลไกการถ่ายเทมวลและความสัมพันธ์ความสมดุลของแต่ละวิภาค

2. แบบจำลองสมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมดุลมวล (Differential Mass Balance Model)

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาจากสมดุลมวลในสองวิภาคคือ วิภาคของแข็งและของไหล เมื่อรวมสมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมดุลมวลทำให้ได้รูปแบบการกระจายตัว (Profile) ของความเข้มข้นได้ขึ้นกับเวลาในวิภาคทั้งสอง การใช้แบบจำลองสมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมดุลมวลต้องพิจารณาปัจจัย 3 ประการด้วยกันคือ

1. สมดุลของวิภาค (Phase equilibrium) ขึ้นกับความดันและอุณหภูมิที่ใช้ ลักษณะเนื้อวัสดุและคุณสมบัติของของไหลเหนือวิกฤติ
2. การถ่ายโอนมวล ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และพื้นที่ผิวของวัสดุที่สัมผัสกับของไหลเหนือวิกฤติ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการแพร่ภายในวัสดุไปยังผิวหน้าของวัสดุ
3. อัตราการไหลของตัวทำละลาย (Solvent flow rate) เกี่ยวข้องกับแรงขับ (Driving force)

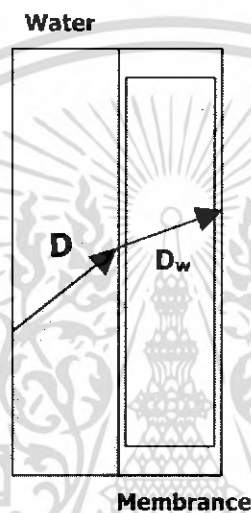
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยแบบจำลองสมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมดุลมวลแบ่งออกเป็น 3 ประเภทย่อย คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามหลักการของการถ่ายโอนความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามหลักการของสมดุลมวลของการถ่ายโอนมวล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการหดตัวของแกน (Shrinking Core)

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวมาแล้วพบว่า แบบจำลองสมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมดุลมวล โดยใช้หลักการถ่ายโอนมวลอาศัยการแพร่ของ Fick's Law เป็นวิธีการที่เหมาะสมในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ในเนื้อวัสดุ

การแพร่เป็นปรากฏการณ์พหุคูณเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแบบไม่จำกัดทิศทางจากบริเวณที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณมวลสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณมวลต่ำ ซึ่งอัตราการแพร่ (Diffusion rate) จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารกับระยะทางที่แพร่ (Concentration gradient) ตามกฎของ Fick's Law ซึ่งกล่าวว่า แมสฟลักซ์ (Mass flux) ต่อหน่วยพื้นที่ขององค์ประกอบหนึ่งเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างความเข้มข้น [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของกึ่งที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำกว่าร้อยละ 80 และที่เหลือเป็นสารจำพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เนื้อเยื่อ และอื่น ๆ จากข้อมูลเหล่านี้ สมการการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤติกับกึ่ง จะสามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จาก คาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่ร่องน้ำระหว่างเซลล์ในกึ่ง (D) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำระหว่างเซลล์ เข้าน้ำในเนื้อเยื่อกึ่ง (D_w) รูปที่ 2.2 ดังนั้น เมื่อรวมค่าการแพร่ของทั้งสองค่ารวมกันค่าที่ได้จะเป็น สัมประสิทธิ์การแพร่รวมของกึ่ง (D_{AB}) ซึ่งสามารถทำนายเวลาการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ แพร่เข้าในกึ่งได้



รูปที่ 2.2 แสดงการแพร่จากคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่ร่องน้ำระหว่างเซลล์ในกึ่ง (D) และการแพร่ของน้ำ ระหว่างเซลล์เข้าน้ำในเนื้อเยื่อกึ่ง (D_w)

การหาสัมประสิทธิ์การแพร่จากคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่ร่องน้ำระหว่างเซลล์ในกึ่ง (D) สามารถทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ได้แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [8]

$$D = 1.77 \times 10^{-9} \left(\frac{X_w}{1 + X_w} \right) \left(\frac{T}{298} \right) \quad (2.4)$$

โดยที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2/s)

X_w คือ ปริมาณน้ำของกึ่ง

T คือ อุณหภูมิของกึ่ง (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำระหว่างเซลล์เข้าน้ำในเนื้อเยื่อ (D_w) เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์มีการแพร่ลงสู่น้ำในเนื้อเยื่อ น้ำจะแพร่คาร์บอนไดออกไซด์สู่น้ำเนื้อเยื่อจะเกิดการดูดซับ (Adsorption) สามารถหาได้จาก [8]

$$D_w = 10^{-16 + 72.83 \frac{X_w}{1 + 9.34 X_w} + \log\left(\frac{T}{298}\right)} \quad (2.5)$$

โดยที่ D_w คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อ (cm^2/s)

T คือ อุณหภูมิของก้อน (K)

การหาสัมประสิทธิ์การแพร่รวมของก้อนหาจาก สัมประสิทธิ์การแพร่จากคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่น้ำระหว่างเซลล์ในก้อน (D) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำระหว่างเซลล์เข้าน้ำในเนื้อเยื่อ (D_w) [9]

$$\frac{1}{D_{AB}} = \frac{1}{D} + \frac{1}{D_w} \quad (2.6)$$

โดยที่ D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่รวมของก้อน (cm^2/s)

2.4.4 เวลาดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวัตถุในเนื้อวัสดุ

เวลาดูดซึมของก๊าซในเนื้อวัสดุ หมายถึง เวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้คาร์บอนไดออกไซด์ละลายในเนื้อวัสดุจนเกิดการอิ่มตัว เวลาดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากการแพร่ของก๊าซในตัวกลางแบบมีขอบเขตจำกัดภายใต้สภาวะที่ไม่คิดความต้านทานที่ผิว [10]

วิธีการหากระบวนการถ่ายโอนมวลที่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้เทคนิคการแยกตัวแปรวัตถุเหล่านี้ เริ่มแรกมีความเข้มข้นเท่ากับ c_{A_0} และมีการเปลี่ยนแปลงตามสิ่งแวดล้อมโดยทันที ซึ่งทำให้มีความเข้มข้นที่ผิวเป็น c_{A_s} เพื่ออธิบายและวิเคราะห์เทคนิคการแยกตัวแปร ให้พิจารณาการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายในแผ่นของแข็งที่มีความหนาหรือรัศมี L เนื่องจากโมเลกุลมีการแพร่ในอัตราที่ช้าภายในของแข็ง ทำให้เทอมของการกระจายตัวของสาร ที่รวมกลุ่มกันอยู่ในกฎข้อแรกของฟิคส์ (Fick's first law) เข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น การหาค่าตอบโพสิฟล์ความเข้มข้นจะแสดงได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีเงื่อนไขของจุดเริ่มต้นและขอบเขต

$$\begin{aligned} c_A &= c_{A0} \quad \text{ที่ } t=0 \quad \text{เมื่อ } 0 \leq z \leq L \\ c_A &= c_{As} \quad \text{ที่ } z=0 \quad \text{เมื่อ } t > 0 \\ c_A &= c_{As} \quad \text{ที่ } z=L \quad \text{เมื่อ } t > 0 \end{aligned}$$

เงื่อนไขขอบเขตที่อยู่ด้านบนทำให้ง่ายขึ้นโดยการแสดงความเข้มข้นในเทอมของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบไร้หน่วย Y ดังนี้

$$Y = \frac{c_A - c_{As}}{c_{A0} - c_{As}} \quad (2.8)$$

ดังนั้น สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยจึงได้เป็น

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} \quad (2.9)$$

โดยมีเงื่อนไขของจุดเริ่มต้นและขอบเขต

$$\begin{aligned} Y &= Y_0 \quad \text{ที่ } t=0 \quad \text{เมื่อ } 0 \leq z \leq L \\ Y &= 0 \quad \text{ที่ } z=0 \quad \text{เมื่อ } t > 0 \\ Y &= 0 \quad \text{ที่ } z=L \quad \text{เมื่อ } t > 0 \end{aligned}$$

ตั้งสมมติฐานว่า มีผลลัพธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในรูปแบบ

$$Y(z,t) = T(t)Z(z) \quad (2.10)$$

เมื่อฟังก์ชัน $T(t)$ ขึ้นอยู่กับเวลา t เพียงอย่างเดียวและฟังก์ชัน $Z(z)$ ขึ้นอยู่กับพิกัดจุด z อนุพันธ์ย่อยจึงได้เป็น

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = Z \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} = T \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (2.12)$$

แทนสมการเหล่านี้ในสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$Z \frac{\partial T}{\partial t} = D_{AB} T \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (2.13)$$

นำ $D_{AB} \cdot T \cdot Z$ หารตลอด จะได้

$$\frac{1}{D_{AB} T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (2.14)$$

ด้านซ้ายของสมการจะขึ้นอยู่กับเวลา t เพียงอย่างเดียวและด้านขวาของสมการจะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง z เพียงอย่างเดียว ถ้าค่า t เปลี่ยนแปลง ด้านขวาของสมการจะยังคงที่และถ้า z เปลี่ยนแปลง ด้านซ้ายของสมการจะยังคงที่ ดังนั้นทั้งสองด้านจะต้องเป็นอิสระต่อ z และ t ซึ่งจะเท่ากับค่าคงที่ $-\lambda^2$ จะทำให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์สองสมการแยกออกมา ซึ่งสมการแรกสำหรับเวลา t

$$\frac{1}{D_{AB} T} \frac{dT}{dt} = -\lambda^2 \quad (2.15)$$

โดยมีผลลัพธ์โดยทั่วไปของสมการคือ

$$T(t) = C_1 e^{-D_{AB} \lambda^2 t} \quad (2.16)$$

และอีกสมการหนึ่งสำหรับตำแหน่ง z

$$-\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -\lambda^2 \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีคำตอบทั่วไปของสมการคือ

$$Z(z) = C_2 \cos(\lambda z) + C_3 \sin(\lambda z) \quad (2.18)$$

แทนที่สมการทั้งสองในผลลัพธ์จะได้

$$Y = T(t)Z(z) = [C'_1 \cos(\lambda z) + C'_3 \sin(\lambda z)]e^{-D_{AB}\lambda^2 t} \quad (2.19)$$

ค่าคงที่ C'_1 และ C'_3 และพารามิเตอร์ λ หาได้โดยการใช้เงื่อนไขสถานะเริ่มต้นและขอบเขต ในสมการที่อยู่ในรูปทั่วไป เงื่อนไขขอบเขตแรกคือ $Y=0$ ที่ $z=0$ จะทำให้ C'_1 เป็นศูนย์ และเงื่อนไขขอบเขตที่สอง $Y=0$ ที่ $z=L$ ทำให้กล่าวได้ว่า $\sin(\lambda L) = 0$ เพราะเป็นไปไม่ได้ที่ C'_3 จะมีค่าเท่ากับศูนย์ หาก C'_3 มีค่าเท่ากับศูนย์จะทำให้สมการทั้งหมดมีค่าเท่ากับศูนย์ ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้น $\sin(\lambda L)$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ

$$\lambda = \frac{n\pi}{L} \quad \text{สำหรับ } n = 1, 2, 3, \dots$$

เพื่อที่จะหาค่า C'_3 จึงนำสมบัติของการตั้งฉาก (Orthogonality) มาใช้ และได้คำตอบแบบสมบูรณ์คือ

$$Y = \frac{c_A - c_{As}}{c_{Ao} - c_{As}} = \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) e^{-(n\pi/2)^2 X_D} \int_0^L Y_0 \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) dz \quad (2.20)$$

โดยที่ L คือ ความหนาหรือรัศมีของแผ่นวัตถุและ X_D คือ อัตราของเวลาสัมพัทธ์ ซึ่งนิยามได้ว่า

$$X_D = \frac{D_{AB}t}{x_1^2} \quad (2.21)$$

โดยมี x_1 เป็นความยาวหรือรัศมีคุณลักษณะของ $L/2$ ถ้าแผ่นวัตถุมีการกระจายความเข้มข้นเริ่มแรก ที่สม่ำเสมอตลอด Z จะได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็น

$$\frac{c_A - c_{As}}{c_{Ao} - c_{As}} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) e^{-(n\pi/2)^2 X_D} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสมการที่ (2.19) ขากแก่การคำนวณ อีกวิธีการหนึ่งในการคำนวณหาเวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองละลายในเนื้อวัสดุจนอิมตัวคือวิธีการอ่านค่าความสัมพันธ์จากแผนภาพ (Graphic Method) ซึ่งใช้รูปที่ 2.3 ในการคำนวณ

