

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์หลังการทำแห้งด้วย
คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

PHYSICAL CHANGE OF AGAR GELS AFTER
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE DRYING



T123108

ประภาพร เงินกระโทก
PRAPAPORN NGERNKRATHOK

พ.
13108
2555

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 123108
วัน,เดือน,ปี 18 ต.ค. 2555

b. 12255169
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555
KMITL-2012-EN-M-220-074

**PHYSICAL CHANGE OF AGAR GELS AFTER
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE DRYING**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-M-220-074**



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นแอการ์หลังการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
Thesis Title Physical Change of Agar Gels After Supercritical Carbon Dioxide Drying
นักศึกษา นางสาวประภาพร เงินกระโทก
รหัสประจำตัว 53611601
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-220-074

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิสร์	
ดร.นริศรา	ทองบุญชู	
ดร.จันทวัฒน์	ไชยชนะวงศ์	
ดร.ญาณิพร	พัชรวรโชติ	
ผศ.ดร.สุรัตน์	อารีรัตน์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.30-15.30 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์หลัง การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
นักศึกษา	นางสาวประภาพร เงินกระโทก
รหัสนักศึกษา	53611601
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

การทำแห้งโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เพื่อรักษาสภาพของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถรักษาสภาพของวัสดุได้ด้วยปริมาณการขึ้นราซึ่งเป็นผลมาจากความชื้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับอุตสาหกรรมการทำแห้งอาหารที่ต้องการอาหารเพื่อให้เก็บรักษาได้ง่ายและปราศจากความชื้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์ซึ่งเป็นต้นแบบของอาหารที่เตรียมจากผงเอการ์ โดยเมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต รวมทั้งมีการเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบการพาความร้อน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการอัตราการแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ซึ่งจากการทดลองพบว่า หลังผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ความดัน 100 120 และ 150 bar อุณหภูมิ 50 °C และเวลา 180 min อัตราการทำแห้งของวุ้นเนื่องมาจากการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์ มีอัตราการแห้งค่อนข้างสูงในช่วง 60 min จากนั้นจะค่อนข้างคงที่ โดยปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือ 0% เมื่อเวลาผ่านไป 180 min ซึ่งถือว่า กระบวนการทำแห้งเสร็จสิ้น แต่อัตราการแห้งจะช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบการพาความร้อน เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลอง แต่จะป้องกันการเสื่อมสภาพของวุ้นได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ ด้วยวิธีการสังเกตการหดตัวของวุ้นเทียบกับเวลาผ่านกล้องวิดีโอ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าในช่วง 0.2×10^{-9} - 1.6×10^{-9} m^2/s เมื่อนำตัวอย่างของวุ้นเอการ์วิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า โครงสร้างภายในของวุ้นเอการ์หลังทำแห้งมีรูพรุนแบบเซลล์ปิดที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect Ratio) อยู่ในช่วง 1.8-2.7 จากโครงสร้างของวุ้นเอการ์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุนส่งผลให้วุ้นเอการ์มีน้ำหนักเบา และเก็บรักษาได้ง่าย ซึ่งจะเป็นต้นแบบของการถนอมอาหารที่มีประสิทธิภาพต่อไป

Thesis Title	Physical Change of Agar Gels after Supercritical Carbon Dioxide Drying
Student	Ms. Prapaporn Ngernkrathok
Student ID.	53611601
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

ABSTRACT

The supercritical carbon dioxide (scCO₂) drying has been a useful theory of treatment in the agricultural products, being more effectively to reduce mold and maintain structure of substances, especially in food industry. This research is studied on physical change of Agar gels that is as representative of food (prepared from Agar powder). After supercritical Carbon dioxide drying and comparison of convectional drying, it was found that the characteristics of drying depend on three key parameters: pressure, temperature and drying time. From the experimental, Agar gel samples were dried under pressurized scCO₂ at 100 120 and 150 bar and 50 °C. Drying rate was fast during first 60 minutes before remaining constant. The residual moisture content of after drying for 180 minutes was about of 0%, the drying would be finished. Drying rate in the pressure of scCO₂ was lower than convectional drying, because of limitation of equipment but the efficiency for Agar structure prevention was better. And also diffusion coefficient of carbon dioxide in Agar gel was determined by observing shrinkage of the dried gel with drying time. The range of diffusion coefficient is range of 0.2×10^{-9} - 1.6×10^{-9} m²/s. The morphological structure of dried Agar gel characterized by SEM in reasonable condition is regularly closed cell. The aspect ratio of dried Agar gel was within 1.8-2.7. As the advantage light weight, the dried Agar gel is actually easier to preserve, which can be applied for dried food in voluminous industries and also to be a new technology for drying.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำผลงานวิจัยเรื่องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี ทั้งนี้ได้รับการเอื้อเฟื้อและสนับสนุนทางด้านวิชาการ วัสดุ และเทคนิคการปฏิบัติการต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาและเป็นผู้ให้คำแนะนำที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งให้คำปรึกษาด้านวิชาการ เสนอแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และตรวจแก้ไขปัญหา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้ง คณะกรรมการที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งเพื่อมาเป็นกรรมการสอบปริญญาโทในครั้งนี

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่ให้วุ้นเอการ์เพื่อใช้ทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณปรางทิพย์ คุณพิสนต์ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับการอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ รวมทั้งคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการ 607 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดามารดา และคนในครอบครัว ที่ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือและการสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ประภาพร เงินกระโทก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 แนวคิดของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อาหาร.....	4
2.1.1 ความชื้น.....	4
2.1.2 ความร้อนและออกซิเจน.....	5
2.1.3 จุลินทรีย์.....	5
2.2 การทำแห้งอาหาร.....	6
2.2.1 การทำแห้งด้วยการพาความร้อน.....	6
2.2.1.1 การทำแห้งแบบพาความร้อนของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรูพรุน.....	8
2.2.2 การทำแห้งแบบแช่แข็ง.....	10
2.2.3 การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	13
2.2.4 ผลกระทบของการทำแห้งกับอาหาร.....	15
2.2.5 การดูดคืนน้ำ (Rehydration).....	17
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเอการ์.....	17
2.3.1 สารประกอบทางเคมีของวุ้น.....	18
2.3.2 กระบวนการสกัดวุ้นจากสาหร่าย.....	19
2.3.3 การนำวุ้นเอการ์ไปประยุกต์ใช้งาน.....	22
2.3.3.1 อุตสาหกรรมอาหาร (Food Industry).....	22
2.3.3.2 อุตสาหกรรมขนมหวาน (Dessert Industry).....	22
2.3.3.3 อุตสาหกรรมนม (Milk and Related Industry).....	22
2.3.3.4 อุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ (Pharmaceutical Industry).....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.5 อุตสาหกรรมทางจุลชีววิทยา (Microbiological Industry) และ อุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Tissue Culture Industry)	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.2 การเตรียมวุ้นเอการ์	28
3.3 การทำแห้งวุ้นเอการ์.....	28
3.3.1 การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	28
3.3.2 การทำแห้งด้วยการพาความร้อน	30
3.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์.....	30
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค	32
3.6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR	32
3.7 การศึกษาการบวมตัวในสารละลาย	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	34
4.1 การกำหนดสภาวะในการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	34
4.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะจำเพาะของการทำแห้งด้วยการพาความร้อน และการทำ แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	37
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และอัตราการทำแห้งเทียบกับเวลา	37
4.3 การศึกษาเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยการพา ความร้อน และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	40
4.3.1 การเปรียบเทียบลักษณะวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยการพาความ ร้อน และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	40
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะวุ้นเอการ์ทั้งแบบทรงกระบอก และทรงลูกบาศก์ ด้วยการทำแห้งแบบพาความร้อน	41
4.3.3 การศึกษาเปลี่ยนแปลงลักษณะภายในวุ้นเอการ์ด้วยเทคนิค SEM หลังผ่าน การทำแห้งวุ้นเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	42
4.4 การศึกษาเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อน และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	45
4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในวุ้นเอการ์ด้วยเทคนิค FTIR.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ในระบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	48
4.4.3 การศึกษาการบวมตัวของวุ้นเอการ์ในสารละลาย	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 การกำหนดสภาวะในการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	52
5.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะจำเพาะของการทำแห้งด้วยการพาความร้อน และ การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	52
5.3 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยภาพถ่าย SEM	53
5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในวุ้นเอการ์ด้วยเทคนิค FTIR	53
5.5 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ในระบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	54
5.6 การศึกษาการบวมตัวในสารละลาย	54
5.7 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก ก ข้อมูลเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	57
ภาคผนวก ข ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	80
ภาคผนวก ค การคำนวณ	93
ประวัติผู้ทำการวิจัย.....	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่	
2.1 การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง	7
2.2 สภาวะเหนือวิกฤตของสารบางชนิด	13
2.3 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพบางประการของสารสามสถานะคือ แก๊ส ของไหล เหนือวิกฤต และของเหลว	15
2.4 ปริมาณความชื้นก่อนและหลังการทำแห้ง	16
2.5 สัดส่วนโดยประมาณสำหรับการอบแห้ง การหดตัวและการคืนตัวของผักบางชนิด	16
4.1 ปริมาณความชื้นในแต่ละสภาวะ	36
4.2 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของวุ้นเอการ์ในสารละลายประเภทต่างๆ (เทียบจากมวลเริ่มต้น)	51



สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่	
ก-1 ค่า IR Absorptions for Representative Functional Groups	64
ข-1 ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวุ้นเอการ์ และการทำแห้งของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สภาวะอุณหภูมิ 50 °C และความดัน 150 bar	81
ข-2 ค่าร้อยละของความชื้นของวุ้นเอการ์ที่หายไป โดยผ่านการทำให้แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เวลาใดๆ	83
ข-3 ค่าอัตราการทำให้แห้งโดยผ่านการทำให้แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เวลาใดๆ	84
ข-4 ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวุ้นเอการ์ และการทำให้แห้งของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการพาความร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ 50 °C.....	85
ข-5 ค่าร้อยละของความชื้นของวุ้นเอการ์ที่หายไปโดยการทำให้แห้งแบบการพาความร้อนที่เวลาใด... 86	
ข-6 ค่าอัตราการทำให้แห้งของวุ้นเอการ์โดยการทำให้แห้งแบบการพาความร้อนที่เวลาใดๆ.....	87
ข-7 ค่าการละลายที่อุณหภูมิและความดันใดๆ	88
ข-8 ค่า Aspect Ratio ของรูพรุนวุ้นเอการ์อบแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	89
ข-9 ค่าตัวแปรในสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในวุ้นเอการ์ที่ความดัน 100 bar..	90
ข-10 ค่าตัวแปรในสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในวุ้นเอการ์ที่ความดัน 120 bar.	91
ข-11 ค่าตัวแปรในสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในวุ้นเอการ์ที่ความดัน 150 bar.	92

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบคทีเรีย (Bacteria)	5
2.2 รา (Mold)	5
2.3 เฟสไดอะแกรมของการทำแห้ง	6
2.4 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	8
2.5 ปรากฏการณ์ของอัตราการทำแห้ง	9
2.6 แผนภูมิสถานะของสารบริสุทธิ์	10
2.7 กลไกการทำแห้งแบบแช่แข็ง	12
2.8 ความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์	14
2.9 การเปลี่ยนแปลงของเซลล์หลังการทำแห้ง	16
2.10 ลักษณะสาหร่ายแดง Gracilaria ที่ใช้ผลิตผงเอการ์	18
2.11 ผงวุ้นบริสุทธิ์มีความขาวสะอาดเป็นเนื้อเดียวกัน ปรากฏจากสิ่งเจือปน	20
2.12 กระบวนการสกัดวุ้น 2 วิธีที่ใช้กับสาหร่ายในประเทศไทย	20
2.13 วุ้นผสมอาหารเพื่อใช้เป็นสารตัวกลางในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ	23
2.14 แผนภาพการทดลองการอบแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตร่วมกับเอทานอล	24
2.15 กราฟค่า Enhancement factor ($y^{\text{sat}} \rho_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันบางช่วง	25
3.1 ชุดอุปกรณ์การทำแห้งวุ้นเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	29
3.2 High Pressure Pump ของ บริษัท ISCO	29
3.3 เตาอบของ บริษัท Carbolite	30
3.4 ชุดอุปกรณ์ในการศึกษาการหดตัวของวุ้นเอการ์	31
3.5 ทิศทางการหดตัวและการแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์	31
3.6 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)	32

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตตามงานวิจัยของ M. van der Kraan.....	35
4.2 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจากการทดลองของ Bamberger และคณะ	36
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา	38
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาโดยมีการปรับค่าอัตราส่วนปริมาตร (VR) ของวุ้นเอการ์เทียบกับขนาดถังปฏิกรณ์	39
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งเทียบกับเวลา.....	40
4.6 การเปรียบเทียบลักษณะของวุ้นเอการ์ก่อนการทำแห้งและภายหลังการทำแห้ง.....	41
4.7 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงวุ้นเอการ์ที่กำลังขยาย 100 เท่า 2 แบบที่ผ่านการทำแห้งด้วยการพาคความร้อน	42
4.8 ภาพถ่าย SEM ของวุ้นเอการ์ภายหลังการทำแห้ง	43
4.9 ค่า Aspect Ratio ของการทำแห้งวุ้นเอการ์ที่เวลาใดๆ.....	45
4.10 กราฟ FTIR ของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและทำแห้งด้วยการพาคความร้อนเทียบกับวุ้นเอการ์ที่ยังไม่ผ่านการทำแห้ง	47
4.11 ร้อยละการหดตัวของวุ้นเอการ์เทียบกับเวลา	49
4.12 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์.....	49
4.13 การเปรียบเทียบลักษณะของวุ้นเอการ์.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-1 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	58
ก-2 แผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer.....	59
ก-3 รูปแบบการสั่นของโมเลกุลในลักษณะต่างๆ	61
ก-4 ตัวอย่างของกราฟอินฟราเรดสเปกตรัม (เบนซิลแอลกอฮอล์)	62
ก-5 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด	62
ก-6 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	67
ก-7 แลปสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	68
ก-8 การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ	68
ก-9 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดตรวจสอบสารด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	69
ก-10 แผนผังส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยว	70
ก-11 แผนผังส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer แบบลำแสงคู่	71
ก-12 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)	72
ก-13 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง	73
ก-14 แบบจำลองของเครื่อง Scanning Electron Microscope	74
ก-15 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่อง SEM	75
ก-16 สัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง	76
ก-17 รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic X-ray)	78
ค-1 Calibration Curve ของสารละลายเอการีนโซเดียมไฮดรอกไซด์	97

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

ตัวอักษร	ความหมาย (หน่วย)
$scCO_2$	คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
$NaOH$	สารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์
W_w	มวลของวัสดุขึ้น (g)
W_d	มวลของวัสดุแห้ง (g)
D	ค่าคงที่อัตราการตายหรือการตายด้วยอัตราเลขล็อก (Logarithmic Order of Death)
TDT	กราฟเวลาที่ทำให้ลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อน (Thermal Death Time Curve)
z	ความต้านทานความร้อนของเอนไซม์ จุลินทรีย์หรือองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร
VR	อัตราส่วนปริมาตรของวุ้นเอการ์ต่อปริมาตรถัง, Volume Ratio
y^{sat}	องค์ประกอบในส่วนของเฟสไอที่สภาวะอิ่มตัว
P_{CO_2}	ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/m^3)
$P_{CO_2}^{max}$	ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงที่สุด (kg/m^3)
$P_{H_2O}^{sat}$	ความหนาแน่นของน้ำที่สภาวะอิ่มตัว (kg/m^3)
κ	แคลปาเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับความดันและอุณหภูมิของระบบ
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
b_1	Van der Waals volume
M_{CO_2}	น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์
M_{H_2O}	น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ
Γ	แกรมม่า
D_v^{eff}	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)
L	ความหนาของแผ่นโฟมกล้วย (m)
M	ความชื้นของแผ่นโฟมกล้วย, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง (kg Water/kg Agar)
x	พิกัดตามทิศทางการแพร่ของน้ำ
t	เวลา (s)
m_1	ฟลักซ์การแพร่ของน้ำ ($kg/m^2 \cdot s$)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (m^2/s)
ρ_l	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
x_i	ความหนาของชั้นตัวอย่าง (m)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันกระบวนการทำแห้งอาหารได้เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมอาหารเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอาหารจำพวกผักผลไม้ตามฤดูกาล ซึ่งจะมีผลผลิตออกมาสู่ท้องตลาดเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษากระบวนการทำแห้งอาหาร ที่มีด้วยกันหลายวิธี ที่ได้แก่ การทำแห้งด้วยการพาความร้อนปกติ การทำแห้งแบบแช่แข็ง หรือการทำแห้งวิธีใหม่โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวดูดซับน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในอาหาร

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ของเนื้ออาหารโดยการจำลองใช้วุ้นเอการ์เพื่อเป็นตัวแทนของอาหาร ซึ่งวุ้นเอการ์เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ผลิตได้จากสาหร่ายสีแดง โดยเมื่อทำการผสมผงวุ้นเอการ์กับตัวทำละลายและให้อุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแห โดยในงานวิจัยของ Z. K. Brown และคณะ [1] ได้ทำการอบแห้งวุ้นเอการ์ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตร่วมกับเอทานอลซึ่งเป็นตัวร่วมของการทำแห้ง ภายหลังจากการทำแห้งทำให้ได้วุ้นเอการ์ที่หดตัว น้ำหนักเบา และเก็บรักษาง่าย สำหรับการทำให้แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นการทำแห้งวิธีหนึ่งนอกเหนือจากการทำแห้งด้วยอากาศปกติซึ่งจะมุ่งเน้นการรักษาโครงสร้างระดับไมโครเมตรให้คงรูปมากที่สุด การทำแห้งจะใช้ได้กับทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ซึ่งต้องสามารถรักษาโครงสร้างตาข่ายของรูพรุนไว้ให้ได้ การทำแห้งเหนือวิกฤตเป็นการนำน้ำออกจากโครงสร้างโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวดูดซับ โดยสารชนิดนี้มีสมบัติทั่วไปอยู่ระหว่างของเหลวและก๊าซ ทำให้มีคุณสมบัติ เป็นก๊าซที่มีความหนาแน่นสูง (Dense Gas) จึงมีความสามารถในการละลาย (Solubility) และการสกัด (Extraction) ใกล้เคียงกับของเหลว และมีความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ใกล้เคียงกับสถานะก๊าซ

นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์มีจุดวิกฤตต่ำเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น คือ ความดัน 72.9 atm และอุณหภูมิ 31 °C [2] ทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบมาเฉพาะรวมทั้งใช้สภาวะในการทดลองไม่สูงมาก และยังสามารถแยกออกจากสารตัวอย่างได้ง่ายเพียงลดความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะเปลี่ยนเฟสเป็นก๊าซและแพร่สู่อากาศโดยธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเลือกคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารทำแห้ง และทำให้เกิดฟองในเนื้ออาหารทำให้อาหารมีน้ำหนักเบา อีกทั้งการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารทำแห้งนี้เป็นการนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ก่อนปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ

สำหรับการศึกษาเรื่องการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในเอการ์ที่ทำให้เกิดโครงสร้างแบบรูพรุนในวุ้นเอการ์ N. Wang และ J. G. Brennan [3] รวมทั้ง รติยา และคณะ [4] ได้แสดงให้เห็นถึงการหดตัวของโฟมกล้วยที่ผ่านการทำแห้ง ในสภาวะอุณหภูมิ 60-80 °C นอกจากนี้ได้มีการประยุกต์ใช้สมการการแพร่ของ Fick (Fick's Law) ทำให้สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในโฟมผลไม้ เช่น กล้วย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้สมการตามงานวิจัยของ N. Wang และ J. G. Brennan เพื่อศึกษาการหดตัวและการแพร่ในวุ้นเอการ์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษากระบวนการทำแห้งวุ้นเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สภาวะต่างๆ และการทำแห้งด้วยการพาความร้อน เพื่อหาปริมาณความชื้นตกค้าง และอัตราการทำแห้ง

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และการทำแห้งด้วยการพาความร้อน

1.2.3 ศึกษาพฤติกรรมการแพร่และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในวุ้นเอการ์

1.3 แนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษากระบวนการทำแห้งรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สภาวะต่างๆ และการทำแห้งด้วยการพาความร้อน โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การทำแห้งวุ้นเอการ์ โดยเริ่มต้นจากการเตรียมวุ้นเอการ์ทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ความเข้มข้น 10% โดยมวลส่วนปริมาตร จากนั้นนำไปทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่ความดัน 100 120 และ 150 bar อุณหภูมิ 50 °C โดยมีการชั่งน้ำหนักก่อนทำแห้งเทียบกับน้ำหนักหลังทำแห้งเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นตกค้าง (%Moisture Content) และอัตราการทำแห้งวุ้นเอการ์ (Drying Rate)

ส่วนที่ 2 ทำการเปรียบเทียบวุ้นเอการ์ 2 แบบ คือ ทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ด้วยการทำแห้งแบบพาความร้อนภายในเตาอบที่อุณหภูมิ 50 °C โดยมีการสังเกตลักษณะการหดตัวที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษานัยของการหดตัว

ส่วนที่ 3 ศึกษาพฤติกรรมการแพร่และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในวุ้นเอการ์ โดยใช้กล้องวิดีโอจับภาพขณะเกิดการหดตัวของวุ้นเอการ์ขณะผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิ 50 °C ความดันที่ 100 120 และ 150 bar จากนั้นจะทำการดัดแปลงสมการของ Fick ที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการหดตัว เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในวุ้นเอการ์

1.4 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

1.4.1 การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะมีการให้อุณหภูมิที่คงที่ที่ 50 °C และมีการปรับค่าความดันในช่วง 100-150 bar

1.4.2 การทำแห้งด้วยการพาความร้อน จะมีการให้อุณหภูมิที่คงที่ที่ 50 °C

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 สามารถหาปริมาณความชื้นตกค้าง และอัตราการทำแห้งของกระบวนการทำแห้งวันเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และการทำแห้งด้วยการพาความร้อนได้

1.5.2 เข้าใจการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวันเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สภาวะต่างๆ และการทำแห้งด้วยการพาความร้อน

1.5.3 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในวันเอการ์ได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อาหาร

อาหาร คือ สารที่ใช้บริโภคเพื่อเสริมโภชนาการให้แก่ร่างกาย อาหารมักมาจากพืชหรือสัตว์ และมีสารอาหารสำคัญหลายชนิด เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน วิตามิน หรือแร่ธาตุ สิ่งมีชีวิตย่อยๆ ที่ดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์เพื่อนำไปสร้างพลังงาน คงชีวิต และกระตุ้นการเจริญเติบโต

อาหารทุกชนิดจะอายุการเก็บรักษาที่ไม่คงทน ซึ่งจะมีการเสียสภาพหรือการเน่าเสียเนื่องจากความชื้น และสภาวะอากาศที่จะช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่อยู่ในเนื้ออาหาร ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการทำแห้ง เพื่อเป็นการดึงความชื้นออกจากเนื้ออาหาร อาหารก็จะเน่าเสียช้าลงหรือไม่เน่าเสีย ปัจจัยที่มีผลต่อการเน่าเสียของอาหาร จะประกอบไปด้วย ความชื้น ความร้อน และจุลินทรีย์

2.1.1 ความชื้น [5]

ความชื้นหรือน้ำจะเป็นสารที่ประกอบอยู่ในเนื้ออาหารที่ประมาณ 7-95 % และถือว่าเป็นส่วนประกอบหลักของเนื้ออาหาร โดยน้ำจะแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของเนื้ออาหารโดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะโคเวเลนต์ ทำให้โมเลกุลของน้ำยึดเกาะอยู่ในโครงสร้างได้ และเมื่อโมเลกุลของน้ำมีการเกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของสารอื่น เช่น อากาศที่มีออกซิเจนอยู่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของน้ำไป โดยจะสามารถวัดระดับการเกาะเกี่ยวกับสารอื่นของโมเลกุลน้ำได้หลายวิธี เช่น 1) การวัดปริมาณน้ำไม่แข็งตัว (Unfreezeable Water) 2) นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) 3) การวัดคุณสมบัติต้านไดอิเล็กตริกของอาหาร 4) การวัดความดันไอ การวัดค่าต่างๆเหล่านี้จะทำให้ทราบว่า เมื่อความชื้นในวัตถุดิบอาหารมีการสัมผัสกับสารตัวอื่นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับโครงสร้างทางเคมีของเนื้ออาหารอย่างไร หรือการแข็งตัวของเนื้ออาหารภายในสภาวะต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะใด

โดยทั่วไปแล้วภายในอาหารอาจสารหลายชนิด เช่น สารคอลลอยด์ ซึ่งจะทำให้การแข็งตัวของไอน้ำเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้แล้วน้ำและสารคอลลอยด์ยังสามารถทำปฏิกิริยากับเกลือบางประเภท เช่น NaOH หรือ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำอิสระในเนื้ออาหารมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นการทราบปริมาณน้ำจึงมีความสำคัญในการคาดคะเนว่า น้ำจะเกิดการเสื่อมสภาพโดยจุลินทรีย์หรือไม่ โดยการวัดปริมาณน้ำอิสระมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วัดจากความดันไอ เนื่องจากน้ำอิสระมีความสัมพันธ์กับระดับความดันไอตามกฎของ ราวูล (Raoult's Law)

2.1.2 ความร้อนและออกซิเจน [6]

อุณหภูมิหรือความร้อนจะมีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เช่นเดียวกับน้ำ โดยสังเกตได้จากต้องมีการนำอาหารไปแช่แข็งในตู้เย็น เนื่องจากว่าจุลินทรีย์จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C แต่ถ้ามีการตั้งอาหารทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25°C จะพบว่าอาหารจะเกิดการเน่าเสียได้ง่ายเนื่องจากว่ากระบวนการเจริญเติบโตหรือการแบ่งเซลล์ของจุลินทรีย์จะต้องมีสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ $20-45^{\circ}\text{C}$ แต่บางชนิดก็สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $0-15^{\circ}\text{C}$

แก๊สออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะเจริญเติบโตได้ในสภาพที่มีแก๊สออกซิเจนน้อย หรือบางชนิดเจริญเติบโตได้ในสภาพที่มีแก๊สออกซิเจนมาก เป็นต้น

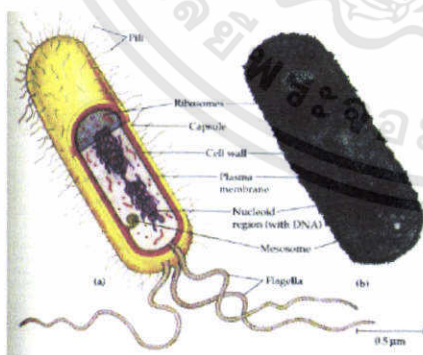
2.1.3 จุลินทรีย์ [6]

จุลินทรีย์เป็นสัตว์ที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กมาก โดยสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ได้แก่ ไวรัส (Virus) แบคทีเรีย (Bacteria) สาหร่าย (Algae) โพรทิสต์ (Protozoa) และรา (Mold) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีเพียง 2 ประเภทที่มีจะเกิดหรือเจริญเติบโตได้ดีในอาหาร คือ แบคทีเรียและรา

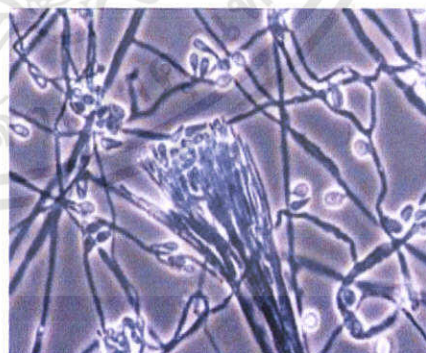
แบคทีเรีย (Bacteria) เป็นสิ่งมีชีวิตโพรคาริโอต ที่ประกอบด้วยออร์แกเนลล์ที่ไม่มีเยื่อหุ้ม ไม่มีนิวเคลียส และไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส แต่มีสารพันธุกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.1

รา (Mold) เป็นยูคาริโอต ที่มีเซลล์ขนาดใหญ่มีโครโมโซมจำนวนมากหลายชุดบรรจุอยู่ในนิวเคลียสอยู่รวมกับเป็นโคลิน โดยไม่มีคลอโรพิลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เมื่อจุลินทรีย์ได้รับอาหารและความชื้น รวมทั้งสภาวะอุณหภูมิและอากาศที่เหมาะสมจะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถเจริญเติบโต และแพร่ขยายเซลล์ในเนื้ออาหาร ทำให้อาหารเกิดการเน่าเสีย



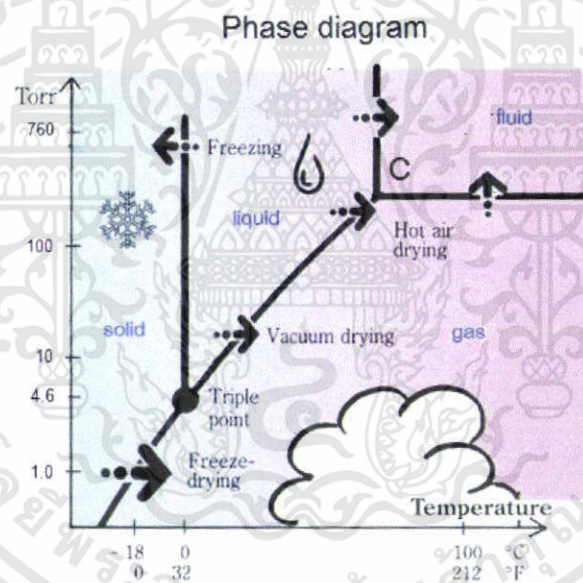
รูปที่ 2.1 แบคทีเรีย (Bacteria) [6]



รูปที่ 2.2 รา (Mold) [6]

2.2 การทำแห้งอาหาร [7]

การทำแห้งอาหาร เป็นการนำความชื้นออกจากอาหารโดยใช้ความร้อน ซึ่งสามารถใช้กับอาหารหลายประเภท ทั้งผักและผลไม้ เช่น กัวยาว มะละกอก กุ้ง เป็นต้น ซึ่งการอบแห้งนี้จะทำให้สูญเสียวิตามินซี วิตามินเอ และน้ำตาล ที่หายไปพร้อมกับความชื้น และภายในอาหารแห้งจะเหลือเพียงเส้นใยอาหารที่จะช่วยด้านระบบขับถ่าย และจะลดการเกิดการสะสมไขมันในร่างกายด้วย ซึ่งการทำแห้งมีอยู่หลายวิธีดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยวิธีการทำแห้งแบบดั้งเดิมโดยการใช้ความร้อนในการทำแห้งน้ำหรือความชื้นให้เกิดการระเหิดโดยการเพิ่มอุณหภูมิ คือ การทำแห้งแบบพาความร้อน (Convictional Drying) สำหรับการทำให้แห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying) ต้องทำการเปลี่ยนเฟสของน้ำให้กลายเป็นของแข็งโดยการลดอุณหภูมิ จากนั้นทำการระเหิดให้กลายเป็นไอโดยลดความดัน ความชื้นก็จะถูกนำออก และการทำแห้งเทคโนโลยีใหม่ คือ การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide Drying) ที่ต้องทำการเพิ่มอุณหภูมิและความดันไปที่จุด C หรือ Critical Point จากนั้นสารจะเปลี่ยนสถานะเป็นของไหลเหนือวิกฤต และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำแห้งได้



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของการทำแห้ง [7]

2.2.1 การทำแห้งด้วยการพาความร้อน

การทำแห้งด้วยวิธีนี้จะเหมาะกับอาหารที่มีความชื้นเป็นของเหลว โดยจะใช้กระแสความร้อนเป็นตัวพาความชื้นออกจากเนื้ออาหาร ซึ่งการทำแห้งในลักษณะนี้ จะมีหลายวิธี คือ

1. ใช้กระแสความร้อนสัมผัสกับอาหาร เช่น ตู้อบแสงอาทิตย์ ตู้อบลมร้อน (Hot Air Dryer)
2. พ่นอาหารที่เป็นของเหลวไปในลมร้อน เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer)

3. ให้อาหารชั้นสัมผัสผิวหน้าของลูกกลิ้งร้อน เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum Dryer หรือ Roller Dryer)

4. กำจัดความชื้นในอาหารในสภาพที่ทำน้ำให้เป็นน้ำแข็งแล้วกลายเป็นไอในห้องสุญญากาศ ซึ่งเป็นการทำให้อาหารแห้งแบบเยือกแข็ง โดยเครื่องอบแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze Dryer)

5. ลดความชื้นในอาหารโดยใช้ไมโครเวฟ (Microwave) [8]

กลไกของการทำแห้งด้วยวิธีการพาความร้อนจะมีอยู่ 3 กลไกดังนี้

1. การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งจะเกิดกับอาหารที่มีลักษณะเป็นของแข็ง

2. การพาความร้อน (Convection) จะเกิดกับอาหารที่เป็นของเหลว โดยกระแสความร้อนจะถูกพาผ่านช่องว่างที่เป็นอากาศหรือแก๊สจากของเหลวชนิดหนึ่งไปยังของเหลวอีกชนิดหนึ่ง

3. การแผ่รังสี (Emission) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนไปยังอาหารซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีอบอาหารในสุญญากาศ และการอบแห้งแบบเยือกแข็งในทางปฏิบัติ การถ่ายเทความร้อนในการอบแห้งอาจเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 2 หรือ 3 แบบก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของอาหารที่นำไปอบแห้ง การเคลื่อนที่ของน้ำในอาหาร น้ำ หรือความชื้นจะเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของอาหารเมื่อได้รับความร้อนในระหว่างการอบ [8]

กล่าวสรุป คือ ความร้อนจากแหล่งกำเนิด จะส่งผ่านความร้อนโดยวิธีการพาและการแผ่รังสีไปยังผิวหน้าของอาหาร จากนั้นความร้อนที่ผิวของอาหารจะถูกส่งผ่าน โดยการนำความร้อนเข้าไปยังน้ำภายในอาหารแล้วระเหยไปโดยมีลมเป่าเป็นตัวพาไอร้อนขึ้น ในการสร้างเครื่องอบแห้งมักอาศัยหลักของการส่งผ่านความร้อนแบบการนำแบบการพาความร้อนเป็นสำคัญ ปัจจุบันมีการสร้างเครื่องอบแห้งแบบการแผ่รังสีความร้อนขึ้นมา เนื่องจากอัตราการอบแห้งสูงมาก เครื่องอบแห้งอาจแบ่งออกตามหลักของการส่งผ่านความร้อนได้ 5 พวกใหญ่ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ที่แบ่งเป็นการทำแห้งแบบการพาความร้อน การนำความร้อน การแผ่รังสีความร้อน การให้ความร้อนด้วยแหล่งกำเนิดภายใน และแบบผสม โดยแต่ละวิธีมีอุปกรณ์ทำแห้งที่ต่างกัน เช่น การทำแห้งแบบพาความร้อน ได้แก่ Spray Drier ที่มีการพ่นสารเหลวให้กลายเป็นละออง พร้อมกับให้ความร้อน หรือ Conveyor Drier ที่มีสายพานลำเลียงผ่านความร้อน ส่วนให้ความร้อนด้วยแหล่งกำเนิดภายใน จะใช้เตาอบแบบต่อเนื่องให้ความร้อนจนเกิดการทำให้แห้ง เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง [9]

