

กระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

SPRAY COATING PROCESSES BY SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-220-102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SPRAY COATING PROCESSES BY SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2013

KMITL-2013-EN-M-220-102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ กระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต  
Thesis Title Spray Coating Processes by Supercritical Carbon Dioxide  
นักศึกษา นายปรีทัศน์ เหมือนจันทร์  
รหัสประจำตัว 54612011  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-220-102

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อัญชลีพร	วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ	
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิสสรณ์	
ดร.จันทวัฒน์	ไชยชนะวงศ์	
ดร.สันติ	วัฒนานุสรณ์	
ผศ.ดร.สุรัตน์	อารีรัตน์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 09.00-10.30 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร CCA ชั้น 4 ห้องประชุมสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วย

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

นักศึกษา

นายปรีทัศน์ เหมือนจันทร์

รหัสนักศึกษา

54612011

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

พ.ศ.

2556

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยการประยุกต์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax) บนแผ่น Poly Methyl Methacrylate (PMMA) โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย และการประยุกต์เทคนิค Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) พ่นผ่านหัวฉีดไปยังสภาวะบรรยากาศ การทดลองนี้ได้ดำเนินการเพื่อศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัว 120-170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 40-85°C ระยะการพ่น 1-15 cm มุมการพ่น 90-150° และการเติมซอร์บิทอล (Sorbitol) เป็นสารก่อผลึก 0.3 wt% ต่อสมบัติของพื้นผิวหลังการเคลือบผิว ผลการดำเนินการพบว่าอนุภาคพาราฟินแว็กซ์หลังผ่านเทคนิค RESS มีขนาด 2.0-10.0  $\mu\text{m}$  ขึ้นกับสภาวะในการดำเนินการ โดยการเพิ่มความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวส่งผลให้ขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์มีขนาดเล็กลงเพียงเล็กน้อย และสามารถเตรียมพื้นผิว PMMA ที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ มุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิวหลังการเคลือบผิวเพิ่มขึ้นจาก 80.0° เป็น 150.5° นอกจากนี้ยังพบว่าค่าตัวเลข  $Re$  และ  $Oh$  สามารถอธิบายผลของสภาวะการพ่นต่อลักษณะฐานวิทยาของพื้นผิวที่สัมพันธ์กับการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้

ตอนที่ 2 ศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองยางเหลวพอลิบิวทาไดอิน (Liquid Polybutadiene, LPB) หรือยางเหลว PB บนแผ่นวงจรมพิมพ์ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวถูกละลาย และการประยุกต์เทคนิค Particles from Gas-Saturated Solutions (PGSS) ขึ้นตอนแรกทำการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในยางเหลว PB พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่าง  $10^{-8}$ - $10^{-9}$   $\text{m}^2/\text{s}$  ที่ 40-60°C และ 80-120 bar หลังจากนั้นศึกษาผลของอุณหภูมิ 40-60°C และความดัน 80-120 bar ต่อประสิทธิภาพการพ่น (Transfer Efficiency) พบว่าประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดมีค่าประมาณ 90% ผลการใช้สารไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumylperoxide, DCP) 0.7 phr เป็นสารเชื่อมโยงโมเลกุล ที่อุณหภูมิการอบ 160°C ระยะเวลาในการอบ 30 min สามารถเพิ่มระดับการยึดติดของพื้นผิวกับแผ่นวงจรมพิมพ์ตามมาตรฐาน ASTM : D 3359 แบบ B จากระดับ 0B เป็น 4B และมุมสัมผัสของหยดน้ำแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำหลังการเคลือบผิวเพิ่มขึ้นจาก 64.0° เป็น 86.0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Spray Coating Processes by Supercritical Carbon Dioxide
Student	Mr. Paritat Muanchan
Student ID.	54612011
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

## Abstract

This research studied spray coating processes by supercritical carbon dioxide (sc-CO<sub>2</sub>). This research is divided into 2 parts as follows :