ตารางที่ 2.3 แสดงสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพสถานะไม่คงที่

| | สัญลักษณ์ของพารามิเตอร์ | การถ่ายโอนมวลของโมเลกุล |
|--|-------------------------|--|
| การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพัทธ์, สัดส่วนแบบไร้มิติ (Unaccomplished change, a dimensionless ratio) | Y | $\frac{c_{As} - c_A}{c_{As} - c_{A0}}$ |
| เวลาสัมพัทธ์ (Relative time) | X | $\frac{D_{AB}t}{x_1^2}$ |
| ตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative position) | n | $\frac{x}{x_1}$ |
| ความต้านทานสัมพัทธ์ (Relative resistance) | m | $\frac{D_{AB}}{k_c x_1}$ |

c_A = ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบ

c_{As} = ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่พื้นผิวของเนื้อวัสดุ

c_{A0} = ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่เวลาเริ่มต้น

x = ระยะจากจุดกึ่งกลางของเนื้อวัสดุถึงตำแหน่งที่ต้องการทราบ

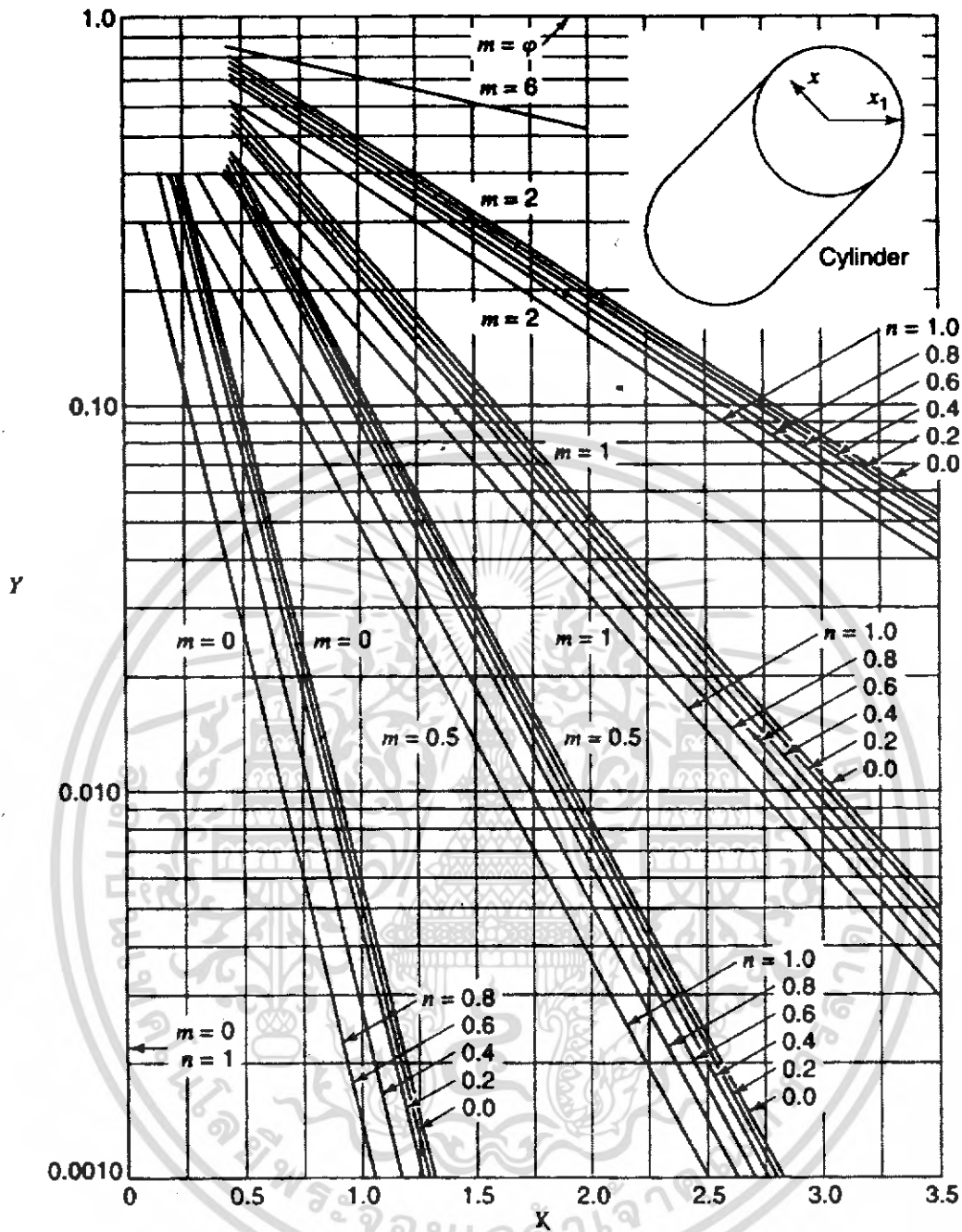
x_1 = ระยะจากจุดกึ่งกลางถึงพื้นผิวของเนื้อวัสดุ

t = เวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองละลายในเนื้อวัสดุจนอิมตัว

k_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective transfer coefficient)

D_{AB} = ค่าความสามารถในการแพร่ของมวล (Mass diffusivity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสภาวะไม่คงที่ในวัสดุทรงกระบอกยาว

เพื่อให้ได้ค่า X ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ t ดังตารางที่ 2.1 จึงต้องทำการคำนวณหาค่า Y ก่อน แล้วจึงอ่านความสัมพันธ์ระหว่างค่า X กับ Y จากรูปที่ 2.3 หากแช่กึ่งไว้ในเครื่องปฏิกรณ์ จนถึงเวลาดังกล่าวตัวกึ่งจะอิมควไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองและทำให้ความเข้มข้นของก๊าซดังกล่าวในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับความเข้มข้นในตัวกึ่ง ดังนั้น พจน์ของ Y จะใกล้ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ให้ความร้อนแก่อาหารที่มีความชื้นเพื่อระเหยน้ำออกจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์แห้ง [2]

การอบแห้งแบ่งได้ 2 แบบ คือ

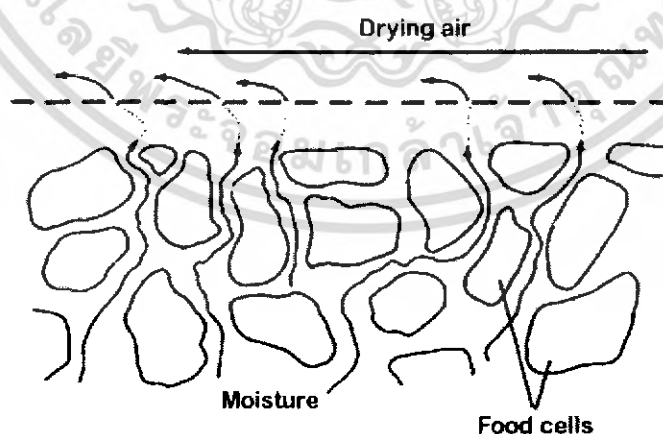
- 1 กระบวนการในอุดมคติ (Adiabatic) เช่น การทำแห้งแบบทั่วไป
- 2 กระบวนการไม่เป็นไปตามอุดมคติ (Non-adiabatic) เช่น การอบแห้งแบบระเหิด

2.5.1 การทำแห้ง (Air drying)

การทำแห้งหรือการกำจัดน้ำ (Drying) หมายถึง การใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ในอาหาร โดยการระเหยน้ำ วัตถุประสงค์คือ ยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยการลดค่า a_w ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ นอกจากนี้การลดน้ำหนักและปริมาณของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาและขนส่ง เพิ่มความหลากหลายและความสะดวกให้แก่ผู้บริโภค อย่างไรก็ตามการทำแห้งทำให้เกิดการสูญเสียทั้งคุณภาพการบริโภคและคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร

2.5.1.1 ทฤษฎีการทำแห้ง (Air drying)

การทำแห้งเกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนและการกำจัดความชื้นออกจากอาหารพร้อมๆกัน การทำแห้งโดยลมร้อนหรือโดยตัวกลางที่เป็นตัวร้อนโดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารและน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอนี้จะแพร่และถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง

สำนักหอสมุดกลาง [พระจอมเกล้าลาดกระบัง]

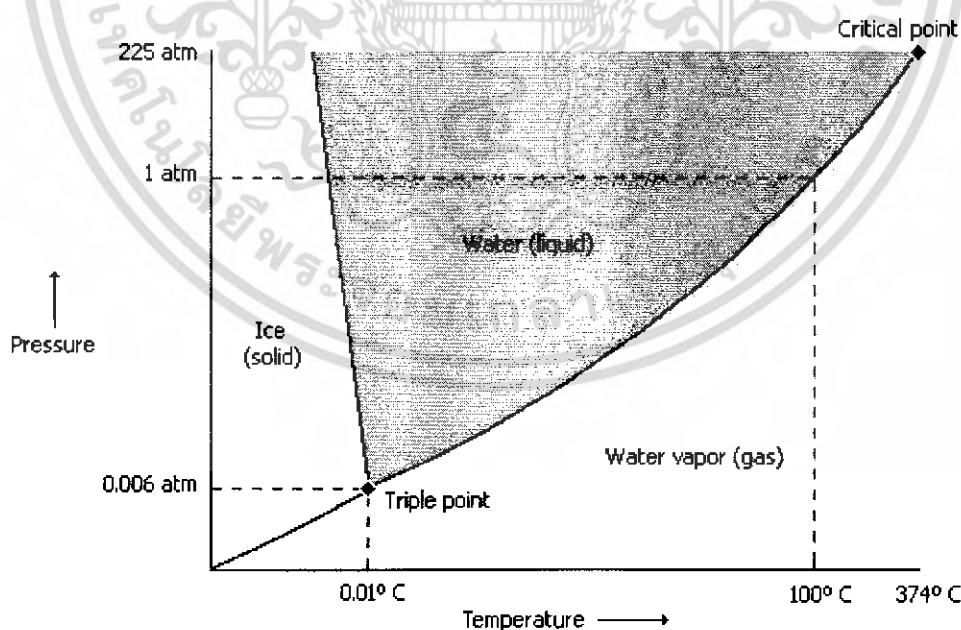
สภาวะดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอขึ้น เพราะอาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสูงและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร

2.5.2 การอบแห้งแบบระเหิด (Freeze drying)

การอบแห้งแบบระเหิด เป็นการช่วยกำจัดน้ำและการถนอมรักษาอาหารแบบไม่ใช้ความร้อน โดยทั่วไปการถนอมโดยการใช้ความร้อนเป็นต้นเหตุทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการ ดังนั้นอาหารที่ได้จึงมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการดีกว่าการอบแห้งทั่วไป อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวจะใช้เวลานานกว่าการกำจัดน้ำ ค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานในการทำให้เยือกแข็งและค่าใช้จ่ายในการทำสุญญากาศย่อมมีราคาสูงมาก ในอุตสาหกรรมใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพง ซึ่งต้องการรักษากลิ่นหรือลักษณะเนื้อสัมผัสที่ค่อนข้างประาะบาง เช่น กาแฟ เห็ด เครื่องเทศและสมุนไพร น้ำผลไม้ เนื้ออาหารทะเล และอาหารพร้อมรับประทาน

2.5.2.1 ทฤษฎีการอบแห้งแบบระเหิด (Freeze drying)

ความสัมพันธ์ระหว่างของแข็ง ของเหลว ก๊าซ ของน้ำเกี่ยวข้องกับกระบวนการแปรรูปอาหารหลายชนิด เช่น การทำให้แข็งขึ้น การอบแห้ง การแช่แข็ง การอบแห้งแบบระเหิด สามารถอธิบายความสัมพันธ์นี้ได้โดยใช้แผนภาพ วัฏภาค หรือ เฟสไดอะแกรม (Phase diagram) ของน้ำในรูปที่ 2.5 แผนภาพดังกล่าว

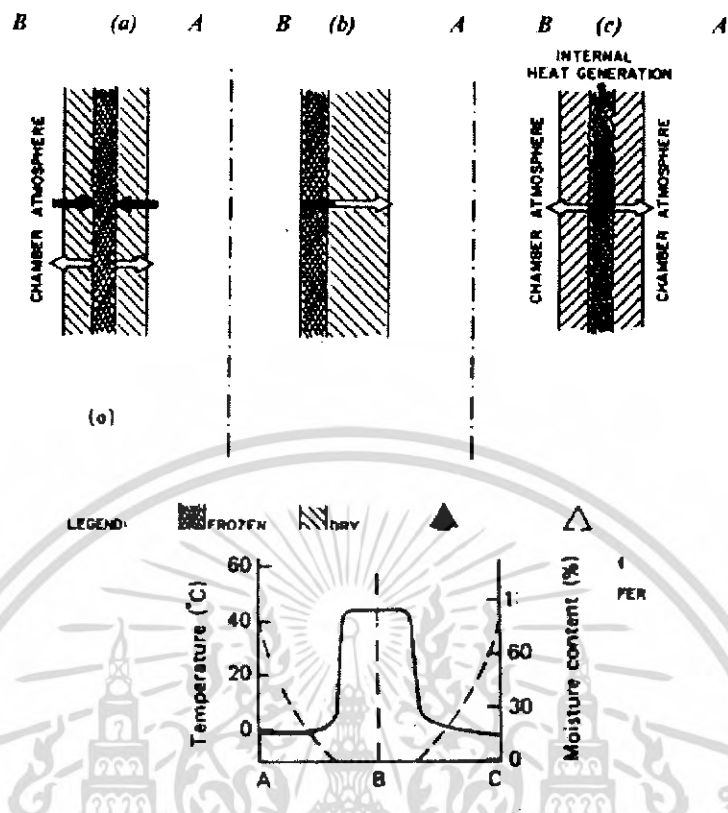


รูปที่ 2.5 เฟสไดอะแกรมของน้ำ แสดงการระเหิดของน้ำแข็ง

แสดงให้เห็นระบบที่สามารถแยกระบบออกจากอีกระบบหนึ่งโดยเส้นแบ่งของทั้งสองสถานะของน้ำบริสุทธิ์ แผนภาพดังกล่าวแสดงความดันและอุณหภูมิของวัฏภาคของน้ำ เส้นแบ่งแต่ละเส้นแสดงอุณหภูมิและความดันที่ทำให้เกิดสถานะสมดุล จุดทริปเปิล (Triple point) เป็นจุดที่ทุกเส้นมาตัดกัน เป็นจุดที่แสดงว่าทั้งสามสถานะอยู่ในภาวะสมดุล

ขั้นตอนแรกของการอบแห้งแบบระเหิด คือ การแช่เยือกแข็งอาหารในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบดั้งเดิม ชนิดของเครื่องมือขึ้นอยู่กับลักษณะของอาหาร อาหารชิ้นเล็กๆจะถูกแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก และเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดกับเซลล์ของอาหาร มีการใช้การแช่แบบเยือกแข็งแบบช้ากับอาหารเหลวเพื่อให้เกิดโครงตาข่ายของผลึกน้ำแข็ง เพื่อเป็นช่องให้ไอน้ำเคลื่อนที่ได้