Mode of Heat Transfer	Batch Operation	Continuous Operation
Convection	Kiln drier Cabinet drier	Tunnel drier Conveyor drier Spray drier Fluidized-bed drier
Conduction	Heat-shelf drier Agitated pan driers	Drum drier

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง [9]

Mode of Heat Transfer	Batch Operation	Continuous Operation
Radiation	Infrared heated Shelf drier	Infrared heated belt drier
Internal Generation of heat	Microwave oven	Dielectric Continuous oven
Mixed	Shelf	Microwave tunnel Rotary drier

โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุอบแห้งมักจะถูกให้ค่านิยามในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อมวลทั้งหมด นั่นคือ ใช้มวลของวัสดุขึ้น W_w เป็นมาตรฐานของการคำนวณความชื้น แต่ในกระบวนการอบแห้งมวลของวัสดุขึ้นจะเปลี่ยนค่าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกกว่าที่จะใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานในการคำนวณความชื้น W_d และมวลของวัสดุขึ้นมีความสัมพันธ์กับมวลของวัสดุแห้งดังต่อไปนี้

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (2.1)$$

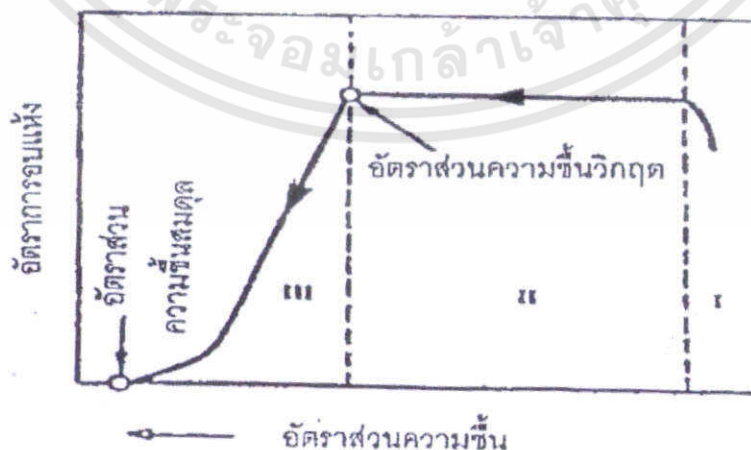
$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (2.2)$$

W_w คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg Water/kg)

W_d คือ มวลวัสดุขึ้น (kg Water/kg)

2.2.1.1 การทำแห้งแบบพาความร้อนของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรูพรุน [10]

วัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่ จะมีความชื้นสะสมอยู่ภายในโครงสร้างของรูพรุน โดยลักษณะการอบแห้งจะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการอบแห้งที่คงที่ และช่วงของการอบแห้งที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นตามการเปลี่ยนอัตราส่วนความชื้น



รูปที่ 2.4 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง [10]

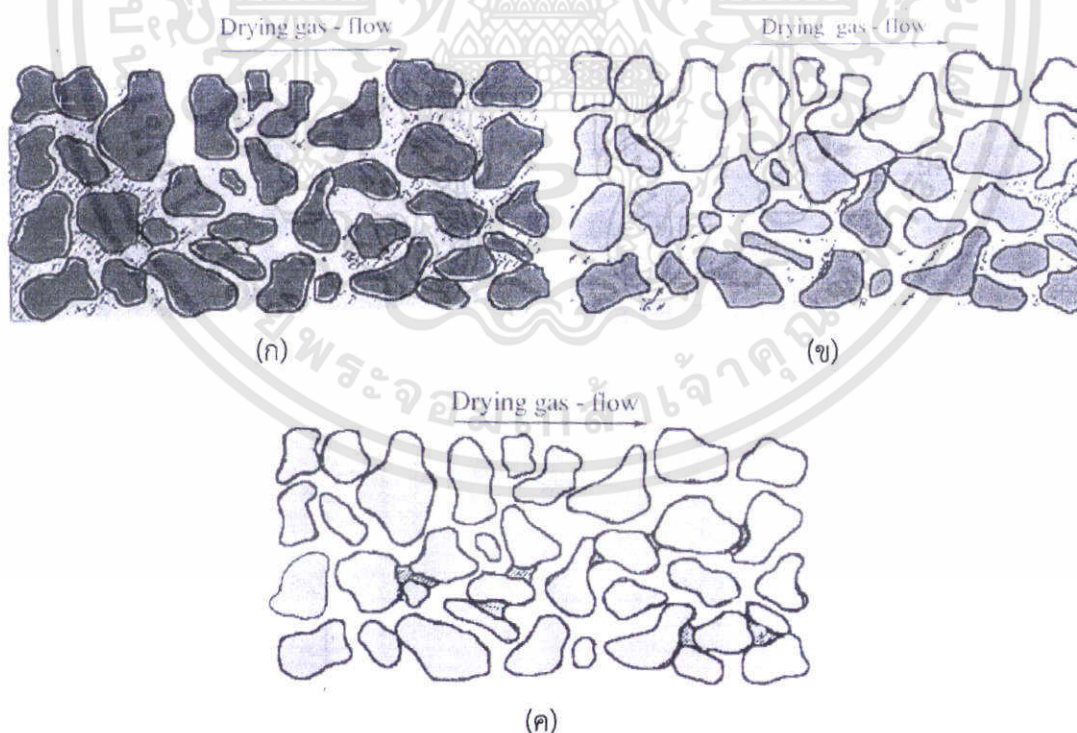
1. อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate)

ช่วงของการอบแห้งที่คงที่ คือ ช่วง II ของรูป 2.4 ในช่วงนี้ อัตราการระเหยของไอน้ำที่ออกจากผิวหน้าเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัสดุพรมที่มาเติมเต็มวัสดุที่ผิวหน้า ดังนั้นน้ำจะมีการปกคลุมที่ผิวหน้าตลอดเวลาส่งผลให้อัตราการทำแห้งในช่วง II ค่อนข้างคงที่ ซึ่งช่วงนี้ที่ผิววัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมากและมีการถ่ายเทมวลตลอดเวลา

2. อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate)

ช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง คือ ช่วง III ของรูป 2.4 เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินไปเรื่อยๆ ค่าความชื้นจะมีค่าเข้าสู่ความชื้นวิกฤต ซึ่งค่าความชื้นวิกฤตจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างที่แตกต่างกันของชิ้นตัวอย่าง และเมื่อการเคลื่อนตัวของน้ำไปที่ผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างมีไม่เพียงพอที่จะไปเติมเต็มแทนที่น้ำที่เพิ่งระเหยออกไป หรือการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุมายังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงซึ่งจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในชิ้นตัวอย่าง

โดยปรากฏการณ์ทำแห้งในลักษณะนี้ จะแสดงได้ในรูปที่ 2.5 ในช่วงแรกจะเห็นปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าและส่วนด้านบนของรูพรมจะค่อยๆ ลดลง จากนั้นความชื้นที่อยู่ภายในรูพรมจะมีการถ่ายเทมาที่ผิวหน้า จะเกิดการพาความร้อนอีกจนทำให้ปริมาณความชื้นลดลง และท้ายสุดความชื้นก็จะเหลือความชื้นบางส่วนที่เกาะอยู่กับโครงสร้างรูพรมของชิ้นตัวอย่างเท่านั้นดังในรูป 2.5 ก ข และ ค ตามลำดับ



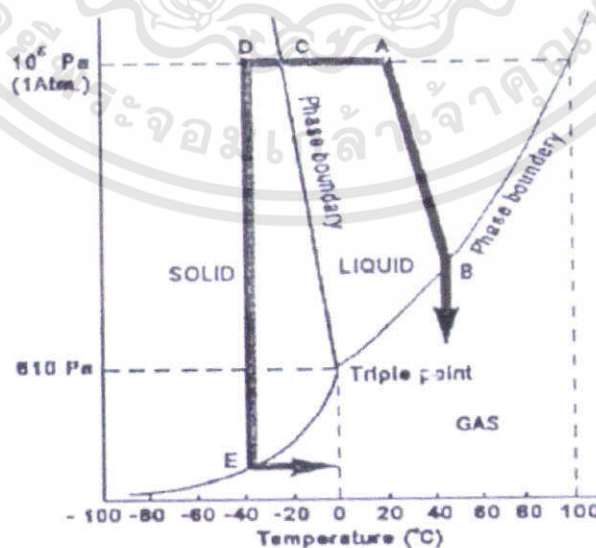
รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้ง (ก) ลดลง (ข) ระยะที่ 2 (ค) สุดท้าย

2.2.2 การทำแห้งแบบแช่แข็ง [11]

กระบวนการทำแห้งด้วยวิธีนี้จะเป็นการลดความชื้นโดยมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของความชื้นโดยเริ่มจากการเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็งโดยการลดอุณหภูมิไปที่จุดเยือกแข็งจากนั้นจะเป็นการลดความดันให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นไอดังแสดงในรูปที่ 2.3 หรือเรียกว่ากระบวนการระเหิด (Sublimation) หรือเรียกชื่อเฉพาะว่า Lyophilization และการทำแห้งภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงคุณค่าทางโภชนาการ เนื้อสัมผัส โครงสร้าง สีกลิ่น และรสชาติอยู่ได้ การทำแห้งแบบแช่แข็งเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง เช่น อาหาร เครื่องสำอาง ยา และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เนื่องจากการทำแห้งแบบแช่แข็งจะมีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง

กระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก (Main Process) 3 ขั้นตอน คือ การแช่แข็ง (Freezing) การทำแห้งระยะที่ 1 (Primary Drying) และการทำแห้งระยะที่ 2 (Secondary Drying) ส่วนขั้นตอนย่อยประกอบกระบวนการ ได้แก่ การเตรียมผลิตภัณฑ์ (Preparation Process) การบรรจุภัณฑ์และการจัดเก็บเป็นกระบวนการหลังการผลิต (Post Process) โดยมีรายละเอียดของกระบวนการหลัก 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ

1. การแช่แข็ง (Freezing) ในขั้นตอนนี้เป็นการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลงจนถึงจุดเยือกแข็งหรือต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ให้น้ำหรือสารละลายเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็งได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งแสดงแผนภาพการลดอุณหภูมิจากจุด A ไปยังจุด D ที่ความดันคงที่ ดังรูปที่ 2.6 สิ่งสำคัญของขั้นตอนนี้คือการเกิดผลึกน้ำแข็ง ระดับความเร็วของการแช่แข็งควรเป็นการแช่แข็งแบบเร็ว (Quick Freezing) ขึ้นไปเนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเซลล์แข็งตัวอย่างรวดเร็วโดยจะไปทำลายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ แต่หากเป็นการแช่แข็งแบบช้า (Natural Freezing) เวลาในการเกิดผลึกนาน ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ เบียดช่องว่างระหว่างเซลล์ทำให้เซลล์แตก โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ ได้รับความเสียหาย การแช่แข็งแบบเร็วที่นิยมใช้มีหลายวิธี เช่น การแช่แข็งแบบลมเป่า การแช่แข็งแบบสัมผัส และการแช่แข็งแบบจุ่มในของเหลวเย็นจัด เป็นต้น

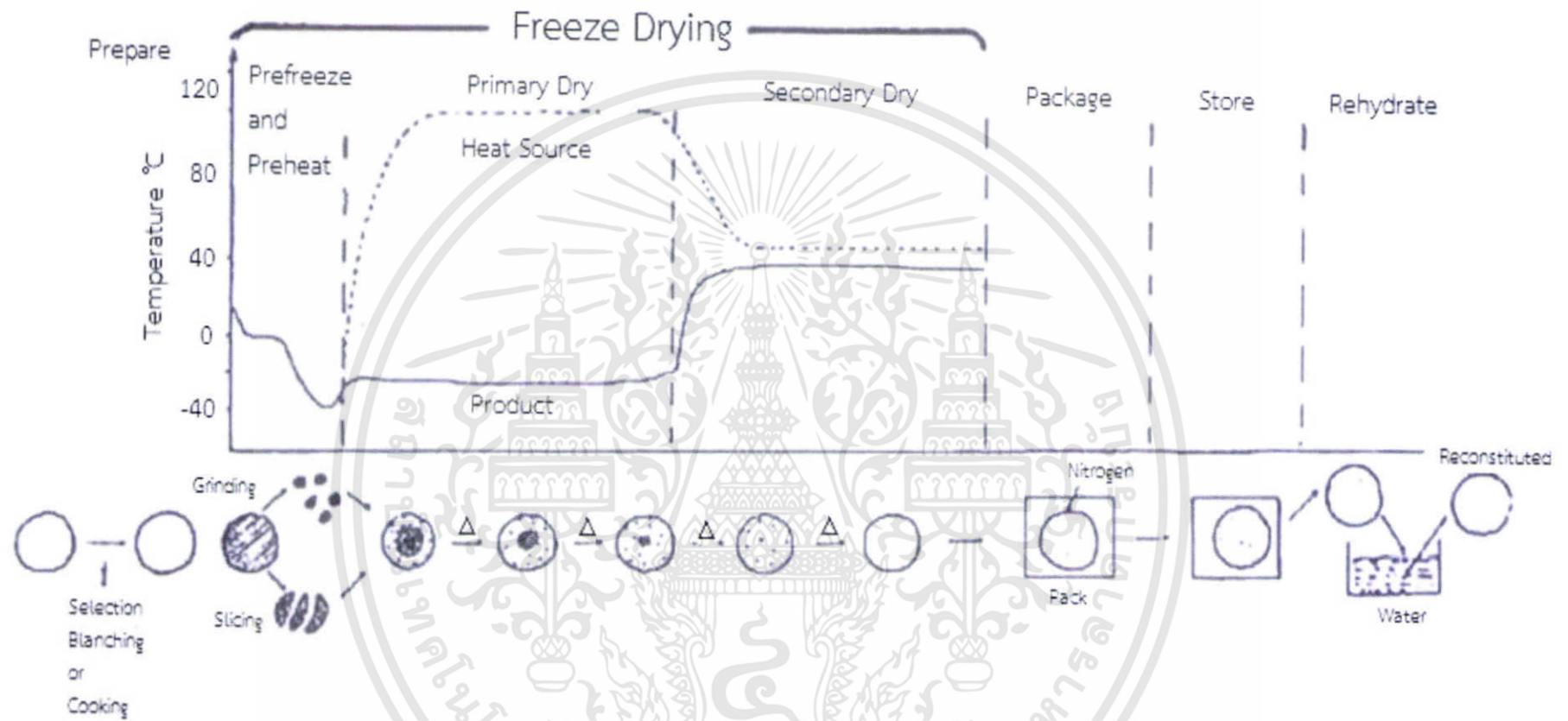


รูปที่ 2.6 แผนภูมิสถานะของสารบริสุทธิ์ [11]

2. การทำแห้งระยะที่ 1 (Primary Drying) ขั้นตอนนี้เป็นการลดความดัน จากจุด D ไปยังจุด E เพื่อให้ผลึกน้ำแข็งที่อยู่ภายในเกิดการระเหิดเป็นไอ โดยระดับความดันจะต้องต่ำกว่าเส้นสมดุลของแข็งและไอ การระเหิดของผลึกน้ำแข็งจึงเกิดได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับพฤติกรรมของการระเหิดของผลึกน้ำแข็งระหว่างการทำแห้งระยะที่ 1 จากกราฟในรูปที่ 2.7 แหล่งความร้อนจะถ่ายเทความร้อนแฝงในการระเหิดกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นอุณหภูมิของระบบจะค่อยๆ สูงขึ้นจนคงที่ เพื่อให้ผลึกน้ำแข็งกลายเป็นน้ำอิสระ (Free Water) สามารถระเหิดออกไปจากผลิตภัณฑ์ โดยมีลำดับของการระเหิดดังนี้

การระเหิดของชั้นน้ำแข็ง (Ice Layer) บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ จากนั้นชั้นน้ำแข็งที่ระเหิดไป กลายเป็นชั้นแห้ง (Dry layer) อยู่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ต่อมาชั้นน้ำแข็งที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ ระเหิดผ่านชั้นแห้งออกไปสู่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เวลาการระเหิด (Sublimation Time) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดว่าโครงสร้างเซลล์โปร่งหรือแน่นเพียงใด

3. การทำแห้งระยะที่ 2 (Secondary Drying) ในขั้นตอนนี้เป็นการกำจัดน้ำที่อยู่ในรูปของพันธะกับสารอื่น (Bound Water) ซึ่งช่วงการทำแห้งนี้เรียกว่า “Desorption” ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อการทำแห้งระยะที่ 1 การระเหิดน้ำอิสระหมดไป จากกราฟในรูปที่ 2.7 ช่วงของการ Desorption อุณหภูมิของระบบเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากต้องมีการเพิ่มพลังงานเพื่อทำการสลายพันธะที่มีความแข็งแรงมาก เพื่อให้เกิดเป็นไออิสระอย่างสมบูรณ์ ที่ไม่สามารถสังเกตอนุภาคของแข็งได้ ก่อนจะนำไปเก็บรักษา หรือส่งขายโดยผ่านกระบวนการจุ่มไนโตรเจน เพื่อให้เกิดความคงรูปของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.7 กลไกการทำแห้งแบบแช่แข็ง [11]

2.2.3 การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [12]

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ในงานอุตสาหกรรมการผลิตสารพอลิเมอร์จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายในปริมาณมาก ซึ่งตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ดังนั้นงานวิจัยจึงมีความพยายามผลิตตัวทำละลายอื่นเข้ามาทดแทน จึงเป็นจุดเริ่มต้นทำให้เกิดการคิดค้นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ง่ายและสามารถนำออกจากกระบวนการโดยการลดความดันในระบบให้เท่ากับความดันบรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นสภาวะแก๊ส และแยกออกได้โดยตรง

สารโดยทั่วไปมี 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แต่เมื่อกำหนดสภาวะให้สารไปที่สภาวะหนึ่งซึ่งเรียกว่า จุดวิกฤต (Critical Point) จะทำให้สารเปลี่ยนสถานะเป็นของไหล ซึ่งสภาวะนี้สารจะมีสมบัติอยู่กึ่งกลางระหว่างของเหลวและแก๊ส สารแต่ละชนิดจะมีจุดวิกฤตที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมี โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะมีจุดวิกฤตอยู่ที่ความดันเท่ากับ 7.38 MPa และอุณหภูมิ 30.95 °C [12] ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีจุดวิกฤตที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ณ จุดนี้เส้นสมดุระหว่างเฟสของเหลวและแก๊สจะเปลี่ยนจากเส้นเป็นจุดและไม่สามารถแยกเฟสโดยการเปลี่ยนความดันและอุณหภูมิได้ ลักษณะคล้ายแก๊สที่มีความหนาแน่นต่ำ แต่การจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลเหมือนของเหลว

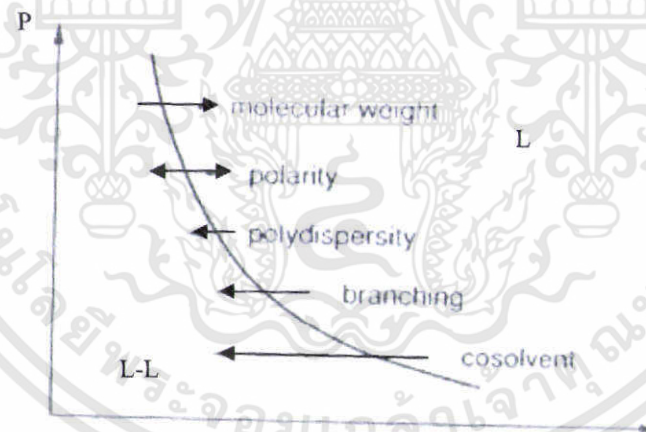
ตารางที่ 2.2 สภาวะเหนือวิกฤตของสารบางชนิด [12]

Solvent	T _c (°C)	P _c (MPa)
Acetone	234.95	4.70
Ammonia	132.45	11.30
Carbon dioxide	30.95	7.38
Cyclohexane	280.35	4.07
Diethyl ether	193.55	3.64
Difluoromethane	78.45	5.83
Difluoroethane	113.55	4.50
Dimethy. Ether	126.85	5.24
Ethane	32.15	4.87
Ethylene	9.25	5.04
Ethyne	35.15	6.14
Hexafluoroethane	19.85	3.06
Methane	-82.75	4.60
Methanol	239.45	8.09
n-hexane	234.35	3.01
Propane	96.65	4.25
Propylene	91.75	4.60

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) สภาวะเหนือวิกฤตของสารบางชนิด

Solvent	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	P_c (MPa)
Sulfur hexafluoride	45.55	3.76
Tetrafluoromethane	-45.55	3.74
Toluene	318.65	41.10
Trifluoromethane	26.15	4.86
Water	374.15	22.10

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการเป็นตัวทำละลายในการผลิตสารในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี การเป็นตัว Blowing Agent ในการผลิตโฟม การทำแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร การผลิตยา เป็นต้น โดยการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาใช้ในการกระบวนการใด ต้องคำนึงถึงความสามารถในการละลายระหว่างสารในระบบกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความดัน อุณหภูมิ โครงสร้างของสาร ความมีขั้วรวมถึงตัวทำละลายร่วมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่า ถ้าน้ำหนักโมเลกุลของสารมากขึ้นความสามารถในการละลายเข้าไปในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะลดลง แต่ถ้การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลและการมีกิ่งในโครงสร้างมากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการละลายเข้าไปในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมากขึ้น



รูปที่ 2.8 ความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ [12]

การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นการทำแห้งวิธีหนึ่งนอกเหนือจากการทำแห้งด้วยอากาศปกติ ซึ่งจะมุ่งเน้นการรักษาโครงสร้างระดับไมโครเมตรให้คงรูปมากที่สุด การทำแห้งจะใช้ได้กับทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยมีความสำคัญกับงานด้านอวกาศ กีฬา และอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ซึ่งต้องสามารถรักษาโครงสร้างตาข่ายของรูพรุนไว้ให้ได้ การทำแห้งเหนือวิกฤตใช้เพื่อนำน้ำออกจากโครงสร้างโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวดูดซับ โดยสารชนิดนี้มีสมบัติทั่วไปอยู่ระหว่างของเหลวและก๊าซ ทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารที่มีความหนาแน่นสูง (Dense Gas) จึงมี

ความสามารถในการละลาย (Solubility) และการสกัดใกล้เคียงกับของเหลว และมีความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ใกล้เคียงกับสถานะก๊าซ [1] ดังแสดงค่าต่างๆในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพบางประการของสารสามสถานะคือ แก๊ส ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว [12]

Properties	Gas	Supercritical fluid	Liquid
ρ (kg m ⁻³)	1	100-800	1000
η (Pa·s)	0.001	0.005-0.01	0.05-0.1
D (m ² s ⁻¹)	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁷	1*10 ⁻⁹

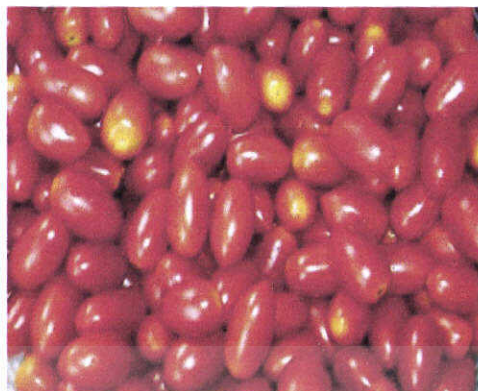
นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์มีจุดวิกฤตต่ำเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น คือ ความดัน 72.9 atm และอุณหภูมิ 31 °C ทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบมาเฉพาะรวมทั้งใช้สภาวะในการทดลองไม่สูงมาก และยังสามารถแยกออกจากสารตัวอย่างได้ง่ายเพียงลดความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะเปลี่ยนเฟสเป็นก๊าซและแพร่สู่อากาศโดยธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเลือกคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารทำแห้ง และทำให้เกิดฟอง เพื่อช่วยเรื่องการยึดเกาะและแทรกตัวของเนื้อเยื่อ อีกทั้งการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารทำแห้งนี้เป็นการนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ก่อนปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ

2.2.4 ผลกระทบของการทำแห้งกับอาหาร

หลังจากที่อาหารผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆแล้ว ภายในเนื้ออาหารจะมีการเปลี่ยนแปลงในหลายลักษณะ ซึ่งได้แก่ การเปลี่ยนแปลงขนาด ความชื้น ลักษณะรูปร่าง รวมทั้งการลดปริมาณจุลินทรีย์ด้วย

ลักษณะเนื้อสัมผัส

การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการทำแห้ง จะทำให้ส่วนต่างๆของอาหารเกิดความเครียดภายใน ซึ่งจะทำให้อาหารเปลี่ยนรูปร่างเซลล์จากที่ค่อนข้างแข็งไปเป็นอาหารที่มีลักษณะเหนียวอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารแต่ละประเภทจะมีค่าที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 พบว่า อาหารประเภทเนื้อสัตว์ เช่น ไข่ เนื้อไก่ เนื้อวัว จะลดความชื้น ได้มากกว่าอาหารประเภทผักและผลไม้ เช่น ถั่ว ข้าวโพด แอปเปิ้ล เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า อาหารต่างชนิดกันจะมีระดับการหดตัวที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.5 โดยจะพบว่าอัตราการหดตัวของพืชจำพวกกะหล่ำปลี มะเขือเทศ หรือพืชที่ใช้น้ำปริมาณมากในการปลูก มีการหดตัวมากกว่าพืชที่ใช้น้ำในการปลูกน้อยจำพวกผักโขมฝรั่งและแครอท



(a) มะเขือเทศที่มีเซลล์แข็ง

(b) มะเขือเทศที่มีเซลล์เหี่ยว

รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของเซลล์หลังการทำแห้ง [13]

ตารางที่ 2.4 ปริมาณความชื้นก่อนและหลังการทำแห้ง [14]

อาหาร	ความชื้นก่อนการทำแห้ง (%)	ความชื้นหลังการทำแห้ง (%)
น้ำนม :		
น้ำนมสด	87	5.0
นมสกัดไขมัน	90	5.0
ไข่ :		
ไข่รวม	74	2.9
ไข่ขาว	88	7.3
ไข่แดง	51	1.1
เนื้อโค (เนื้อย่าง)	60	1.5
เนื้อไก่ (ไก่ย่าง)	61	1.6
ถั่ว (อบ)	92	11.5
ข้าวโพด (หวาน)	76	3.2
มันฝรั่ง (ต้ม)	80	4.0
น้ำแอปเปิล	86	6.2

ตารางที่ 2.5 สัดส่วนโดยประมาณสำหรับการอบแห้ง การหดตัวและการคืนตัวของผักบางชนิด [14]

ผัก	อัตราการทำแห้ง	อัตราหดตัวโดยรวม	อัตราการคืนตัว
กะหล่ำปลี	11.5	21.0	10.5
แครอท, ลูกเต๋า	7.5	12.0	7.0
หัวหอมใหญ่, แผ่นบาง	7.0	8.0	5.5
พริกไทยสด	17.0	22.0	8.0
ผักโขมฝรั่ง	13.0	13.5	5.0
แผ่นมะเขือเทศ	14.0	20.0	5.0

ณ

การทำแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวหน้าของอาหาร การสะท้อนแสงและสี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของคาร์โบไฮเดรตและคลอโรฟิลล์เกิดจากความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างการทำแห้ง โดยทั่วไปการทำแห้งที่เวลานานกว่าและอุณหภูมิสูงกว่าทำให้สีเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาจากเอนไซม์ที่หลงเหลืออยู่ในอาหารทำให้เกิดสีน้ำตาล อัตราการเกิดสีน้ำตาลในนมหรือผลิตภัณฑ์ผลไม้ในระหว่างการเก็บรักษาขึ้นอยู่กับปริมาณ ความชื้นและอุณหภูมิในการเก็บรักษา โดยอัตราการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิการ ทำแห้งที่อุณหภูมิสูงเมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงกว่า 4-5% และอุณหภูมิการเก็บรักษาเกิน 38 °C

คุณค่าทางอาหาร

ความสามารถในการละลายของวิตามินชนิดต่างๆในน้ำจะมีค่าแตกต่างกัน โดยเมื่อเวลาในการ ทำแห้งเพิ่มขึ้น วิตามินบางชนิด เช่น ไรโบฟลาวิน อาจเกิดการอิมัลชันและตกตะกอน จึงเกิดการ สูญเสียน้อย ส่วนวิตามินชนิดอื่น เช่น กรดแอสคอร์บิก จะละลายน้ำดังนั้นจะสูญเสียปริมาณมากหลัง การทำแห้ง วิตามินซีไวต่อความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งสามารถลดการสูญเสียวิตามินซีได้ โดยการ ทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เวลาสั้น การควบคุมความชื้นและปริมาณออกซิเจนต่ำระหว่างการเก็บ รักษา ไทอามินก็ไวต่อความร้อนเช่นกัน แต่วิตามินที่ละลายน้ำได้ชนิดอื่นจะทนทานต่อความร้อนและ ปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าวิตามินซีและเกิดการสูญเสียระหว่างการทำแห้งไม่เกิน 5-10%

2.2.5 การดูดคืนน้ำ (Rehydration) [14]

การดูดคืนน้ำไม่ใช่ปฏิกิริยาย้อนกลับของการทำแห้ง การเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะเนื้อสัมผัส การเคลื่อนที่ของตัวละลายและการสูญเสียสารระเหยไม่สามารถเกิดแบบย้อนกลับเหมือนเดิมได้ ความร้อนลดระดับการดูดคืนน้ำของอาหารและความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ ทำให้โปรตีนจับตัวกันและ ลดความสามารถในการอุ้มน้ำ อาจใช้อัตราเร็วและระดับการดูดคืนน้ำเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของอาหาร ได้ สภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมจะทำให้อาหารเกิดความเสียหายน้อยกว่าและดูดคืนน้ำได้เร็วกว่า อาหารที่ทำแห้งที่สภาวะไม่เหมาะสม

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเอการ์ [15,16]

เอการ์เป็นสารที่สกัดจากสาหร่ายทะเล โดยภาพรวมจะใช้เป็นสารเติมให้เกิดวุ้นหรือเจล ภายในโครงสร้างมีเอกาโรส (Agarose) เป็นสารที่ทำให้เกิดเป็นวุ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 85 °C โดยสาย โข้จะเป็นแบบสุ่ม หรือหลอมละลายอยู่ในรูปของเหลว แต่สามารถย้อนกลับมาอยู่ในรูปวุ้นอีกครั้ง เมื่อ อุณหภูมิลดลงถึง 35-40 °C ส่งผลให้เกิดลักษณะโครงสร้างแบบสายโซ่โมเลกุลคู่ (Double Helix State) แรงยึดระหว่างสายโซ่โมเลกุลจะทำให้เกิดแถบจังก์ชัน (Junction Zone) ผลคือ เกิดเป็น โครงข่ายสามมิติที่อยู่หนึ่งแต่จะไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นวงบิด การเติมเอการ์เพียง 1% จะ สามารถทำให้วุ้นแข็งตัวได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารทั่วไปมักจะใช้เอการ์เติม และบ่อยครั้งที่ต้องมีการทำ แห้งเพื่อเก็บรักษา ขนส่ง และบรรจุ

วุ้น (Agar) เป็นผลิตภัณฑ์ที่สกัดได้จากสาหร่ายสีแดง (Rhodophyceae) บางชนิด กลุ่มของสาหร่ายที่ให้วุ้นมักเรียกรวมกันว่า Agarophytes ซึ่งให้คุณสมบัติแตกต่างกันไปตามความสามารถและลักษณะในการเกิดเจล (Gel Formation) อาจแบ่งได้เป็นกลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 พวก Gellidium Type สาหร่ายพวกนี้ให้วุ้นที่เกิดเจลที่ตี มันคงแข็งแรง แต่มักจะให้ความเข้มข้นต่ำ

กลุ่มที่ 2 พวก Gracilaria และ Hypnea Type พวกนี้จะให้วุ้นที่เกิดเจลที่ดี ถ้าเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้น หรือถ้าเติมสาร Electrolytes บางตัวลงไป

กลุ่มที่ 3 พวก Chondrus Type พวกสาหร่ายกลุ่มนี้ให้วุ้นที่เกิดเจลได้ดีพอสมควร เมื่อใช้ความเข้มข้นสูงขึ้น

สาหร่ายธรรมชาติที่นำมาผลิตเป็นวุ้นที่พบมากในประเทศไทย ได้แก่พวกกลุ่มที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 มีลักษณะเป็นลำแขนงสีแดงส้ม ซึ่งพบแถบฝั่งทะเลตะวันออก และทางภาคใต้ ซึ่งเกษตรกรสามารถนำมาเพาะเลี้ยงได้ โดยนำมาใช้เพื่อเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตวุ้น ซึ่งสามารถทำรายได้แก่ผู้เพาะเลี้ยงเป็นอย่างดี ปัจจุบันยังไม่มีการผลิตวุ้นในระดับอุตสาหกรรมภายในประเทศ วุ้นและผลิตภัณฑ์จากสาหร่ายอื่น ๆ ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศจำนวนมาก เพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา เครื่องสำอาง และในปัจจุบันได้มีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้และจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งต้องใช้วุ้นเป็นสารค่าจุนหรือเป็นสารรองรับ (Medium) นอกจากนี้ยังใช้ในงานด้านวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ อาทิ การวิเคราะห์ทางด้านอิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis) วุ้นที่นำมาใช้ในงานที่กล่าวนี้มีคุณภาพและราคาแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน [15]



รูปที่ 2.10 ลักษณะสาหร่ายแดง Gracilaria ที่ใช้ผลิตผงเอการ์ [16]

2.3.1 สารประกอบทางเคมีของวุ้น

วุ้นเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อน ประกอบด้วยสารสำคัญสองกลุ่ม คือ เอกาโรสและเอกาโรแพ็คติน (Agaropectin) พวกเอกาโรสเป็นพอลิเมอร์สายยาวที่ประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) และอนุพันธ์ของมัน โดยที่มีโมเลกุลของ 3, 6-anhydro-L-galactose และ b-D-galactose เกาะเชื่อมสลับกัน เอกาโรสค่อนข้างเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือมีประจุน้อยมากจึงมัก