Part 1 : Paraffin wax spray coating process on Poly Methyl Methacrylate (PMMA) was studied by using sc-CO<sub>2</sub> as a solvent. The Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) method was applied by spraying through a nozzle at to ambient condition. The experiments were conducted to investigate the effects of pre-expansion pressure 120–170 bar, pre-expansion temperature 40–85°C, spraying distance 1–15 cm, spraying angle 90°–150° and the addition of sorbitol as a nucleating agent of 0.3 wt% on the properties of the treated PMMA surfaces. The experimental results revealed that the average particle sizes of paraffin wax after the RESS method were found to be 2.0–10.0 μm depending upon the experimental conditions. By increasing pre-expansion pressure and temperature resulted in slightly decreasing of the particle size. PMMA superhydrophobic surface was successfully prepared. The water contact angle of the treated surface increased from 80.0° to 150.5°. Moreover, it was found that *Re* and *Oh* numbers could describe the effects of spraying conditions on surface morphology relating to superhydrophobic surface improvement.

Part 2 : Liquid Poly Butadiene Rubber (LPB) spray coating process on printed circuit board (PCB) was studied by using sc-CO<sub>2</sub> as a solute. The Particles from Gas-Saturated Solutions (PGSS) method was applied. The first step was to study the swelling behavior of LPB solution by sc-CO<sub>2</sub>, and to estimate the diffusion coefficient of sc-CO<sub>2</sub> into LPB. The diffusion coefficient ranges from 10<sup>-8</sup>–10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s at 40–60°C and 80–120 bar. The second step was to study the effects of the temperature of 40–60°C and the pressure of 80–120 bar on the transfer efficiency. The maximum transfer efficiency was approximately of 90%. By using the cross-linking agent, 0.7 phr dicylmylperoxide (DCP), at a given curing temperature of 160°C within 30 min, the surface adhesion based on ASTM : D 3359 type B increased from 0B to 4B. The degree of hydrophobicity increased indicating by the water contact angle from 64.0° to 86.0°.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือดังนี้

ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ รวมทั้งความรู้และประสบการณ์ในการทำงาน

รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้ความรู้เกี่ยวกับงานวิจัยและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความรู้และคำแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์