ค่าความดันของอาหารต่ำกว่า 610.5 ปาสคาล และน้ำเกิดการเยือกแข็ง เมื่ออาหารได้รับความร้อน น้ำแข็งจะระเหิดกลายเป็นไอน้ำทันทีโดยไม่ผ่านการละลาย ไอน้ำจะถูกกำจัดออกจากอาหารอย่างต่อเนื่องด้วยการรักษาความดันให้ต่ำกว่าความดันไอน้ำที่ผิวของน้ำแข็ง ไอน้ำจะถูกกำจัดออกไปด้วยปั๊มสุญญากาศและกลั่นตัวบนขดลวดทำความเย็น เมื่อกระบวนการทำแห้งดำเนินต่อไป ผิวหน้าของการระเหิดจะเคลื่อนที่เข้าไปในอาหาร (รูปที่ 2.6) ความร้อนแฝงของการระเหิดจะเคลื่อนที่ผ่านไปยังผิวหน้า ไอน้ำจะเคลื่อนที่และถูกกำจัดออกไปจากอาหาร โดยผ่านช่องน้ำแข็งที่ระเหิดไป การทำให้อาหารจะเกิดขึ้นในสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกโดยการระเหิดจนเหลือความชื้นประมาณ 15% (น้ำหนักเปียก) และขั้นตอนที่สองคือ การทำแห้งโดยการกำจัดน้ำที่ยังเป็นของเหลว จนมีความชื้นประมาณ 2% (น้ำหนักเปียก) การกำจัดน้ำเกิดขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องทำแห้ง จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง โดยยังรักษาความดันต่ำอยู่



รูปที่ 2.6 การถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างการอบแห้งแบบระเหิด

- ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านผิวร้อน
- ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นเยือกแข็ง
- ความร้อนที่เกิดขึ้น กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (--) และปริมาณความชื้น (-) ตามแนว A→B→C ในแต่ละตัวอย่าง

ผลกระทบต่ออาหาร

ถ้ามีการบรรจุอย่างถูกต้องเหมาะสม อาหารอบแห้งแบบระเหิดจะมีอายุการเก็บรักษานานกว่า 12 เดือน โดยจะยังคงคุณภาพด้านประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการสูงมาก สารหอมระเหยจะไม่มีอยู่ในน้ำบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง ดังนั้นกลิ่นจึงไม่หลุดไปในไอน้ำที่ระเหิดออกไปจากน้ำแข็งแต่จะยังคงอยู่ในอาหาร เป็นผลให้ 50-100% ของกลิ่นยังคงอยู่

ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารอบแห้งแบบระเหิดจะยังคงใกล้เคียงกับวัตถุดิบมากเนื่องจากการหดตัวหรือเกิดเปลือกแข็งน้อยมาก โดยโครงสร้างเป็นพรุน จะทำให้เกิดการคืนตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการเติมน้ำ แต่โครงสร้างดังกล่าวจะเปราะบางและแตกหักง่ายมากจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันความเสียหายทางกายภาพขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน แป้งหรือคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ น้อยมากอย่างไรก็ตามโครงสร้างที่เป็นรูพรุนอาจทำให้ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปได้ง่ายและทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ไขมันเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ จึงจำเป็นต้องบรรจุอาหารในภาชนะที่บรรจุก๊าซเฉื่อย มีการเปลี่ยนแปลงไขมันและกรดแอสคอร์บิกน้อยมากระหว่างการอบแห้งแบบระเหิดและการสูญเสียวิตามินในระดับต่ำมาก อย่างไรก็ตามการสูญเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างการเตรียมผลิตภัณฑ์อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านโภชนาการของอาหาร

ดังนั้นจากข้อดีต่างๆ ของการทำแห้งแบบระเหิดทำให้เราเลือกวิธีนี้เป็นวิธีการเก็บรักษาอายุผลิตภัณฑ์

2.6 การคงสภาพการพองตัวของกึ่งด้วยการแช่เยือกแข็งแบบไครโอเจนิค(Cryogenic freezing)

เป็นวิธีการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว ทำได้โดยจุ่มกึ่งในสารทำความเย็นหรือฉีดพ่นสารทำความเย็นลงบนกึ่ง เมื่อสารทำความเย็นสัมผัสกับกึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะเดิมซึ่งอาจจะเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ การเปลี่ยนสถานะจะมีการดึงความร้อนออกจากอาหาร ทำให้อาหารมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว สารทำความเย็นที่จัดเป็นสารไครโอเจนิคที่นิยมใช้กับอาหาร เช่น ไนโตรเจนเหลว(Liquid Nitrogen) คาร์บอน ไดออกไซด์เหลว (Liquid Carbon dioxide) เป็นต้น

ไนโตรเจนเหลว เป็นผลพลอยได้จากการผลิตออกซิเจนเหลวจากอากาศ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ 47.6 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสารทำความเย็นตัวอื่นๆ แต่มีประโยชน์เพราะมีจุดเดือดที่ต่ำมากที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส

ข้อดีของไนโตรเจนเหลว

1. กึ่งจะมีการสูญเสียใช้น้ำน้อยมาก น้อยกว่า 1%
2. ออกซิเจนจะถูกกำจัดออกไปขณะแช่เยือกแข็งโดยรวมตัวกับก๊าซไนโตรเจนเป็นสารประกอบจึงช่วยลดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
3. ผลึกที่เกิดขึ้นเกิดความเสียหายน้อยมาก
4. คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งมีลักษณะผิวหน้าและเนื้อสัมผัสที่ดี ไม่ถูกทำลายของเหลวที่ไหลออกมาเมื่อนำไปทำละลายน้อย

ข้อเสียของไนโตรเจนเหลว

1. การลดอุณหภูมิเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที อาจเกิด Thermal Shock ทำให้ชิ้นอาหารเกิดการแตกร้าวเสียคุณภาพ การป้องกันโดยการลดอุณหภูมิของอาหารก่อนนำมาแช่เยือกแข็ง
2. เนื้อสัตว์ที่มีสีแดงถ้านำมาแช่เยือกแข็งด้วยวิธีนี้สีจะไม่สวย เกิดเมทโม โอ โกลบิน เนื่องจากออกซิเจนถูกกำจัดออกไป

คาร์บอนไดออกไซด์เหลว เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ต่าง ๆ มีจุดเดือดที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส ในการแช่เยือกแข็ง เมื่อน้ำพ่นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวลงบนผลิตภัณฑ์จะเกิดเป็นเกล็ดน้ำแข็ง ซึ่งมี

ข้อดี คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีเอนทัลปีและจุดเดือดที่ต่ำกว่าไนโตรเจนเหลว ช่วยลดการเกิด Thermal shock นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นพิษต่อจุลินทรีย์

ข้อเสีย คือ คาร์บอนไดออกไซด์ต้องใช้เวลาในการระเหิด และต้องฉีดใกล้ผลิตภัณฑ์มาก ที่สุดเท่าที่จะทำได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองเพื่อหาความดัน อุณหภูมิและเวลาภายใต้ภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติซึ่งมีผลโดยตรงต่อการพองตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และค่า pH ของกึ่ง

ในการทดลองมีการทดลองทั้งหมด 5 การทดลอง

1. การหาปริมาณน้ำในตัวกึ่ง
2. การหาเวลาที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติแพร่กระจายอย่างสมบูรณ์ในกึ่ง
3. วิธีการลดเวลาในกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติแพร่ในกึ่ง
4. วิธีการหาค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติเข้าเนื้อเยื่อกึ่งและการประมาณค่า pH ระหว่างกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติในกึ่ง
5. ศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิต่ออัตราการพองตัวและ pH ของกึ่งหลังผ่านสถานะคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ
 - 5.1 การทำแห้งแบบระเหิด
 - 5.2 การวัดค่าร้อยละการพองตัวของกึ่ง
 - 5.3 การวัดค่า pH ของกึ่งหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ
 - 5.4 การศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของกึ่ง

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง
2. บีมคาร์บอนไดออกไซด์
3. ก๊าซจูลทธรอนอีเล็กตรอนแบบส่องกราด
4. เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์
5. เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์
6. ตู้อบสารเคมี
7. เครื่องวัด a_w
8. เครื่องวัด pH

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 99.9%
2. ไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1 การหาปริมาณน้ำในตัวกึ่ง (Moisture Content, Wet basis)

วิธีการทดลอง

นำกึ่งขาวสดปอกเปลือกขนาด 50-60 ตัว / กิโลกรัม บันทึกรน้ำหนัก นำมาหั่นเป็นชิ้นบางๆ หลังจากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 20 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลง บันทึกรน้ำหนัก

คำนวณหาปริมาณน้ำในกึ่งจากสมการ (3.1)

$$\% \text{ ความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักกึ่งก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกึ่งหลังอบ})}{\text{น้ำหนักกึ่งก่อนอบ}} \times 100 \quad (3.1)$$

การทดลองที่ 2 การหาเวลาที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติแพร่กระจายอย่างสมบูรณ์ในกึ่ง

วิธีการ

1. หาสัมประสิทธิ์การแพร่รวมของกึ่ง (D_{AB})

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่รวมของคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อกึ่งสามารถประมาณได้จากผลรวมแบบอนุกรมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ (D) กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเนื้อกึ่ง (D_w) ดังแสดงในสมการที่ (3.2)

$$\frac{1}{D_{AB}} = \frac{1}{D} + \frac{1}{D_w} \quad (3.2)$$

โดยที่ D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่รวม (cm^2/s)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ (D) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเนื้อกึ่ง (D_w) มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในกึ่ง (X_w) ตามลำดับ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ De cindio และคณะ ,1995[6] ซึ่งได้แสดงสมการเชิงเอมพิริคัลสำหรับประมาณค่า D และ D_w ได้ดังนี้

$$D = 1.77 \times 10^{-9} \left(\frac{X_w}{1 + X_w} \right) \left(\frac{T}{298} \right) \quad (3.3)$$

$$\log D_w = -16 + 72.8 \frac{X_w}{1 + 9.3 X_w} + \log \left(\frac{T}{298} \right) \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

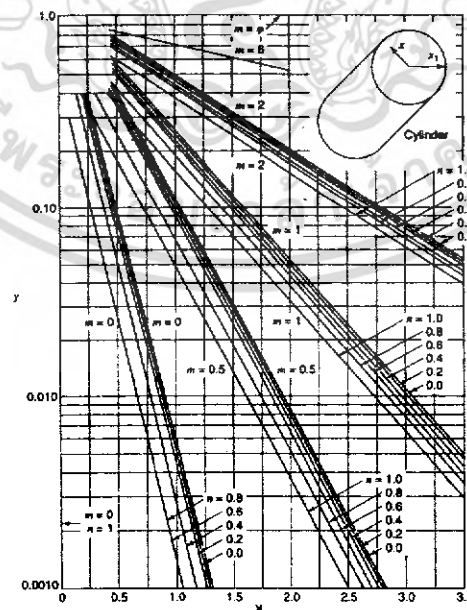
- โดยที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของ CO_2 ในน้ำ (cm^2/s)
 D_w คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในกึ่ง (cm^2/s)
 x_w คือ ปริมาณน้ำของกึ่งที่ได้จากการทดลองที่ 1
 T คือ อุณหภูมิของกึ่ง (K)

2. หาเวลาที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติแพร่และอิมตัวในกึ่ง

เมื่อสามารถประมาณค่า D_{AB} ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้จะสามารถประมาณเวลาที่ใช้ในการแพร่ของ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติเข้าสู่เนื้อกึ่งได้โดยวิธีการประมาณค่าจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสัมพันธ์ (Y) กับเวลาสัมพันธ์ (X_D) โดยมีสมมุติฐานว่า คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติมีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำทำให้ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์กระจายสม่ำเสมอในตัวกึ่ง ดังนั้น ค่าความต้านทานสัมพันธ์ ($m=0$) และค่าตำแหน่งสัมพันธ์ ($n=0$) จะได้ค่า X_D จากความสัมพันธ์จากแผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสถานะไม่คงที่ในวัสดุทรงกระบอกยาว (รูปที่ 3.1) และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพันธ์มีค่าใกล้ 1 มากแทนค่า (X_D) และ (D_{AB}) ในสมการที่ (3.5)

$$t = \frac{x_1^2 X_D}{D_{AB}} \quad (3.5)$$

โดยมี x_1 เป็นความยาวคุณลักษณะของ $L/2$



รูปที่ 3.1 แผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสถานะ

ไม่คงที่ในวัสดุทรงกระบอกยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3 วิธีการลดเวลาในกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติแพร่ในกึ่งวิธีการ

เวลาที่ใช้ในการซึมแพร่จนอิ่มตัวของกึ่งอาจเป็นเวลานานเกินไป การปรับลดเวลาในกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติโดยร้อยละการพองตัวและค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลงมาก เมื่อเทียบกับเวลาในการแพร่จนอิ่มตัว สามารถทำได้ 2 แบบ คือ

3.1 การปรับตัวคุณค่าคงที่ในสมการการแพร่ของน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อกึ่ง (D_w) เนื่องจากกึ่งมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำ ดังนั้น ผลของการแพร่ของน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อกึ่งจะมีผลทำให้เวลาในการแพร่นานมากขึ้น

3.2 การปรับลดเวลาในกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ จากแผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสภาวะไม่คงที่สำหรับทรงกระบอกยาว (รูปที่ 3.1) ซึ่งใช้ในการคำนวณเวลาในการแพร่ของกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติเนื่องจากกึ่งมีลักษณะเป็นทรงกรวย ดังนั้นจึงมีสมมติฐานว่าเวลาในการแพร่ในวัสดุทรงกระบอกจะนานกว่าวัสดุรูปโคน โดยพื้นที่รูปกรวยจะมีพื้นที่น้อยกว่ารูปทรงกระบอกประมาณ 33.33 %

การทดลองที่ 4 วิธีการหาค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติเข้าเนื้อเยื่อกึ่งและการประมาณค่า pH ระหว่างกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติในกึ่ง

ในกระบวนการละลายหรือการดูดซึมสำหรับกรณีนี้จะพิจารณา โดยใช้กลไกของการละลายที่เป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's Law) กล่าวคือคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแพร่เข้าไปในกึ่งจนเกิดสมดุล พบว่า ค่าความดันมีผลต่อค่าการละลายของก๊าซในกึ่ง ดังสมการที่ 3.6

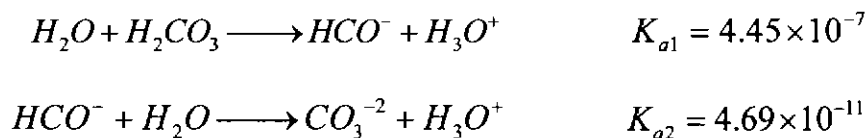
$$C = k_D p \quad (3.6)$$

โดยที่ C คือ ค่าการละลาย (Solubility)(mol/kg)

k_D คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี

p คือ ความดัน (bar)