เรียกว่า Neutral Polysaccharides ส่วนเอกาโรแพคตินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ในวุ้นอีกพวกหนึ่งมีโครงสร้างคล้ายเอกาโรส แต่บางโมเลกุลของ L-galactose จะมีกลุ่มอนุมูลซัลเฟตเกาะอยู่ และโมเลกุลของ D-galactose จะมีไพรรูเวทเกาะอยู่ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สายพอลิเมอร์เหล่านี้มีประจุ บางครั้งจึงเรียกว่า Charged Agarose

จากการศึกษาด้านคุณภาพของวุ้นพบว่า วุ้นที่มีส่วนประกอบของเอกาโรแพคติน ถ้ามีประจุมากเท่าใดยิ่งทำให้ความแข็ง (Gel Strength) ของวุ้นยิ่งต่ำลง ดังนั้นในกระบวนการสกัดวุ้นจึงต้องพยายามลดปริมาณของหมู่ซัลเฟตที่เกาะอยู่ในส่วนของน้ำให้น้อยที่สุด การลดหมู่ซัลเฟตทำได้โดยการต้มสาหร่ายกับสารละลายต่าง ซึ่งทำให้เกิดการรบกวนของซัลเฟต ขณะเดียวกันก็เกิด 3, 6-anhydride ของน้ำตาลกลาแลกโตสขึ้นได้ภายในสายของพอลิเมอร์ เป็นการทำให้วุ้นมีคุณภาพดีขึ้นได้อีกทางหนึ่ง

วุ้นมีสมบัติในการละลายได้ในน้ำร้อนแต่ไม่ละลายในน้ำเย็นและสามารถเกิดเป็นเจล (Gel Formation) ได้เป็นอย่างดี เมื่อสารละลายร้อนของวุ้นเย็นตัวลง และเป็นเจลที่อยู่ตัวที่อุณหภูมิปกติ ดังนั้นจึงใช้เป็นสารประเภทช่วยให้เกิดการคงรูป (Stabilizing Agent) และใช้เป็น Emulsifying Agent ได้เป็นอย่างดีในอุตสาหกรรมต่างๆ

2.3.2 กระบวนการสกัดวุ้นจากสาหร่าย

โดยทั่วไปการสกัดวุ้นสาหร่ายทะเล ประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ คือ การทำความสะอาดสาหร่ายก่อนทำการสกัด การกำจัดหมู่ซัลเฟตในวุ้นโดยทำปฏิกิริยากับด่าง จากนั้นจึงทำการสกัดด้วยน้ำที่ pH ประมาณ 6-7 ที่อุณหภูมิประมาณ 95-110 °C จากนั้นกรองเอาสารละลายของวุ้น แล้วกำจัดน้ำออกจากวุ้นโดยการแช่แข็งหรือด้วย Hydraulic Press นำวุ้นที่อบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 50-55 °C แล้วจึงบดเป็นวุ้นผง อย่างไรก็ตามเทคนิคและรายละเอียดสำหรับในแต่ละขั้นตอนนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งของสาหร่ายเป็นสำคัญ ดังนั้น ในกระบวนการสกัดวุ้นจากสาหร่ายทะเลก่อนทำการสกัดจึงจำเป็นต้องทดสอบสภาวะที่เหมาะสมก่อนทุกครั้งที่ได้ตัวอย่างสาหร่าย ก่อนทำการสกัดในถังสกัดขนาดใหญ่

ปัจจัยที่ต้องควบคุมในการสกัด

1. มีการทำลาย (Hydrolysis) สายโซ่ของพอลิแซ็กคาไรด์ของวุ้นให้น้อยที่สุด (การเกิด Hydrolysis จะเกิดได้ดีเมื่อสภาวะของสารละลายเป็นกรดสูง อุณหภูมิสูง ระยะเวลาในการสกัดนาน)
2. มีการกำจัดปริมาณของหมู่ซัลเฟตให้มากที่สุด
3. สี กลิ่น และสิ่งเจือปนถูกกำจัดออกมาได้มากที่สุด

สำหรับการสกัดวุ้นจากสาหร่าย Gracilaria ในประเทศไทยนั้นที่สำคัญมี 2 ชนิดคือ สาหร่ายผมนาง ซึ่งมีมากทางภาคใต้ และสาหร่ายเขากวางซึ่งมีมากทางตะวันออกของไทย สาหร่ายสองชนิดนี้มีช่วงการเจริญเติบโตที่เก็บเกี่ยวผลผลิตได้คนละช่วงเวลา กล่าวคือ ในช่วงเดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน จะสามารถเก็บเกี่ยวสาหร่ายผมนางจากภาคใต้ได้ ส่วนสาหร่ายเขากวางจะเริ่มเก็บเกี่ยวได้ประมาณเดือนธันวาคมถึงมิถุนายน อย่างไรก็ตามสาหร่ายสกุล Gracilaria นั้นโดยทั่วไปเชื่อกันว่าจะให้วุ้นที่มีคุณภาพด้อยกว่า วุ้นที่ได้จากสกุล Gelidium ซึ่งสกุลนี้ในประเทศไทยมีน้อยมาก

กล่าวคือ ความแข็ง (Gel Strength) ของวุ้นสาหร่ายสกุล Gellidium จะสูงกว่าวุ้นสกุล Gracilaria แต่จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการวิจัยพอลิแซ็กคาไรด์ พบว่า ถ้ากำจัดซัลเฟตด้วยด่างออกจากวุ้น หลังการสกัดแทนที่จะกำจัดก่อนทำการสกัด (สำหรับสาหร่ายสกุล Gracilaria จะให้วุ้นที่มีคุณภาพดีขึ้นมาก และมีลักษณะของผลึกวุ้นสาหร่ายที่ขาวสะอาดดังแสดงได้ในรูปที่ 2.11

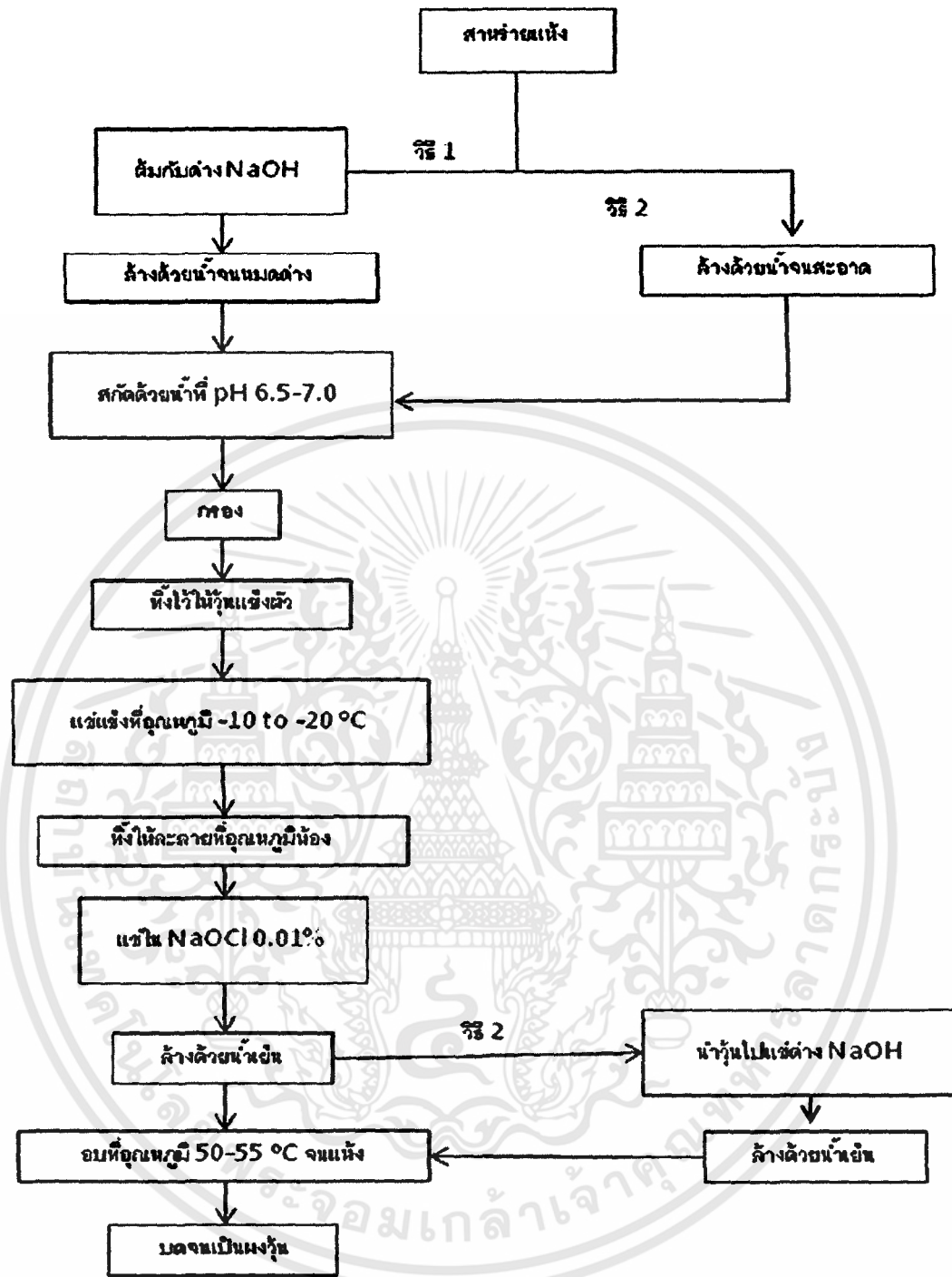


รูปที่ 2.11 ผงวุ้นบริสุทธิ์มีความขาวสะอาดเป็นเนื้อเดียวกัน ปราศจากสิ่งเจือปน [16]

การสกัดวุ้นโดยการกำจัดซัลเฟต จำเป็นสำหรับงานบางประเภทที่ต้องวุ้นที่มีคุณภาพสูง เช่น งานด้านเภสัชกรรม เทคโนโลยีชีวภาพ หรือเพื่อใช้ในการเตรียมวุ้นบริสุทธิ์เพื่อวิจัยขั้นสูงนั้น โดยการกำจัดซัลเฟตโดยการแช่วุ้นในด่างหลังจากการสกัดนั้นจำเป็นจะต้องกระทำเนื่องจากวุ้นที่ใช้ในงานดังกล่าว จะต้องเป็นวุ้นที่มีปริมาณเอคาโรสสูงมาก ซึ่งกระบวนการสกัดวุ้นที่ใช้กับสาหร่ายในประเทศไทยแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะเห็นว่า กระบวนการสกัดวุ้นโดยการกำจัดซัลเฟตหลังสกัดวุ้น มีขั้นตอนที่สะดวกและง่ายกว่า การกำจัดซัลเฟตก่อนสกัดวุ้น โดยมีขั้นตอนเพียงนำสาหร่ายแห้งมาละลายในด่างที่ 25 °C จากนั้นล้างให้สะอาด และนำมาสกัดด้วยน้ำที่ pH ประมาณ 6.5-7 และใช้เวลาเพียง 2 hr แต่กระบวนการกำจัดซัลเฟตก่อนการสกัดมีขั้นตอนที่ยุ่งยากกว่า โดยเพิ่มขั้นตอนให้วุ้นเกิดการแข็งตัวโดยลดอุณหภูมิที่ -10 ถึง -20 °C ก่อนนำไปแช่ใน NaOCl 0.01% และล้างด้วยน้ำเย็น ก่อนนำไปอบและบดเป็นผง เพื่อให้ได้วุ้นเอการ์บริสุทธิ์



(ก) การกำจัดซัลเฟตหลังทำการสกัดวุ้นแล้ว



(ข) การกำจัดซัลเฟตในวันก่อนการสกัด

รูปที่ 2.12 กระบวนการสกัดหุ้บ 2 วิธีที่ใช้กับสาหร่ายในประเทศไทย [15] โดย
 (ก) การกำจัดซัลเฟตหลังทำการสกัดหุ้บแล้ว (ข) การกำจัดซัลเฟตในวันก่อนการสกัด

2.3.3 การนำวุ้นเอการ์ไปประยุกต์ใช้งาน [16]

2.3.3.1 อุตสาหกรรมอาหาร (Food Industry)

ในผลิตภัณฑ์เนื้อ และสัตว์ปีก จะมีการใช้วุ้นเป็นวัตถุเจือปนอาหารเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ช่วยให้มีลักษณะเนื้อสัมผัส ความสามารถในการอุ้มน้ำ สี และกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อและไก่กระป๋อง จะมีการใช้วุ้นช่วยป้องกันการละลายของลักษณะเนื้อสัมผัส และช่วยให้ผลิตภัณฑ์เนื้อบดมีการจับตัวกันได้ดียิ่งขึ้น สำหรับผลิตภัณฑ์ปลากระป๋อง ตัววุ้นจะช่วยรักษาคุณภาพของเนื้อปลาไม่ให้เกิดความเสียหาย จากการถูกระทบกระแทกระหว่างการขนส่ง นอกจากนั้น Diet Food อาจใช้วุ้นจากเอการ์ช่วยให้อิ่มได้โดยไม่ให้อ้วน เพราะคุณสมบัติที่เป็น Hydrocolloid ที่มีอยู่ในเอการ์เอง

2.3.3.2 อุตสาหกรรมขนมหวาน (Dessert Industry)

วุ้นนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการทำขนมหวานหลายชนิด วุ้นมะพร้าวอ่อน วุ้นกะทิ วุ้นกาแฟ ฯลฯ โดยใช้เป็นตัวทำให้เกิดเจล และเป็นตัวชะลอการตกผลึกของน้ำตาล ช่วยให้ Emulsion คงตัว และกระจายตัวสม่ำเสมอ ช่วยให้ฟองมีความคงตัวด้วย ใช้ในผลิตภัณฑ์ Bakery Cake ที่มี Icing เช่น โดนัท ใช้เอการ์เป็นตัวจับ Free Water ในผลิตภัณฑ์เพื่อไม่ให้ Icing หรือน้ำตาลบนผิวหน้าของผลิตภัณฑ์หลอมละลายและเหนียวติดกับวัสดุที่ห่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เสียรูป

2.3.3.3 อุตสาหกรรมนม (Milk and Related Industry)

ผลิตภัณฑ์นมชนิดต่างๆ ซึ่งรวมถึงผลิตภัณฑ์ประเภทไอศกรีม Sherbets เนยแข็ง และผลิตภัณฑ์นมอื่น มีการใช้วุ้นเป็นส่วนประกอบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความคงตัว และช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อสัมผัสดีขึ้น ผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยว เช่น โยเกิร์ต มีการใช้วุ้นเพื่อให้ข้นหนืด และในนมที่มีการใส่ Chocolate ตัววุ้นจะช่วยให้มีการแขวนลอยได้ดีขึ้น

2.3.3.4 อุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ (Pharmaceutical Industry)

คุณสมบัติของเจลเป็นสารคงความยืดหยุ่นและลื่น จึงนำเอการ์มาใช้เป็นส่วนประกอบของยาระบาย (Laxative) เนื่องจากเอการ์ช่วยทำให้กากอาหารในลำไส้ไม่ระคายเคืองต่อผนังลำไส้ และช่วยให้การบีบรัดตัวของผนังลำไส้ (Peristalsis) เป็นไปอย่างปกติ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมของปลอกหุ้ม (Capsule) ของเม็ดยาด้วยและเป็นส่วนผสมของครีมโลชันทาผิว

2.3.3.5 อุตสาหกรรมทางจุลชีววิทยา (Microbiological Industry) และอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Tissue Culture Industry)

มีการนำเอการ์มาใช้อย่างแพร่หลายในด้านการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เพื่อตรวจเชื้อในห้องปฏิบัติการทางจุลชีววิทยา ในห้องทดลองตามโรงพยาบาล ยิ่งกว่านั้นอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงเชื้อใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย หรือผลิตจุลินทรีย์เพื่อใช้แทนยาฆ่าแมลง ก็สามารถใช้อเอการ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เอการ์เป็นตัวกลาง (Media) ที่ดี เมื่อผสมกับอาหารที่พืชต้องการ นำนึ่งในหม้อนึ่งความดัน เทใส่ภาชนะและทิ้งให้เย็นตัวก็จะได้อวุ้นที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ โดยรากพืช

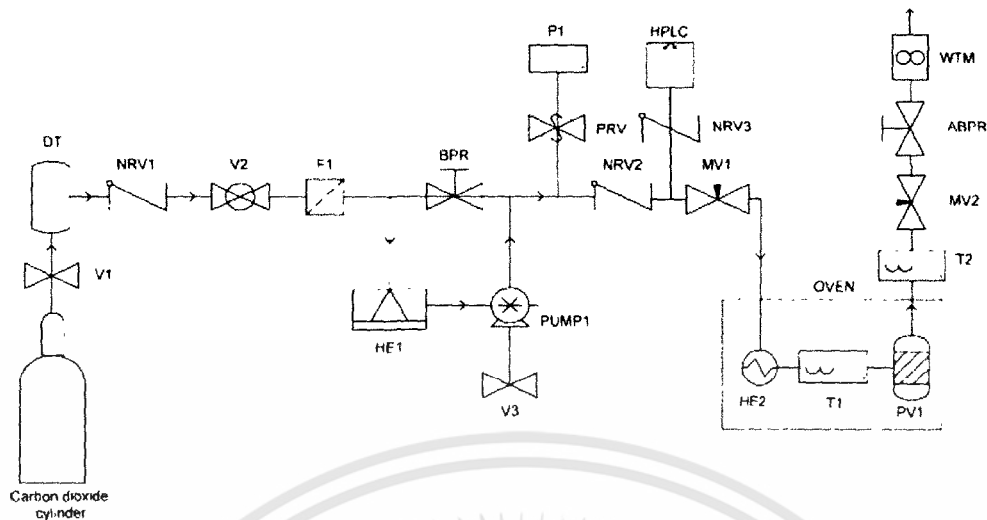
สามารถยืดเกาะและดูดซึมอาหารได้ดี ดังเช่นการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้ที่แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยความเข้มข้นของปริมาณวุ้นเอการ์ที่ใช้กันแพร่หลาย และได้ผลดีคือ 0.8%



รูปที่ 2.13 วุ้นผสมอาหารเพื่อใช้เป็นสารตัวกลางในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ [16]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Z.K.Brown และคณะ [1] ได้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเพื่อนำน้ำออกจากวุ้นเอการ์ โดยมีการเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบใช้อากาศและการทำแห้งแบบแช่แข็ง การทดลองได้ศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดเป็นวุ้นของเอการ์ ที่ใช้วุ้นเอการ์ที่มีลักษณะ 2 แบบ คือ แบบมีการเติมน้ำตาลซูโครสและไม่มีการเติมน้ำตาลซูโครส รวมทั้งมีการใช้สภาวะการทำแห้ง 2 แบบ คือ แบบมีการใช้อีทานอลเป็นตัวทำละลายร่วมและไม่มีการใช้อีทานอล การทดลองยังมีการควบคุมอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และอัตราการลดความดันขาออกด้วย โดยแผนภาพการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่า ณ จุดนี้มีผลกับโครงสร้างทางกายภาพของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทดสอบด้วยเทคนิค X-Ray Micro-CT ซึ่งสามารถวัดค่าความเป็นรูพรุน (%Voidage) ของโครงสร้างวุ้นเอการ์แห้งได้ โดยสามารถอธิบายโครงสร้างของวุ้นเอการ์ที่เกิดการยุบตัวได้ ที่โดยทั่วไปเมื่อมีคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะลดการเกิดการยุบตัว สำหรับวุ้นเอการ์ที่มีการผสมน้ำน้ำตาลซูโครส จะให้ผลด้านโครงสร้างหลังทำแห้งที่คงรูปมากกว่าการไม่ใส่น้ำตาลซูโครส ค่าความเป็นรูพรุนของแต่ละวิธีการทำแห้งจะต่างกัน โดยการทำแห้งด้วยอากาศจะมีค่าความเป็นรูพรุน 4% ซึ่งน้อยกว่าการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมที่มีค่าเท่ากับ 48% แต่น้อยกว่าการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่มีอีทานอลเป็นตัวทำละลายร่วมที่มีค่าเท่ากับ 68% ส่วนการทำแห้งแบบแช่แข็งจะให้ค่าความเป็นรูพรุนมากที่สุดที่ 76% แต่จากการสังเกตจะพบว่ารูพรุนของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่มีอีทานอลเป็นตัวทำละลายร่วมจะมีรูพรุนแบบพิเศษ คือ ลักษณะคล้ายโฟม ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างวุ้นเอการ์กับอีทานอล ซึ่งจะให้ผลที่ชัดเจนกว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อยู่ในช่วง 1-3 l/min และอัตราการลดความดันขาออกที่อยู่ในช่วง 0.4-1.6 MPa/min ซึ่งทั้งสองตัวแปรไม่มีผลโดยตรงกับโครงสร้างของวุ้นเอการ์แห้ง



รูปที่ 2.14 แผนภาพการทดลองการอบแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตร่วมกับเอทานอล [1]

M. van der Kraan และคณะ [17] ได้ทำงานวิจัยเพื่อหาสมการกระจายตัวของน้ำในสองเฟส คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและเส้นใยในกระบวนการย้อมสี ทำให้สามารถหาค่าการละลายของน้ำในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้น้ำในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้โดยทำการประยุกต์ใช้สมการของไหลแบบไม่อุดมคติ ตามสมการของราอูล เนื่องจากความสามารถและประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ซึ่งสมการการหาค่าการละลายโดยการประยุกต์ใช้สมการของราอูลแสดงได้ดังนี้

$$\Gamma = \frac{y^{\text{sat}} \rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}^{\text{max}}}\right) \exp\left(\frac{k \rho_{\text{CO}_2}}{T} - \frac{b_1}{M_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{\rho_{\text{CO}_2}^{\text{max}} \rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}^{\text{max}} - \rho_{\text{CO}_2}}\right) \quad (2.3)$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}} = \frac{1000 A M_{\text{H}_2\text{O}}}{RT} \exp\left(\frac{B}{T - C}\right)$$

$$y^{\text{sat}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CO}_2}}$$

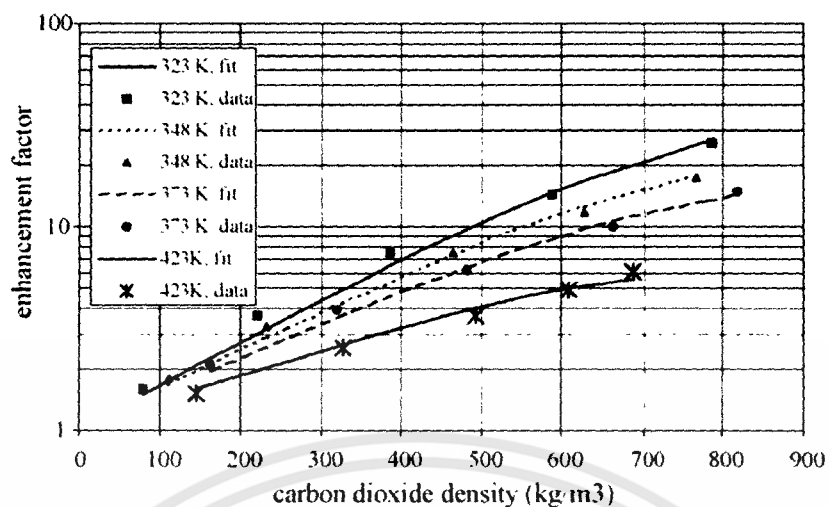
โดยที่ $\rho_{\text{CO}_2}^{\text{max}} = 1560 \text{ kg/m}^3$; Perry & Green

$M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ kg/mol}$

$b_1 = 0.0305 \text{ dm}^3/\text{mol}$; Van der Waals volume

$K =$ แคปบาเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับความดันและอุณหภูมิของระบบที่หาค่าได้

จากรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟค่า Enhancement factor ($y^{\text{sat}} \rho_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันบางช่วง [17]

งานวิจัยเกี่ยวกับการทำแห้งด้วยการพาความร้อน คือ งานของ รติยา และคณะ [4] ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโพลีเอทิลีนขณะอบแห้ง โดยรวมการหดตัวของวัสดุในแบบจำลองด้วย วิธีขอบเขตเคลื่อนที่และขอบเขตคงที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการรวมการหดตัวของวัสดุ และเปรียบเทียบผลการทำนายด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นกับผลการทดลอง ในการทดลองนั้น ได้ออบแห้งแผ่นโพลีเอทิลีนที่ความหนาแน่น 0.3, 0.5 และ 0.7 g/mm อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C และความเร็วลม 0.5 m/s สำหรับคุณภาพของแผ่นโพลีเอทิลีนอบแห้งที่ทำการศึกษาได้แก่ คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส และโครงสร้างระดับจุลภาค ผลที่ได้จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า วิธีขอบเขตเคลื่อนที่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้น ของแผ่นโพลีเอทิลีนได้แม่นยำกว่ากรณีใช้วิธีขอบเขตคงที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ สำหรับคุณภาพของแผ่นโพลีเอทิลีนอบแห้งนั้น พบว่า ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนส่งผลต่อความแข็ง ความกรอบ และลักษณะโครงสร้างภายใน ขณะที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อคุณภาพของแผ่นโพลีเอทิลีนในด้านดังกล่าวเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนเดียวกัน

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สมการการแพร่ของ Fick ในการอธิบายการถ่ายเทความชื้น ภายในแผ่นโพลีเอทิลีน โดยสมมติการแพร่ของน้ำออกจากแผ่นโพลีเอทิลีนเกิดจากเกรเดียนท์ของความเข้มข้นของความชื้น และสมมติให้แผ่นโพลีเอทิลีนมีลักษณะเป็นแผ่นบางที่กว้างและยาวมาก (Infinite Slab) การถ่ายเทความชื้น และการหดตัวเกิดขึ้น ในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว และไม่คิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของการถ่ายเทมวลได้ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v^{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right), 0 < x < L(t) \quad (2.4)$$

เมื่อ	D_v^{eff}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)
	L	คือ ความหนาของแผ่นโฟมกล้วย (m)
	M	คือ ความชื้นของแผ่นโฟมกล้วย (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)
	x	คือ พิกัดตามทิศทางการแพร่ของน้ำ
	t	คือ เวลา (s)

สำหรับ N. Wang และ J. G. Brennan ได้ประยุกต์สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายการแพร่ของความชื้นขณะการทำแห้งมันฝรั่ง [3] โดยโมเดลทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายระดับความชื้นและอุณหภูมิระหว่างการทำแห้งในตัวอย่างที่มีลักษณะแบบแผ่นบาง การจะเลือกใช้โมเดลใด ขึ้นกับปฏิกริยาระหว่างความชื้นและเนื้อสารโดยเฉพาะส่วนผิวหน้าของเนื้อสารที่ต้องมีทฤษฎีของการดูดซับเข้ามาเกี่ยวข้อง การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีจะแสดงได้ภายในโมเดล ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการทำแห้งมันฝรั่งด้วยวิธีการพาความร้อนปกติ ซึ่งจะสนใจการประยุกต์ใช้สมการของ Crank-Nicolson เพื่อแก้ปัญหาในส่วนต่างๆ ทั้งการแพร่ของความชื้นและความร้อนขณะการทำแห้งที่เวลาต่างๆ รวมทั้งมีการเปรียบเทียบกับสมการของ Fick เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าการเลือกใช้สมการนั้นมีความถูกต้อง และแม่นยำเพียงพอ

Berger และ Pei [3] ได้ประยุกต์สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าต่างๆ ในการทำแห้งปลา และพวกผักต่างๆ ซึ่งต้องมีการตั้งสมมติฐานเพื่อให้ใช้สมการได้อย่างเหมาะสม (1) การหดตัวของสารเกิดน้อยและมองข้ามไปได้ (2) สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนให้ขึ้นกับ ความชื้นตั้งต้นและอุณหภูมิ (3) ไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำภายในสารขณะการทำแห้ง (4) การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิกายนอกจะเกิดเป็นช่วง โดยแต่ละส่วน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิและความแตกต่างของความดันไอระหว่างผิวรอยต่อของของแข็งกับอากาศ (5) ตัวอย่างต้องมีลักษณะเป็นแผ่นบางซึ่งกว้างและยาวมาก

สมมติให้มีการประยุกต์ใช้สมการการถ่ายเทมวลของ Fick การถ่ายเทมวล (Liquid Flux, m_1) ที่อยู่ระหว่างผิวรอยต่อแสดงได้ดังนี้

$$m_1 = D \rho_l \frac{\partial M}{\partial x} \quad (2.5)$$

สมมูลมวลระหว่างผิวรอยต่อ และความหนา dx ทำให้สมการเปลี่ยนเป็นดังนี้

$$\rho_l \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \rho_l \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

โดย	m_1	คือ ฟลักซ์การแพร่ของน้ำ ($kg/m^2 \cdot s$)
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ ($m^2 \cdot s$)
	ρ_l	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/s)
	M	คือ ปริมาณความชื้น ($kg \text{ Water}/kg \text{ Agar}$)
	x	คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (m)

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์ทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ที่เตรียมจากผงเอการ์ หลังผ่านการทำแห้งโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และการพาความร้อน จะสามารถรักษาสภาพของสาร รวมทั้งลดการเน่าเสียและขึ้นราซึ่งเป็นผลมาจากความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร ที่ต้องทำให้อาหารปราศจากความชื้นและเก็บรักษาง่าย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- อลูมิเนียมฟอยล์
- ซ้อนตักสาร
- ขวดน้ำกลั่น
- Hot plate/Stirrer/Water bath
- Stand/Clamp
- แท่งแก้วคนสาร
- หลอดหยด
- ปีกเกอร์
- ถังอัดแรงดันสูง (High Pressure Vessel)
- อ่างน้ำ

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- High Pressure Pump (Syringe) ของบริษัท ISCO รุ่น 260D
- Oven ของบริษัท Carbolite
- Hot plate ของบริษัท Yellow line รุ่น Yellow MAG HS7

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- Scanning Electron Microscope (SEM) ของ Camscan UK รุ่น MX-2000
- เครื่องมือชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น AX205
- UV-VIS Spectrophotometer ของบริษัท Milton roy รุ่น Spectronic 601
- Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 99.95% (Minimum Purity Grade)
- ผงเอคาร์ 99.0% จากวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
- อะซีโตน (CH_3COCH_3) AR Grade จากบริษัท RCI Labscan
- กรดซัลฟิวริกคอลลิก (H_2SO_4) 98% จากบริษัท RHK
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade จากบริษัท Univar

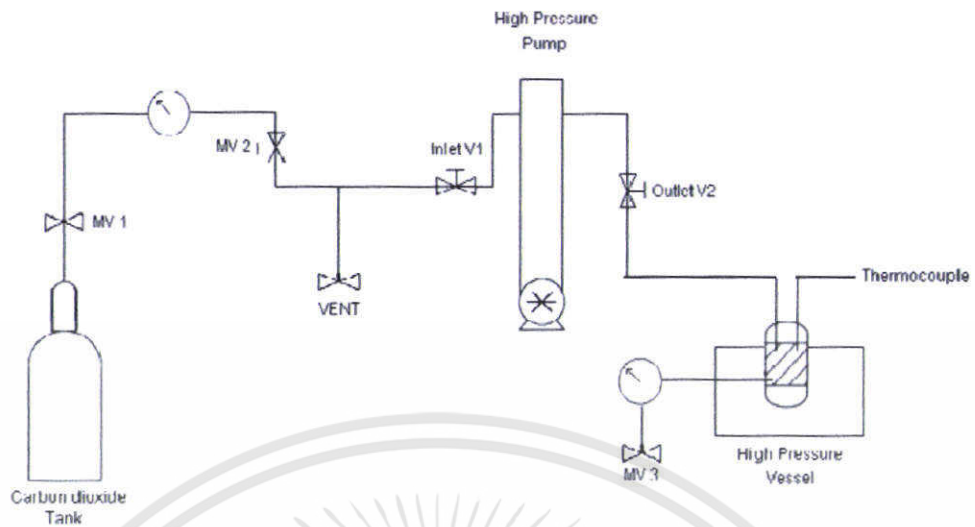
3.2 การเตรียมวุ้นเอคาร์

ในการทดลองจะนำผงเอคาร์และน้ำที่ความเข้มข้น 10% โดยมวลส่วนปริมาตร มาผสมกันในภาชนะที่เป็นแก้ว จากนั้นนำไปใส่ในอ่างน้ำร้อนที่มีการให้ความร้อนที่ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่โดยใช้ Temperature Control พร้อมกับปั่นกวนโดยใช้ Stirrer เพื่อการผสมให้เข้ากัน จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 2 hr แล้วเทใส่แม่พิมพ์พลาสติกขนาด $3.0 \times 5.0 \times 0.3\text{ cm}^3$ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 hr เสร็จแล้วตัดโดยใช้หลอดที่มีขนาดคงที่ ให้มีลักษณะแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 mm สูง 5.0 mm และแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 5.0 mm^3 จากนั้นแยกเก็บในขวดสีชาเพื่อรักษาความชื้นให้คงที่

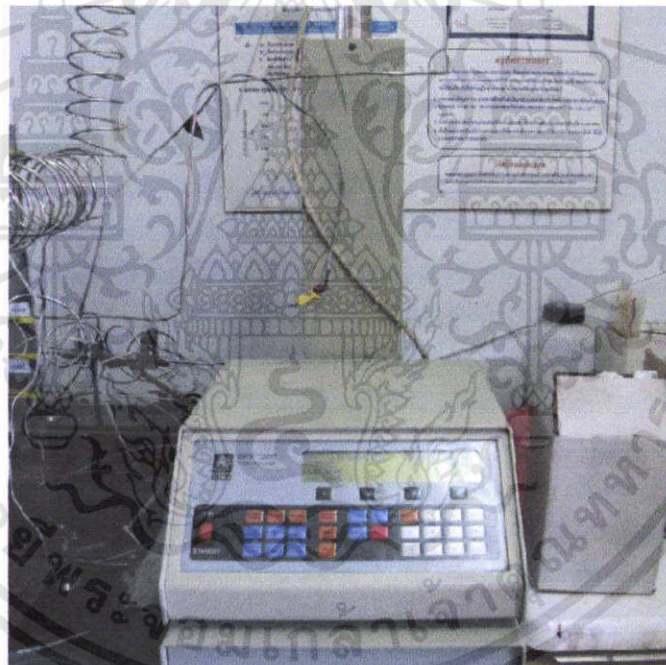
3.3 การทำแห้งวุ้นเอคาร์

3.3.1 การทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

นำวุ้นเอคาร์ที่มีลักษณะเดียว คือ ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 mm สูง 5.0 mm มาชั่งน้ำหนักก่อนใส่ในถังอัดแรงดันสูง ซึ่งมีปริมาตรบรรจุ 15 ml แล้วให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ พร้อมทั้งวัดและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วย Temperature Control จากนั้นปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากถังเก็บผ่านวาล์ว MV1 ดังรูปที่ 3.1 ที่ความดัน 60 bar ไปที่ปั๊มอัดแรงดันสูง ดังรูปที่ 3.2 เพื่อเพิ่มความดันเป็น 150 bar หรือที่ความดันตามต้องการ ก่อนปล่อยผ่านหัวจ่ายไปที่ถังอัดแรงดันที่บรรจุขึ้นตัวอย่าง จากนั้นควบคุมระบบความดัน และอุณหภูมิให้คงที่ และใช้เวลาในการทำแห้งในช่วง 180 min โดยวิเคราะห์ผลที่เวลา 10 20 30 60 90 120 150 และ 180 min ด้วยการนำวุ้นเอคาร์แห้งไปชั่งน้ำหนักเพื่อศึกษาอัตราการทำแห้งวุ้นเอคาร์