จากสมการที่ 3.6 จะเห็นว่า ค่าความดันเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งมีผลต่อค่าการละลายของก๊าซในกึ่ง และค่าการละลายสามารถหาค่า pH ได้จากสมการเคมี



ซึ่งค่า K_{a2} จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้น หา pH ได้จาก

$$pH = -\log(\sqrt{K_{a1}Cd}) \quad (3.7)$$

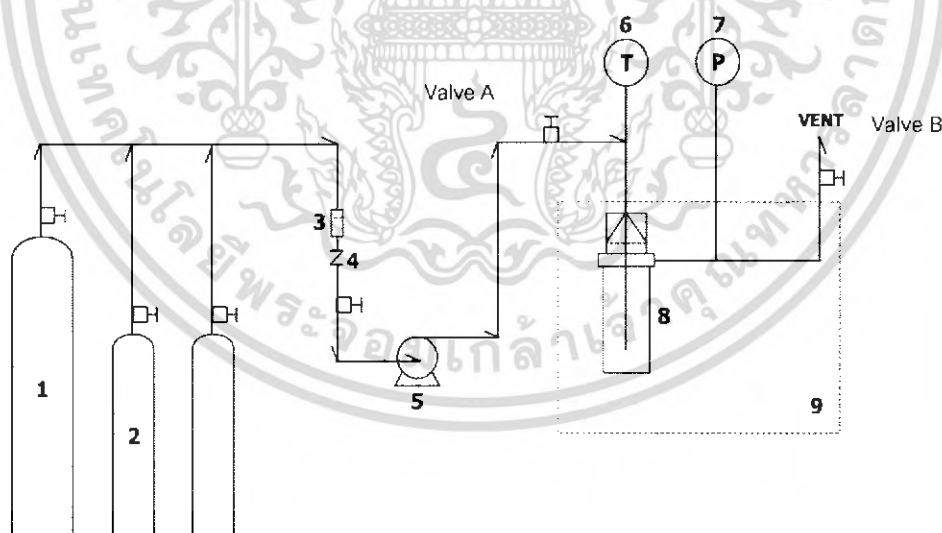
เมื่อ C คือ ค่าการละลาย (mol/kg)

d คือ ความหนาแน่นของสาร (kg/l)

K_{a1} คือ ค่าคงที่การแตกตัวของกรดคาร์บอนิก

การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิต่ออัตราการพองตัวและ pH ของกึ่งหลังผ่านสภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ

กำหนดสภาวะช่วงของความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความดัน 3 ระดับ คือ 1100, 1250, 1400 และอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 35, 40, 50 องศาเซลเซียสรวมทั้งสิ้น 9 สภาวะ ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยใช้เวลาตามที่คำนวณได้จากการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง

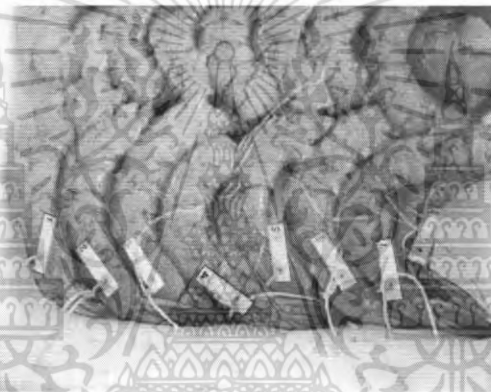
1. ถังคาร์บอนไดออกไซด์ใหญ่
2. ถังคาร์บอนไดออกไซด์เล็ก
3. ตัวกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วาล์ว
5. ป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูง
6. เครื่องทำความร้อน
7. เกจวัดความดัน
8. ถังปฏิกรณ์ความดันสูง
9. ตัวควบคุมอุณหภูมิและความดัน

วิธีการทดลอง

1. เตรียมกึ่งขาวปอกเปลือกตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากันร้อยเชือกติดฉลากที่กึ่งแต่ละตัวแขวนในถังปฏิกรณ์ความดันสูง (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 การเตรียมกึ่ง ร้อยเชือกติดหมายเลข

2. ชันนอตทั้ง 8 ตัวให้แน่นเพื่อไม่ให้ก๊าซรั่วซึม ตั้งค่าเครื่องทำความร้อน (Heater)



รูปที่ 3.4 การขันนอตเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เนื่องจากภายในถังยังมีส่วนของอากาศอยู่จึงต้องทำการไล่อากาศที่ค้างอยู่ในระบบ เพื่อให้ภายในถังปฏิบัติการความดันสูงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ โดยเปิดวาล์ว A และเปิดวาล์ว B เป็นตัวเปิดไล่อากาศออกภายนอก
4. ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เครื่องปฏิบัติการความดันสูงให้สูงกว่าความดันวิกฤต (7.38 เมกกะปาสคาล) ปรับอุณหภูมิและตั้งเวลาตามที่ได้กำหนดไว้
5. เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดแล้ว ไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกโดยเปิดวาล์ว B เมื่อปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจนหมดแล้วจึงจับน็อตออก
6. จากนั้นนำกึ่งมาแช่แข็งแบบโคโอดินิกด้วยไนโตรเจนเหลว

การทดลองที่ 5.1 การทำแห้งแบบระเหิด (Freeze dry)

วิธีการทดลอง

นำกึ่งที่ผ่านการแช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลวแล้วไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิด (Freeze dry) โดยนำกึ่งวางไว้ในถาด เปิดเครื่องและระบบทำความเย็น เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเปิดระบบสุญญากาศ (Vacuum) และระบบทำความร้อน (Heater) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

การทดลองที่ 5.2 การวัดค่าร้อยละการพองตัวของกึ่ง (Expansion ratio)

วิธีการทดลอง

ใช้เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (MD-200s) ใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) เพื่อหาความหนาแน่น ตัวกลางของเหลวคือ น้ำ ก่อนที่จะทำการวัดค่าจะต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที ก่อนการใช้งาน เพื่อเป็นการอุ่นเครื่องและเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำเท่ากับอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ใช้คีมจับกึ่งวางในเครื่องวัดความหนาแน่น โดยเครื่องจะแสดงค่าความหนาแน่น

คำนวณหาอัตราขยายตัว (φ) จากสมการ

$$(\varphi) = 100 - \left(\frac{P_{\text{หลังกระบวนการ}}}{P_{\text{ก่อนกระบวนการ}}} \right) \times 100 \quad (3.8)$$

การทดลองที่ 5.3 การวัดค่า pH ของกึ่งหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือ
วิกฤติ

วิธีการทดลอง

โดยนำกึ่งที่ผ่านการแช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลว ละลายที่อุณหภูมิห้อง มาสับให้ละเอียด
จำนวน 1.6 กรัม ผสมน้ำร้อน 75 °C จำนวน 20 mL รอให้เย็น วัดโดยเครื่องวัด pH (Consort
C830,Japan) บันทึกผล

การทดลองที่ 5.4 การศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของกึ่ง

วิธีการทดลอง

การตัดชิ้นตัวอย่างเพื่อดูสมบัติทางสัณฐานวิทยาของกึ่งนั้น การศึกษากระบวนการเกิดโพลี
ได้จากภาพทางด้านหน้าตัดขวาง (Cross section) จึงต้องใช้วิธีหั่นกลางตัว จากนั้นนำกึ่งไปเคลือบ
ทองด้วยเครื่องเคลือบทองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้กึ่งมีสมบัติการนำไฟฟ้าแล้วจึงศึกษาสมบัติทาง
สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO 1455VP,England)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

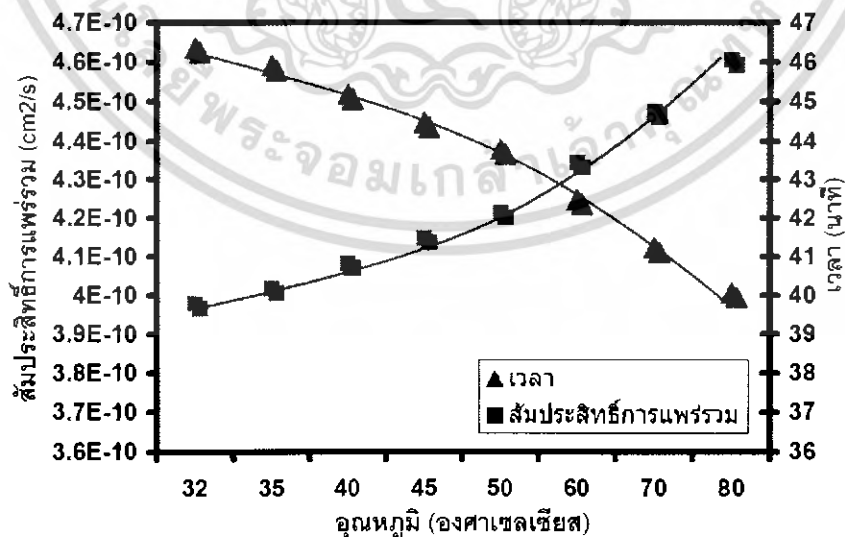
จากการวิจัยเพื่อศึกษาผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมในการพองตัวของกึ่งและผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อการพองตัวภายใต้สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตตลอดจนเสถียรภาพของโครงสร้างของกึ่งที่ได้ทำการทดลองในการปรับเปลี่ยนหาสภาวะอุณหภูมิ ความดัน การหาอัตราการพองตัว ค่าการละลายและผลของค่า pH พบว่า

4.1 ปริมาณน้ำในตัวกึ่ง (Moisture Content, Wet basis)

กึ่งที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณความชื้น $80.64\% \pm 1.26$

4.2 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และเวลาในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในกึ่งอย่างสมบูรณ์

ผลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่รูน้ำระหว่างเซลล์ในกึ่ง (D) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำระหว่างเซลล์เข้าสู่รูน้ำในเนื้อเยื่อของกึ่ง (D_w) แทนลงในสมการการแพร่รวมของกึ่ง (D_{AB}) ได้จากสมการที่ 2.6 ซึ่งขึ้นกับค่าปริมาณน้ำในกึ่ง มีค่าเท่ากับ $80.64\% \pm 1.26$ สามารถหาเวลาในการแพร่ได้จากแผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสภาวะไม่คงที่ในวัสดุทรงกระบอกยาว (รูปที่ 2.3)



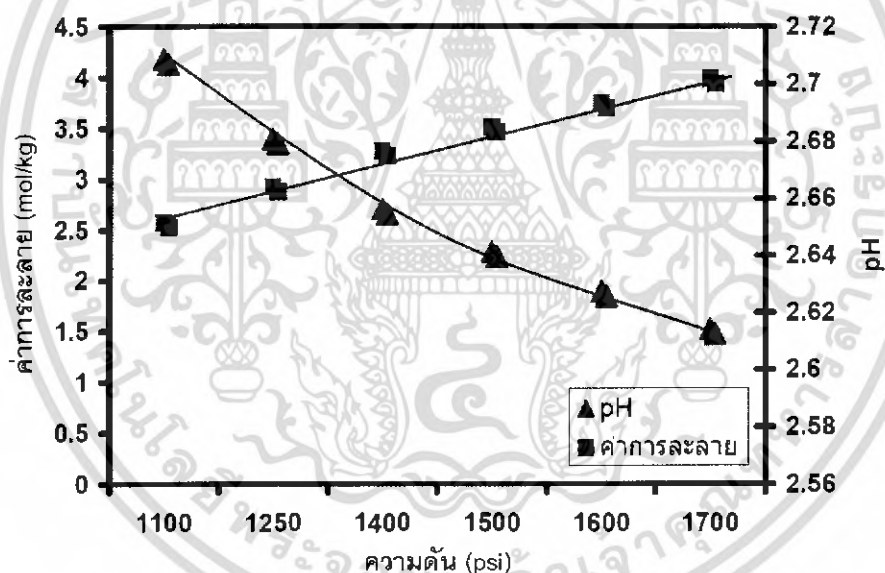
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์การแพร่รวมของกึ่งและเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการแพร่รวมของกึ่งจะเห็นว่า อุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติและสัมประสิทธิ์การแพร่รวมของกึ่งกล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่รวมของกึ่งจะสูงขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติลดลง โดยอุณหภูมิในช่วง 32-80 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการแพร่ไม่เกิน 50 นาที แสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.1

4.3 การประมาณค่าการละลายและค่า pH ในกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติที่ความดันต่าง ๆ

จากสมการการหาค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติในน้ำ (สมการ 2.1) พบว่า ความดันมีผลต่อค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ ซึ่งจะส่งผลต่อค่า pH เนื่องจากถ้าการละลายสูงขึ้นจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ละลายลงสู่เนื้อกึ่งได้มาก เกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ทำให้ค่า pH ในกึ่งระหว่างกระบวนการต่ำลง แสดงได้จากรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการละลายและค่า pH

4.4 ผลของการทดสอบการเกิดพองตัวในกึ่งที่สภาวะต่างๆ

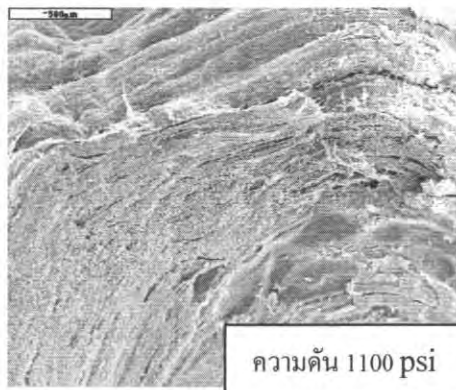
ในการทดลองกึ่งที่สภาวะต่าง ๆ จะทำการทดลองทั้งสิ้น 9 สภาวะและเกิดลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็นแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของกึ่งหลังออกจากกระบวนการที่สังเกตได้