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การทำแห้งวันเอคาร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต



รูปที่ 3.2 High Pressure Pump ของ บริษัท ISCO

สำหรับการวัดค่าปริมาณความชื้นตกค้าง (%Wet Basis, X) และอัตราการทำแห้ง (u) ที่เวลาใดๆสามารถประยุกต์สมการของ Niewczas และคณะ [10] ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$X = 100 - \frac{m_o}{m} (100 - X_o) \quad (3.1)$$

$$u = \frac{m_o - m}{m_o} \cdot \frac{100}{t} \quad (3.2)$$

โดย	m_0	คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนทำแห้ง (kg)
	m	คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังทำแห้ง (kg)
	t	คือ เวลาในการทำแห้ง (min)

3.3.2 การทำแห้งด้วยการพาความร้อน

การทดลองในขั้นนี้มีการนำวุ้นเอการ์ที่มีรูปร่างต่างกัน 2 แบบ คือ แบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 mm สูง 5.0 mm ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับที่ทดลองด้วยวิธีการทำแห้งแบบการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 5.0 mm³ นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C ด้วยเตาอบดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยใช้เวลาทำแห้งเท่ากับ 180 min ทั้งนี้ทำการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังทำแห้ง ที่เวลา 10 20 30 60 90 120 150 และ 180 min เพื่อศึกษาอัตราการทำแห้งวุ้นเอการ์เทียบกับการทำแห้งโดยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และเพื่อศึกษานัยของการหดตัวของรูปร่างของวุ้นเอการ์ในรูปแบบที่กำหนด



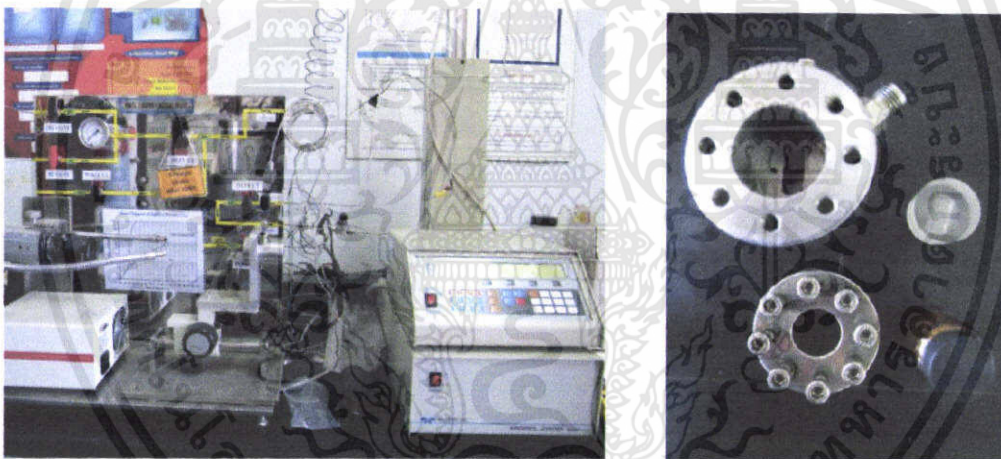
รูปที่ 3.3 เตาอบของบริษัท Carbolite

3.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์

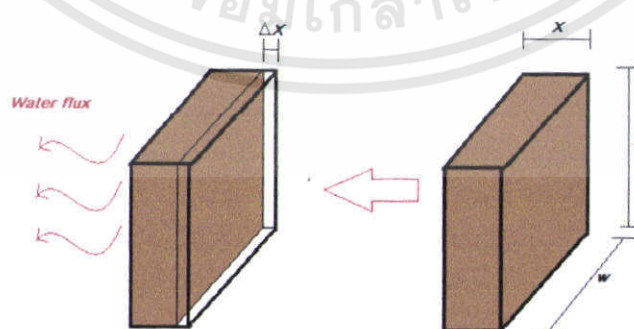
การสังเกตการหดตัวหลังการทำแห้งผ่านกล้องวิดีโอ จะทำการติดตั้งอุปกรณ์คล้ายกับรูปที่ 3.4 แต่จะใช้ตัวอย่างเป็นลักษณะแผ่นสี่เหลี่ยมบางขนาด 5.0x5.0x1.0 mm เพื่อให้ตรงกับสมมติฐานการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ที่ขึ้นตัวอย่างทดสอบต้องมีด้านกว้างและด้านยาวมีค่ามากกว่าด้านหนา รวมทั้งเปลี่ยนถังอัดแรงดันสูงให้มีกระจกส่องผ่านเพื่อให้สามารถสังเกตการหดตัวของวุ้นเอการ์ได้ และปรับค่าแรงดันเป็น 100 120 และ 150 bar เพื่อศึกษาการหดตัวของวุ้นเอการ์ และสามารถนำมา

ประยุกต์ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของน้ำที่ละลายหรือแพร่ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต นั่นคือจะทำให้ปริมาณจำเพาะของวุ้นเอการ์เปลี่ยนไป ทำให้ประยุกต์ใช้สมการของ Fick จากงานวิจัยของ Wang และ J. G. Brennan [3] รวมทั้งรติยา และคณะ [4] ได้ตั้งสมการที่ 2.4 โดยมีการตั้งสมมติฐานการแพร่ของน้ำเข้าไปละลายในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเกิดจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของความชื้น รวมทั้งสมมติให้วุ้นเอการ์มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่กว้างและยาวมาก (Infinite Slab) การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว และไม่คิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ

ข้อจำกัดของการเลือกใช้ชิ้นตัวอย่างที่มีลักษณะแบบแผ่นบางเนื่องจากว่า การใช้กล้องวิดีโอจับภาพขณะเกิดการหดตัวของวุ้นเอการ์ทำได้เพียงภาพ 1-2 มิติ รวมทั้งต้องให้การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียวดังแสดงในรูปที่ 3.5 แต่การหดตัวของวุ้นเอการ์เกิดขึ้นทั้ง 3 มิติ (ตามการศึกษาในหัวข้อ 2.3.2) จึงมีการกำหนดให้ด้านกว้างและยาวมีค่ามากกว่าความหนา ดังนั้นจึงทำให้สามารถดัดแปรสมการของ Fick ได้เหมาะสมมากขึ้น



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ในการศึกษาการหดตัวของวุ้นเอการ์



รูปที่ 3.5 ทิศทางการหดตัวและการแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

โครงสร้างทางจุลภาคภายในวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต จะทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเทคนิคนี้อาศัยการโฟกัสลำอิเล็กตรอนกราดลงบนผิวที่ถูกตัดของวุ้นเอการ์แห้ง อิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับผิวจะถูกถ่ายทอดผ่านระบบตรวจวัดและอิเล็กทรอนิกส์ปรากฏบนจอภาพ โดยวุ้นเอการ์ที่ทดสอบนำมาจากวุ้นที่ทำแห้งที่เวลา 0-180 min



รูปที่ 3.6 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

โครงสร้างทางเคมีของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FTIR เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี เนื่องจากการทำแห้งด้วยความร้อนสูงจะส่งผลโดยตรงต่อวัสดุ ซึ่งอาจทำให้เกิดการสลายพันธะภายในโครงสร้างของวุ้นเอการ์ หรืออาจทำให้โครงสร้างบางส่วนเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีการยิงรังสีอินฟราเรด (Infrared) ไปที่สารตัวอย่างและแปลค่าเป็นความยาวคลื่นหรือ Wave Number โดยสารแต่ละชนิดจะดูดซับรังสีที่ความยาวคลื่นต่างกัน ซึ่งจะสามารถบ่งบอกเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏอยู่บนสารนั้นๆ ได้

3.7 การศึกษาการบวมตัวในสารละลาย

ภายหลังจากการเตรียมวุ้นเอการ์และผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 50 °C และความดันที่ 100 120 และ 150 bar จะได้วุ้นเอการ์แห้ง จากนั้นนำวุ้นเอการ์ไปแช่ในสารละลายเป็นเวลา 24 hr โดยมีการเตรียมตัวทำละลาย 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ น้ำบริสุทธิ์ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 1 M สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 M เพื่อศึกษาระดับการบวมตัวที่สภาวะสารละลายชนิดต่างๆ โดยมีการเทียบน้ำหนักและวัดขนาดของชิ้นตัวอย่างก่อนการทำแห้ง และหลังการแช่ในสารละลาย เพื่อหาค่าระดับการบวมตัว



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการทำแห้งของวุ้นเอการ์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์ รวมทั้งสามารถทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ได้อีกด้วย

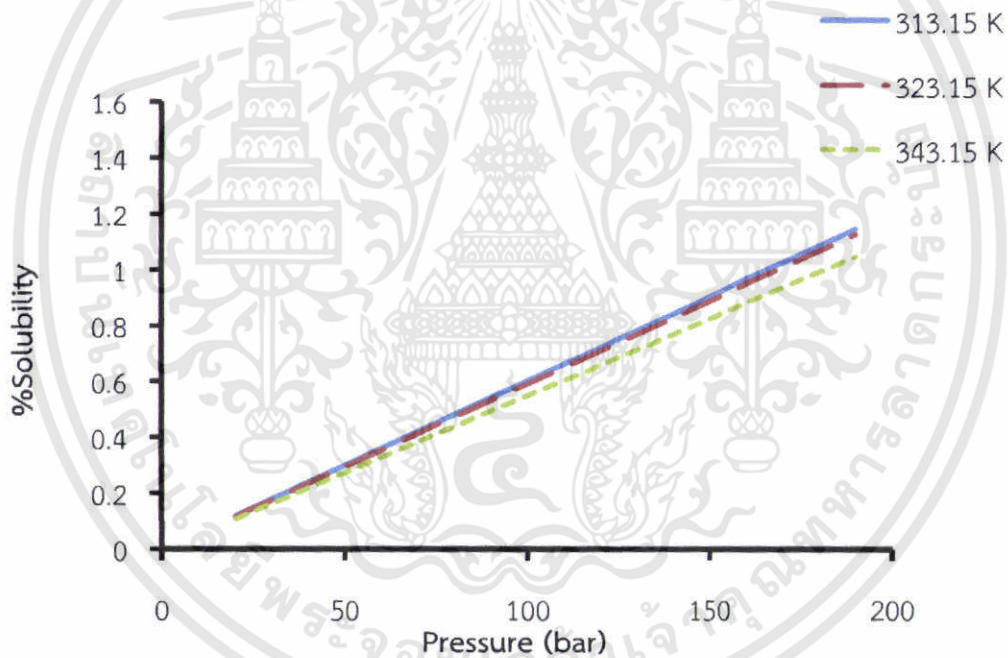
4.1 การกำหนดสภาวะในการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

สำหรับการกำหนดสภาวะในการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีความจำเป็นเนื่องจากต้องทำการควบคุมระบบ โดยควบคุมความดัน อุณหภูมิ และความสามารถของการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตให้เหมาะสม เพื่อให้กระบวนการทำแห้งมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

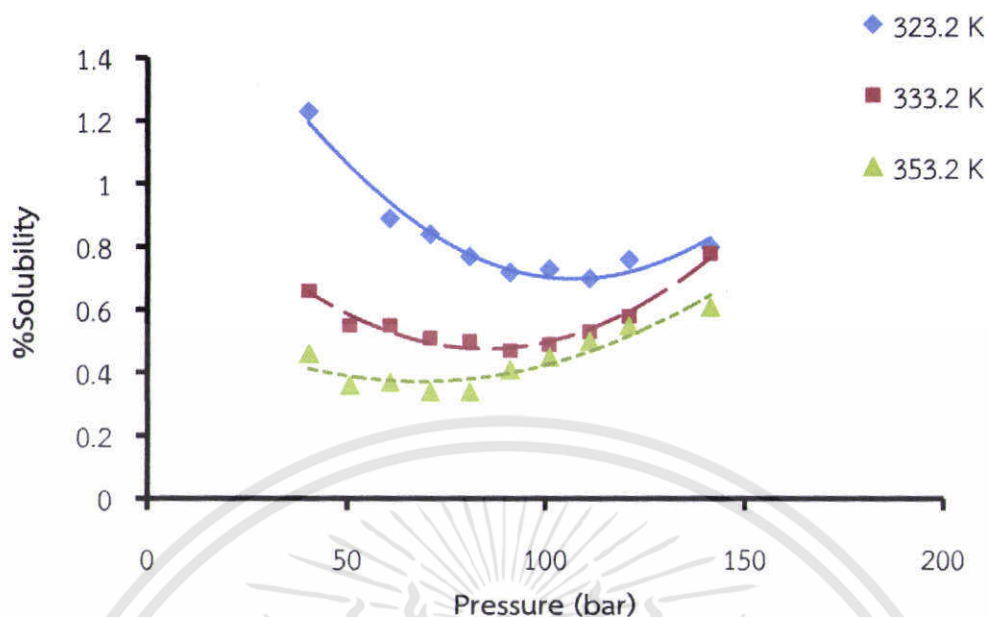
การทดลองการทำแห้งวุ้นเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ต้องมีการคำนึงถึงค่าความสามารถของการละลายของน้ำในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นตัวกำหนดอัตราส่วนการเตรียมความเข้มข้นของวุ้นเอการ์ โดยควบคุมสัดส่วนความชื้นหรือปริมาณน้ำภายในชิ้นตัวอย่างวุ้นเอการ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ นั่นคือ ประยุกต์ใช้สมการของไหลแบบไม่อุดมคติ ของ Raoult's Law ตามงานวิจัยของ M. van der Kraan และคณะ [16] ดังแสดงในภาคผนวก ค.1 ที่ทำงานวิจัยเพื่อหาสมการกระจายตัวของน้ำในสองเฟส คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและเส้นใยในกระบวนการย้อมสี ซึ่งในระบบดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับระบบของงานวิจัยนี้ คือ น้ำในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและเอการ์ เนื่องจากภายในโครงสร้างของเอการ์และเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันในสายโซ่ที่เหมือนกัน คือ $-OH$ และ $-O-$ รวมทั้งเป็นพอลิเมอร์ที่มาจากธรรมชาติเหมือนกัน จากการคำนวณค่าการละลายที่อุณหภูมิและความดันที่ $50\text{ }^{\circ}C$ (323.15 K) และ 150 bar ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 0.088 g/ml

จากการวิเคราะห์หาค่าการละลายตามสมการของ Raoult's Law พบว่า ค่าการละลายมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความดันค่าการละลายจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับ แต่สำหรับการเพิ่มหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ค่าการละลายลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Bamberger และคณะ [17] ในช่วงความดันมากกว่า 70 bar ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยพบว่า เมื่อเพิ่มความดันของระบบที่มากกว่าความดันของจุดวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ จะทำให้ค่าการละลายมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้ระบบจะทำให้ค่าการละลายลดลง แต่งานวิจัยนี้ทำการหาสภาวะการทำแห้งโดยการอ้างอิงสมการของ Raoult เป็นหลัก เนื่องจากการทดลองของ

Bamberger และคณะ ทำให้ทราบว่า การเพิ่มความดันในช่วงก่อนจุดวิกฤต ที่ความดัน 70 bar ซึ่งเป็นช่วงที่คาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่เข้าสู่สถานะเหนือวิกฤต ค่าการละลายจึงมีค่าที่ผันแปร คือ เมื่อเพิ่มความดันค่าการละลายลดลง ดังนั้นการทดลองในตอนที่ 4.2 การเลือกสถานะที่จะใช้ในการทำแห้งวุ้นเอการ์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ จึงเลือกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 50.0 °C ซึ่งจะทำให้ค่าการละลายอยู่ในระดับที่เหมาะสม เนื่องจากการเกิดเป็นสถานะเหนือวิกฤตของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อุณหภูมิของระบบจะต้องมีค่ามากกว่า 31.7 °C ดังนั้นการใช้อุณหภูมิที่มากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ทั้งนี้ให้ผลการเปลี่ยนแปลงค่าการละลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่การทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความดันที่อยู่ในช่วง 100-150 bar เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าการละลายกับสมการทางทฤษฎีของ Raoult's Law ที่ได้แสดงในรูป 4.1 และสาเหตุที่ไม่สามารถปรับค่าความดันให้มากกว่า 150 bar เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการทดลองที่สามารถทนแรงอัดสูงสุดได้ที่จุดนี้ มิฉะนั้นในขณะที่ทดลองอาจเกิดการระเบิดของอุปกรณ์ทำให้เครื่องมือเสียหาย หรือผู้ทดลองอาจได้รับบาดเจ็บ



รูปที่ 4.1 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตตามงานวิจัยของ M. van der Kraan ตามสมการที่ ค.1



รูปที่ 4.2 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจากการทดลองของ Bamberger และคณะ [18]

จากปริมาณความชื้นในวุ้นเอการ์ที่เตรียมได้ที่ 0.036 g/ml และการคำนวณหาค่าการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.061-0.088 g/ml เมื่อเพิ่มความดันของระบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ 100-150 bar ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในวุ้นเอการ์สามารถละลายเข้าไปในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้จริง การทำแห้งในระบบนี้จึงสามารถทำได้

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นในแต่ละสภาวะ

สภาวะ	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	ค่าการละลาย (g/ml)
ความชื้นในวุ้นเอการ์	25	1	0.036
ความชื้นในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	50	100	0.061
	50	120	0.075
	50	150	0.088

4.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะจำเพาะของการทำแห้งด้วยการพาความร้อน และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

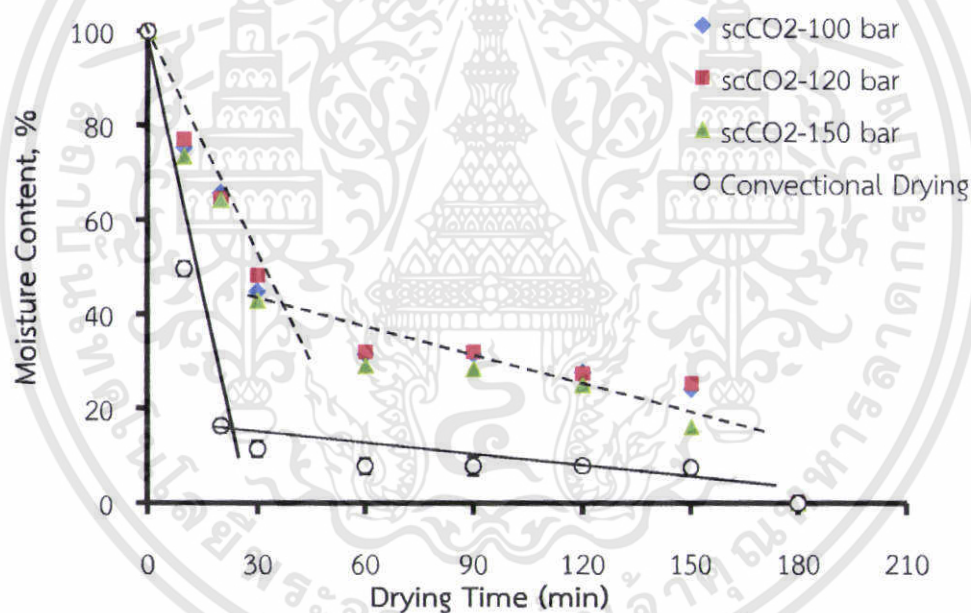
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และอัตราการทำแห้งเทียบกับเวลา

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และอัตราการทำแห้งทั้ง 2 วิธี คือ การทำแห้งด้วยการพาความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่สภาวะอุณหภูมิ 50 °C ความดัน 100 120 และ 150 bar เพื่อให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพ ข้อดี และข้อเสียของการทำแห้งแต่ละวิธี โดยพบว่า เมื่อให้เวลาในการทำแห้งเพิ่มขึ้น ความชื้นที่อยู่ภายในวันเอการ์ของการทำแห้งทั้ง 2 วิธี จะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.3

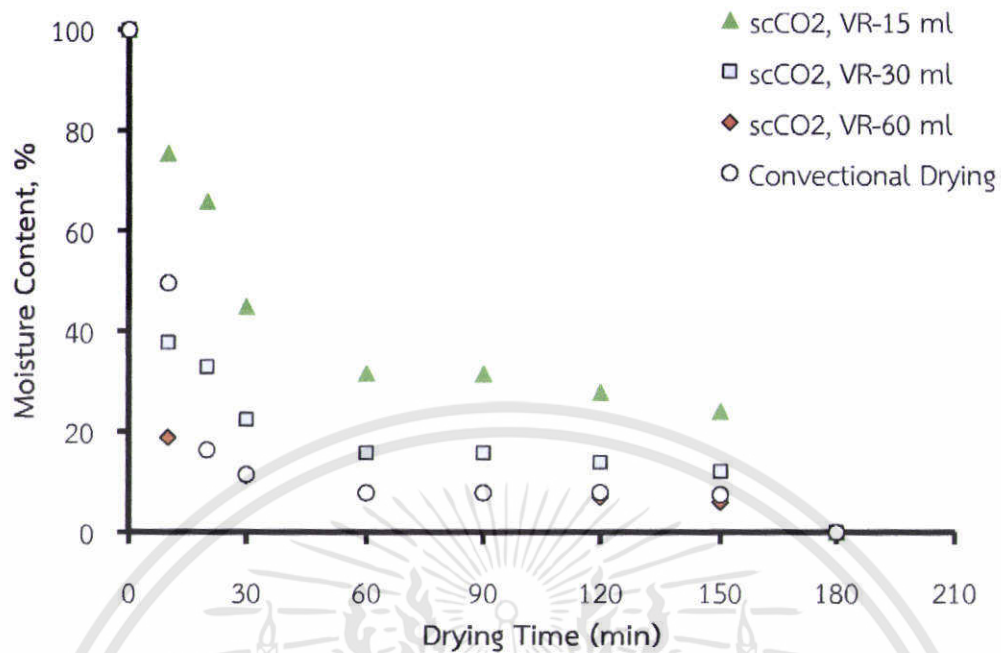
เมื่อพิจารณาที่การทำแห้งวันเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตไหลผ่านเข้าไปในเนื้อของเอการ์ ภายในวันเอการ์จะค่อยเกิดการหดตัวอย่างช้าๆ ซึ่งสาเหตุเนื่องจากเมื่อถึงจุดสมดุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดการเปลี่ยนเฟสจากก๊าซมาเป็นของไหลเหนือวิกฤตซึ่งทำให้เกิดสมดุลการแพร่และการละลายของน้ำเข้าไปในเฟสคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยเมื่อพิจารณาสภาวะสมดุลที่ความดัน 150 bar และอุณหภูมิ 50 °C สามารถคำนวณค่าการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยประยุกต์ใช้สมการตามงานวิจัยของ M. van der Kraan และคณะ [16] ดังสมการ ค.1 ได้เท่ากับ 0.088 g/ml ของปริมาตรบรรจุ เมื่อเทียบกับปริมาตรถังที่บรรจุคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตทั้งหมดจะสามารถดูดซับน้ำได้ถึง 15 เท่า ซึ่งมากกว่าปริมาณของน้ำที่ละลายอยู่ในวันเอการ์ที่เตรียมได้ที่มีปริมาณน้ำเพียง 0.036 g/ml หรือคิดเป็น 36 เท่าของน้ำที่สามารถดูดซับได้ ส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถรองรับหรือดูดซับน้ำที่แพร่ออกจากวันเอการ์ได้มากเพียงพอ โดยจะพบว่าในช่วง 60 นาทีแรก การลดลงของปริมาณความชื้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากในช่วงต้นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในถังอัดแรงดันสูงยังปราศจากความชื้น ความชื้นจึงสามารถเข้าไปละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ในปริมาณมาก ก่อนที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นจะลดลงอย่างช้าจนคงที่ เนื่องมาจากน้ำได้แพร่และละลายเข้าไปในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจนใกล้ถึงจุดอิ่มตัวจึงส่งผลให้มีแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ลดต่ำลงจึงส่งผลให้อัตราการทำแห้งลดลง และช่วงท้ายจะมีอัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย น่าจะมีสาเหตุเนื่องจากหลังจากที่วันเอการ์หดตัวจนขนาดใกล้เคียงคงที่น้ำในวันเอการ์ถูกดันให้ออกจากวันเอการ์ จึงส่งผลให้ในช่วงท้ายการเปลี่ยนแปลงความชื้นเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.3

สำหรับการเปลี่ยนแปลงความดันของการทำแห้งวันเอการ์จะสังเกตเห็นแนวโน้มของการลดปริมาณความชื้นได้มากขึ้นเมื่อใช้ความดันในการทดลองมากขึ้น แต่จะไม่ชัดเจน เนื่องจากขนาดของการทดลองที่มีปริมาณวันเอการ์ที่มีความชื้นเพียง 0.036 g/ml ซึ่งเป็นขนาดเล็กมาก การเปลี่ยนแปลงความชื้นตามการเปลี่ยนความดันจึงไม่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.3

การเปรียบเทียบการทำแห้งวุ้นเอการ์โดยวิธีใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และการพาความร้อน พบว่า การลดลงของปริมาณความชื้นโดยใช้การพาความร้อนเร็วกว่าการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เนื่องจากข้อจำกัดของงานวิจัยที่ปริมาตรภายในเตาอบที่อุณหภูมิ 50°C มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของวุ้นเอการ์มาก จึงทำให้น้ำภายในเอการ์สามารถแพร่ไปในกระแสอากาศร้อนได้ในปริมาณมากกว่า รวมทั้งการทำแห้งแบบการพาความร้อนอาจมีการระบายอากาศสู่ภายนอกผ่านทางช่องว่างเล็กๆร่วมด้วย ส่งผลให้การทำแห้งจึงเกิดได้เร็วกว่าแบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต แต่เมื่อมีการจำลองการปรับขนาดของถังอัดแรงดันสูงที่ใช้ทดลองการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ความดัน 150 bar ด้วยการใช้ Volume Ratio (VR) หรืออัตราส่วนของวุ้นเอการ์เทียบกับปริมาตรถังตามวิธีในภาคผนวก ค.6 จะพบว่า เมื่อ VR มีค่าลดลงหรือขนาดถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้เส้นสมมูลการทำแห้งเลื่อนตัวลง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 นั้นหมายถึงแนวโน้มของการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับการทำแห้งแบบการพาความร้อนมากขึ้น ดังนั้น ถ้าทั้ง 2 วิธีมีขนาดถังปฏิกรณ์ที่ใกล้เคียงกัน ความสามารถในการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตอาจมีประสิทธิภาพในการทำแห้งที่เร็วขึ้นในถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ขึ้น

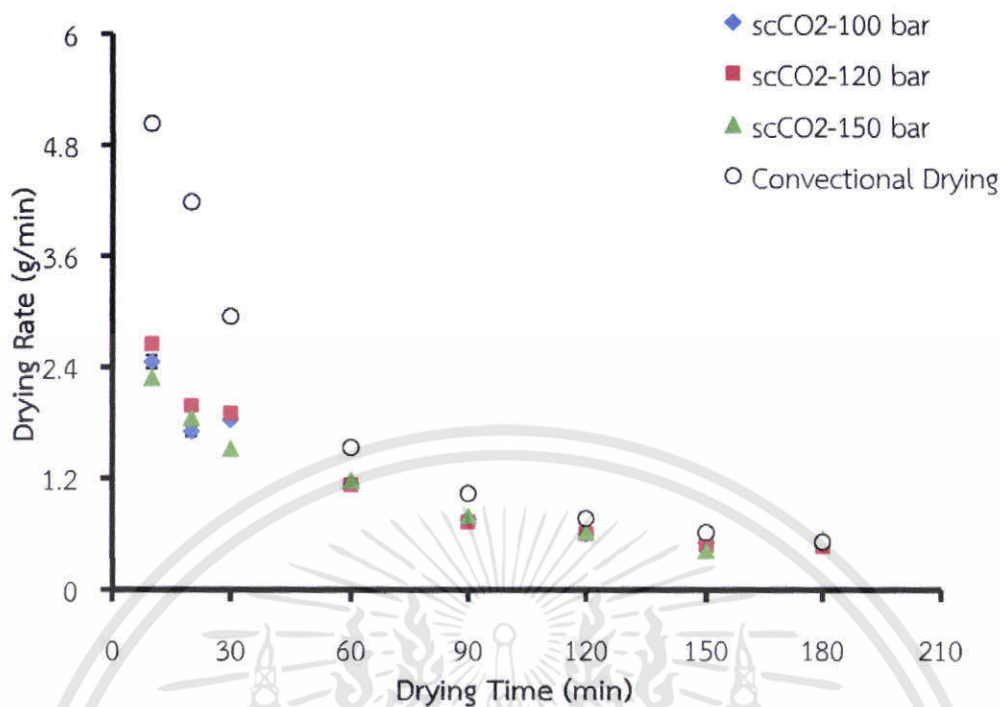


รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาโดยมีการปรับค่าอัตราส่วนปริมาตร (VR) ของวุ้นเอการ์เทียบกับขนาดถังปฏิกรณ์

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอัตราการทำแห้งพบว่า การทำแห้งวุ้นเอการ์ด้วยการพาความร้อนและการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต จะมีอัตราการทำแห้งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ที่ประมาณ 60 min อัตราการทำแห้งช่วงนี้จะเกิดอย่างรวดเร็วเนื่องจากการละลายของน้ำเข้าไปในด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และการแพร่ของน้ำเข้าไปในกระแสอากาศร้อน ส่วนในช่วงที่ 2 ที่เวลาการทำแห้งมากกว่า 60 min อัตราการทำแห้งจะลดลงจนคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 นั้นหมายถึงน้ำไม่สามารถออกจากวุ้นเอการ์ได้อีก แต่การพิจารณาที่การทำแห้งด้วยการพาความร้อน จะพบว่าแตกต่างจากทฤษฎี คือ อัตราการทำแห้งของสารที่มีความชื้นรูปพรุนในช่วงแรกจะต้องคงที่และจะค่อยๆลดลง [10] สาเหตุที่ทำให้เกิดลักษณะดังกล่าว เนื่องจาก สมดุลระหว่างขนาดของสารและขนาดของเตาอบที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีความแตกต่างกันมาก ความชื้นในรูปพรุนจึงระเหยเข้าไปสู่กระแสอากาศร้อนได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะค่อยๆลดลงจนคงที่



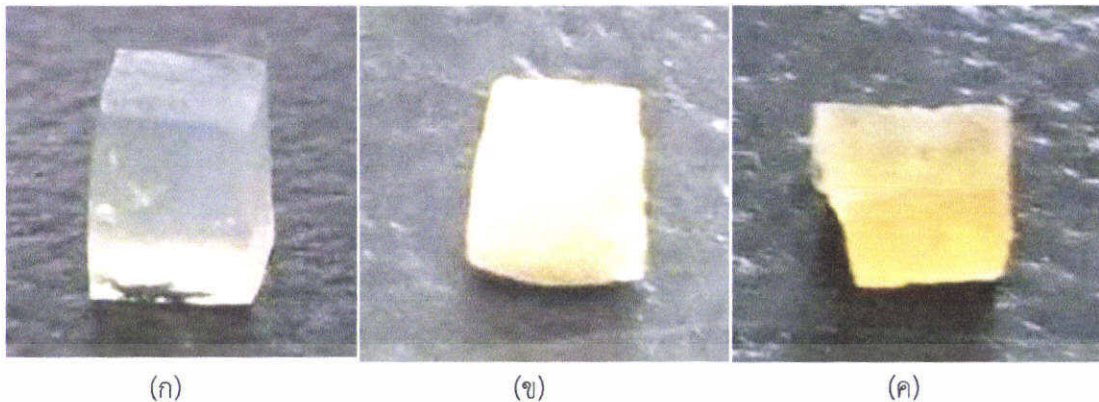
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งเทียบกับเวลา

4.3 การศึกษาเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อน และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

4.3.1 การเปรียบเทียบลักษณะวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อน และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของวุ้นเอการ์ จะทำให้ทราบถึง กลไกขณะเกิดการแห้ง เช่น การเปลี่ยนสีทำให้เข้าใจถึงการเกิดปฏิกิริยาทางความร้อนขณะมีการทำแห้ง การหดตัวทำให้เข้าใจถึงลักษณะการแพร่ของน้ำที่ออกจากวุ้นเอการ์ เป็นต้น

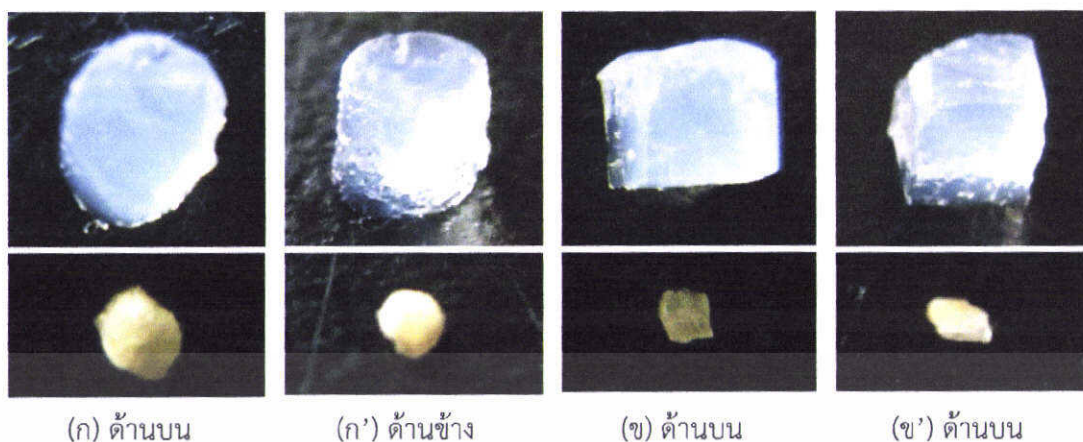
เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า จะพบว่า วุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อนจะเกิดการเสียหาย คือ มีรูปร่างที่บิดเบี้ยว และเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองใส ในขณะที่วุ้นเอการ์จากการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี เนื่องจากความร้อนและออกซิเจนในอากาศ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ส่งผลให้วุ้นเอการ์เปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ในขณะที่วุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะมีลักษณะขาวขุ่น ที่มองเห็นฟองก๊าซขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งจะต้องทดสอบด้วยเทคนิค SEM เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัญญาณวิทยาต่อไป



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบลักษณะของขี้ผึ้งเอคาร์โดย (ก) ยังไม่ผ่านการทำแห้ง (ข) ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (ข) ผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อน

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะขี้ผึ้งเอคาร์ทั้งแบบทรงกระบอก และทรงลูกบาศก์ ด้วยการทำแห้งแบบพาความร้อน

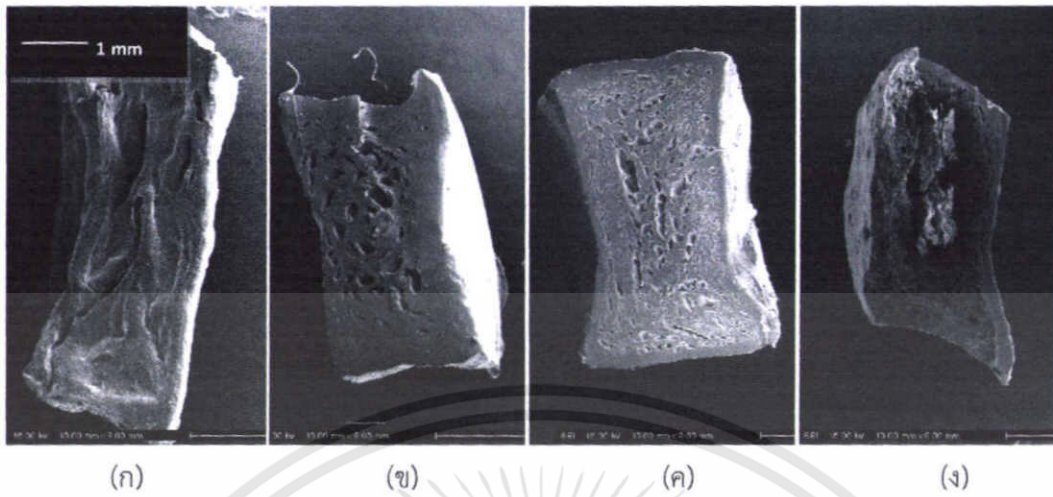
การศึกษานี้ของการหดตัว ช่วยให้สามารถเลือกรูปร่างของขี้ผึ้งเอคาร์เพื่อใช้ประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในขี้ผึ้งเอคาร์ได้อย่างเหมาะสม โดยขั้นตอนนี้มีการนำขี้ผึ้งเอคาร์ที่มีรูปร่างต่างกัน 2 แบบ คือ แบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 mm สูง 5.0 mm อัตราการทำแห้ง ซึ่งมีขนาดเดียวกับที่ทดลองด้วยวิธีการทำแห้งแบบการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 5.0 mm³ ไปอบที่อุณหภูมิคงที่ 50 °C จากการสังเกตลักษณะขี้ผึ้งเอคาร์ทั้ง 2 แบบ พบว่า เอคาร์แบบทรงลูกบาศก์จะเกิดการหดตัวทั้งสามทิศทางซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนโดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดจาก 5.0 mm เป็น 1.0 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข, ข') ในขณะที่แบบทรงกระบอกจะเห็นการหดตัวในทิศทางความสูงเปลี่ยนจาก 5.0 mm เป็น 1.0 mm มากกว่าการลดขนาดในทิศทางเส้นผ่านศูนย์กลาง ตามรูป 4.7 (ก, ก') ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาลักษณะการหดตัวดังกล่าว เนื่องจากต้องมีการเลือกลักษณะของขี้ผึ้งเอคาร์เพื่อนำไปศึกษาในหัวข้อ 4.4.2 ที่เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในขี้ผึ้งเอคาร์ ที่มีข้อจำกัดในการเลือกใช้ชิ้นตัวอย่างที่มีลักษณะแบบแผ่นบางเนื่องจากว่า การใช้กล้องวิดีโอจับภาพขณะเกิดการหดตัวของขี้ผึ้งเอคาร์ทำได้เพียงภาพ 1-2 มิติ รวมทั้งต้องให้การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว ดังนั้นจึงเลือกใช้เอคาร์แบบทรงสี่เหลี่ยมซึ่งมีการหดตัวแบบสมมาตรและมีทิศทางที่แน่นอน แต่การหดตัวของขี้ผึ้งเอคาร์ในการทดลองนี้จะเกิดขึ้นทั้ง 3 มิติ ดังนั้นในหัวข้อ 4.4.2 จึงมีการกำหนดให้ด้านกว้างและยาวมีค่ามากกว่าความหนา และจึงทำให้สามารถประยุกต์ใช้สมการของ Fick ตามงานวิจัยของ Wang และ J. G. Brennan [3] รวมทั้งรัตติยา และคณะ [4] ได้เหมาะสมมากขึ้น



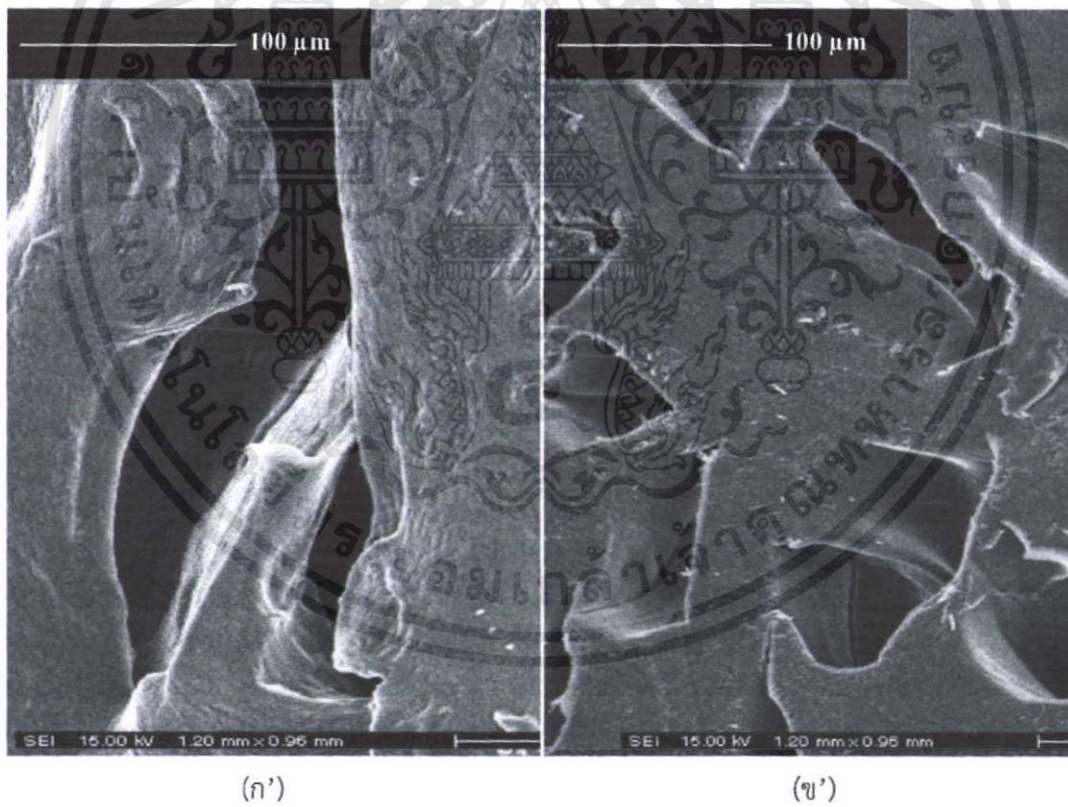
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเอการ์ที่กำลังขยาย 100 เท่า 2 แบบที่ผ่านการทำแห้งด้วยการพาคความร้อน โดย (ก, ก') บน-รูปร่างเอการ์ทรงกระบอกก่อนการทำแห้ง, ล่าง-รูปร่างเอการ์ทรงกระบอกหลังการทำแห้ง (ข, ข') บน-รูปร่างเอการ์ทรงลูกบาศก์ก่อนการทำแห้ง, ล่าง-รูปร่างเอการ์ทรงลูกบาศก์หลังการทำแห้ง

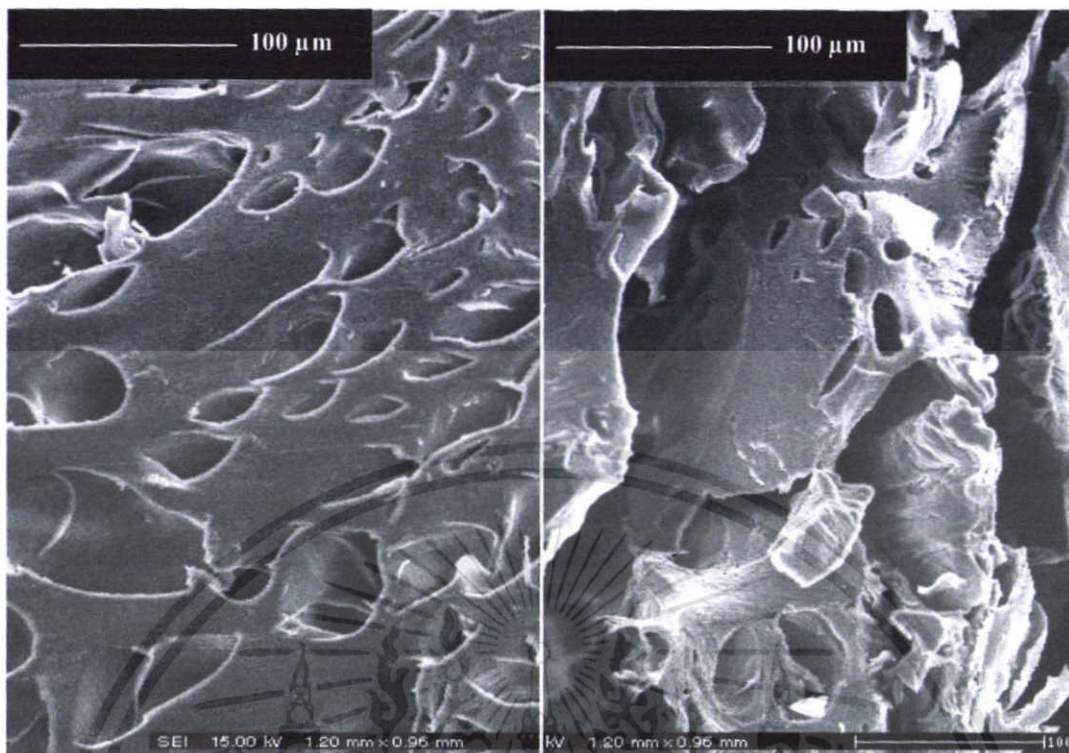
4.3.2 การศึกษาเปลี่ยนแปลงลักษณะภายในรูปร่างเอการ์ด้วยเทคนิค SEM หลังผ่านการทำแห้งรูปร่างเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ช่วยยืนยัน การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือลักษณะโครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อนำชิ้นงานรูปทรงกระบอกที่ผ่านการทำแห้งรูปร่างเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เวลา 10 min ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่า จากภาพขยาย 12 เท่าภาพรวมภายนอกของรูปร่างเอการ์มีการหดตัวทุกด้าน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก-ง) แต่เมื่อสังเกตในเนื้อโครงสร้างภายในรูปร่างเอการ์จากภาพขยาย 100 เท่า จะเห็นรูพรุนวงปิด (Close Cell) ที่มีลักษณะแบบเข็ม (Needle) ซึ่งเกิดจากการหดตัวของโครงสร้างในทิศทางแนวขวาง (X Direction) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ก' เนื่องจากน้ำที่สะสมภายในโครงสร้างของรูปร่างเอการ์เกิดการแพร่และละลายไปสู่เฟสสมดุลของของไหลอย่างช้าๆ ทำให้เกิดการหดตัวของรูปร่างเอการ์อย่างช้าๆ แต่หลังจากเพิ่มเวลาในการทำแห้งให้มากขึ้นเป็น 30 และ 120 min รูปร่างเอการ์ที่ได้มีรูพรุนแบบวงปิดขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากดังรูปที่ 4.8 ข' และ ค' ตามลำดับ ซึ่งจะสามารรถสังเกตเห็นลักษณะรูพรุนที่ค่อนข้างกลม เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีแรงดันสูงแพร่กลับเข้าไปในรูปร่างเอการ์ และเมื่อให้เวลาการทำแห้งที่มากขึ้นที่เวลา 180 min พบว่า โครงสร้างรูพรุนแบบปิดภายในรูปร่างเอการ์เกิดการแตกและเชื่อมติดกัน เนื่องมาจากสายโซ่ของเอการ์ที่มีพันธะ $-OH$ และ $-O-$ จะเกิดการแตกออก ซึ่งเป็นการแตกของพันธะที่มี Radical เกิดขึ้นเนื่องมาจากการได้รับความร้อนเป็นเวลานาน ส่งผลทำให้รูพรุนขนาดเล็กเกิดการแตกออกกลายเป็นโพรงในแนวยาว คล้ายกับรูพรุนแบบเซลล์เปิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Z.K. Brown และคณะ [1] ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ง'



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM 12x ของวุ้นเอการ์ภายหลังการทำแห้งที่เวลา (ก) 10 min (ข) 30 min (ค) 120 min และ (ง) 180 min



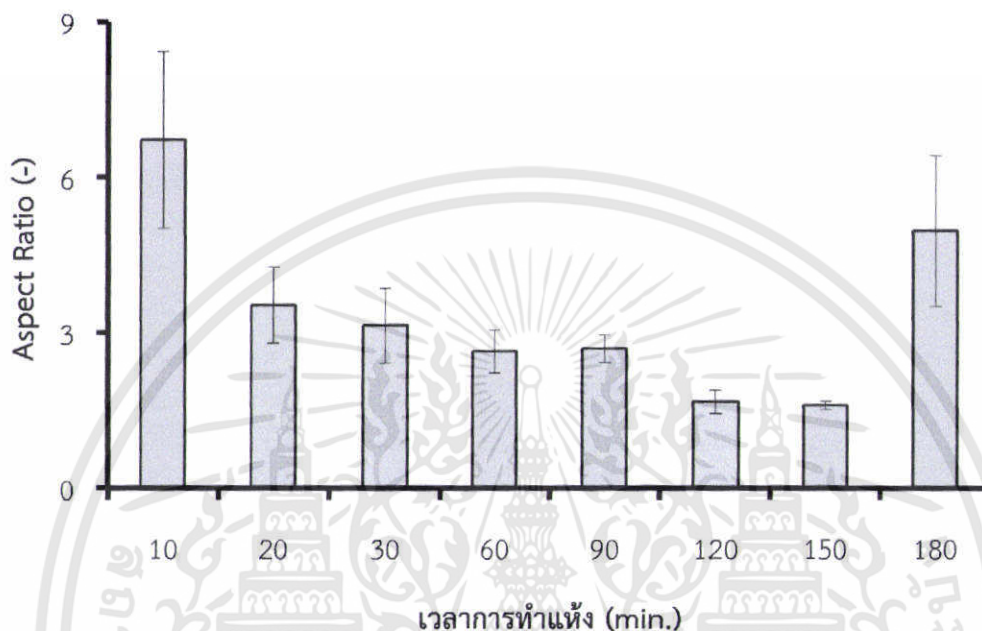


(ค') (ง')

รูปที่ 4.8 (ต่อ) ภาพถ่าย SEM 100x ของรูพรุนเอคาร์ภายใต้การทำให้แห้งที่เวลา (ก') 10 min (ข') 30 min (ค') 120 min และ (ง') 180 min

การวัดขนาดรูพรุนทำให้ทราบสมบัติทางกายภาพของรูพรุนในรูพรุนเอคาร์ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้อย่างชัดเจน ว่ามีลักษณะวงรี วงกลม หรือเหลี่ยม โดยการวัดค่าขนาดของรูพรุนจะต้องมีการตั้งค่าเริ่มต้นของด้านกว้างหรือด้านยาวของชิ้นตัวอย่าง โดยได้กำหนดให้ด้านยาวมีค่าเริ่มต้นที่ 5.0 nm ซึ่งเป็นขนาดของรูพรุนเอคาร์จริงที่ทดสอบ และจากการวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนตามค่า Aspect Ratio หรือค่าอัตราส่วนความยาวและความกว้างด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่า ขนาดของรูพรุนมีการเปลี่ยนแปลงในหลายลักษณะ ไม่ขึ้นกับเวลา แต่ขึ้นกับความสามารถในการแพร่และการละลายของน้ำเข้าสู่เฟสของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าด้านยาวของรูพรุนมีค่ามากกว่าด้านกว้างมาก แสดงถึงการหดตัวของรูพรุนเอคาร์ เนื่องจากในช่วงต้นความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามาก จึงทำให้น้ำในรูพรุนเอคาร์สามารถแพร่และละลายเข้าสู่เฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ในปริมาณมาก แต่หลังจากเพิ่มเวลาในการทำให้แห้งมากขึ้น ค่า Aspect Ratio จะค่อยๆ ลดลงอย่างเป็นลำดับ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.8-2.7 นั้นแสดงถึงภายในรูพรุนเอคาร์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากเมื่อเวลาการทำให้แห้งมากขึ้น น้ำที่ละลายเข้าไปในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะถึงจุดอิ่มตัวหรือจุดสมดุลและในขณะเดียวกันนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่มีความดันสูงจะเกิดการแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนเอคาร์ ส่งผลให้เกิดรูพรุนแบบวงปิดขนาดเล็กจำนวนมาก จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่า Aspect Ratio ในช่วงนี้ลดลง แต่เมื่อให้

เวลาในการทำแห้งเพิ่มอีก จะทำให้ค่า Aspect Ratio มีค่าเพิ่มขึ้นอีก โดยที่เวลา 180 min พบว่า โครงสร้างรูพรุนภายในวุ้นเอการ์เกิดการแตกและเชื่อมติดกัน เนื่องจากสายโซ่ของเอการ์ที่มีพันธะ -OH และ -O- จะเกิดการแตกออก ส่งผลทำให้รูพรุนขนาดเล็กเกิดการแตกออกกลายเป็นโพรงในแนวยาวส่งผลให้ค่า Aspect Ratio สูงขึ้นอีกซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Z.K. Brown และคณะ [1]



รูปที่ 4.9 ค่า Aspect Ratio ของการทำแห้งวุ้นเอการ์ที่เวลาใดๆ

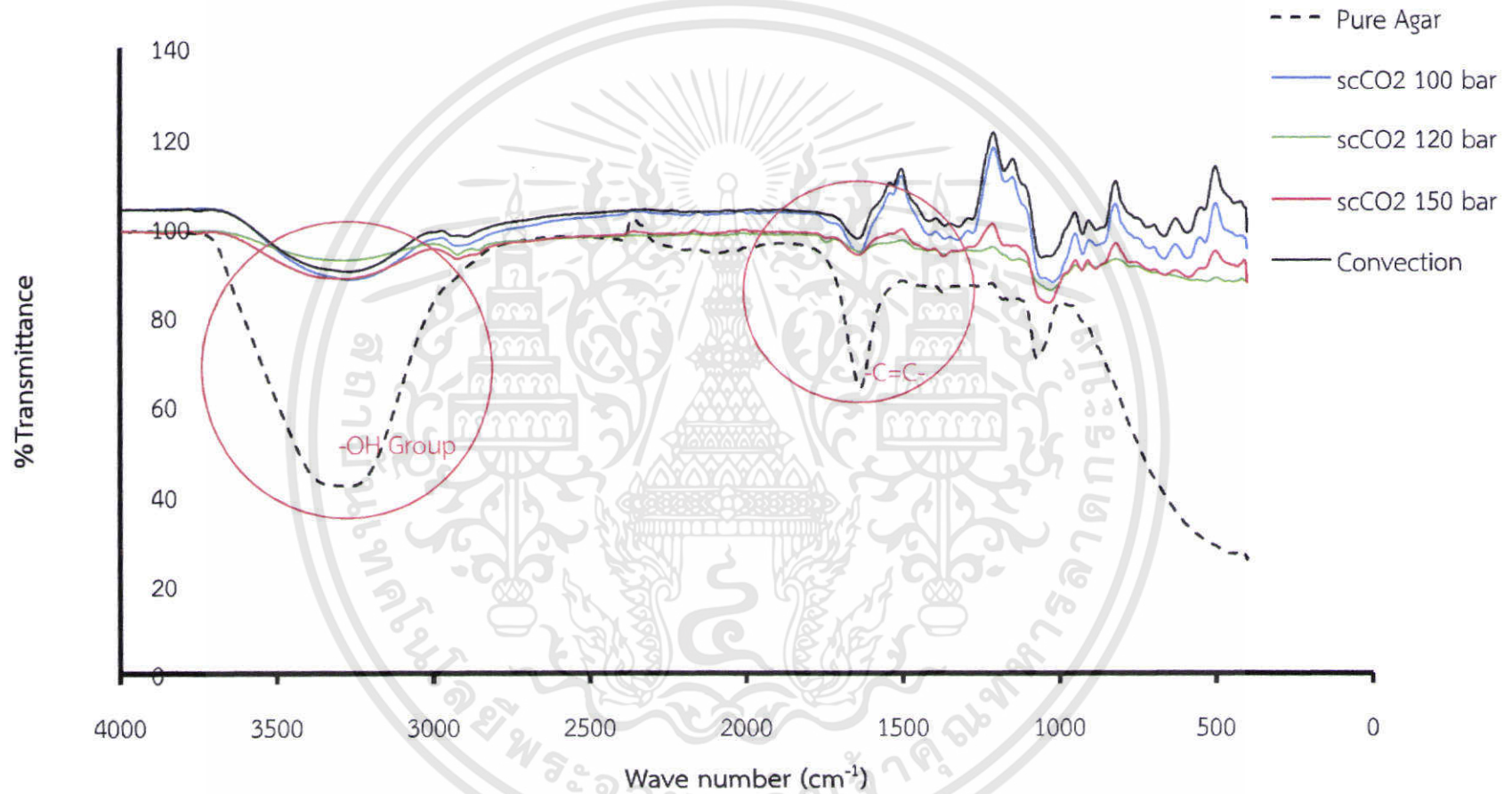
4.4 การศึกษาเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อน และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในวุ้นเอการ์ด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FTIR เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี เนื่องจากการทำแห้งด้วยความร้อนสูงจะส่งผลโดยตรงต่อวัสดุ ซึ่งอาจทำให้เกิดการสลายพันธะภายในโครงสร้างของวุ้นเอการ์ หรืออาจทำให้โครงสร้างบางส่วนเปลี่ยนแปลงไป

ภายหลังจากการนำวุ้นเอการ์ไปทำแห้งทั้ง 2 วิธี คือ แบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และแบบการพาความร้อน นำตัวอย่างทั้งสองแบบไปหาความเข้มข้นด้วยเทคนิค UV-VIS เนื่องจากวุ้นเอการ์ภายหลังการทำแห้งจะเป็นของแข็งจึงต้องมีการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถละลายวุ้นเอการ์ได้ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าว Wave Length ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 660.50 nm จะทำให้ Wave Length เปลี่ยนแปลง และแปรค่าเป็นความเข้มข้นได้ ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความเข้มข้นที่ 1.0978 ml/100 ml ของสารละลาย ส่วนเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งแบบการพาความร้อน

ร้อนมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0975 ml/100 ml ของสารละลาย แสดงให้เห็นว่า วุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีพาคความร้อนมีการสูญเสียโมเลกุลบางส่วนที่มากกว่าการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตทำให้ได้ค่าความเข้มข้นที่ต่ำกว่า แต่ค่าทั้งสองเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมาก จึงต้องมีการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR เพื่อศึกษาโครงสร้างของวุ้นเอการ์ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใดและเพื่อการยืนยันว่า วุ้นเอการ์ที่ทำแห้งทั้งสองวิธีมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมือนหรือต่างกันอย่างไร ผลการวิเคราะห์ภาพ IR Spectra ที่แสดงตามรูปที่ 4.10 ของวุ้นเอการ์ที่ยังไม่ผ่านการทำแห้งวิธีใด จะมีพีคที่ Wave Number 3200-3700 cm^{-1} ปรากฏอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงวุ้นเอการ์จะมีหมู่ของไฮดรอกซิล (-OH) ที่เป็นโครงสร้างหลักของน้ำอยู่ในปริมาณมาก ที่โดยทั่วไปแล้ว H_2O จะมีจำนวนแบบของการสั่นแบบพื้นฐาน 3 แบบ คือที่ Wave Number 3756, 3652 และ 1545 cm^{-1} [19] และเมื่อนำวุ้นเอการ์ไปทำแห้งพบว่าพีค ณ จุดนี้มีความเข้มที่ลดลงแสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลมีปริมาณลดลง นั่นคือความชื้นภายในวุ้นเอการ์ลดลงด้วย เมื่อสังเกตพีคที่ Wave Number 1630 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$ จะพบว่า มีความเข้มของพีคลดลงเมื่อผ่านการทำแห้งทั้งสองวิธี แสดงว่า การทำแห้งทำให้โครงสร้างแบบตาข่ายของวุ้นเอการ์เปลี่ยนแปลงไป โดยอาจทำให้เกิดการแตกพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ที่กระจายตัวในวุ้นเอการ์ ส่วนในช่วงพีคจำนวนมากในช่วง Wave Number ที่ 1100-500 cm^{-1} จะแสดงเอกลักษณ์ของพันธะ C-H ทั้ง Bending และ e Starching ซึ่งเมื่อนำวุ้นเอการ์ผ่านการทำแห้งเป็นเวลานาน ความชื้นหรือน้ำก็จะหลุดจากโครงสร้างมากขึ้นส่งผลให้วุ้นเอการ์มีพันธะย่อยแบบ C-H มากขึ้น สำหรับความแตกต่างของการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและแบบการพาคความร้อน จะเห็นความแตกต่างเพียงเล็กน้อยคือ ที่ Wave Number 3270 cm^{-1} จะเห็นแนวโน้มของการทำแห้งแบบการพาคความร้อน จะมีความเข้มต่ำกว่าแบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต นั่นหมายถึง การทำแห้งแบบพาคความร้อนจะลดความชื้นได้ดีกว่าแบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในตอนต้นที่ 4.1.2 ที่มีสาเหตุจากข้อจำกัดของงานวิจัยที่ปริมาณภายในเตาอบที่อุณหภูมิ 50 °C มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของวุ้นเอการ์มาก จึงทำให้น้ำภายในเอการ์สามารถแพร่ไปในกระแสอากาศร้อนได้ในปริมาณมากกว่า การทำแห้งจึงเกิดได้เร็วกว่าแบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต



รูปที่ 4.10 กราฟ FTIR ของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและทำแห้งด้วยการพาความร้อนเทียบกับวุ้นเอการ์ที่ยังไม่ผ่านการทำแห้ง

4.4.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ในระบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

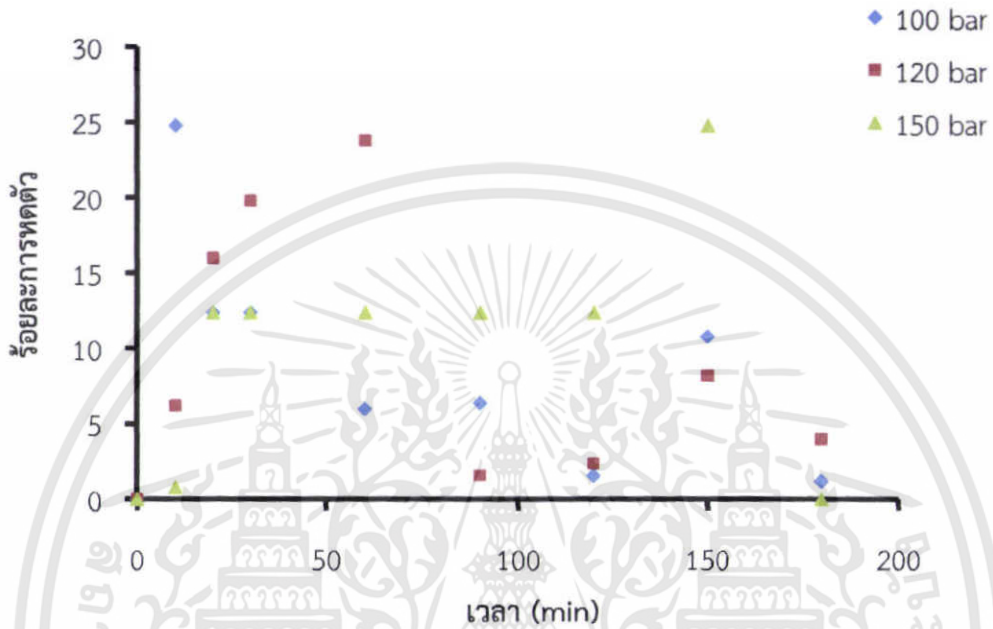
การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์โดยการปรับค่าความดันของระบบทำให้สามารถควบคุมประสิทธิภาพของการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่ขึ้นกับความดัน และสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ได้

ก่อนทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ ได้มีการนำวุ้นเอการ์ทรงกระบอก และทรงลูกบาศก์ไปผ่านการทำแห้งด้วยวิธีพาความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 50 °C พบว่า ตัวอย่างแห้งของวุ้นเอการ์แบบทรงกระบอกมีรูปร่างที่บิดเบี้ยวไปจากรูปทรงกระบอก แต่ในส่วนของตัวอย่างแห้งของวุ้นเอการ์แบบทรงลูกบาศก์ มีรูปร่างที่คงตัว แต่มีขนาดที่เปลี่ยนแปลงจาก 5 mm เป็น 1 mm เมื่อเวลาในการทำแห้งอยู่ที่ 180 min นั้นแสดงให้เห็นว่าการหดตัวของวุ้นเอการ์ภายหลังการทำแห้งเกิดได้ทุกทิศทางเท่าๆกัน หรือเกิดการหดตัวทั้ง 3 มิติ ดังนั้นจึงนำการศึกษาจากส่วนนี้ไปประยุกต์ใช้ในชั้นการศึกษาการหดตัวและหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ผ่านทางกล้องวิดีโอ สำหรับการประยุกต์ใช้สมการของ Fick (สมการ ค.2) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แพร่ของน้ำ โดยระหว่างกระบวนการทำแห้ง น้ำที่สะสมภายในโครงสร้างของวุ้นเอการ์เกิดการแพร่และละลายไปสู่เฟสสมดุลของของไหลอย่างช้าๆ ส่งผลให้เกิดการหดตัวของวุ้นเอการ์ และสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความสูงของวุ้นเอการ์ได้ตามเวลาโดยแปลงเป็นตัวแปรร้อยละการหดตัว ตามรูปที่ 4.11 ซึ่งจะพบว่า การหดตัวของวุ้นเอการ์ไม่ขึ้นกับเวลาและไม่สามารถหาแนวโน้มของการหดตัวของวุ้นเอการ์ได้ เนื่องจากการหดตัวจะขึ้นกับความสามารถของการละลายของน้ำเข้าไปในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมากกว่า รวมถึงขึ้นกับความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆด้วย โดยที่อุณหภูมิและความดันที่จุดหนึ่งๆ ค่าความหนาแน่นของสารจะคงที่ แต่การจะประยุกต์ใช้สมการของ Fick ให้เหมาะสม จะต้องมีการตั้งสมมติฐานที่เหมาะสม โดยจะคิดว่าการแพร่ของน้ำเข้าไปละลายในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเกิดจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของความชื้น รวมทั้งสมมติให้วุ้นเอการ์มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่กว้างและยาวมาก (Infinite Slab) การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว และไม่คิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของการถ่ายเทมวลได้ดังนี้

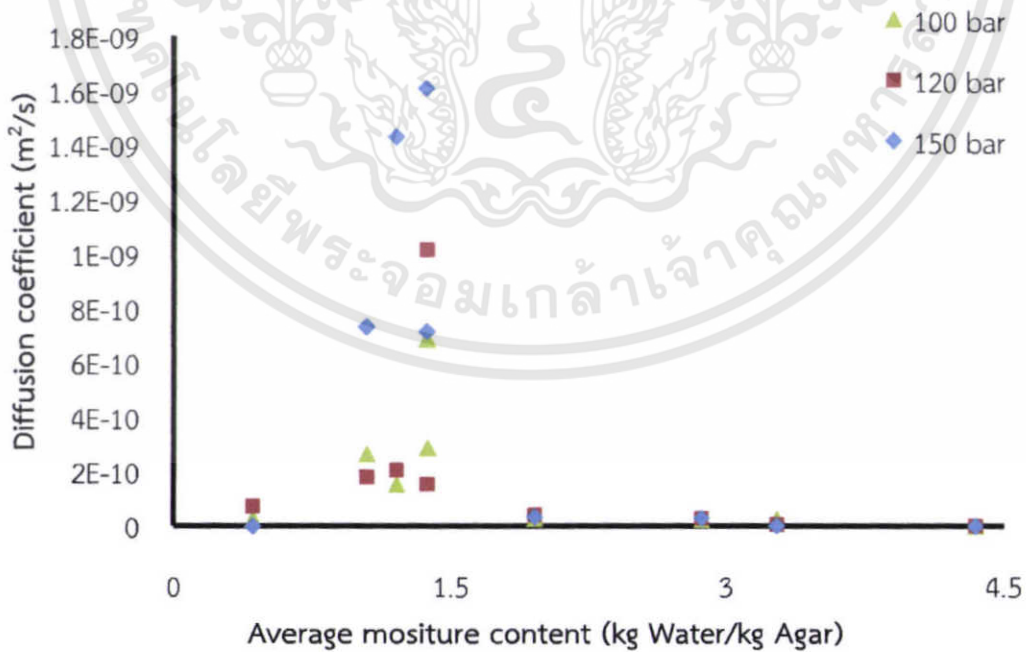
$$m_1 = D\rho_1 \frac{\partial M}{\partial x}$$

ในการทำแห้งภายใต้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C แต่มีการเปลี่ยนค่าของความดันที่ 100 120 และ 150 bar พบว่า เมื่อเพิ่มความดันในการทำแห้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.12 เนื่องจากการเพิ่มความดัน จะส่งผลให้ความ

หนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากขึ้น จึงเป็นแรงผลักดันให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำเข้าไปในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมากขึ้น นั่นหมายถึง การมีความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาก จะสามารถดูดซับความชื้นได้ปริมาณมาก จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 ร้อยละการดูดตัวของวุ้นเอการ์เทียบกับเวลา