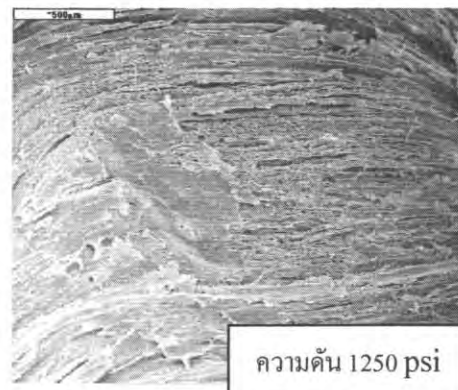
| ความดัน (psi) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (นาท) | ลักษณะที่สังเกตได้หลังจากผ่านกระบวนการ |
|---------------|---------------|------------|--|
| 1100 | 35 | 50 | กึ่งพองมากขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำ |
| | 40 | 50 | กึ่งพองมากขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำ |
| | 50 | 50 | กึ่งมีลักษณะเหี่ยวและเปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำ |
| 1250 | 35 | 50 | กึ่งพองมากขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำ |
| | 40 | 50 | กึ่งพองมากขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำ |
| | 50 | 50 | มีลักษณะเหี่ยวและเปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำ |
| 1400 | 35 | 50 | กึ่งพองมากขึ้นจนแตกที่กลางหลังและเปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำพบน้ำแข็งแห้งเกาะอยู่ที่กึ่งมาก |
| | 40 | 50 | กึ่งพองมากขึ้นพบรอยแตกเล็กน้อย, เปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำ พบน้ำแข็งแห้งเกาะอยู่ที่กึ่ง |
| | 50 | 50 | มีลักษณะเหี่ยวและเปลี่ยนเป็นสีส้ม, มีการสูญเสีย น้ำ |

จากตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้จะเห็นได้ว่ากึ่งมีลักษณะการพองตัวที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ละลายลงสู่ผิวกึ่ง เซลล์กึ่งจะทำหน้าที่จ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับพองก๊าซ ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของพองก๊าซขึ้น พองก๊าซจะทำหน้าที่ดึงรั้งเนื้อเยื่อให้ขยายขนาดเพิ่มมากขึ้นจึงเห็นว่ากึ่งมีลักษณะพองตัว ขณะที่อุณหภูมิ 50 °C กึ่งมีลักษณะเหี่ยว เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เนื้อกึ่งแข็งและต้านทานการขยายตัวของพองก๊าซทำให้ร้อยละการพองตัวลดลง

นอกจากนี้ที่ความดัน 1400 psi อุณหภูมิ 35 °C และ 40 °C จะเกิดน้ำแข็งแห้งและการแตกร้าวที่ตัวกึ่ง อันเป็นผลมาจากน้ำแข็งแห้งที่เกาะอยู่ที่กึ่งจะทำให้เนื้อเยื่อแข็งตัวไม่ยืดหยุ่น ดังนั้นพองก๊าซที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถดึงรั้งเนื้อเยื่อให้พองขึ้นแต่จะฉีกขาดเนื้อเยื่อ



ความดัน 1100 psi



ความดัน 1250 psi

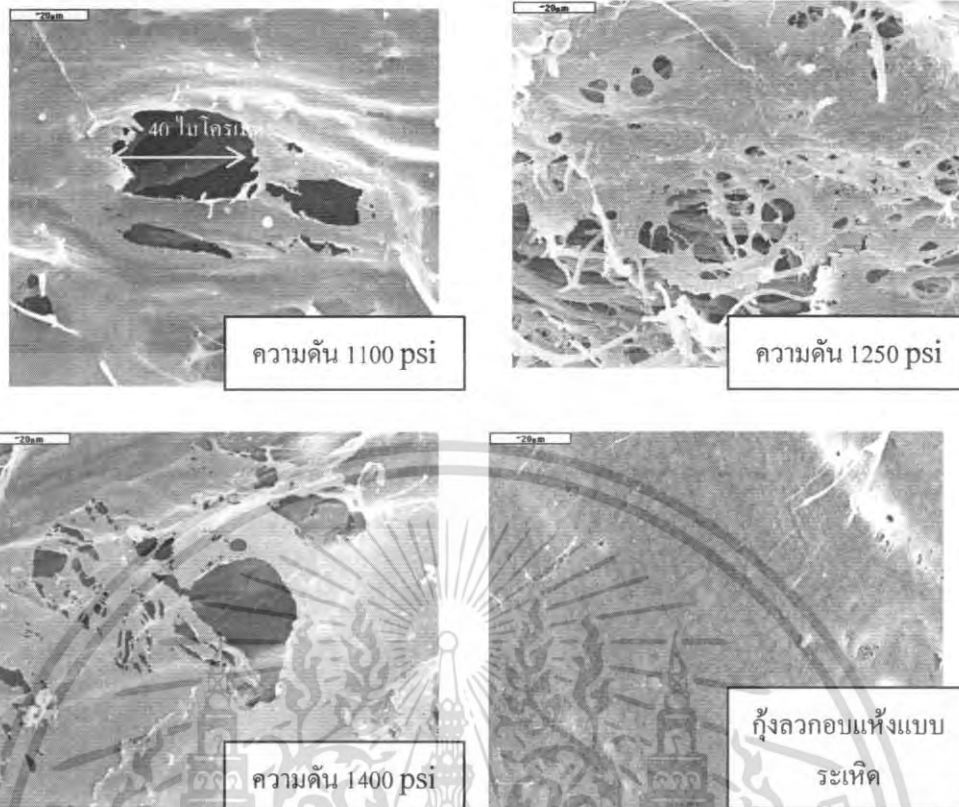


ความดัน 1400 psi

กึ่งลวกอบแห้งแบบ
ระเหิด

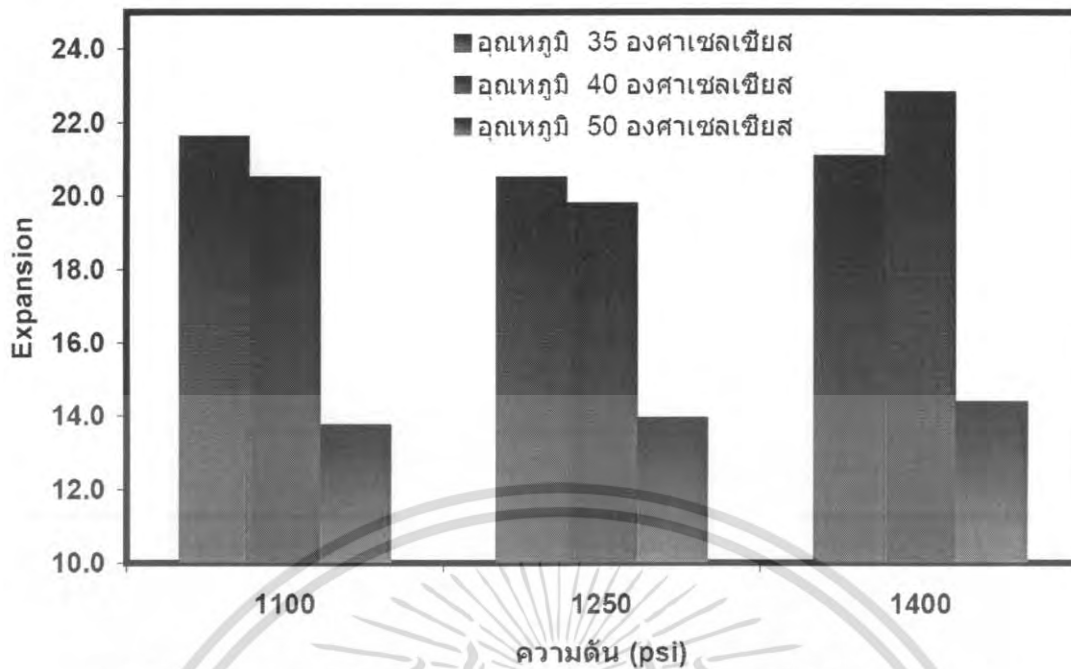
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบกึ่งที่กำลังขยาย 50 เท่าสภาวะ 35 °C เวลา 50 นาที

จากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่าที่ความดัน 1100 และ 1250 psi เริ่มมีการฉีกขาดของเนื้อเยื่อกึ่งเนื่องจากการเจริญเติบโตของ ฟองก๊าซ ส่วนที่ความดัน 1400 psi จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเนื้อเยื่อกึ่งเกิดการฉีกขาดแล้ว ส่วนกึ่งลวกอบแห้งแบบระเหิด ไม่พบการฉีกขาดของเนื้อเยื่อจากผลของฟองก๊าซ

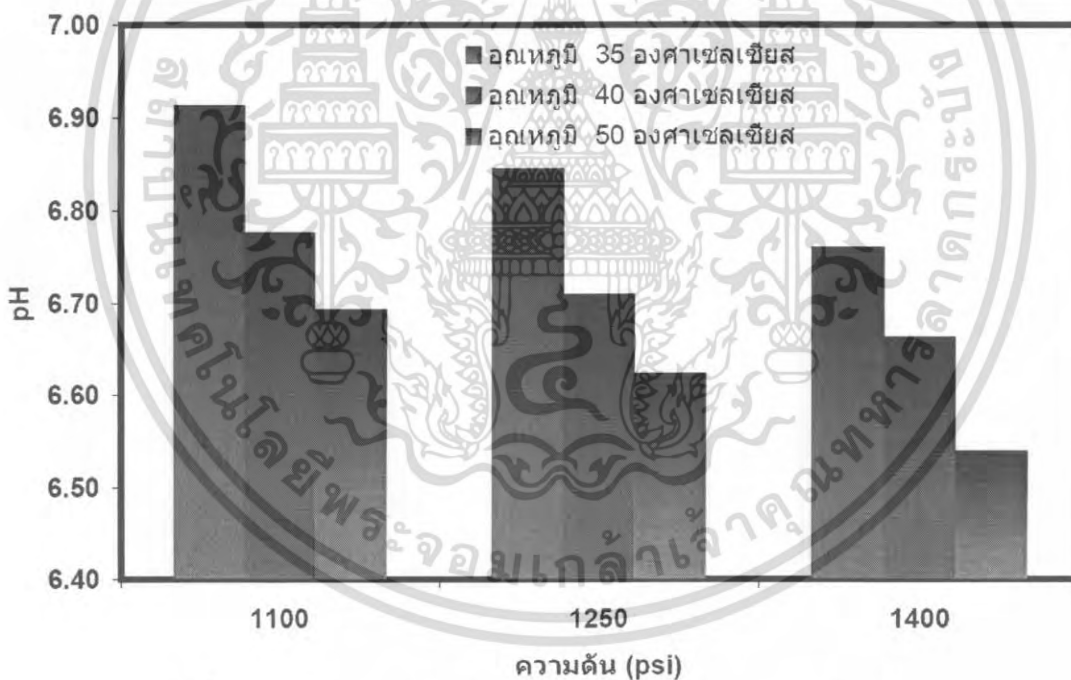


รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบกึ่งที่กำลังขยาย 1000 เท่า สภาวะ 35°C เวลา 50 นาที

จากรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 1000 เท่า จะเห็นอย่างชัดเจนว่า เกิดรูพรุนของฟองก๊าซขนาดประมาณ 40 ไมโครเมตรที่ความดัน 1100 psi และพบการฉีกขาดที่เกิดจากการเจริญเติบโตของฟองก๊าซในเนื้อเยื่อที่ความดัน 1250 และ 1400 psi ในขณะที่กึ่งลวกอบแห้งแบบระเหิดไม่เกิดรูพรุนของฟองก๊าซ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการพองตัวของกึ่ง พบว่า ที่ทุกระดับความดัน การใช้อุณหภูมิ 35 และ 40 องศาเซลเซียส มีผลต่อค่าการพองตัวไม่แตกต่างกันคือมีค่าอยู่ในช่วง 20-22 % แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียสที่ทุกระดับความดัน พบว่า การพองตัวของกึ่งลดลงอย่างชัดเจนคือมีค่าอยู่ในช่วง 13-14 % แสดงในรูปที่ 4.5



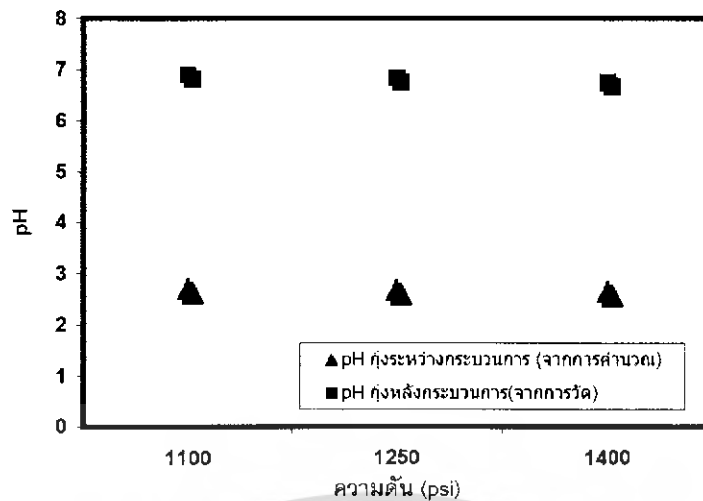
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความดันและอุณหภูมิกับอัตราการพองตัว



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความดันและอุณหภูมิกับค่า pH

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าที่ความดันเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่า pH จะลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นคาร์บอนไดออกไซด์จะความสามารถในการแพร่สูง แต่เมื่อพิจารณาที่ความดันสูงขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่า pH จะลดลง เนื่องจากความดันจะมีผลต่อค่าการละลายดังนั้นเมื่อที่ความดันสูงขึ้นการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงขึ้น ค่า pH จึงต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