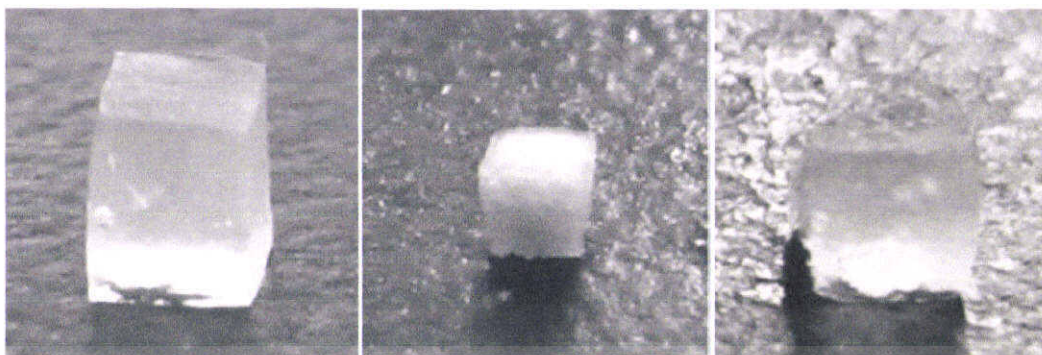


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์

4.4.3 การศึกษาการบวมตัวของวุ้นเอการ์ในสารละลาย

การศึกษาการบวมตัวของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งในสารละลายประเภทต่างๆ จะทำให้ทราบว่า ภายหลังจากวุ้นเอการ์พบกับความชื้นรูปแบบต่างๆอีกครั้ง วุ้นเอการ์จะเกิดการบวมตัว หรือการเสียรูปอีกหรือไม่ และเป็นไปในลักษณะใด

โดยในขั้นนี้มีการนำวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 50 °C และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความดันที่ 100 120 และ 150 bar จะได้วุ้นเอการ์ขาวขุ่นที่มีฟองขนาดเล็กจำนวนมาก และวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อนที่มีลักษณะสีเหลืองสีทั้ง 12 ตัวอย่างแช่ตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ น้ำบริสุทธิ์ สารละลายกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ความเข้มข้น 1 M และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 M โดยแช่ในสารละลายจนถึงจุดอิ่มตัวที่เวลา 24 hr พบว่า วุ้นเอการ์แห้งจะเกิดการบวมตัวในสารละลายทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากการละลายของตัวทำละลายเข้าไปในรูพรุนของวุ้นเอการ์ ซึ่งโครงสร้างหลักของเอการ์จะมีลักษณะแบบตาข่ายที่สามารถดูดซับตัวทำละลายได้ แต่ลักษณะของวุ้นเอการ์ที่แช่ในตัวทำละลายแต่ละตัวจะมีลักษณะที่ต่างกัน คือ ในน้ำบริสุทธิ์ วุ้นเอการ์ที่บวมตัวจะแข็งใส ส่วนวุ้นเอการ์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเปื่อยยุ่ยและใส ดังแสดงในรูปที่ 4.13 สำหรับวุ้นเอการ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยาเริ่มต้นโดยเปลี่ยนสีวุ้นเอการ์จากขาวขุ่นเป็นสีเหลือง แล้วค่อยๆ เปลี่ยนกลับไปเป็นขาวใสตามเดิม และจากการสังเกตระดับการบวมตัวของวุ้นเอการ์โดยการเทียบจากน้ำหนักวุ้นเอการ์หลังการบวมตัวในสารละลายที่ความดันค่าต่างๆกับวุ้นเอการ์ที่ยังไม่ผ่านการทำแห้ง แสดงได้ตามตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อใช้ความดันในการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่มากขึ้นจาก 100-150 bar ค่าระดับการบวมตัวของวุ้นเอการ์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มจาก 5.9-19.2 เนื่องจากการใช้ความดันการทำแห้งที่มากจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ส่งผลให้ขณะทำแห้งเกิดการแพร่เข้าสู่เฟสของวุ้นเอการ์ได้ในปริมาณมาก ส่งผลให้โครงสร้างวุ้นเอการ์ภายหลังการทำแห้งมีรูพรุนเกิดขึ้นมาก ซึ่งรูพรุนเหล่านี้สามารถดูดซับตัวทำละลายได้ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ระดับการบวมตัวมีค่ามากขึ้น และสำหรับการพิจารณาถึงชนิดของตัวทำละลายโดยเทียบเฉพาะแต่ละสภาวะของการทำแห้ง จะพบว่า วุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อนจะมีระดับบวมตัวสูงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำที่ 15.4% และ 10.2% ตามลำดับ เนื่องจากวุ้นเอการ์จะมีหมู่ฟังก์ชัน -OH อยู่ทำให้สามารถละลายได้ดีในสารที่มีขั้วเหมือนกัน คือ ในโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำจะมีหมู่ฟังก์ชัน -OH เช่นกัน ดังนั้น การละลายและการบวมตัวจึงเกิดได้ดีกับสารที่มีขั้วเหมือนกัน



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบลักษณะของขี้เถ้า (ซ้าย) ขี้เถ้าที่ยังไม่ผ่านการทำแห้ง (กลาง) ขี้เถ้าที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (ขวา) ขี้เถ้าแห้งที่บวมตัวในสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของขี้เถ้าในสารละลายประเภทต่างๆ (เทียบจากมวลเริ่มต้น)

สารละลาย	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว			การทำแห้ง แบบพา ความร้อน
	การทำแห้งด้วย scCO_2 ที่ความดัน (bar)			
	100	120	150	
น้ำบริสุทธิ์	2.4	5.4	5.5	12.7
สารละลายกรดซัลฟิวริก (ความเข้มข้น 1 M)	4.9	6.4	12.8	10.2
สารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 1 M)	5.9	14.0	19.2	15.4

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ภายหลังจากการทดลองผลการทดลองเผยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของวุ้นเอการ์ในหลายลักษณะ ซึ่งขึ้นกับกระบวนการในการทดลองที่มีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต หรือการพาความร้อนแบบปกติ ซึ่งแต่วิธีและสภาวะของการทำแห้งจะได้ลักษณะทางกายภาพของวุ้นเอการ์ที่แตกต่างกัน

5.1 การกำหนดสภาวะในการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ค่าความสามารถของการละลายของน้ำในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เป็นตัวกำหนดอัตราส่วนสำหรับการเตรียมความเข้มข้นของวุ้นเอการ์ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้สมการของ Raoult's Law โดยสามารถเลือกสภาวะในการทำแห้งแบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ที่อุณหภูมิคงที่ 50.0 °C ความดัน 100 120 และ 150 bar เนื่องจากมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการคำนึงถึงความสิ้นเปลืองพลังงานและการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า และหาค่าความสามารถของการละลายของน้ำในเฟสของน้ำในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.061 0.075 และ 0.088 g/ml ตามลำดับ

5.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะจำเพาะของการทำแห้งด้วยการพาความร้อน และการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ทำการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และการพาความร้อน กรณีการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 50 °C ความดัน 150 bar พบว่า คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะค่อยๆไหลผ่านเข้าไปในเนื้อของเอการ์ จนทำให้ภายในวุ้นเอการ์เกิดการหดตัวอย่างช้าๆ โดยมีอัตราการทำแห้งในช่วง 30 นาทีแรกอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะค่อนข้างคงที่ โดยปริมาณความชื้นจะไม่หลงเหลือหลังจากเวลาผ่านไป 180 min

ส่วนกรณีการอบแห้งโดยการพาความร้อนทำโดยการนำวุ้นเอการ์ที่มีรูปร่างต่างกัน 2 แบบ คือ แบบทรงกระบอก และแบบลูกบาศก์ มาทำแห้งแบบพาความร้อนในเตาอบที่ 50 °C จะพบว่า แนวโน้มของอัตราการทำแห้งลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกหรือในช่วง 30 min ก่อนที่จะค่อยๆคงที่ โดยการทำแห้งจะสิ้นสุดเมื่อความชื้นลดลงเหลือ 0% ที่เวลาการทำแห้งที่ 180 min สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวุ้นเอการ์ พบว่า เอการ์แบบทรงลูกบาศก์จะเกิดการหดตัวทั้งสามมิติ เปลี่ยนจาก 5.0 mm เป็น 1.0 mm ในขณะที่แบบทรงกระบอกจะเห็นการหดตัวในทิศทางความสูงเปลี่ยนจาก 5.0 mm เป็น 1.0 mm มากกว่าการลดขนาดในทิศทางเส้นผ่านศูนย์กลาง

การเปรียบเทียบการทำแห้งวุ้นเอการ์โดยวิธีใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และการพาความร้อน พบว่า การลดลงของปริมาณความชื้นและอัตราการทำแห้งโดยใช้การพาความร้อนเร็วกว่าการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต แต่ผลด้านลักษณะทางกายภาพ พบว่า วุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อนจะเกิดการเสียสภาพคือมีรูปร่างที่บิดเบี้ยว และเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองใส ในขณะที่วุ้นเอการ์จากการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี

5.3 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยภาพถ่าย SEM

การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM เผยให้เห็นวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตพบว่า หลังจากอบแห้งเป็นเวลา 10 min พบว่า เกิดรูพรุนแบบวงปิด (Close Cell) ที่มีลักษณะแบบเข็ม (Needle) ที่เกิดจากเกิดการหดตัวของโครงสร้างในทิศทางแนวขวาง เมื่อเพิ่มเวลาในการทำแห้งให้มากขึ้นเป็น 30 และ 120 min จะเกิดรูพรุนแบบวงปิดลักษณะคล้ายวงกลมขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก ที่มีสาเหตุจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่อิมมิดด้วยน้ำที่มีแรงดันสูงแพร่กลับเข้าไปในวุ้นเอการ์ และเมื่อให้เวลาการทำแห้งจนถึงที่เวลา 180 min พบว่า โครงสร้างรูพรุนแบบปิดภายในวุ้นเอการ์เกิดการแตกและเชื่อมติดกัน เนื่องจากความร้อนสามารถทำลายโครงสร้างแบบร่างแหของวุ้นเอการ์ได้ ส่งผลทำให้รูพรุนขนาดเล็กเกิดการแตกออกกลายเป็นโพรงในแนวยาว คล้ายกับรูพรุนแบบเซลล์เปิดขึ้น

จากการวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนตามค่า Aspect Ratio พบว่า ขนาดของรูพรุนมีการเปลี่ยนแปลงในหลายลักษณะ ขึ้นกับความสามารถในการแพร่และการละลายของน้ำเข้าไปสู่เฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยในช่วง 30 นาทีแรก พบว่า ค่า Aspect Ratio เฉลี่ยเท่ากับ 7.8 หลังจากเพิ่มเวลาในการทำแห้งมากขึ้น ค่า Aspect Ratio จะค่อยๆลดลงอย่างเป็นลำดับ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.8-2.7 แต่เมื่อให้เวลาในการทำแห้งเพิ่มอีก จะทำให้ค่า Aspect Ratio มีค่าเพิ่มขึ้นอีก โดยที่เวลา 180 min พบว่า โครงสร้างรูพรุนภายในวุ้นเอการ์เกิดการแตกและเชื่อมติดกัน ค่า Aspect Ratio ในช่วงท้ายจึงมีแนวโน้มที่สูงขึ้น

5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในวุ้นเอการ์ด้วยเทคนิค FTIR

การนำวุ้นเอการ์ที่ทำแห้งทั้ง 2 วิธี ทั้งแบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และแบบการพาความร้อน ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ภาพ IR spectra ของวุ้นเอการ์ที่ยังไม่ผ่านการทำแห้งจะมีพีคที่ Wave Number 3270 cm^{-1} ปรากฏอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างหลักของน้ำอยู่ในปริมาณมาก แต่เมื่อวุ้นเอการ์ผ่านการทำแห้งทั้ง 2 วิธี Wave Number ที่ 3270 cm^{-1} มีค่าการดูดกลืนที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือ ความชื้นภายในวุ้นเอการ์ลดลงภายหลังจากการทำแห้ง และการสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงที่ Wave Number 1630 cm^{-1} และที่ Wave Number $1100-500\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงความชื้นที่สูญเสียจากโครงสร้างมากขึ้นส่งผลให้วุ้นเอการ์มีพันธะย่อยแบบ C-H มากขึ้น ส่งผลให้การทำแห้งทำให้โครงสร้างแบบตาข่ายของวุ้นเอการ์เปลี่ยนแปลงไป แต่สำหรับความแตกต่างของการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและแบบการพาความร้อน จะเห็นความแตกต่างเพียงเล็กน้อย คือ จะมีความเข้มต่ำกว่าแบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต นั่นหมายถึง การทำแห้งแบบพาความร้อนจะลดความชื้นได้ดีกว่าแบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต แต่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

5.5 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ในระบบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การทำแห้งภายใต้จะใช้สภาวะที่อุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C แต่มีการเปลี่ยนค่าของความดันที่ 100 120 และ 150 bar จะส่งผลถึงความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า เมื่อเพิ่มความดันในการทำแห้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพของการทำแห้งเพิ่มขึ้นด้วย

5.6 การศึกษาการบวมตัวในสารละลาย

การบวมตัวของวุ้นเอการ์ในสารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ น้ำบริสุทธิ์ สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 1 M และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 M โดยพบว่า วุ้นเอการ์แห้งจะเกิดการบวมตัวในสารละลายทั้ง 3 ชนิด และลักษณะของวุ้นเอการ์ที่แช่ในตัวทำละลายแต่ละตัวจะมีลักษณะที่ต่างกัน คือ ในน้ำบริสุทธิ์ วุ้นเอการ์ที่บวมตัวจะแข็งใส ส่วนวุ้นเอการ์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเปื่อยยุ่ยและใส การสังเกตระดับการบวมตัวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของวุ้นหลังจากผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต พบว่า เมื่อใช้ความดันเพิ่มจาก 100-150 bar ค่าระดับการบวมตัวมีค่าเพิ่มจาก 5.9-19.2

5.7 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

การศึกษาระบวนการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต จะมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและเตรียมอุปกรณ์ที่เป็นปั๊มอัดแรงดันสูงมาก โดยระบบการไหลในท่อ พวกข้อต่อต่างๆต้องมีการควบคุมไม่ให้เกิดการรั่วไหล เพราะจะทำให้ระบบในการทำาทดลองผันแปร ดังนั้นค่าที่ได้จะไม่แม่นยำเท่าที่ควร การเลือกใช้สภาวะของการทดลองที่หมายถึงอุณหภูมิและความดันของการทดลองก็มีความสำคัญ โดยต้องคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์ ว่าเป็นการใช้พลังงานโดยเปล่าประโยชน์หรือไม่และสำหรับการเลือกวัสดุที่จะมาใช้ทำแห้งต้องคำนึงถึงขนาดของปั๊มอัดแรงดันสูงเป็นหลักรวมทั้งปริมาณความชื้นของวัสดุด้วย เนื่องจากต้องมีการคำนวณค่าความสามารถของการละลายของความชื้นเข้าไปในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์ มิฉะนั้นวัสดุที่นำมาทำแห้งจะไม่สามารถแห้งได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z.K. Brown, P.J. Fryer, I.T. Norton, S. Bakalis and R.H. Bridson, **Drying of agar gels using Supercritical carbon dioxide**, UK, The Journal of Supercritical Fluids 54, 2010, P.89-95.
- [2] J.W.Hill and R. H. Petrucci, **General Chemistry and integrated approach**, 3rd ed., Prentice Hall, US, 2002.
- [3] N. Wang & J. G. Brennan, **A Mathematical Model of Simultaneous Heat and Moisture Transfer during Drying of Potato**, UK, Journal of Food Engineering 24, 1995, P.47-60
- [4] รติยา อรุณานันท์, สมเกียรติ ปรัชญารากรและสมชาติ โสภณธรณฤทธิ, **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยและคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้ง**, ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 2550
- [5] วิไล รังสาดทอง, **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร (Food Processing Technology)**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2547, หน้า 39-41, 292-298
- [6] **ความสัมพันธ์ของจุลินทรีย์กับมนุษย์** [Online]. Available : www.rmuti.ac.th/user/thanyaphak/contacts/Microorganism.ppt
- [7] **รูปภาพ Phase diagram of drying** [Online]. Available : <http://www.FoodnetWorksolution.com/vocab/word/925>
- [8] **การอบแห้ง (Dryer)** [Online]. Available : <http://dryer.siam2web.com/?cid=1012047>
- [9] สมบัติ ขอทวีวัฒนา. **การพัฒนากรรณวิธีการผลิต ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร**. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2527
- [10] สมชาย โสภณธรณฤทธิ. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบ้างประเภท**. กรุงเทพมหานคร : โครงการส่งเสริมการสร้างตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2540.
- [11] อรวรรณ จันทร์เรืองฤทธิ และอาจารย์ สายบุญบัง. **การศึกษาลักษณะการทำแห้งแบบเยือกแข็งของผลไม้ชนิดต่างๆ**. ปัญหาพิเศษ โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [12] Maartje F., Kemmere and Thierry Meyer, **Supercritical carbon dioxide in Polymer Reaction Engineering**, Germany, 2005, P.6
- [13] **รูปภาพมะเขือเทศราชินีที่ผ่านการทำแห้ง** [Online]. Available : http://myhome.iirt.com/article/preserve.php?subaction=showfull&id=1246378080&archive=&start_from=&ucat=8&
- [14] วิไล รังสาดทอง, **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร (Food Processing Technology)**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2547, หน้า 39-41, 292-298

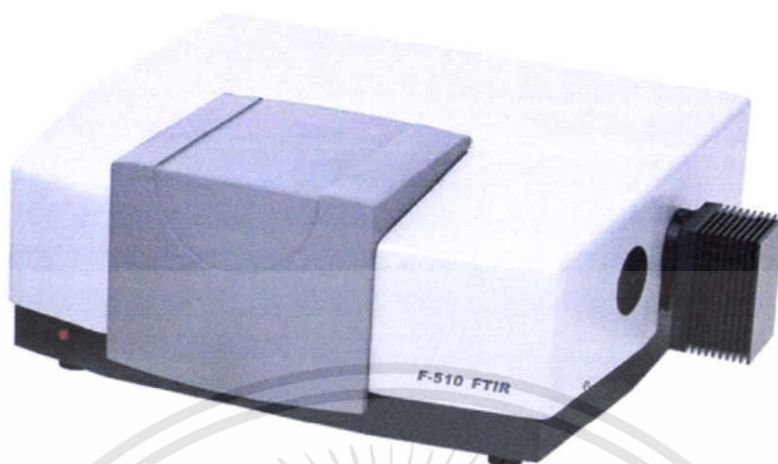
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] สมบูรณ์ ผู้พัฒน์, “การผลิตวุ้นจากสาหร่ายทะเล”, สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [Online]. Available : <http://tanozpic.multiply.com/journal/item/2/2>
- [16] รูปสาหร่ายแดง *Gracilaria* และวุ้นผสมอาหารเพื่อใช้เป็นสารตัวกลางในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ [Online], Available : <http://www.entrykitchen.com/index.php?lay=show&ac= article&id=538964971&Ntype=9>
- [17] M. van der Kraan , M.V. Fernandez Cid ,G.F. Woerlee ,W.J.T. Veugelers ,C.J. Peters c, G.J. Witkamp, **Equilibrium distribution of water in the two-phase system supercritical carbon dioxide–textile**, *The Journal of Supercritical Fluid* 40, 2007, P.336-343.
- [18] Ram B. Gupta, Jae-Jin Shim, **Solubility in Supercritical Carbon dioxide**, US, 2007, P.825-828
- [19] นิพนธ์ ตั้งคณานูรักษ์ และคณิตา ตั้งคณานูรักษ์. **สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์ (Analytical Spectroscopy)**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 2547. หน้า 366.
- [19] นิพนธ์ ตั้งคณานูรักษ์ และคณิตา ตั้งคณานูรักษ์. **สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์ (Analytical Spectroscopy)**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 2547. หน้า 366.
- [20] อรทัย สีลาพจนานพ. 2545. **รูปตัวอย่างผลจากการทดสอบ FTIR**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/lpd_10_2546_ft-ir.pdf
- [21] Perkinelmer Company. 2008. **Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)**. (Online) Available: http://las.perkinelmer.com/local/Thailand/AS_FTIR.htm
- [22] **รูปหลักการเครื่อง FTIR**. 2543. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.etslabs.com/images/methods/9.gif>
- [23] Sarawoot's Webpage. 2550. **การใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในการวิเคราะห์ทางเคมี**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm>
- [24] แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. **วัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ. 2547.
- [25] **โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)**. 2551. (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.elecnecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/termwork/sem/scan1/sem1.html>



ภาคผนวก ก
ข้อมูลเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)



รูปที่ ก-1 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy [19]

รังสีอินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.78–1000 μm หรือ wave number ในช่วง $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ โดย wave number (cm^{-1}) = $1/\text{wavelength (cm)}$ โดยในช่วงของรังสีอินฟราเรดจะแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่

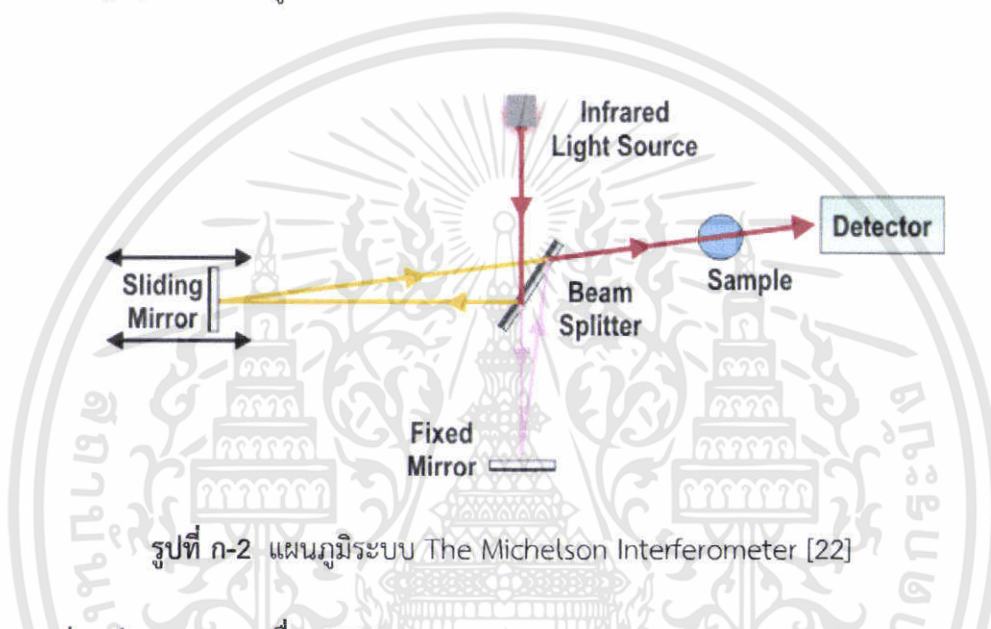
1. Near Infrared คือช่วง wave number $12800 - 4000 \text{ cm}^{-1}$
2. Middle Infrared คือช่วง wave number $4000 - 200 \text{ cm}^{-1}$
3. Far Infrared คือช่วง wave number $200 - 10 \text{ cm}^{-1}$

ช่วงของอินฟราเรดที่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ช่วง Middle Infrared ซึ่งมีประโยชน์ในการให้ข้อมูลด้านโครงสร้างโมเลกุล โดยรังสีอินฟราเรดจะมีพลังงานต่ำกว่ารังสี UV เมื่อโมเลกุลของสารดูดซับรังสีอินฟราเรดจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุนของพันธะ โมเลกุลจะดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความถี่เดียวกันกับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ดังนั้นสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ในการสั่นจำเพาะที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์แต่ละชนิดได้คุณสมบัตินี้เรียกว่า finger print และนอกจากนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ด้านคุณภาพ เช่น การวิเคราะห์ชนิดของ functional group แล้วก็ยังสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้อีกด้วยโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของ Beer-Lambert's Law ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่างในสารละลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการดูดซับ Absorbance ของสารละลายนั้นดังสมการ

$$A = \epsilon bc \text{ (Absorbance } A = \text{constant} \times \text{path length} \times \text{concentration)}$$

เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ อีกทั้งเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว มีความแม่นยำสูงและเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง เทคนิคนี้จึงเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น การวิเคราะห์ด้านพอลิเมอร์และปิโตรเคมี [19]

Fourier Transform Infrared Spectrometer(FTIR Spectrometer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ที่พัฒนามาจาก เครื่อง IR Spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีในปริมาณน้อยๆได้ แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FTIR Spectrometer เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรดสะท้อนสู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมัน สะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญคือตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไปอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง [20] ดังแสดงในรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 แผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer [22]

ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR

Source หรือแหล่งกำเนิดแสงจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1500 – 2000 K และจะปลดปล่อยแสงที่มีความถี่ในช่วงอินฟราเรดออกมา ซึ่งมีหลายชนิด ดังนี้

1. The Nernst glower สามารถให้ความร้อนได้ถึง 2200 K อายุการใช้งานนาน แต่ไม่เสถียรที่ความร้อนสูงมากอาจเกิดการไหม้ได้ง่ายเนื่องจากมันจะมีความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงต้องมีการควบคุมกระแสในการใช้ที่แน่นอน
2. The Globar source สามารถให้ความร้อนได้ถึง 1500 K จะมีความเสถียรและให้แสงที่มีความเข้มมากกว่าแบบ Nernst glower
3. The incandescent wire source ใช้ Nichrome wire สามารถให้ความร้อนได้ถึง 1100 K ซึ่งชนิดนี้จะใช้กระแสและความต่างศักย์ในการใช้งานที่ต่ำกว่าทั้งสองชนิดข้างต้นและมีอายุการใช้งานที่นานกว่า

Interferometer สัญญาณแสงที่ผ่าน Interferometer จะออกมาในรูปสัญญาณที่เรียกว่า Interferogram ซึ่งต้องแปลงสัญญาณนี้เป็นให้เป็น Spectrum อีกที โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะดีกว่าการใช้ Monochromator ที่จะแยกลำแสงเป็นลำแสงความยาวคลื่นเดียวทำให้แสงแต่ละความยาวคลื่นถูกตรวจวัดในเวลาที่แตกต่างกันแต่ Interferometer สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากสามารถตรวจวัดพลังงานของทุกความยาวคลื่นแสงได้ในเวลาเดียวกัน

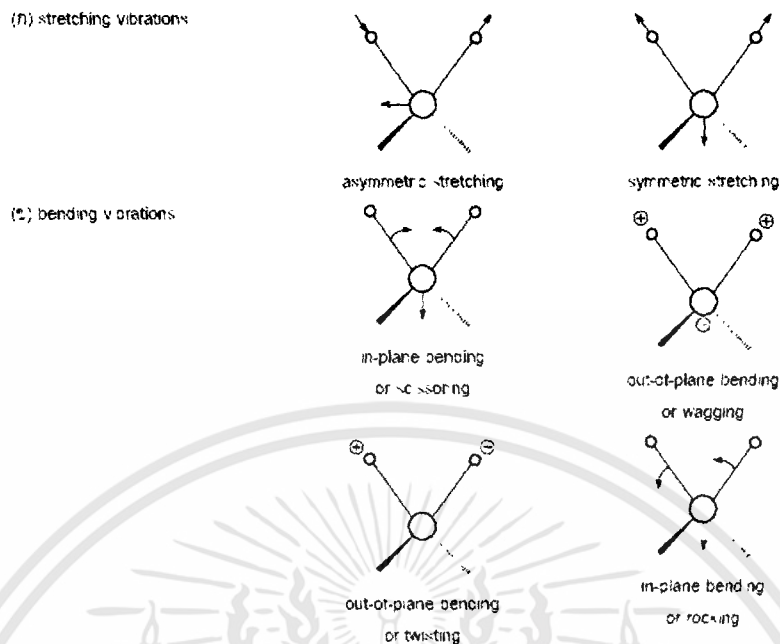
Sample ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ได้ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างในการวัดตัวอย่างแบบต่าง ๆ เช่น การใช้ KBr disk สำหรับตัวอย่างของแข็งหรือการใช้ Liquid Cell สำหรับตัวอย่างของเหลว หรือ Gas Cell สำหรับตัวอย่างที่เป็นก๊าซ เป็นต้น

Detector ทำหน้าที่ตรวจวัดพลังงานแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง

1. Pyroelectric Detectors จะแปลงสัญญาณแสงอินฟราเรดเป็นค่าทางไฟฟ้า ให้ค่า sensitivity สูง คือ Deuterated Triglycine Sulfate (DTGS) สามารถตรวจวัดได้ช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ และสามารถใช้ในการตรวจวัดแสงที่มีความเข้มสูงได้ดี มีข้อดีคือสามารถวัดได้ที่อุณหภูมิห้องปกติ จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับ FTIR

2. Semiconductor Detector ได้แก่ Mercury Cadmium Tellurium (MCT) detector สามารถตรวจวัดได้ช่วง $650-4000\text{ cm}^{-1}$ มีข้อดีคือให้ Sensitivity สูงกว่าแบบ Deuterated Triglycine Sulfate (DTGS) ตรวจวัดได้เร็ว แต่มีข้อจำกัดคือ จะใช้ได้ที่อุณหภูมิต่ำๆ ดังนั้น ก่อนการใช้งานต้องหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวทำให้สิ้นเปลือง โดยมากจะนิยมใช้เป็น Detector ของ FTIR Microscope

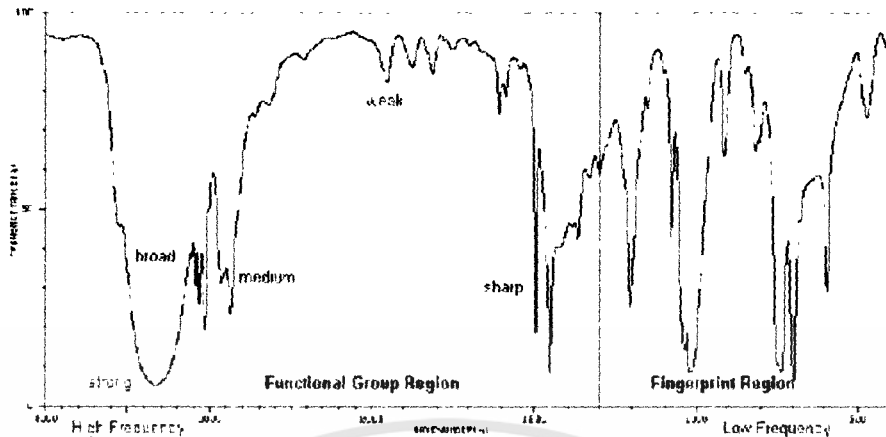
การอ้างอิงถึงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงนี้จะใช้ค่าที่เรียกว่าเวฟ 넘เบอร์ (Wave Number) ซึ่งมีหน่วยเป็น cm^{-1} (Reciprocal Centimeter) ซึ่งหมายถึงจำนวนคลื่นต่อหน่วยเซนติเมตร ตัวอย่าง เช่น รังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ 3000 cm^{-1} หมายถึงในระยะทาง 1 เซนติเมตรที่คลื่นนี้เดินทางไปจะมีจำนวนลูกคลื่นทั้งหมด 3000 ลูกคลื่น ดังนั้นตัวเลขยิ่งมากย่อมหมายถึงพลังงานของรังสีก็ยิ่งมากด้วย ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่เป็นประโยชน์ต่อนักเคมีจะอยู่ในช่วง $4000-400\text{ cm}^{-1}$ พลังงานของรังสีอินฟราเรดจะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (Vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของรังสีอินฟราเรดก็จะเกิดการดูดกลืนขึ้น ตัวอย่างของรูปแบบของการสั่นเหล่านี้เป็นดังแสดงในรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 รูปแบบการสั่นของโมเลกุลในลักษณะต่างๆ [20]

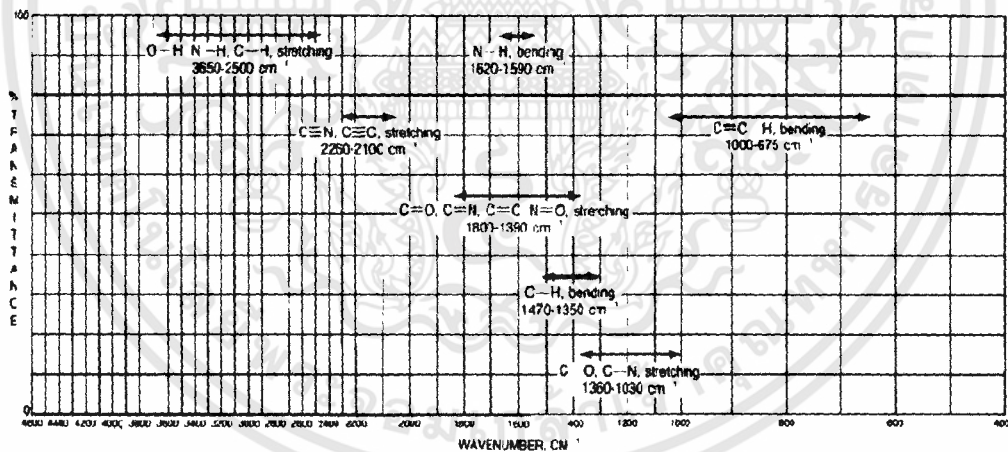
จากรูปที่ ก-3 แสดงให้เห็นได้ว่าการสั่นของโมเลกุลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ การยืด-หด หรือสเตรตซิง (Stretching) ของพันธะ และการงอ หรือเบนดิง (Bending) ของพันธะ สเตรตซิงเป็นการเคลื่อนที่อย่างเป็นจังหวะตามแนวแกนพันธะของอะตอมที่ต่อกันอยู่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความยาวพันธะ ซึ่งมีได้สองรูปแบบย่อยคือสเตรตซิงแบบสมมาตร (Symmetric) และแบบอสมมาตร (Asymmetric) ส่วนเบนดิงเป็นการเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะ ซึ่งอาจมีรูปแบบปลีกย่อยอีก ได้แก่ Twisting, Wagging, หรือ Rocking และทั้งหมดนี้อาจเกิดการเคลื่อนที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (In-plane) หรือต่างระนาบ (Out-of-plane) ก็ได้

การสั่นในลักษณะต่างๆ เหล่านี้จะมีการดูดกลืนพลังงานที่เป็นค่าเฉพาะของมัน ซึ่งมีก้อยู่ในช่วงคลื่นอินฟราเรด แต่เนื่องจากโมเลกุลหนึ่งๆ มีพันธะได้หลายแบบ และพันธะแต่ละพันธะก็มีรูปแบบการสั่นได้อีกหลายแบบ ทำให้โมเลกุลหนึ่งๆ จะแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้หลายช่วงคลื่นพร้อมๆ กัน ลักษณะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดจะเป็นแถบ (Band) หรือพีค (Peak) หลายๆ แถบหรือพีค ที่แสดงถึงค่าปริมาณรังสีอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์ (%transmittance) ซึ่งหมายถึงปริมาณรังสีที่สามารถทะลุผ่านตัวอย่างออกไปได้ เทียบกับ Wave Numberซึ่งมีก้อยู่ในช่วง $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ กราฟที่ได้จะเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม ซึ่งแต่ละแถบการดูดกลืนสามารถบ่งบอกลักษณะเฉพาะลงไปได้อีก เช่น หากตัวเลขทรานสมิตแตนซ์มีค่ามากเรียกว่าสัญญาณนั้นอ่อน (weak ใช้ตัวย่อ w) ในทางกลับกัน หากตัวเลขทรานสมิตแตนซ์มีค่าน้อยเรียกว่าสัญญาณนั้นเข้ม (strong ใช้ตัวย่อ s) สัญญาณที่มีความเข้มปานกลางจะเรียกว่า medium (m) นอกจากนี้แถบการดูดกลืนยังอาจมีลักษณะกว้าง (broad) หรือแคบ (sharp) โดยการสั่นของพันธะแต่ละแบบก็จะมีลักษณะเฉพาะของพีคที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งนำมาใช้ประกอบการพิจารณาโครงสร้างของโมเลกุล นอกเหนือจากการพิจารณาจากค่าเวฟนัมเบอร์ที่เกิดการดูดกลืนแต่เพียงอย่างเดียวได้ ตัวอย่างของอินฟราเรดสเปกตรัมเป็นดังแสดงในรูปที่ ก-4