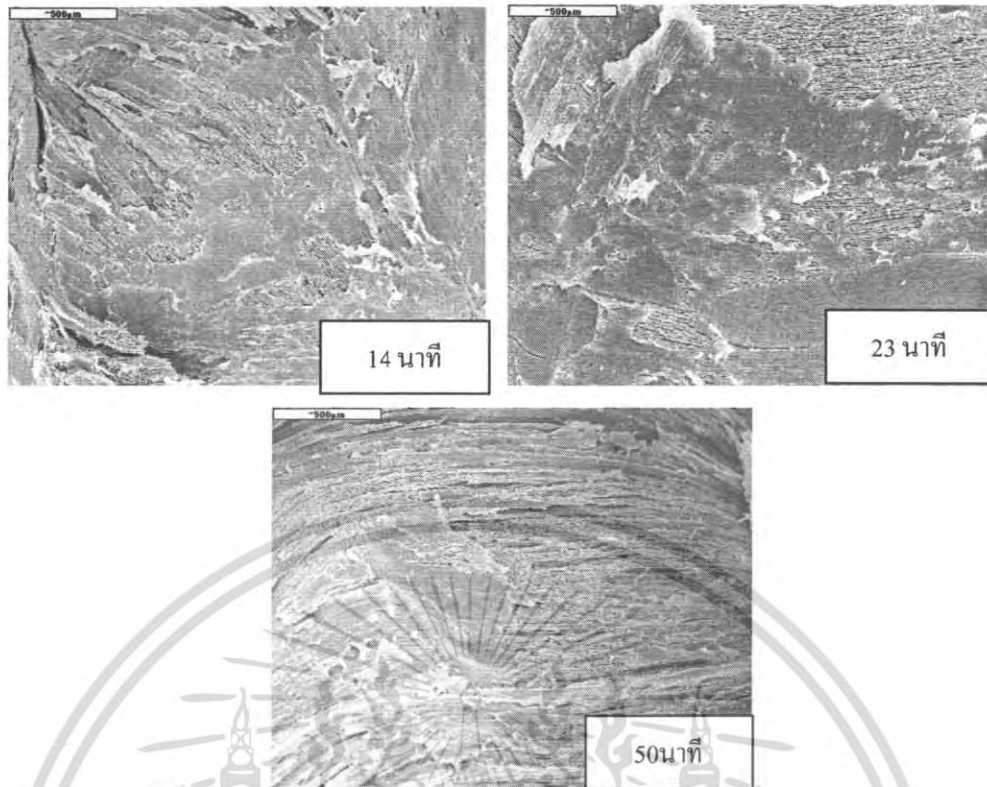
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของความดันกับค่า pH ของกึ่งระหว่างกระบวนการที่ได้จากการคำนวณและค่า pH ของกึ่งหลังกระบวนการที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งได้จากการวัด

จากรูปที่ 4.7 ค่า pH ของกึ่งหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติที่ได้จากการวัดจะมีค่าประมาณ 6.5 – 6.93 ขณะที่ค่า pH ของกึ่งระหว่างกระบวนการ กึ่งจะสัมพันธ์กับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นกรดคาร์บอนิกสามารถค่าการละลายได้จำกัดสมการที่ 2.1 โดยค่า pH ของกึ่งลดลงอยู่ในช่วง 2.5-2.9 ซึ่งข้อดีของการที่ pH ในกระบวนการมีค่าลดลงจะช่วยทำลายจุลินทรีย์ในกึ่ง [3]

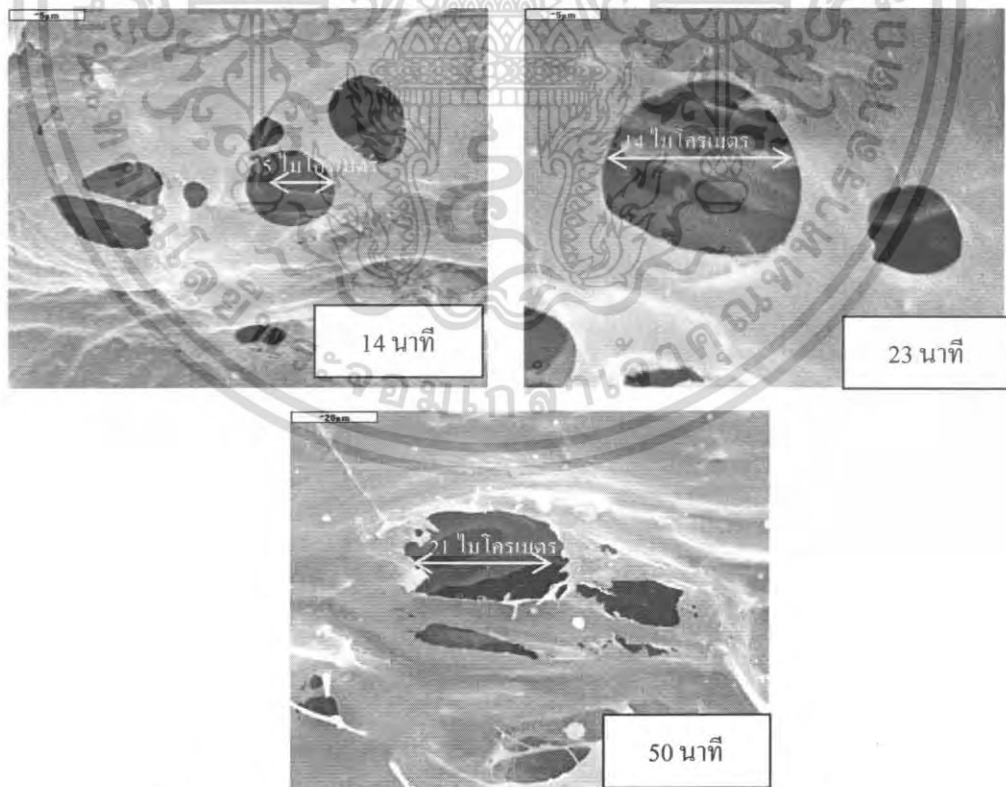
จากข้อมูลข้างต้นจะสามารถพิจารณาหาสภาวะที่ดีที่สุดจาก ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้คือมีลักษณะที่กึ่งไม่เกิดการแตกร้าวหรือเหี่ยวลง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เสียหายเนื่องจากฟองก๊าซน้อย ร้อยละการพองตัวมาก และค่า pH ที่ใกล้เคียง 7 มากที่สุด ดังนั้น สภาวะที่ดีที่สุดคือ ความดัน 1100 psi อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 50 นาที

4.5 ผลของการลดเวลากระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติเพอร์ในกึ่ง

จากสภาวะที่ความดัน 1100 psi อุณหภูมิ 35 °C การลดเวลาในกระบวนการจะเลือกเวลาจากการคำนวณ ได้ที่เวลา 14 , 23 และ 34 นาที จากผลการทดลองกึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ไม่แตกต่างกัน คือ กึ่งพองมากขึ้น เปลี่ยนเป็นสีส้มและมีการสูญเสียน้ำแต่เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาเปรียบเทียบกับกึ่งที่สภาวะความดัน 1100 psi 35 °C เป็นเวลา 50 นาที กำลังขยาย 50 เท่าพบว่าที่เวลา 14 , 23 นาทีไม่พบการฉีกขาดจากการเจริญของฟองก๊าซในเนื้อเยื่อกึ่ง เมื่อเทียบกับเวลา 50 นาที เริ่มเห็นฟองก๊าซบ้างดังแสดงในรูปที่ 4.8



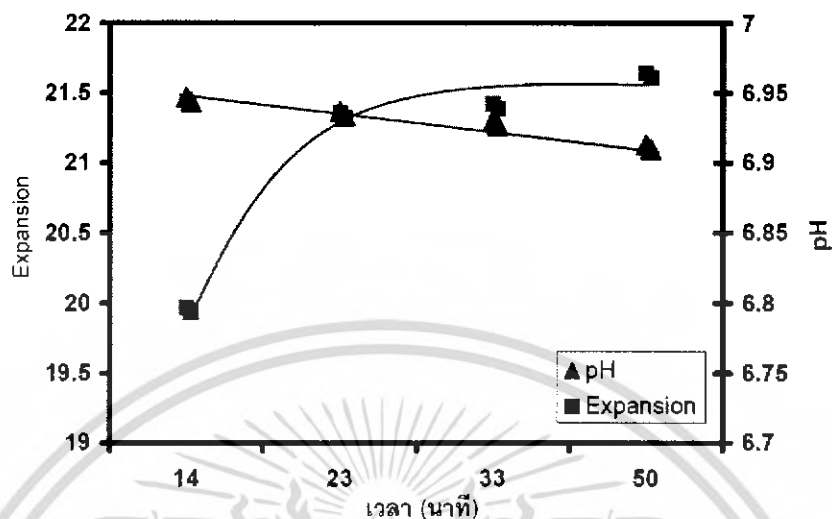
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 50 เท่า ณ สภาวะความดัน 1100 psi 35 °C ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่า

ณ สภาวะความดัน 1100 psi 35 °C ที่เวลาต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 ที่กำลังขยาย 3000 เท่าพบว่า เกิดการเจริญเติบโตของฟองก๊าซซึ่งทำให้น้ำเยื่อ
มีขนาดที่เวลา 14, 23 และ 50 นาที



รูปที่ 4.10 แสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการพองตัว เวลา และ pH

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ค่า pH ในเวลาที่ 14 , 24 , 34 และ 50 นาที มีค่าใกล้เคียงกันคือ 6.91 – 6.95 แต่เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการพองตัวพบว่า ค่าร้อยละการพองตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาที่ประมาณ 23 นาที ค่าร้อยละการพองตัวจะเริ่มคงที่โดยมีค่าร้อยละการพองตัวประมาณ ร้อยละ 22

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมนั้น สามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตติลงน้ำในกึ่ง ไม่ต้องคำนึงถึงสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อมีค่าเท่ากับ 8.1×10^{-10} cm²/s ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และเวลาในการแพร่จนอิ่มตัวในกึ่งคือ 48 นาที
2. ความดัน 1100 psi อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เวลา 23 นาทีเป็นสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตติ ในกึ่งซึ่งมีค่าการพองตัวเท่ากับ 21.36 % และค่า pH 6.94
3. ค่าการละลาย ระหว่างกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตติที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส คือ 2.58 mol/kg สามารถลด pH ระหว่างกระบวนการเหลือ 2.7 ทำให้เชื้อจุลินทรีย์ถูกทำลาย อีกทั้งอากาศในกระบวนการจะถูกไล่ออกจากระบบทำให้ภายในระบบมีภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic) [2]

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของสารช่วยให้เกิดฟองตัวอื่น (Blowing agent) เช่น ไนโตรเจน โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่ออาหาร
2. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] หนังสือพิมพ์กรุงเทพธุรกิจรายสัปดาห์. "ถนนนักลงทุน". [online]. Available:
<http://www.bangkokbizweek.com/2005010/road/index.php>
- [2] ดร.วิไล รังสาตทอง. 2546. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ :
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น.
- [3] ผศ.ดร สุวิมล กิรติพิบูล. 2545. การควบคุมจุลินทรีย์ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ . สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)
- [4] Daniel Klempher and Kurt C. Frisch, *Handbook of Polymer Foams and Foam Technology*. Hanser, Munich Vienna, 1991, 1 – 45, 187 - 222
- [5] N.L. Rozzi, R.K. Singh. 2002. "Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety". [online]. Available : <http://members.ift.org/NR/rdonlyres/8D6BF5E1-9F9A-4C0C-9D0B-9E30318D6140/0/crfsfsv01n1p033034ms20010086.pdf>
- [6] J. M. Smith, H. C. Van Ness and M. M. Abbott. 2001. *Chemical Engineering Thermodynamics*. 6thed. New York : McGraw-Hill.
- [7] R. Vieth, Wolf. n.d. . *Diffusion In and Through Polymers*. New York. Hanser Publishers.
- [8] Alavi^{a*} S.H. , Razvi^b S.S.H. , Harriott^c P. 22 May 2002. " Process dynamics of Starch - based microcellular forms produced by supercritical fluid extrusion ". I : modeldevelopment ". [online]. Available : www.oznet.kstate.edu/dp_grsi/sajidpublications/FRI%202003%20modeling%20article%20part%20I.pdf
- [9] Julian C. Smith, Peter Harriott and Warren L. McCabe. 2000. *UNIT OPERATIONS CHEMICAL ENGINEERING*. 6thed. NEW YORK : McGraw-Hill.
- [10] GEANKOPLIS, CHRISTIE JOHN. 2003. *Transport Processes and Separation Process Principle*. 4thed. New Jersey : Pearson Education.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณเวลาในการแพร่จันอิมตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤติในกึ่ง

ตัวอย่าง การคำนวณหาเวลาในการแพร่จันอิมตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติในกึ่ง ที่ความดัน 1250 psi อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งกึ่งมีค่าความชื้น 0.8064 ความหนา 0.55 cm ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่รวมของ CO₂ ในเนื้อกึ่งสามารถประมาณได้จากผลรวมแบบอนุกรมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ CO₂ ในน้ำ (D) กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเนื้อกึ่ง (D_w) จากสมการที่ 2.4 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ CO₂ ในน้ำ (D) จากสมการที่ 2.4

$$D = 1.77 \times 10^{-9} \left(\frac{0.8064}{1 + 0.8064} \right) \left(\frac{308}{298} \right)$$

$$D = 8.1666 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$$

จากสมการที่ 2.5 หาสัมประสิทธิ์การการแพร่ของน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อ (D_w) เมื่อแทนค่าปริมาณความชื้นจะได้

$$D_w = 10^{-16 + 72.83 \frac{0.8064}{1 + 9.34(0.8064)} + \log\left(\frac{308}{298}\right)}$$

$$D_w = 8.01124 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$$

จากสมการที่ 2.6 หาสัมประสิทธิ์การแพร่รวมของกึ่ง หาได้จาก SC-CO₂ สู่น้ำในกึ่ง และจากน้ำแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อ

$$\frac{1}{D_{AB}} = \frac{1}{8.1666 \times 10^{-10}} + \frac{1}{8.01124 \times 10^{-10}}$$

$$D_{AB} = 4.0441 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากแช่กึ่งไว้ในเครื่องปฏิกรณ์ จนถึงเวลาดังกล่าวตัวกึ่งจะอิมตัวไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองและทำให้ความเข้มข้นของก๊าซดังกล่าวในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับความเข้มข้นในตัวกึ่ง ดังนั้น พจน์ของ Y จะใกล้ 1 จากความสัมพันธ์แผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสถานะไม่คงที่ในวัสดุทรงกระบอกยาว ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะกระจายอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้น ค่าความต้านทานสัมพัทธ์ ($m=0$) และค่าตำแหน่งสัมพัทธ์ ($n=0$) จะสามารถทราบเวลาที่ใช้ในการแพร่

$$X = \frac{D_{AB}t}{x_1^2}$$

$$0.04 = \frac{4.0441 \times 10^{-10} \times t}{0.0055^2}$$

$$t = 49.8667 \text{ min}$$

ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการแพร่ 49.9 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายกับ pH