รูปที่ ก-4 ตัวอย่างของกราฟอินฟราเรดสเปกตรัม (เบนซิลแอลกอฮอล์) [20]

โมเลกุลต่างชนิดกันจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ช่วงคลื่นแตกต่างกันและให้สเปกตรัมต่างกัน แม้แต่สารที่มีโครงสร้างง่าย ๆ ก็อาจให้สเปกตรัมที่ดูซับซ้อนได้ อินฟราเรดสเปกตรัมของสารแต่ละชนิดจะเป็นลักษณะเฉพาะและโดยทั่วไปจะไม่พบสารคู่ใดซึ่งมีสเปกตรัมเหมือนกันเกือบทุกประการ ส่วนสารที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภทเดียวกันมักให้ที่ลักษณะคล้ายคลึงกันในช่วงความถี่ใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีความแตกต่างของส่วนอื่นของโมเลกุลอยู่บ้าง นักเคมีจึงใช้อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีในการบอกหมู่ฟังก์ชันสำคัญๆ ในโมเลกุลของสารที่สนใจได้ รูปที่ ก-5 และตาราง ก-1 รวบรวมความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิดไว้



รูปที่ ก-5 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด [20]

ช่วงการดูดกลืนที่สำคัญของอินฟราเรดสเปกตรัมที่ให้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันได้มีอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วง $4000-1300\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเรียกว่าเป็นบริเวณหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group Region) ในช่วง Functional Group Region นั้นจะมีพิศการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันสำคัญๆ อยู่หลายหมู่ เช่น OH, NH และ C=O stretching เป็นต้น นอกจากนี้สเปกตรัมช่วง $900-650\text{ cm}^{-1}$ พอดีบอกให้ทราบได้ว่าสารที่สนใจมีหมู่อะโรมาติกอยู่หรือไม่ ช่วงการดูดกลืนช่วงกลางของสเปกตรัม ตั้งแต่ $1300-900\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งมักเรียกกันว่าเป็นบริเวณลายนิ้วมือ (Fingerprint Region) จะเป็นช่วงสเปกตรัมที่ดูซับซ้อน สเปกตรัมช่วงนี้จะมีประโยชน์มากเมื่อใช้ในการยืนยันโดยการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิงว่าสารที่

สนใจเป็นสารเดียวกันกับสารอ้างอิงหรือไม่ (เปรียบเทียบการเทียบลายนิ้วมือ) เนื่องจากอินฟราเรดสเปกตรัมของสารเดียวกันจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการหากทดสอบภายใต้ภาวะเดียวกัน แถบหรือพีคการดูดกลืนในช่วงลายนิ้วมือเหล่านี้เป็นผลโดยรวมของการสั่นของพันธะหลายๆ พันธะของโมเลกุลซึ่งจะมีความซับซ้อน จึงไม่จำเป็นต้องแปลความหมายของทุกพีคของอินฟราเรดสเปกตรัม อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ก็ให้ข้อมูลเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันซึ่งอาจไม่สามารถทำได้สะดวกเท่าโดยเทคนิคอื่น เช่น อินฟราเรดสเปกตรัมสามารถบอกได้ทันทีว่าสารตัวอย่างมีหมู่คาร์บอนิลอยู่หรือไม่ในขณะที่เทคนิคอื่นไม่สามารถทำได้ เป็นต้น [20]



ตารางที่ ก-1 ค่า IR Absorptions for Representative Functional Groups เพื่อใช้ในการ
เทียบมาตรฐาน [21]

Functional	Molecular Motion	Wave number (cm ⁻¹)
alkanes	C-H stretch	2950-2800
	CH ₂ bend	~1465
	CH ₃ bend	~1375
	CH ₂ bend (4 or more)	~720
alkenes	=CH stretch	3100-3010
	C=C stretch (isolated)	1690-1630
	C=C stretch (conjugated)	1640-1610
	C-H in-plane bend	1430-1290
	C-H bend (monosubstituted)	~990 & ~910
	C-H bend (disubstituted - E)	~970
	C-H bend (disubstituted - 1,1)	~890
	C-H bend (disubstituted - Z)	~700
alkynes	acetylenic C-H stretch	~3300
	C,C triple bond stretch	~2150
	acetylenic C-H bend	650-600
aromatics	C-H stretch	3020-3000
	C=C stretch	~1600 & ~1475
	C-H bend (mono)	770-730 & 715-685
	C-H bend (ortho)	770-735
	C-H bend (meta)	~880 & ~780 & ~690
	C-H bend (para)	850-800

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ค่า IR Absorptions for Representative Functional Groups เพื่อใช้ในการเทียบมาตรฐาน [21]

Functional Group	Molecular Motion	Wave number (cm ⁻¹)
alcohols	O-H stretch	~3650 or 3400-3300
	C-O stretch	1260-1000
ethers	C-O-C stretch (dialkyl)	1300-1000
	C-O-C stretch (diaryl)	~1250 & ~1120
aldehydes	C-H aldehyde stretch	~2850 & ~2750
	C=O stretch	~1725
ketones	C=O stretch	~1715
	C-C stretch	1300-1100
carboxylic acids	O-H stretch	3400-2400
	C=O stretch	1730-1700
	C-O stretch	1320-1210
	O-H bend	1440-1400
esters	C=O stretch	1750-1735
	C-C(O)-C stretch	1260-1230
	C-C(O)-C stretch (all)	1210-1160
acid chlorides	C=O stretch	1810-1775
	C-Cl stretch	730-550
anhydrides	C=O stretch	1830-1800&1775-1740
	C-O stretch	1300-900
amines	N-H stretch (1 per N-H)	3500-3300
	N-H bend	1640-1500
	C-N Stretch (alkyl)	1200-1025
	C-N Stretch (aryl)	1360-1250
	N-H bend (oop)	~800

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ค่า IR Absorptions for Representative Functional Groups เพื่อใช้ในการ
เทียบมาตรฐาน [21]

Functional	Molecular Motion	Wave number (cm ⁻¹)
amides	N-H stretch	3500-3180
	C=O stretch	1680-1630
	N-H bend	1640-1550
	N-H bend (1°)	1570-1515
alkyl halides	C-F stretch	1400-1000
	C-Cl stretch	785-540
	C-Br stretch	650-510
	C-I stretch	600-485
nitriles	C,N triple bond stretch	~2250
isocyanates	-N=C=O stretch	~2270
isothiocyanates	-N=C=S stretch	~2125
imines	R ₂ C=N-R stretch	1690-1640
nitro groups	-NO ₂ (aliphatic)	1600-1530&1390-1300
	-NO ₂ (aromatic)	1550-1490&1355-1315
mercaptans	S-H stretch	~2550
sulfoxides	S=O stretch	~1050
sulfones	S=O stretch	~1300 & ~1150
sulfonates	S=O stretch	~1350 & ~11750
	S-O stretch	1000-750
phosphines	P-H stretch	2320-2270
	PH bend	1090-810
phosphine	P=O	1210-1140

UV-Vis Spectrophotometer



รูปที่ ก-6 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer [23]

UV-Vis spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง ในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่าน หรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างจะวางอยู่ในเครื่องมือ ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง มีความไวมาก ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ควบคุมกับเครื่องมือในการวิเคราะห์ และการร่วมกับเทคนิคอื่นๆ ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น

UV-Vis Spectrum

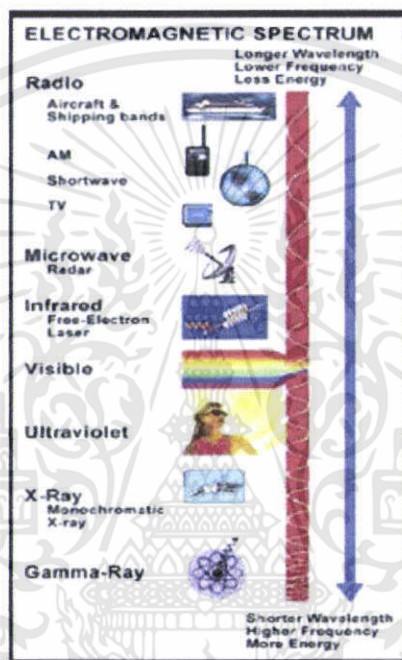
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแถบสเปกตรัมตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นสั้น (รวมทั้งรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์) ไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นยาว (รวมถึงไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ) รังสียูวี และแสงขาวซึ่งเป็นเพียงส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 190-800 nm

UV-Vis Spectroscopy

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคนิค UV- Vis Spectroscopy ได้ถูกนำไปใช้งานต่างๆ อย่างมากมาย แม้ว่าทุกวันนี้เครื่องมือที่นำเทคนิคนี้ไปใช้จะมีความแตกต่างจากเครื่องมือตัวแรกเป็นอย่างมาก แต่เครื่องมือเหล่านี้ก็ทำงานบนหลักการพื้นฐานเดียวกัน คือคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวี หรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสง แล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า

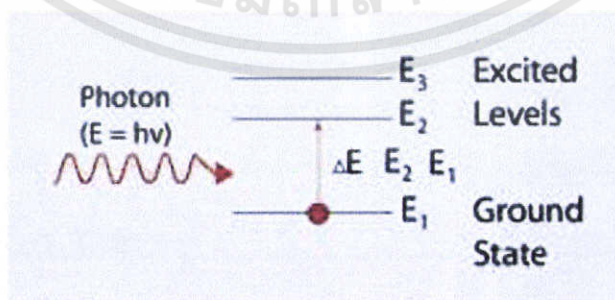
UV-Visible Spectroscopy เป็นการวัดพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไปเมื่ออิเล็กตรอนถูกเลื่อนไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (Electronic Transition) เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์รั่วอิเล็กตรอน

บางครั้งจึงเรียก UV-Visible Spectroscopy ว่า Electronic Spectroscopy โดยปกติช่วง UV จะมีความยาวคลื่นประมาณ 10-380 nm แต่การวิเคราะห์โดย UV Spectrum จะใช้ความยาวคลื่นในช่วง 200-380 nm ซึ่งเรียกว่า "Near-Ultraviolet Region" ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 nm อากาศจะดูดกลืนรังสีในช่วงนี้จึงต้องวัด Spectrum ภายใต้สุญญากาศจึงเรียกความยาวคลื่นของ UV ในช่วงนี้ว่า "Vacuum-Ultraviolet Region" ส่วนความยาวคลื่นที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือเรียกว่า "Visible Region" จะเป็น Spectrum ของในช่วงประมาณ 380-780 nm ซึ่งจะปรากฏให้เห็นเป็นสีต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ ก-7

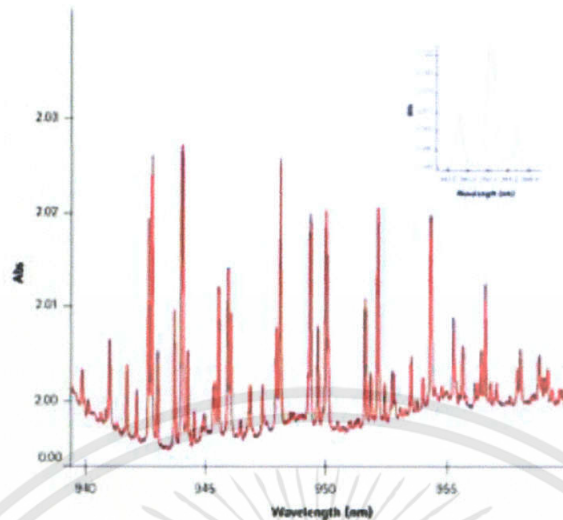


รูปที่ ก-7 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [23]

เมื่อทำการวัดปริมาณ ของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิด ที่ความยาว คลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูด กลืน แสงหรือค่า Absorbance ของสารจะแปรผัน กับจำนวนโมเลกุล ที่มีการ ดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิด และปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ ก-8 แสดงการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน ภายในโมเลกุล เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ [23]



รูปที่ ก-9 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer [23]

UV-Vis Spectrophotometer

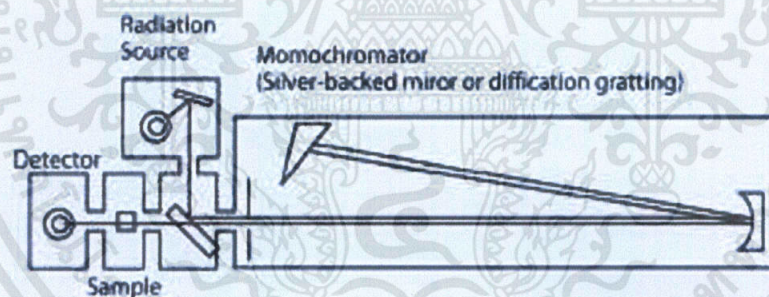
เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ไปใช้งาน เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยทั่วไปแล้วส่วนประกอบที่สำคัญของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ มีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดรังสี (Source) : แหล่งกำเนิดรังสีในสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่นิยมใช้กันแพร่หลายมี ดังนี้
 - ก. หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวทีเรียมความดันต่ำเป็นแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องที่ดีที่สุด ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 160-360 nm มีทั้งประเภทใช้ศักย์ไฟฟ้าสูง (2,200-6,600 Volt) และประเภทใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 40 Volt) หลอดชนิดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มสูงจนถึงความยาวคลื่นประมาณ 360 nm หลังจากนั้นความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว
 - ข. หลอดทังสเตน ประกอบด้วยหลอดทังสเตนอยู่ในหลอดสุญญากาศซึ่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วง UV ใกล้ช่วงแสงที่มองเห็นได้จนถึงช่วง IR หลอดชนิดนี้มีราคาและหาได้ง่ายในท้องตลาด
2. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) : โมโนโครเมเตอร์เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณภาพของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นลำรังสีความยาวคลื่นเดียวในช่วงแสงที่มองเห็นได้อาจใช้ปริซึมแก้ว ส่วนในช่วง UV จำเป็นต้องใช้ปริซึมที่ทำด้วยควอตซ์ สำหรับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีราคาแพงมักใช้โมโนโครเมเตอร์แบบ Diffraction Grating ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีร่องเป็นจำนวนมากและความกว้างของร่องใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสี

3. **อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Recorder) :** หลังจากทีลํารังสีความยาวคลื่นเดียวผ่านสารที่ต้องการวัดการดูดกลืนแล้ว จะไปตกที่อุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งให้ข้อมูลการดูดกลืนสำหรับสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ราคาถูก ข้อมูลนี้จะปรากฏออกมาในรูปการป้ายเบนของเข็มบนหน้าปัดมิเตอร์ หรือปรากฏเป็นตัวเลขก็ได้ ในกรณีเช่นนี้ต้องบันทึกข้อมูลสำหรับแต่ละความยาวคลื่นในกระดาษกราฟเส้นที่เชื่อมจุดต่าง ๆ คือสเปคตรัม สำหรับสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นเองโดยอัตโนมัติจะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอยู่ด้วย สามารถบันทึกออกมาเป็นสเปคตรัมได้โดยตรง สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดนี้มีราคาค่อนข้างแพง
4. **เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง :** เนื่องจากแก๊วธรรมชาติดูดกลืนรังสีในช่วง UV จึงจำเป็นต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยควอตซ์แทน เซลล์ที่นิยมใช้มีความหนา 1.00 cm การรักษาความสะอาดเซลล์เป็นเรื่องสำคัญมากสำหรับการวัดสเปคตรัม ไม่ควรปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยไปจนเหลือสารตัวอย่างติดอยู่กับเซลล์ ควรล้างเซลล์ให้สะอาดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์หรือนํ้ากลั่นตามความเหมาะสม เช็ดผิวภายนอกเซลล์ด้วยกระดาษเช็ดเซลล์แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศก็เป็น การเพียงพอ ไม่ควรใช้กรดโครมิกล้างเซลล์ ควรแยกเซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายของสารอินทรีย์ออกจากเซลล์ที่บรรจุสารอนินทรีย์ เพื่อให้ง่ายต่อการล้างทำความสะอาด เซลล์ควอตซ์นี้มีราคาแพงจึงควรเก็บรักษาไว้อย่างดีที่สุด [23]

ชนิดของสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภทด้วยกันคือ

1. Single-Beam Spectrophotometer

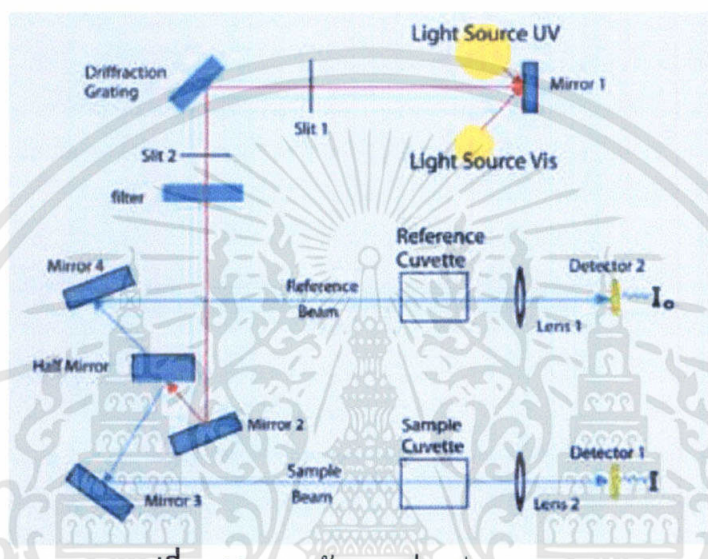


รูปที่ ก-10 แผนผังแสดงส่วนประกอบของ
เครื่อง UV-Vis spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยว [23]

รูปที่ ก-10 แสดงทางเดินของรังสีในสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งเป็นสเปคโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีเดี่ยว และสามารถวัดสเปคตรัมทั้งในช่วง UV และช่วง Visible จะเห็นได้ว่า เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสี ซึ่งอาจจะเป็นหลอดดิวที่เรียมหรือหลอดทังสเตนแล้ว จะผ่านเลนส์กระจกต่าง ๆ โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating เลนส์ต่าง ๆ ของสารตัวอย่างแล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณตลอดเส้นทางของลำรังสีนี้มีลำรังสีเพียงลำเดียว จึงเรียกสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ว่าแบบลำรังสีเดี่ยว สังเกตว่าเมื่อ Grating หมุนทำมุมกับลำรังสีที่มาจากกระทบตัวเลขบนหน้าปัดของเครื่องจะแสดงว่าในขณะที่นั้นรังสีที่ผ่าน Grating มีความยาวคลื่นเท่าใด เนื่องจากสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะไปสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน เซลล์แรกบรรจุตัวทำละลายบริสุทธิ์ ส่วนเซลล์หลังบรรจุสารละลายที่ต้องการวัด ทุกครั้งที่วัดต้องให้ลำรังสีผ่านเซลล์แรก

ปรับเครื่องให้อยู่ในตำแหน่ง “ศูนย์” แล้วจึงให้ลำรังสีผ่านเซลล์หลังความแตกต่างระหว่างการดูดกลืนรังสีของทั้ง 2 เซลล์จะปรากฏบนหน้าปัดมิเตอร์ ทำเช่นนี้เรื่อยไป สำหรับทุกความยาวคลื่นที่ต้องการวัดแล้วนำข้อมูลที่ได้อ่านบันทึกเป็นสเปกตรัมต่อไป ก่อนใช้สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทลำรังสีเดี่ยวควรใช้เวลาเครื่องมือได้ปรับตัวอย่างน้อย 15-20 min เพื่อให้แน่ใจว่าหลอดตัวที่เรียมหรือหลอดทังสแตนให้รังสีที่มีความเข้มสม่ำเสมอ

2. Double-Beam Spectrophotometer



รูปที่ ก-11 แผนผังแสดงส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer แบบลำแสงคู่ [23]

จากรูปที่ ก-11 เป็นสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ซึ่งใช้โมโนโครเมเตอร์แบบ Double Pass ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดี่ยวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit Slit แล้วลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (beam chopper) ซึ่งในกรณีนี้เป็นแผ่นวงกลมซึ่งครึ่งหนึ่งเป็นโลหะและอีกครึ่งหนึ่งเป็นช่องว่างอุปกรณ์นี้จะหมุนอยู่ตลอดเวลา เมื่อลำรังสีตกกระทบครึ่งวงกลมที่เป็นโลหะจะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ต่อมาลำรังสีจะผ่านครึ่งวงกลมที่เป็นช่องว่างและทะลุไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ลำรังสีลำเดี่ยวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ Phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไป ในการใช้สเปคโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่ ไม่จำเป็นต้องอุ่นเครื่องนานเหมือนเครื่องแบบลำรังสีเดี่ยวทั้งนี้ เพราะไม่ว่าแหล่งกำเนิดรังสีจะให้ความเข้มสูงหรือต่ำเพียงใด ลำรังสีทั้งสองที่อุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกคงมีความเข้มเท่ากันเสมอ นอกจากนี้สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้มักจะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณติดอยู่ด้วยและสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นไปตลอดเวลาพร้อมกับบันทึกสเปกตรัมในเวลาเดียวกัน เครื่องแบบนี้จึงมีราคาค่อนข้างแพง

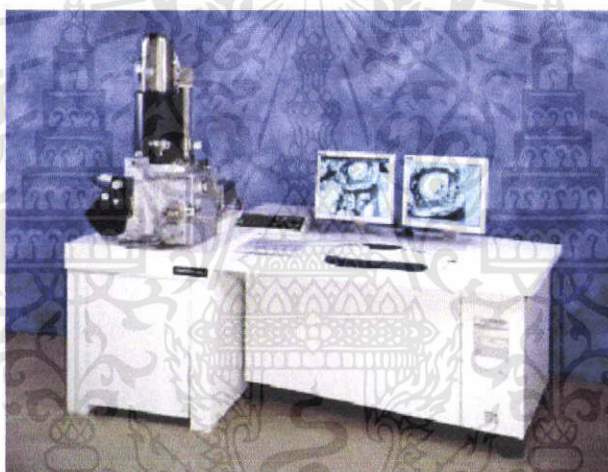
สำหรับเครื่องแบบลำแสงคู่ นั้นแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ ก่อนที่จะไปตกกระทบตัวอย่าง โดยแสงลำหนึ่งจะใช้เป็นลำแสงอ้างอิงขณะที่อีกลำจะผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือที่เป็นแบบลำแสงคู่บางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัด 2 ตัว เพื่อที่จะตรวจวัดแสงอ้างอิงและแสงที่มาจากตัวอย่างได้พร้อมกัน แต่

ในบางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัดเพียงตัวเดียว โดยแสงทั้งสองลำจะผ่านตัว Beam Chopper ซึ่งจะทำหน้าที่กักแสงลำหนึ่งไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเครื่องตรวจวัดจึงสามารถตรวจวัดความแตกต่างของแสงทั้งสองลำได้

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ/ปริมาณ

โดยหลักการแล้วสเปกตรัมซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี และแสงขาวของสารตัวอย่างจะแสดงคุณสมบัติเฉพาะของสารนั้นๆ ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สารชนิดต่างๆได้ แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะให้ผลเพียงคร่าวๆ เพราะลักษณะของสเปกตรัมของสาร แต่ละชนิดที่ได้จะมีความกว้างมาก และยังมีรายละเอียดอีกเยอะจึงต้องใช้เทคนิคอื่นๆ ร่วมวิเคราะห์ด้วย สำหรับการวิเคราะห์สารในเชิงปริมาณด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy สามารถทำได้โดยใช้วิธีการทำกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Absorbance และค่าความเข้มแสง ดังนั้นเมื่อสามารถวัดค่า Absorbance ของสารได้ก็สามารถหาปริมาณของสารที่จะวิเคราะห์ได้จากกราฟ

Scanning electron microscopy (SEM)



รูปที่ ก-12 เครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) [24]

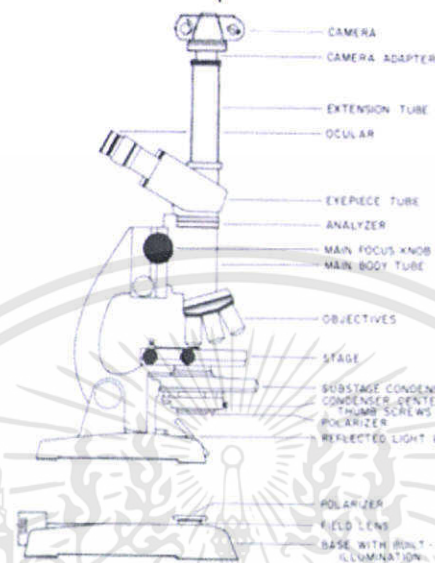
Scanning electron microscopy

SEM เป็นหนึ่งในกล้องจุลทรรศน์ชนิดหนึ่งซึ่งกล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการศึกษาชีววิทยาและช่วยให้เรามองเห็นในสิ่งที่เล็กมากๆ กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) คือเครื่องมือขยายขอบเขตของประสาทสัมผัสทางตา ให้เห็นสิ่งที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่า เช่น จุลินทรีย์ เซลล์เม็ดเลือด เป็นต้น ในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ คือ กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบธรรมดาและแบบสเตอริโอ
2. กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและแบบส่องกราด

1. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเป็นกล้องที่ได้รับการพัฒนาจากในอดีตจนมีกำลังขยายถึง 2,000 เท่า และเป็นกล้องที่ราคาถูกสามารถใช้งานที่ละเอียดพอประมาณ ซึ่งประกอบด้วยเลนส์ 2 ชนิดคือ เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา โดยใช้แสงผ่านวัตถุแล้วขึ้นมาที่เลนส์จนเห็นภาพที่บนวัตถุอย่างชัดเจน



รูปที่ ก-13 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง [24]

2. ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์

1. ลำกล้อง (Body Tube) เป็นส่วนที่เชื่อมโยงอยู่ระหว่างเลนส์ใกล้ตากับเลนส์ใกล้วัตถุมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกกรบกวน
2. แขน (Arm) คือส่วนที่ทำหน้าที่ยึดระหว่างส่วนลำกล้องกับฐานเป็นตำแหน่งที่จับเวลาแยกกล้อง
3. แท่นวางวัตถุ (Specimen Stage) เป็นแท่นใช้วางแผ่นสไลด์ที่ต้องการศึกษา
4. ที่หนีบสไลด์ (Stage Clip) ใช้หนีบสไลด์ให้ติดอยู่กับแท่นวางวัตถุ ในกล้องรุ่นใหม่จะมี Mechanical stage แทนเพื่อควบคุมการเลื่อนสไลด์ให้สะดวกขึ้น
5. ฐาน (Base) เป็นส่วนที่ใช้ในการตั้งกล้อง ทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวกล้องทั้งหมด
6. กระจกเงา (Mirror) ทำหน้าที่สะท้อนแสงจากธรรมชาติหรือแสงจากหลอดไฟภายในห้องให้ส่องผ่านวัตถุโดยทั่วไปกระจกเงามี 2 ด้าน ด้านหนึ่งเป็นกระจกเงาเว้า อีกด้านเป็นกระจกเงาระนาบ สำหรับกล้องรุ่นใหม่จะใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งสะดวกและชัดเจนกว่า
7. เลนส์รวมแสง (Condenser) ทำหน้าที่รวมแสงให้เข้มข้นเพื่อส่งไปยังวัตถุที่ต้องการศึกษา
8. ไดอะแฟรม (Diaphragm) อยู่ใต้เลนส์รวมแสงทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงให้เข้าสู่เลนส์ในปริมาณที่ต้องการ
9. ปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse Adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพโดยเปลี่ยนระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ (เลื่อนลำกล้องหรือแท่นวางวัตถุขึ้นลง) เพื่อให้ภาพชัดขึ้น
10. ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine Adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพทำให้ได้ภาพที่ชัดขึ้น

11. เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) จะติดอยู่กับจานหมุน (Revolving Nose Piece) ซึ่งจานหมุนนี้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ ตามปกติเลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยาย 3-4 ระดับ คือ 4x, 10x, 40x, 100x ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ

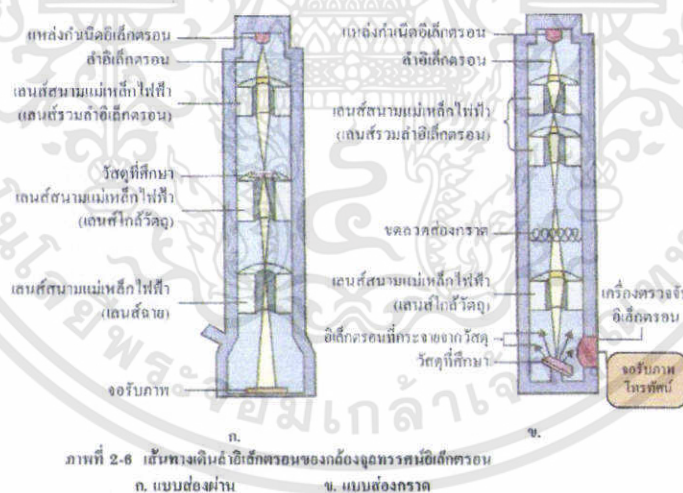
12. เลนส์ใกล้ตา (Eye Piece) เป็นเลนส์ที่อยู่บนสุดของลำกล้อง โดยทิ้งไปมีกำลังขยาย 10x หรือ 15x ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวกลับ

3. กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนเป็นกล้องที่ใช้อิเล็กตรอนความถี่สูงให้การทำงานแทนแสง สามารถขยายได้ถึง 500,000 เท่า จนเห็นโมเลกุลที่อยู่ในโครงสร้างต่างๆ ได้ แต่ด้วยความสามารถขยายที่สูงราคาจึงสูงตาม

(1) กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) เรียกย่อว่า TEM เอิร์น รุสกา สร้างเป็นคนแรก เมื่อปี พ.ศ. 2475 ใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในเซลล์โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องผ่านเซลล์หรือตัวอย่างที่ศึกษา ซึ่งต้องมีการเตรียมแบบพิเศษและบางเป็นพิเศษด้วย

(2) กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เรียกย่อว่า SEM เอ็ม วอน เอนเดนนี่ สร้างสำเร็จเมื่อปี พ.ศ. 2481 โดยใช้ศึกษาผิวของเซลล์หรือผิวของวัตถุที่นำมาศึกษาโดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิววัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ [25]



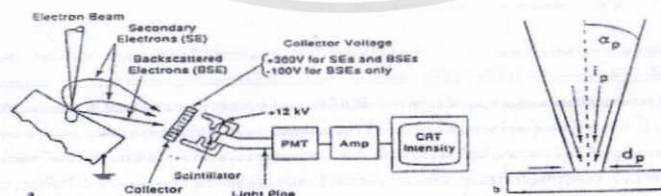
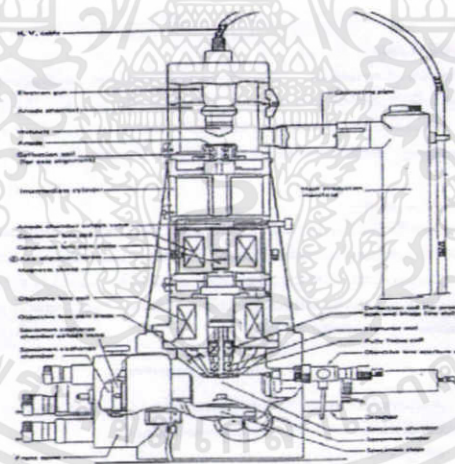
รูปที่ ก-14 แบบจำลองของเครื่อง Scanning Electron Microscope [25]

3.1 Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายตาประเภทที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีชื่อ "ภาษาอังกฤษ" คำเต็มว่า SCANNING

ELECTRON MICROSCOPE และโดยทั่วไปแล้วผู้ที่คุ้นเคยกับอุปกรณ์ชนิดนี้มักจะเรียกชื่อย่อเป็นภาษาอังกฤษว่า "SEM" ส่วนกล้องจุลทรรศน์อีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นต้นกำเนิดของ SEM นั้นเป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่เรียกว่า TEM คำนี้ย่อมาจาก Transmission Electron Microscope ซึ่งหมายถึงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องผ่านตัวอย่างที่บางมากและภาพที่เกิดขึ้นก็คือเงาที่ปรากฏบนแผ่นรับภาพ ซึ่งสามารถบันทึกบนแผ่นฟิล์ม (ถ่ายภาพ) ได้เช่นกันทั้ง SEM และ TEM มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานคล้ายคลึงกันในระบบโดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับระบบสุญญากาศการทำให้มีลำแสงอิเล็กตรอน และระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีบทบาทในการรวมหรือกระจายลำแสงอิเล็กตรอน กล้องทั้งสองประเภทมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือระบบของการสร้างภาพและลักษณะของภาพที่ปรากฏ นั่นคือ TEM มีระบบของการเกิดภาพได้ง่าย ภาพที่เกิดขึ้นจะปรากฏให้ผู้ใช้เห็นได้โดยตรงบนแผ่นรับภาพ และภาพนั้นเกิดความแตกต่างระหว่างความโปร่งใสกับความทึบแสงที่ลำแสงอิเล็กตรอนผ่านหรือไม่สามารถจะผ่านได้ภาพที่ปรากฏก็คือเงาของตัวอย่าง ส่วนระบบการเกิดภาพใน SEM เป็นระบบที่ค่อนข้างจะยุ่งยากไม่ใช่เป็นเงาที่ภาพที่เกิดขึ้นโดยตรงอันเกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนผ่านหรือไม่สามารถจะผ่านตัวอย่างภาพใน SEM จึงเป็นภาพที่เกิดโดยทางอ้อมซึ่งเป็นการรวบรวมสัญญาณที่เกิดภายหลังการกระทบลำแสงอิเล็กตรอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นภาพให้ปรากฏบนจอภาพที่มี ลักษณะคล้ายจอโทรทัศน์หรืออีกนัยหนึ่งภาพที่เกิดขึ้นใน SEM ก็คือผลจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นภาพ รวมทั้ง SEM ยังมีลักษณะพิเศษอีกหนึ่งคือเป็นภาพที่มีความลึกหรือเป็นภาพประเภท 3 มิติ

3.2 หลักการทำงานของ SEM



รูปที่ ก-15 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่อง SEM [25]

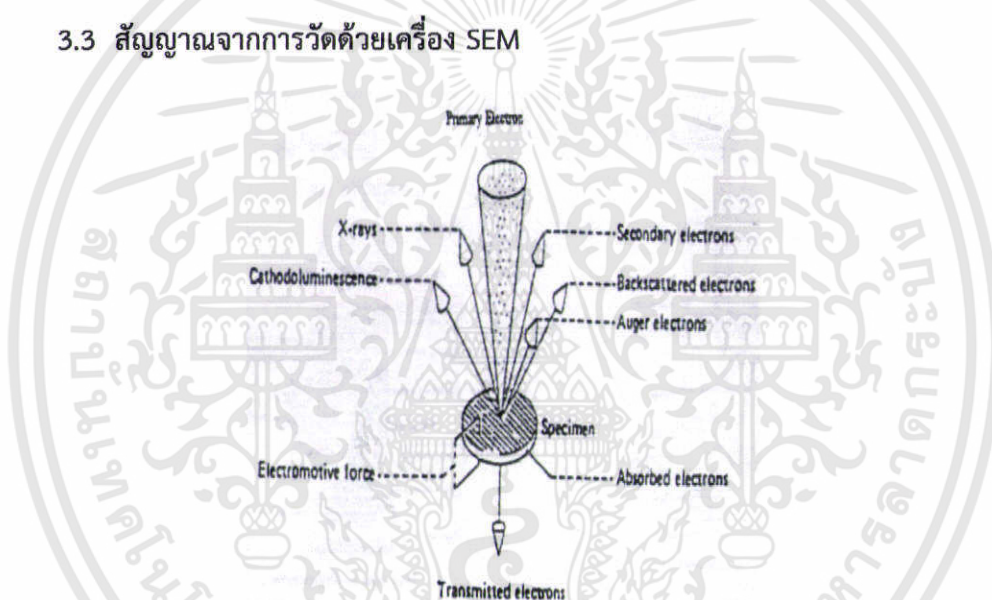
การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจาก filament และเร่งกลุ่มอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1-40 keV พร้อมทั้งสร้างกลุ่มอิเล็กตรอนให้

เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบเลนส์ (Condenser Lens) และโฟกัสภาพโดย (Objective Lens) ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวตัวอย่างโดยใช้ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning Coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) สัญญาณนี้จะถูกดึงเข้าสู่ Detector แปลงเป็นสัญญาณอิเล็กตรอนิกส์และนำไปขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพจอ Cathode Ray Tube (CRT) ซึ่งเราสามารถบันทึกภาพลงฟิล์มได้ด้วยการถ่ายภาพจากจอภาพหรือเก็บข้อมูลภาพในระบบเชิงตัว สำหรับเลขในกล่องจุลทรรศน์รุ่นใหม่สำหรับการใช้งาน โดยทั่วไปสามารถพิจารณาตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปรคือ

- 1.) df ,ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางปลายลำอิเล็กตรอน (Electron Probe Diameter)
- 2.) ip ,กระแสของลำอิเล็กตรอน (Electron Probe Current)
- 3.) ap ,มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (Electron Probe Convergence)

ตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรนี้มีส่วนสำคัญในการปฏิบัติงานด้วยกล้อง SEM ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกัน เช่นในขณะ df มีค่าเล็กลง ค่า ap จะมีค่ามากขึ้นและ ip จะมีค่าน้อยลง เป็นต้น [25]

3.3 สัญญาณจากการวัดด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ ก-16 สัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง [25]

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนผิวตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ 1. ยืดหยุ่น (Elastic) 2. ไม่ยืดหยุ่น (Inelastic)

3.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) ลักษณะการชนชนิดนี้สัญญาณที่ได้ คือ Backscatter Electron อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electrons) จะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบ และมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ มีการกระเจิงกลับจากผิวของตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบ Backscatter (BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (Detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

- 3.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering)** ลักษณะการชนชนิดนี้อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ให้กับอะตอมของตัวอย่างและทำให้อะตอมของตัวอย่างที่อยู่ในระดับความลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น Secondary Electrons, Auger Electrons, Characteristic X-ray, Bremsstrahlung (Continuum X-rays), Electron-hole Pairs, Ultraviolet, Cathodoluminescence เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้เราจะได้สัญญาณหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ Secondary electrons จนถึงการใช้วิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) ของธาตุในตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อื่นจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้นๆ

3.3.3 อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron (SE)) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างจะใช้ภาพของสัญญาณ SEI เป็นส่วนใหญ่

นอกจากนี้โอกาสการเกิดสัญญาณ SE ยังอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิสามารถเคลื่อนผ่านลงไปเนื้อตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิมากโอกาสที่จะเกิด SE ก็จะน้อยลงนั้นหมายถึง สัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

3.3.4 รังสีเอกซ์ (X-rays) ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1. รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่อง (Continuous X-ray) 2. รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic X-ray) มีการกำหนดต่างกันดังนี้

3.3.5 รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-ray) เกิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูโลมบีใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทาง และสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว จึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์

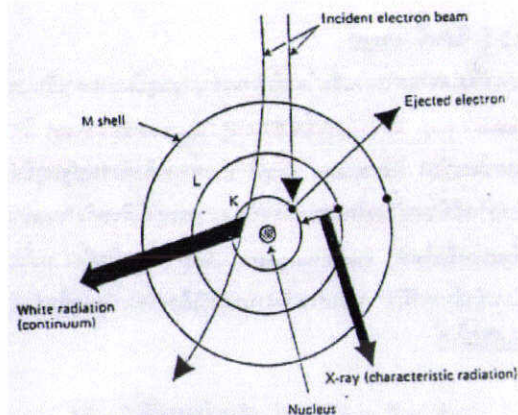
$$E_0 - E_1 = D E = h\nu \quad (\text{สำหรับกรณีนี้ } E_0 > E_1)$$

E_0 = พลังงานของ Primary Electron ก่อนทำอันตรกิริยา

E_1 = พลังงานของ Primary Electron หลังทำอันตรกิริยา

H = ค่าคงที่ของ Planck

V = ความถี่ของ X-ray ที่เกิดขึ้น



รูปที่ ก-17 รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic x-ray) [25]

3.3.6 รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic X-ray) ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็หลุดออกจากวงโคจรทำให้ช่องว่างเกิดขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (X-ray) เช่น อิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นโคจร (Electron Shell) ของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis) และนอกจากนี้ความเข้มของรังสีเอกซ์ยังบ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis)

3.3.7 Auger Electrons เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้นโคจรใดๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำเนินพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้นโคจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรเรียกอิเล็กตรอนชนิดนี้ว่า Auger Electrons ซึ่งการวิเคราะห์พลังงาน Auger Electrons นี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวตัวอย่าง เช่นการ วัดปริมาณของธาตุ (ที่มี Atomic Number ต่ำ) ที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

3.3.8 Cathodoluminescence เป็นลักษณะการเรืองแสงของตัวอย่าง ซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็น เกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติที่มีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากนัก เมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้ [25]

3.4 กำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (SE) ในเครื่อง SEM

เมื่ออิเล็กตรอนจาก Filament ถูกควบคุมเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง และลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด Scanning Coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกระดาของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกระดาบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกระดาบนพื้นผิวนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะที่สัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกระดาของอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้น จึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

- กำลังขยาย = $\frac{\text{พื้นที่บน CRT (Display Space)}}{\text{พื้นที่ของการกระดาบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$
- ชุดของ Scanning Coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกระดาบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกระดาแล้วยังควบคุมความเร็วในการกระดาอีกด้วย ซึ่งมีลักษณะความเร็วในการกระดาจะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าใช้ความเร็วในการกระดาที่มีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วต่ำ



ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ข.1 ข้อมูลจากการทดลองการทำแห้งวุ้นเอการ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ตารางที่ ข-1 ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวุ้นเอการ์ และการทำแห้งของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สภาวะอุณหภูมิ 50 °C และความดัน 150 bar

ตัวอย่างที่	ขนาด r (mm)/h (mm)	ใช้เวลาทำแห้ง (min)	น้ำหนักเริ่มต้น (g)	น้ำหนักหลังทำแห้ง (g)	ความชื้นที่หายไป (g)	%การทำแห้ง
1	2.34 / 3.12	180	0.0130	0.0001	0.0129	98.9256
2	2.55 / 3.31	150	0.0441	0.0334	0.0107	24.3145
3	2.51 / 2.41	120	0.0386	0.0067	0.0320	82.7550
4	2.24 / 2.95	90	0.0472	0.0134	0.0338	71.5678
5	2.29 / 2.71	60	0.0406	0.0118	0.0288	70.8652
6	2.45 / 3.20	150	0.0554	0.0140	0.0414	74.7021
7	2.40 / 3.42	30	0.0476	0.0230	0.0247	51.7632
8	2.40 / 2.95	120	0.0546	0.0346	0.0200	36.5702
9	2.42 / 3.12	120	0.0469	0.0117	0.0351	75.0053
10	2.27 / 2.83	30	0.0484	0.0207	0.0277	57.1783
11	2.30 / 3.10	90	0.0542	0.0185	0.0356	65.8050
12	2.68 / 2.54	20	0.0496	0.0319	0.0177	35.7460
13	2.40 / 2.63	180	0.0448	0.0072	0.0375	83.8472

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวันเอการ์ และการทำแห้งของวันเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สภาวะอุณหภูมิ 50 °C และความดัน 150 bar

ตัวอย่างที่	ขนาด r (mm)/h (mm)	ใช้เวลาทำแห้ง (min)	น้ำหนักเริ่มต้น (g)	น้ำหนักหลังทำแห้ง (g)	ความชื้นที่หายไป (g)	%การทำแห้ง
14	2.05 / 2.83	20	0.0535	0.0311	0.0224	41.9174
15	2.10 / 2.96	10	0.0534	0.0412	0.0122	22.8697
16	2.61 / 2.44	20	0.0633	0.0409	0.0225	35.4808
17	2.37 / 2.47	60	0.0389	0.0125	0.0264	67.9434
18	2.55 / 2.86	60	0.0496	0.0167	0.0329	66.4045
19	2.33 / 2.56	150	0.0448	0.0057	0.0391	87.2934
20	2.62 / 2.73	90	0.0330	0.0056	0.0274	83.0452
22	2.40 / 2.39	120	0.0637	0.0175	0.0462	72.5703
23	2.56 / 2.48	120	0.0606	0.0233	0.0373	61.4788
24	2.40 / 2.53	30	0.0398	0.0200	0.0198	49.6982
25	2.08 / 2.67	20	0.0513	0.0352	0.0161	31.3852
26	2.32 / 2.44	10	0.0530	0.0389	0.0141	26.5472
27	2.45 / 2.85	30	0.0432	0.0189	0.0244	56.3599
28	2.73 / 2.43	90	0.0509	0.0163	0.0346	67.9434
29	2.83 / 2.62	120	0.0585	0.0181	0.0404	69.0663

ตารางที่ ข-2 ค่าร้อยละของความชื้นของวันเอการที่หายไป โดยผ่านการทำให้แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เวลาใดๆ

Sample	เวลาที่ใช้ (min)	%การทำแห้ง	ร้อยละของความชื้นที่หายไป				100-x	SD	variance	error
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Avg.				
0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
1	10	22.87	26.54	24.36	24.59	25.16	75.41	1.8458	1.7321	1.0657
2	20	35.74	35.48	31.38	34.20	33.69	65.80	2.4456	1.7321	1.4120
3	30	51.76	57.18	56.36	55.10	56.21	44.90	2.9214	1.7321	1.6867
4	60	70.86	67.94	66.4	68.40	67.58	31.60	2.2653	1.7321	1.3079
5	90	71.57	65.8	67.94	68.43	67.39	31.56	2.9169	1.7321	1.6841
6	120	75.00	72.57	69.06	72.21	71.28	27.79	2.9863	1.7321	1.7242
7	150	74.70	87.29	65.69	75.89	76.29	24.10	10.8493	1.7321	6.2639
8	180	98.92	83.84	87.35	90.03	87.07	9.96	7.8908	1.7321	4.5558

ตารางที่ ข-3 ค่าอัตราการทำแห้งโดยผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เวลาใดๆ

Sample	เวลาที่ใช้ (min)	อัตราการทำแห้ง				SD	variance	error
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Avg.			
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	10	2.2897	2.6547	2.4366	2.4603	0.1837	1.7321	0.1060
2	20	1.7873	1.7740	1.5693	1.7102	0.1222	1.7321	0.0706
3	30	1.7254	1.9059	1.8787	1.8367	0.0973	1.7321	0.0562
4	60	1.1811	1.1324	1.1067	1.1401	0.0378	1.7321	0.0218
5	90	0.7952	0.7312	0.7549	0.7604	0.0324	1.7321	0.0187
6	120	0.6250	0.6048	0.5756	0.6018	0.0249	1.7321	0.0144
7	150	0.4980	0.5820	0.4380	0.5060	0.0723	1.7321	0.0418
8	180	0.5496	0.4658	0.4853	0.5002	0.0438	1.7321	0.0253

ข.2 ข้อมูลจากการทดลองการทำแห้งวุ้นเอการ์ด้วยการพาความร้อน

ตารางที่ ข-4 ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวุ้นเอการ์ และการทำแห้งของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยการพาความร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ 50 °C

เวลาที่ใช้ (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	น้ำหนักก่อน ทำแห้ง (กรัม)	น้ำหนักหลัง ทำแห้ง (กรัม)	%น้ำที่ หายไป	น้ำหนักก่อน ทำแห้ง (กรัม)	น้ำหนักหลัง ทำแห้ง (กรัม)	%น้ำที่ หายไป	น้ำหนักก่อน ทำแห้ง (กรัม)	น้ำหนักหลัง ทำแห้ง (กรัม)	%น้ำที่ หายไป
10	0.0491	0.0256	47.8084	0.0739	0.0368	50.2030	0.0767	0.0360	53.0639
20	0.0538	0.0194	63.9137	0.0756	0.0116	84.6561	0.0764	0.0111	85.4712
30	0.0355	0.0052	85.3439	0.0750	0.0077	89.7333	0.0772	0.0073	90.5428
60	0.0559	0.0063	88.7359	0.0815	0.0048	94.1104	0.0709	0.0045	93.6530
90	0.0589	0.0062	89.4773	0.0706	0.0033	95.3258	0.0690	0.0031	95.5073
120	0.0406	0.0042	89.6501	0.0567	0.0039	93.1217	0.0588	0.0038	93.5374
150	0.0559	0.0057	89.8014	0.0768	0.0046	94.0104	0.0770	0.0048	93.7662
180	0.0433	0.0043	90.0693	0.0803	0.0037	95.3923	0.0810	0.0051	93.7037

ตารางที่ ข-5 ค่าร้อยละของความชื้นของวัชเนการ์ที่หายไปโดยการทำให้แห้งแบบการพาความร้อนที่เวลาใดๆ

Sample	เวลาที่ใช้ (min)	ร้อยละของความชื้นที่หายไป			Avg.	SD	variance	error
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	10	47.8084	50.2030	53.0639	50.3584	2.6312	1.7321	1.5191
2	20	80.9137	84.6561	85.4712	83.6803	2.4304	1.7321	1.4032
3	30	85.3439	89.7333	90.5428	88.5400	2.7974	1.7321	1.6151
4	60	88.7359	94.1104	93.6530	92.1665	2.9797	1.7321	1.7203
5	90	89.4773	95.3258	95.5073	93.4368	3.4302	1.7321	1.9804
6	120	89.6501	93.1217	93.5374	92.1031	2.1345	1.7321	1.2324
7	150	89.8014	94.0104	93.7662	92.5260	2.3627	1.7321	1.3641
8	180	90.0693	95.3923	93.7037	93.0551	2.7201	1.7321	1.5705

ตารางที่ ข-6 ค่าอัตราการทำแห้งของวันเอการ์โดยการทำแห้งแบบการพาความร้อนที่เวลาใดๆ

Sample	เวลาที่ใช้ (min)	อัตราการทำแห้ง				SD	variance	error
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Ave.			
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	10	4.7808	5.0203	5.3064	5.0358	0.2631	1.7321	0.1519
2	20	4.0457	4.2328	4.2736	4.1840	0.1215	1.7321	0.0702
3	30	2.8448	2.9911	3.0181	2.9513	0.0932	1.7321	0.0538
4	60	1.4789	1.5685	1.5609	1.5361	0.0497	1.7321	0.0287
5	90	0.9942	1.0592	1.0612	1.0382	0.0381	1.7321	0.0220
6	120	0.7471	0.7760	0.7795	0.7675	0.0178	1.7321	0.0103
7	150	0.5987	0.6267	0.6251	0.6168	0.0158	1.7321	0.0091
8	180	0.5004	0.5300	0.5206	0.5170	0.0151	1.7321	0.0087

ข.3 ค่าการละลายที่อุณหภูมิและความดันใดๆ โดยการประยุกต์ใช้สมการของ Raoult

ตารางที่ ข-7 ค่าการละลายที่อุณหภูมิและความดันใดๆ

T(°C)	ค่าการละลายของน้ำในวัฏเการที่ความดันค่าต่างๆ (Bar)							
	20	60	80	100	120	150	170	190
40	0.0121	0.0362	0.0483	0.0604	0.0725	0.0906	0.1026	0.1147
50	0.0117	0.0351	0.0468	0.0585	0.0702	0.0877	0.0994	0.1111
70	0.0110	0.0331	0.0441	0.0551	0.0661	0.0826	0.0936	0.1047
80	0.0107	0.0321	0.0428	0.0535	0.0642	0.0803	0.0910	0.1017
90	0.0104	0.0312	0.0416	0.0521	0.0625	0.0781	0.0885	0.0989

ข.4 การวัดขนาดรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ

ตารางที่ ข-8 ค่า Aspect Ratio ของรูพรุนวงแหวนเอการอบแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

เวลาในการทำแห้ง (min)	Aspect ratio							Avg.	SD	Varian	Error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7				
10.00	5.85	11.74	4.98	4.34	-	-	-	6.73	3.40	2.00	1.70
20.00	3.24	2.58	1.14	1.99	6.17	6.07	3.56	3.53	1.94	2.65	0.73
30.00	6.00	1.63	2.00	1.20	3.73	5.84	1.60	3.14	1.91	2.65	0.72
60.00	2.29	2.38	1.41	3.50	3.64	-	-	2.64	0.93	2.24	0.42
90.00	2.81	2.64	2.81	3.41	3.21	1.21	2.81	2.70	0.71	2.65	0.27
120.00	2.00	1.34	0.97	1.18	2.76	1.81	1.63	1.67	0.60	2.65	0.23
150.00	1.64	1.76	1.71	1.86	1.46	1.56	1.23	1.60	0.21	2.65	0.08
180.00	2.46	0.95	10.92	9.12	2.60	2.40	6.32	4.97	3.86	2.65	1.46

ข.5 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ จะประยุกต์ใช้สมการของ Fick

ตารางที่ ข-9 ค่าตัวแปรในสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ที่ความดัน 100 bar

จุดเวลา	dm (kg)	dt (s)	Area transfer (m ²)	m 1 (kg/m ² .s)	ความหนาแน่นน้ำ (kg/m ³)	∂M (kg /kg)	∂x (m)	D (m ² /s)
0	1.4421E-06	0	0.0020	0	1000	0	0	0
10	3.7214E-06	1200	0.0020	1.5417E-06	1000	-3.1316	-3.1E-05	1.5262E-11
20	4.6053E-06	1200	0.0020	1.9079E-06	1000	-3.2185	-8E-05	4.7423E-11
30	5.5356E-06	1500	0.0020	1.8347E-06	1000	-3.3055	-9.9E-05	5.4948E-11
60	3.7214E-07	1800	0.0020	1.0278E-07	1000	-0.2610	-0.000119	4.6869E-11
90	5.5821E-07	1800	0.0020	1.5417E-07	1000	-0.1740	-8E-06	7.0894E-12
120	1.9072E-06	1800	0.0020	5.2676E-07	1000	-0.2610	-1.2E-05	2.4222E-11
150	9.3036E-07	3300	0.0020	1.4016E-07	1000	-0.6959	-4.1E-05	8.2576E-12
180	3.3028E-05	2100	0.0020	7.8188E-06	1000	-1.5658	-2E-05	9.9871E-11

ตารางที่ ข-10 ค่าตัวแปรในสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลพร่องของน้ำในวินเอการ์ที่ความดัน 120 bar

จุดเวลา	dm (kg)	dt (s)	Area transfer (m ²)	m 1 (kg/m ² .s)	ความหนาแน่นน้ำ (kg/m ³)	∂M (kg /kg)	∂x (m)	D (m ² /s)
0	1.5560E-07	0	0.0020	0	1000	0	0	0
10	1.3440E-06	1200	0.0020	5.5696E-07	1000	-3.1316	-3.1000E-05	5.5135E-12
20	5.0268E-06	1200	0.0020	1.1139E-06	1000	-3.2185	-8.0000E-05	2.7688E-11
30	4.0403E-06	1500	0.0020	1.3367E-06	1000	-3.3055	-9.9000E-05	4.0034E-11
60	3.0807E-06	1800	0.0020	2.2278E-06	1000	-0.2610	-1.1900E-04	1.0159E-09
90	5.1643E-06	1800	0.0020	3.3418E-06	1000	-0.1740	-8.0000E-06	1.5367E-10
120	6.2017E-06	1800	0.0020	4.4557E-06	1000	-0.2610	-1.2000E-05	2.0489E-10
150	5.2045E-06	3300	0.0020	3.0380E-06	1000	-0.6959	-4.1000E-05	1.7899E-10
180	2.4200E-05	2100	0.0020	5.7287E-06	1000	-1.5658	-2.0000E-05	7.3175E-11

ตารางที่ ข-11 ค่าตัวแปรในสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลพร่องของน้ำในวุ้นเอการ์ที่ความดัน 150 bar

จุดเวลา	dm (kg)	dt (s)	Area transfer (m ²)	m 1 (kg/m ² .s)	ความหนาแน่นน้ำ (kg/m ³)	∂M (kg /kg)	∂x (m)	D (m ² /s)
0	1.9920E-07	0	0.0015	0	1000	0	0	0
10	3.0876E-06	1200	0.0015	1.7298E-06	1000	-3.1316	-4.00E-06	2.2095E-12
20	3.0876E-06	1200	0.0015	1.7298E-06	1000	-3.2185	-6.20E-05	3.3322E-11
30	3.0876E-06	1500	0.0015	1.3839E-06	1000	-3.3055	-6.20E-05	2.5956E-11
60	3.0876E-06	1800	0.0015	1.1532E-06	1000	-0.2610	-6.20E-05	2.7398E-10
90	3.0876E-06	1800	0.0015	1.1532E-06	1000	-0.1740	-6.20E-05	4.1097E-10
120	6.1752E-06	1800	0.0015	2.3064E-06	1000	-0.2610	-6.20E-05	5.4796E-10
150	0	3300	0.0015	0	1000	-0.6959	-1.24E-04	0
180	2.7988E-05	2100	0.0015	8.9599E-06	1000	-1.5658	0.00E+00	0



ภาคผนวก ค
การคำนวณ

ค.1 การคำนวณหาค่าการละลาย (Solubility) ของน้ำในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การประยุกต์ใช้สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในการคำนวณหาค่าการละลายของน้ำในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต นั้นคือ ประยุกต์ใช้สมการของไหลแบบไม่อุดมคติ ของ Raoult's Law ตามงานวิจัยของ M. van der Kraan และคณะ [16]

สมการหาค่าการละลายโดยประยุกต์ใช้ Raoult's Law ได้ดังนี้

$$\Gamma = \frac{y^{\text{sat}} \rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}^{\text{max}}}\right) \exp\left(\frac{\kappa \rho_{\text{CO}_2}}{T} - \frac{b_1}{M_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{\rho_{\text{CO}_2}^{\text{max}} \rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}^{\text{max}} - \rho_{\text{CO}_2}}\right) \quad (\text{ค.1})$$

ที่สภาวะการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

$$P = 150 \text{ bar}, T = 50 + 273 = 323 \text{ K}$$

ตัวแปล $\rho_{\text{CO}_2}^{\text{max}} = 1560 \text{ kg/m}^3$; Perry & Green

$$M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ kg/mol}$$

$$\kappa = 2.08 \text{ K}\cdot\text{m}^3/\text{kg}; \text{Depend on temperature}$$

$$V = 15 \text{ ml}, \text{ Volume of Tank}$$

$$b_1 = 0.0305 \text{ dm}^3/\text{mol}; \text{Van der Waals volume}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}} = \frac{1000 A M_{\text{H}_2\text{O}}}{RT} \exp\left(\frac{B}{T - C}\right)$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}} = \frac{1000(1.32 \times 10^4) \left(\frac{18 \text{ kg}}{\text{mol}}\right)}{(8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1})(323 \text{ K})} \exp\left(\frac{-3884 \text{ K}}{323 \text{ K} - 43 \text{ K}}\right) = 6.70 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{n M_w}{v} = \frac{P M_w}{RT} = \frac{(150 \text{ bar}) \left(\frac{44 \text{ kg}}{\text{mol}}\right)}{(8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1})(323 \text{ K})} = 0.286 \text{ kg/m}^3$$

แทนค่าใน (2.1) $y^{\text{sat}} = 0.235$; mass fraction of water in scCO₂

$$y^{\text{sat}} = 0.235 = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CO}_2}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + (0.286 \text{ g/ml} \times 15 \text{ ml})}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 1.316 \text{ g}$$

$$S = \frac{1.316 \text{ g H}_2\text{O}}{15 \text{ ml Tank}} = 0.088 \text{ g/ml-tank}$$

ค.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์ จะประยุกต์ใช้สมการของ Fick ตามงานวิจัยของ N. Wang & J. G. Brennan [3] และ Ratiya และคณะ [4] โดยมีการตั้งสมมติฐานการแพร่ของน้ำเข้าไปละลายในเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเกิดจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของความชื้น รวมทั้งสมมติให้วุ้นเอการ์มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่กว้างและยาวมาก (Infinite Slab), การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว และไม่คิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของการถ่ายเทมวลได้ดังนี้

$$m_1 = D\rho_l \frac{\partial M}{\partial x} \quad (\text{ค.2})$$

โดย m_1 คือ Liquid flux [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
 D คือ Diffusion coefficient of water [m^2/s]
 ρ_l คือ Density of liquid
 M คือ Moisture content (kg Water/kg Agar)
 x คือ The space dimension in the direction of thickness (m)

ตัวอย่าง

- ที่อุณหภูมิที่ 50 °C ความดัน 150 bar
 ที่เวลาการทำแห้งที่ 10 min
- น้ำหนักของวุ้นเอการ์ที่เปลี่ยนแปลง, dm 3.0876E-06 kg
 - เวลาที่เปลี่ยนแปลง, dt 1200 s
 - พื้นที่การถ่ายเทมวล, A 0.001487 m^2
 - ดังนั้น ฟลักซ์การแพร่ของน้ำ, $m_1 = dm/A \cdot dt = 1.72981\text{E}-06 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
 - ความหนาแน่นน้ำ, $\rho_l = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
 - การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของความชื้น, $\partial M = -3.13155 \text{ kg Water}/\text{kg Agar}$
 - การเปลี่ยนแปลงความหนา, $\partial x = -4.0000\text{E}-06 \text{ m}$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวุ้นเอการ์, $D = \frac{m_1 \partial x}{\rho_l \partial M} = 2.2095\text{E}-12 \text{ m}^2/\text{s}$

ค.3 การคำนวณการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 99%

ในการทดลองจะใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นเพียง 1.0 M เพื่อทดสอบการบวมตัวและละลายวุ้นเอการ์ ซึ่งมีการคำนวณดังนี้

วิธีคิด

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของไฮโดรคลอริก } 99\% &= \frac{\text{ความหนาแน่นของ } \text{H}_2\text{SO}_4 \times \text{ปริมาตร solvent}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{H}_2\text{SO}_4} \\ &= \frac{(1.81 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3})(1000 \frac{\text{cm}^3}{\text{L}})}{98.08 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \\ &= \frac{18.8 \text{ mol}}{\text{L}} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$\begin{aligned} C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\ (18.8 \frac{\text{mol}}{\text{L}}) V_1 &= (1 \frac{\text{mol}}{\text{L}}) (20.0 \text{ ml}) \\ V_1 &= 1.06 \text{ ml} \end{aligned}$$

ดังนั้น การใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 M ปริมาตร 20 ml ต้องใช้กรดไฮโดรคลอริก 99% ปริมาณ 1.06 ml

ค.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 M

อีกสารละลายที่ต้องใช้ทดสอบการบวมตัว คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์แข็งและทำการผสมน้ำ จึงต้องมีการหาอัตราส่วนมวลของโซเดียมไฮดรอกไซด์แข็งกับน้ำเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ 1.0 M

วิธีคิด

$$\begin{aligned} 1.0 \text{ M} &= \frac{n (\text{Mol})}{V (\text{L})} = \frac{m}{Mw \cdot V} \\ 1.0 \frac{\text{mol}}{\text{L}} &= \frac{m}{(\frac{40 \text{ mol}}{\text{g}})(20 \times 10^{-3} \text{ L})} \\ m &= 1.25 \text{ g} \end{aligned}$$

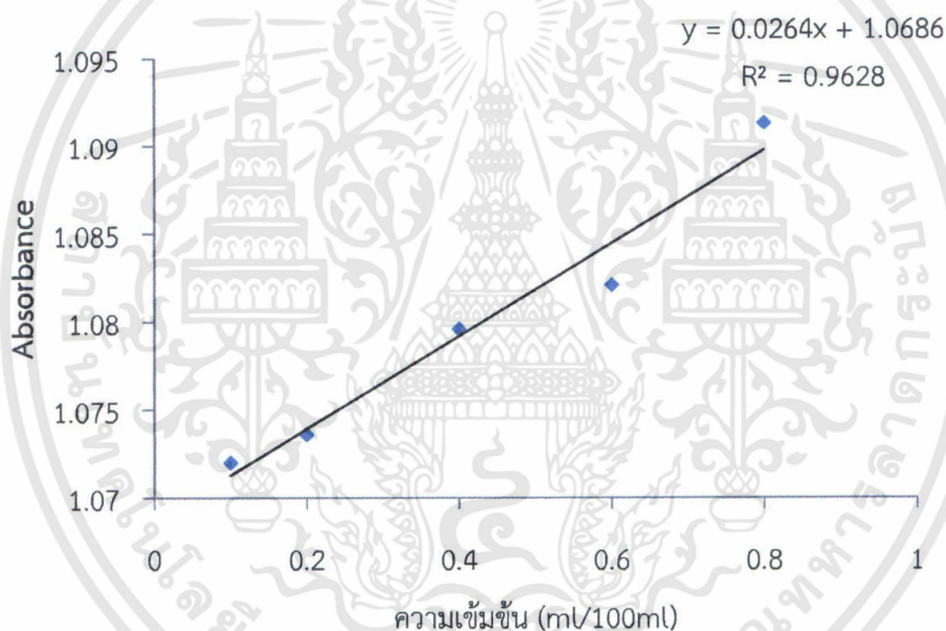
ค.5 การหาค่าความเข้มข้นของวุ้นเอการ์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

กำหนดให้ Wave Length ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 660.50 nm

สมมติให้ ความเข้มข้นของวุ้นเอการ์อบแห้งที่กระจายตัวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทราบความเข้มข้นแน่นอน 5 ค่า ได้แก่ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ให้เป็น 10 ml

วิธีการทำ Calibration curve

1. นำวุ้นเอการ์ที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน 5 ค่า ได้แก่ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 10 ml
2. นำค่า Absorbance ของสารละลายเอการ์ในโซเดียมไฮดรอกไซด์แต่ละความเข้มข้นมา Plot กราฟระหว่าง Absorbance กับความเข้มข้น
3. ลากเส้น Calibration Curve โดยให้ผ่านค่าทั้ง 5 ค่าในกราฟ



รูปที่ ค-1 Calibration curve ของสารละลายเอการ์ในโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ความเข้มข้นของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีค่า Absorbance เท่ากับ 1.107 เมื่อลากเส้นผ่าน Calibration Curve ตัดที่แกน x จะได้ค่าความเข้มข้นของน้ำย้อมก่อนย้อม เท่ากับ 1.0978 ml/100ml สารละลาย

2. ความเข้มข้นของวุ้นเอการ์ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการพาความร้อน มีค่า Absorbance เท่ากับ 1.097 เมื่อลากเส้นผ่าน Calibration Curve ตัดที่แกน x จะได้ค่าความเข้มข้น เท่ากับ 1.0975 ml/100ml สารละลาย

ค.6 การปรับค่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการทำแห้งด้วยแฟกเตอร์ VR

VR, Volumetric Ratio คือ อัตราส่วนปริมาตรชื้นตัวอย่างวุ้นเอการ์เทียบกับปริมาตรถังปฏิกรณ์

กำหนด ขนาดวุ้นเอการ์เริ่มต้น = $5 \times 3 \text{ mm}^3 = 0.125 \text{ ml}$

กำหนดปริมาณความชื้นที่เวลา 20 min มีค่า = 65.8%

ขนาดถังปฏิกรณ์ขณะทดลอง = 15 ml

ขนาดถังปฏิกรณ์ที่พยายามปรับค่า

วิธีคิด $VR_{(เดิม)} = 0.125 \text{ ml} / 15 \text{ ml} = 0.008333$

$VR_{(ใหม่)} = 0.125 \text{ ml} / 30 \text{ ml} = 0.004166$

ปริมาณความชื้นที่เวลา 20 min หลังปรับค่า = $(65.8\% \times 0.004166) / 0.008333$
= 32.90%

ดังนั้น ค่าความชื้นที่ถูกปรับที่ VR-30 ml = 32.90%

ประวัติผู้ทำการวิจัย



ชื่อ-นามสกุล ประภาพร เงินกระโทก

วันเดือนปีเกิด 28 มกราคม พ.ศ. 2531

ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปีที่สำเร็จการศึกษา	ชื่อสถานศึกษา
วศ บ.สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี และวัสดุพอลิเมอร์	2553	มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประสบการณ์ในการฝึกงาน

ฝึกงานที่บริษัทพานาโซนิคอิเล็กทรอนิกส์ ทรัค เวกส์ ไทยแลนด์ ในหน่วยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ (Injection Process) ระยะเวลาในการฝึกงาน 1 มีนาคม 2552 ถึง 3 พฤษภาคม 2552

เข้าร่วมโครงการ Young Researcher of JSPS Program ณ มหาวิทยาลัย Yamagata ประเทศญี่ปุ่นในช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน 2554

ผลงานทางวิชาการ

ประภาพร เงินกระโทก และสุรัตน์ อารีย์รัตน์ “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวุ้นเอการ์หลังผ่านการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, 10-11 พฤศจิกายน 2554, หน้า T-38