ตัวอย่าง การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายและค่า pH กุ้งในกระบวนการ กำหนดสถานะความดัน 1250 psi คาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่น 0.3 g/ml โดยค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรีมีค่า 0.034 mol/bar×kg

$$C = k_D p$$

$$C = \frac{0.034 \times 1250}{14.7}$$

$$C = 2.89115 \text{ mol/kg}$$

จากสมการที่ 2.3 สามารถคำนวณค่า pH ของกุ้งในกระบวนการ โดย

$$pH = -\log(\sqrt{K_{a1} C_d})$$

$$pH = \sqrt{4.45 \times 10^{-7} \times 2.89115 \times 0.3}$$

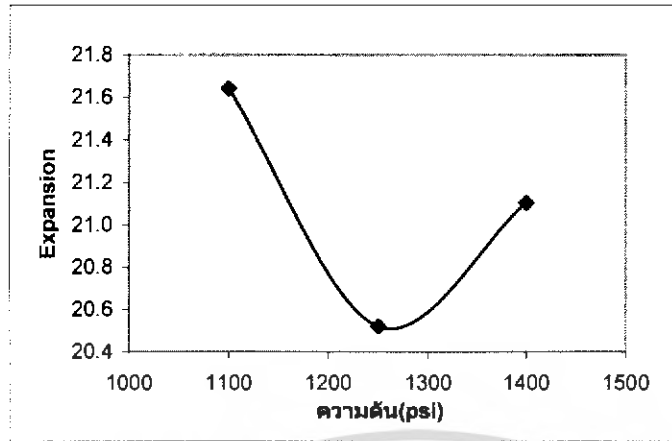
$$pH = 3.21$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

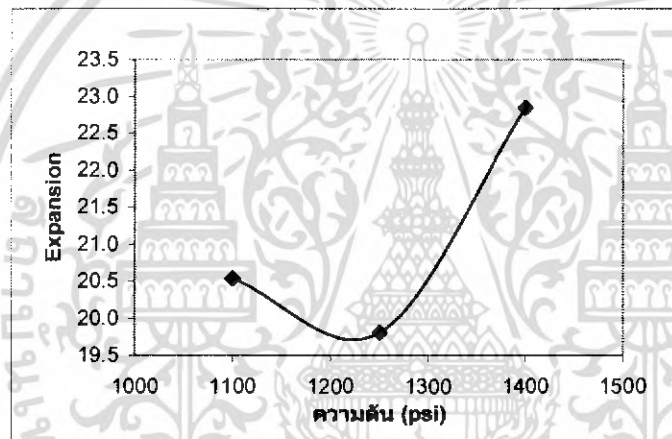
ภาคผนวก ค.
กราฟผลการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ



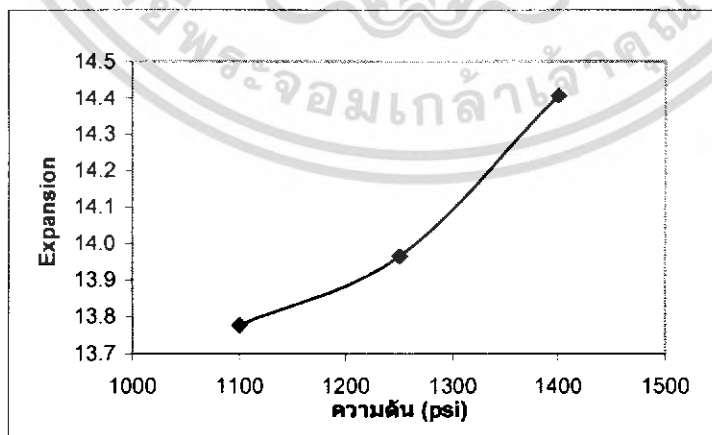
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการพองตัว ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

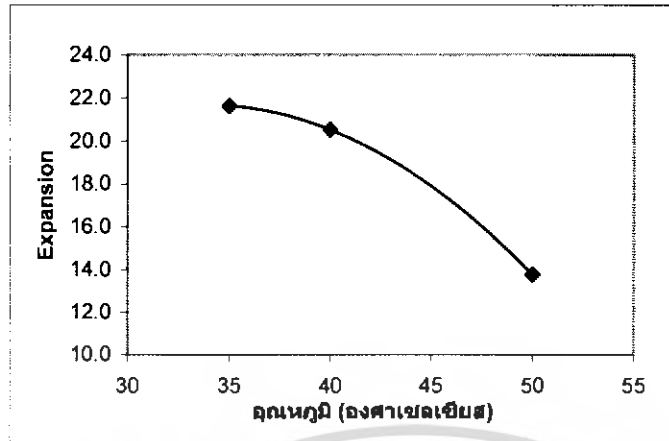


รูปที่ ค.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการพองตัว ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

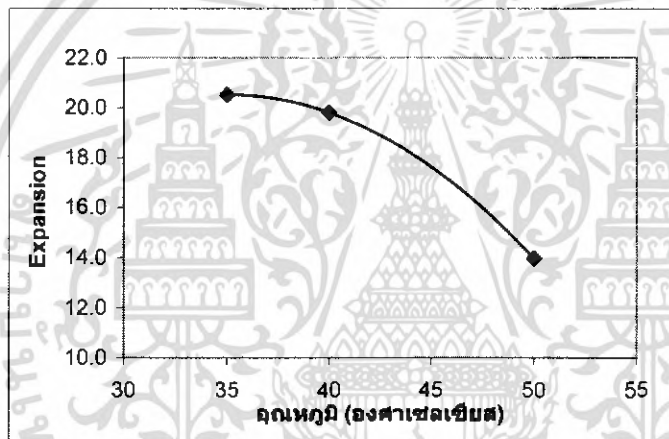


รูปที่ ค.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการพองตัว ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

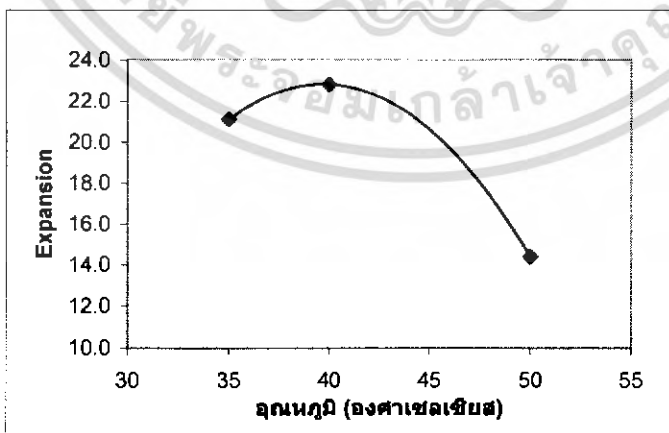
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการพองตัว ที่ความดัน 1100

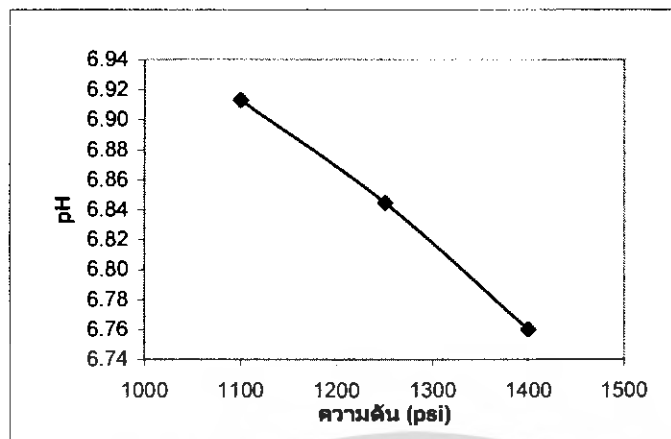


รูปที่ ค.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการพองตัว ที่ความดัน 1250

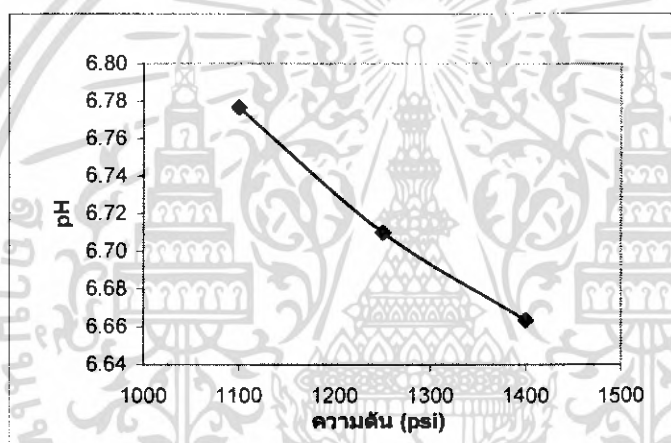


รูปที่ ค.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการพองตัว ที่ความดัน 1400

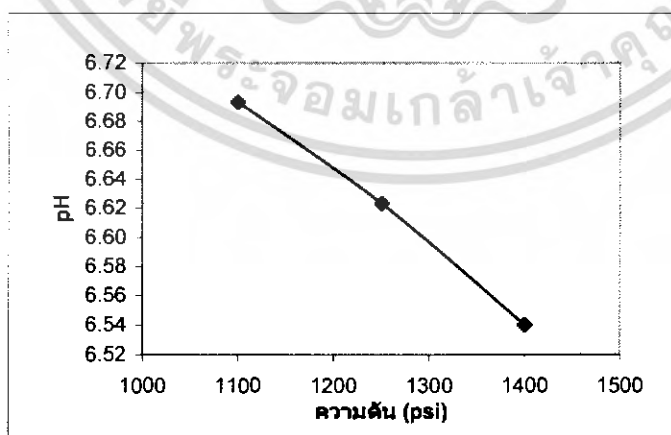
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าPH ที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส

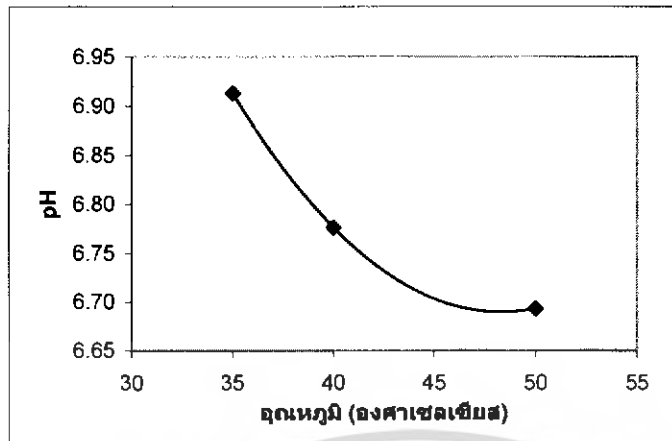


รูปที่ ค.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าPH ที่อุณหภูมิตั้งที่ 40 องศาเซลเซียส

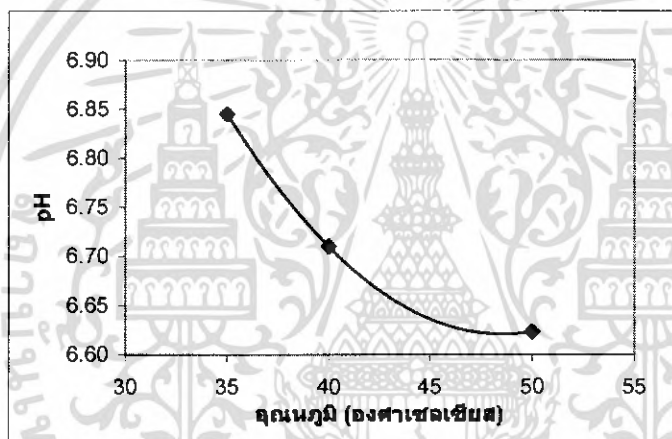


รูปที่ ค.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าPH ที่อุณหภูมิตั้งที่ 50 องศาเซลเซียส

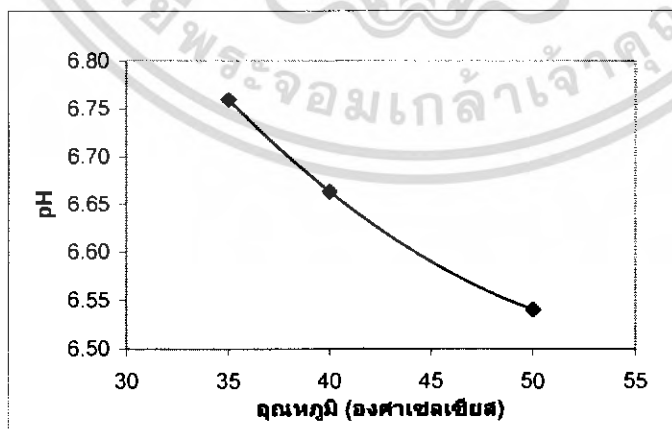
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าPH ที่ความดัน 1100

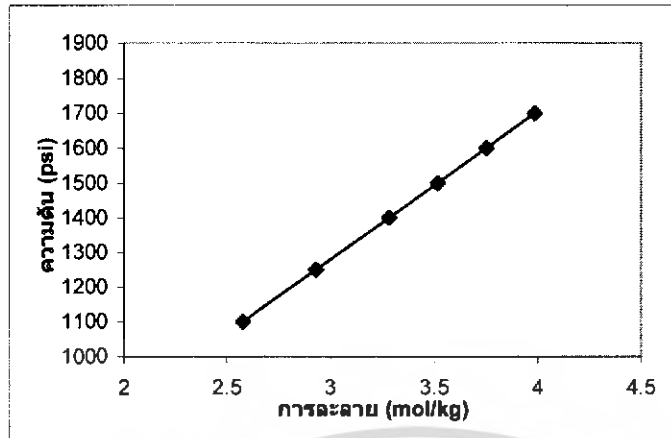


รูปที่ ค.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าPH ที่ความดัน 1250

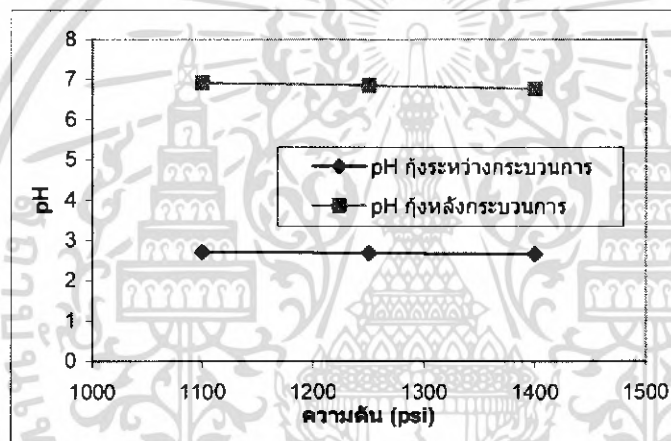


รูปที่ ค.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าPH ที่ความดัน 1400

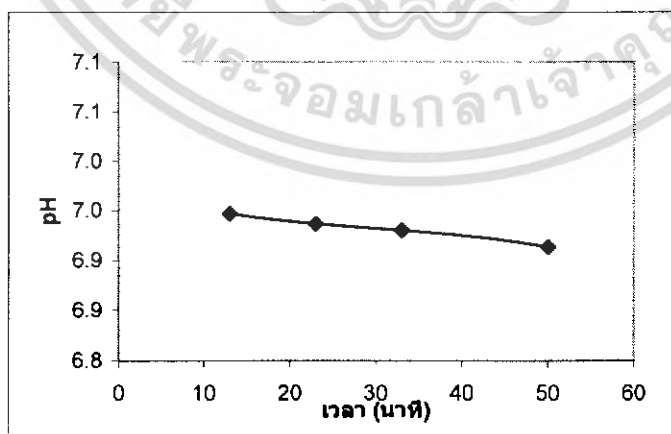
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายและความดัน

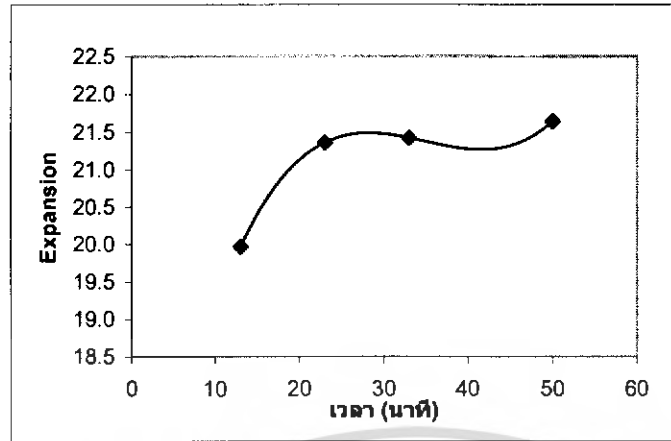


รูปที่ ค.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและpH ของกึ่งก่อนและหลังกระบวนการ



รูปที่ ค.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าPH ที่ความดัน 1100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าExpansionที่ความดัน 1100



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางผลการทดลอง

ภาคผนวก ง.1 ตารางแสดงการหาปริมาณน้ำในกึ่ง

| ตัวที่ | น้ำหนักฟอยด์ (g) | น้ำหนักกึ่งก่อนอบและฟอยด์ (g) | น้ำหนักกึ่ง (g) | น้ำหนักกึ่งหลังอบและฟอยด์ (g) | ปริมาณน้ำ (g) | ความชื้น | ความหนา กึ่ง (cm) |
|--------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------|----------|-------------------|
| 1 | 0.361 | 7.8496 | 7.489 | 1.93 | 5.920 | 79.048 | 0.53 |
| 2 | 0.345 | 8.2185 | 7.874 | 2.01 | 6.209 | 78.853 | 0.54 |
| 3 | 0.372 | 9.8415 | 9.469 | 2.17 | 7.672 | 81.016 | 0.60 |
| 4 | 0.342 | 6.5966 | 6.255 | 1.47 | 5.127 | 81.967 | 0.50 |
| 5 | 0.365 | 9.4596 | 9.095 | 2.19 | 7.270 | 79.933 | 0.57 |
| 6 | 0.373 | 8.7035 | 8.330 | 2.02 | 6.684 | 80.233 | 0.55 |
| 7 | 0.351 | 9.9032 | 9.552 | 2.45 | 7.453 | 78.029 | 0.60 |
| 8 | 0.281 | 7.7512 | 7.470 | 1.72 | 6.031 | 80.736 | 0.53 |
| 9 | 0.342 | 9.4832 | 9.142 | 2.08 | 7.403 | 80.984 | 0.57 |
| 10 | 0.640 | 8.739 | 8.099 | 2.21 | 6.529 | 80.615 | 0.54 |
| 11 | 0.359 | 7.986 | 7.627 | 1.76 | 6.226 | 81.628 | 0.53 |
| 12 | 0.366 | 8.0062 | 7.640 | 1.80 | 6.206 | 81.231 | 0.54 |
| 13 | 0.300 | 7.3613 | 7.062 | 1.60 | 5.761 | 81.586 | 0.51 |

ภาคผนวก ง.(1) ต่อ

| | | | | | | | |
|----|-------|--------|-------|------|-------|--------|------|
| 14 | 0.339 | 8.2317 | 7.893 | 1.90 | 6.332 | 80.217 | 0.53 |
| 15 | 0.314 | 6.5135 | 6.200 | 1.42 | 5.094 | 82.153 | 0.47 |
| 16 | 0.350 | 8.6835 | 8.334 | 1.93 | 6.754 | 81.037 | 0.55 |
| 17 | 0.335 | 7.7763 | 7.441 | 1.99 | 5.786 | 77.758 | 0.53 |
| 18 | 0.338 | 7.5785 | 7.240 | 1.84 | 5.739 | 79.257 | 0.52 |
| 19 | 0.329 | 7.9313 | 7.603 | 1.76 | 6.171 | 81.175 | 0.54 |
| 20 | 0.363 | 6.5134 | 6.151 | 1.46 | 5.053 | 82.162 | 0.46 |
| 21 | 0.360 | 8.1101 | 7.750 | 1.93 | 6.180 | 79.743 | 0.53 |
| 22 | 0.306 | 6.9764 | 6.671 | 1.58 | 5.396 | 80.899 | 0.49 |
| 23 | 0.330 | 9.0442 | 8.715 | 1.89 | 7.154 | 82.093 | 0.56 |
| 24 | 0.345 | 7.1863 | 6.842 | 1.69 | 5.496 | 80.335 | 0.50 |
| 25 | 0.377 | 8.1887 | 7.812 | 1.91 | 6.279 | 80.370 | 0.54 |
| 26 | 0.376 | 7.8001 | 7.424 | 1.79 | 6.010 | 80.954 | 0.53 |
| 27 | 0.382 | 7.8113 | 7.430 | 2.02 | 5.791 | 77.950 | 0.53 |
| 28 | 0.380 | 6.6802 | 6.301 | 1.56 | 5.120 | 81.265 | 0.47 |
| 29 | 0.415 | 8.8680 | 8.453 | 1.91 | 6.958 | 82.316 | 0.55 |
| 30 | 0.372 | 7.3401 | 6.968 | 1.71 | 5.630 | 80.798 | 0.51 |
| 31 | 0.361 | 8.1729 | 7.812 | 1.78 | 6.393 | 81.840 | 0.53 |
| 32 | 0.352 | 8.4173 | 8.065 | 1.99 | 6.427 | 79.691 | 0.55 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.(1) ต่อ

| | | | | | | | |
|----|-------|--------|-------|------|-------|--------|------|
| 33 | 0.347 | 7.9342 | 7.588 | 1.84 | 6.094 | 80.319 | 0.53 |
| 34 | 0.337 | 7.0041 | 6.667 | 1.68 | 5.324 | 79.861 | 0.49 |
| 35 | 0.331 | 7.0543 | 6.723 | 1.72 | 5.334 | 79.345 | 0.50 |
| 36 | 0.363 | 7.9125 | 7.550 | 1.83 | 6.083 | 80.564 | 0.53 |
| 37 | 0.382 | 9.2743 | 8.892 | 2.31 | 6.964 | 78.317 | 0.57 |
| 38 | 0.340 | 7.8405 | 7.501 | 1.72 | 6.121 | 81.596 | 0.53 |
| 39 | 0.354 | 9.475 | 9.121 | 2.04 | 7.435 | 81.516 | 0.58 |
| 40 | 0.332 | 6.2024 | 5.871 | 1.38 | 4.822 | 82.146 | 0.46 |
| 41 | 0.354 | 7.4063 | 7.053 | 1.68 | 5.726 | 81.194 | 0.52 |
| 42 | 0.350 | 6.6130 | 6.263 | 1.46 | 5.153 | 82.274 | 0.47 |
| 43 | 0.383 | 8.7259 | 8.343 | 2.05 | 6.676 | 80.015 | 0.55 |
| 44 | 0.332 | 5.6624 | 5.331 | 1.30 | 4.362 | 81.837 | 0.43 |
| 45 | 0.329 | 7.0935 | 6.765 | 1.45 | 5.644 | 83.422 | 0.50 |
| 46 | 0.428 | 6.8950 | 6.468 | 1.67 | 5.225 | 80.789 | 0.47 |
| 47 | 0.329 | 8.1785 | 7.850 | 1.75 | 6.429 | 81.896 | 0.54 |
| 48 | 0.375 | 8.2407 | 7.865 | 2.00 | 6.241 | 79.344 | 0.54 |
| 49 | 0.317 | 7.7199 | 7.403 | 1.78 | 5.940 | 80.241 | 0.53 |
| 50 | 0.300 | 8.7177 | 8.418 | 2.03 | 6.688 | 79.450 | 0.56 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.2 ตารางแสดงผลการทดลองสภาวะต่างๆ

| ความดัน (psi) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (Min) | รูปร่าง | น้ำหนัก (g) | ความหนาแน่น (Kg/m ³) | Expansion (%) | pH | ค่าเฉลี่ยของ Expansion (%) | ค่าเฉลี่ยของ pH |
|---------------|---------------|------------|---------|-------------|----------------------------------|---------------|------|----------------------------|-----------------|
| 1100 | 35 | 13 | 1 | 5.24 | 0.850 | 19.43 | 6.95 | 19.96 | 6.94 |
| | | | 2 | 5.40 | 0.844 | 20.00 | 6.94 | | |
| | | | 3 | 5.14 | 0.839 | 20.47 | 6.95 | | |
| 1100 | 35 | 23 | 1 | 5.74 | 0.828 | 21.51 | 6.94 | 21.35 | 6.93 |
| | | | 2 | 5.09 | 0.831 | 21.23 | 6.94 | | |
| | | | 3 | 5.42 | 0.830 | 21.32 | 6.93 | | |
| 1100 | 35 | 33 | 1 | 5.34 | 0.827 | 21.61 | 6.93 | 21.42 | 6.93 |
| | | | 2 | 5.14 | 0.831 | 21.23 | 6.93 | | |
| 1100 | 35 | 50 | 1 | 6.85 | 0.830 | 21.32 | 6.93 | 21.64 | 6.91 |
| | | | 2 | 6.93 | 0.823 | 21.99 | 6.92 | | |
| | | | 3 | 6.41 | 0.827 | 21.61 | 6.89 | | |
| 1100 | 40 | 50 | 1 | 6.38 | 0.848 | 19.62 | 6.83 | 20.53 | 6.77 |
| | | | 2 | 4.94 | 0.831 | 21.23 | 6.65 | | |
| | | | 3 | 5.78 | 0.836 | 20.75 | 6.85 | | |
| 1100 | 50 | 50 | 1 | 5.40 | 0.891 | 15.54 | 6.70 | 13.77 | 6.69 |
| | | | 2 | 5.88 | 0.934 | 11.46 | 6.72 | | |
| | | | 3 | 4.67 | 0.904 | 14.31 | 6.66 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.2 (ต่อ)

| | | | | | | | | | | | |
|------|----|----|---|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 1250 | 35 | 50 | 1 | 5.83 | 0.832 | 21.13 | 6.82 | 20.52 | 6.84 | | |
| | | | 2 | 6.06 | | | | | | 19.90 | 6.87 |
| 1250 | 40 | 50 | 1 | 4.90 | 0.840 | 20.37 | 6.72 | 19.81 | 6.71 | | |
| | | | 2 | 6.09 | | | | | | 19.62 | 6.75 |
| | | | 3 | 5.88 | | | | | | 19.43 | 6.66 |
| 1250 | 50 | 50 | 1 | 5.11 | 0.904 | 14.31 | 6.63 | 13.96 | 6.62 | | |
| | | | 2 | 3.74 | | | | | | 14.88 | 6.64 |
| | | | 3 | 4.90 | | | | | | 12.70 | 6.60 |
| 1400 | 35 | 50 | 1 | 5.07 | 0.848 | 19.62 | 6.76 | 21.10 | 6.76 | | |
| | | | 2 | 5.17 | | | | | | 21.32 | 6.80 |
| | | | 3 | 6.52 | | | | | | 22.36 | 6.72 |
| 1400 | 40 | 50 | 1 | 6.81 | 0.816 | 22.65 | 6.64 | 22.84 | 6.66 | | |
| | | | 2 | 7.04 | | | | | | 24.45 | 6.66 |
| | | | 3 | 6.03 | | | | | | 21.42 | 6.69 |
| 1400 | 50 | 50 | 1 | 5.57 | 0.890 | 15.63 | 6.55 | 14.40 | 6.54 | | |
| | | | 2 | 6.24 | | | | | | 12.98 | 6.51 |
| | | | 3 | 6.11 | | | | | | 14.59 | 6.56 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.3 ตารางแสดงค่าการละลาย

| ความดัน (psi) | ความดัน (bar) | ค่าการละลาย (mol/kg) | pH |
|---------------|---------------|----------------------|-------------|
| 1100 | 75.84233019 | 2.578639226 | 2.708662445 |
| 1250 | 86.18446613 | 2.930271848 | 2.680903781 |
| 1400 | 96.526660206 | 3.28190447 | 2.65629477 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้