พี่และเพื่อนในภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจและการสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ปริทัศน์ เหมือนจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัด III อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
สัญลักษณ์.....	XIV
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 กระบวนการเคลือบผิว (Coating Processes).....	6
2.1.1 การทาสีหรือทาเคลือบผิว (Painting).....	6
2.1.2 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Coating).....	6
2.1.3 การเคลือบผิวแบบจุ่ม (Dip Coating).....	6
2.1.4 การเคลือบผิวแบบพ่นละออง (Spray Coating).....	6
2.2 ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluids).....	7
2.2.1 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide).....	8
2.3 กระบวนการเกิดผลึก.....	9
2.4 การเกิดอนุภาคด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	10
2.4.1 Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS).....	10
2.4.2 Particles from Gas-Saturated Solutions (PGSS).....	11
2.4.3 Gas Anti-Solvent Process (GAS).....	11
2.4.4 Supercritical Anti-Solvent Process (SAS).....	12
2.4.5 Solution Enhanced Dispersion by Supercritical Fluid (SEDS).....	12
2.5 การไหลของของไหลผ่านหัวฉีด เดอ ลาวาล (De Laval Nozzle).....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว (Hydrophobicity of Surfaces).....	14
2.6.1 ปรากฏการณ์บนพื้นผิวใบบัว (Lotus Leaf Effect).....	15
2.7 พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax).....	16
2.8 ยางบิวทาไดอีน (Polybutadiene, PB).....	16
2.8.1 ยางเหลว PB (Liquid Butadiene Rubber, LPB).....	17
2.9 การแพร่ของสาร.....	17
2.9.1 การแพร่ของสารไปยังภูมิภาคของไหลเหนือวิกฤต.....	17
2.9.2 การบวมตัวของพอลิเมอร์เนื่องจากการแพร่และการละลายของของไหลเหนือวิกฤต.....	18
2.9.3 สมดุลของการดูดซับ.....	20
2.10 ประสิทธิภาพการพ่น (Transfer Efficiency).....	21
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
<b>บทที่ 3 การทดลอง.....</b>	<b>25</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	25
3.3 การศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์.....	26
3.3.1 การศึกษาผลจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำและคุณลักษณะของพื้นผิว PMMA.....	26
3.3.2 การศึกษาผลจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่มต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำและคุณลักษณะของพื้นผิว PMMA.....	27
3.4 การศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB.....	27
3.4.1 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB.....	27
3.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการพ่นในกระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS.....	27
3.5 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว.....	28
3.6 การทดสอบการยึดติดแบบเทป (Tape Test).....	28
3.7 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว.....	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	29
ตอนที่ 1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS.....	29
4.1 สมดุลวัฏภาคระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์.....	29
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการเคลือบผิว	
แบบพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์บนแผ่น PMMA โดยเทคนิค RESS	
ต่อคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว.....	33
4.2.1 การศึกษาผลของระยะเวลาพ่นและการพ่นซ้ำในกระบวนการเคลือบผิวโดย	
เทคนิค RESS.....	33
4.3 การเกิดอนุภาคโดยเทคนิค RESS.....	36
4.3.1 ผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	37
4.3.2 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	39
4.3.3 ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	41
4.3.4 ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	44
4.4 การศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	45
4.4.1 การประมาณค่าความดันและความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีด	
ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	45
4.4.2 การประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	47
4.4.3 การประมาณค่าความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	49
4.5 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว.....	50
4.5.1 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA ก่อนกระบวนการเคลือบผิว.....	50
4.5.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบผิว	
ด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม.....	51
4.5.3 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบด้วย	
พาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS.....	52
4.5.4 การปรับเปลี่ยนมุมการพ่นเพื่อปรับปรุงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค	
พาราฟินแว็กซ์.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ตอนที่ 2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS.....	60
4.6 การศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ด้วยเทคนิคการจับภาพ.....	60
4.7 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันต่อประสิทธิภาพการพ่นของกระบวนการ เคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS.....	63
4.7.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการพ่น.....	63
4.7.2 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการพ่น.....	64
4.8 การศึกษาผลของสารเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลต่อการยึดติดกับพื้นผิว.....	65
4.9 ศึกษาผลของเวลาในการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของยางเหลว PB ต่อการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB.....	67
4.10 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว.....	68
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....</b>	<b>69</b>
<b>ตอนที่ 1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS.....</b>	<b>69</b>
5.1 สมดุลวัฏภาคระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์.....	69
5.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละออง พาราฟินแว็กซ์บนแผ่น PMMA โดยเทคนิค RESS ต่อคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำ ของพื้นผิว.....	69
5.3 การเกิดอนุภาคด้วยเทคนิค RESS .....	69
5.4 การศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	69
5.5 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว .....	70
<b>ตอนที่ 2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS.....</b>	<b>70</b>
5.6 การศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ด้วยเทคนิคการจับภาพ.....	70
5.7 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันต่อประสิทธิภาพการพ่นของกระบวนการ เคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS.....	71

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.8 การศึกษาผลของสารเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลต่อการยึดติดกับพื้นผิว.....	71
5.9 ศึกษาผลของเวลาในการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของยางเหลว PB ต่อการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB.....	71
5.10 การทดสอบของหยดน้ำของพื้นผิว.....	71
ข้อเสนอแนะ.....	72
บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก การประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	78
ภาคผนวก ข กระบวนการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	81
ภาคผนวก ค การประมาณค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์.....	85
ภาคผนวก ง จลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	92
ภาคผนวก จ การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระ ของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	100
ภาคผนวก ฉ การศึกษาการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	101
ภาคผนวก ช การศึกษาประสิทธิภาพการพ่นของระบบสารผสมยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตด้วยเทคนิค PGSS.....	104
ภาคผนวก ซ การทดสอบการยึดติดทางกายภาพด้วยวิธีมาตรฐาน.....	106
ภาคผนวก ฎ ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการพ่น.....	108
ภาคผนวก ฏ ชุดอุปกรณ์การสังเกตพฤติกรรมการบวมตัวด้วยเทคนิคการจับภาพ.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความหนาแน่น ความหนืด สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแก๊ส ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว.....	8
2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการเกิดอนุภาคด้วยของไหลเหนือวิกฤต.....	13
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของหยดน้ำและสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิว.....	14
2.4 ค่าอุณหภูมิของ Lennard-Jones ( $\epsilon/k, ^\circ K$ ) และขนาดโมเลกุลของแก๊สต่างๆ ( $\sigma, nm$ ) .....	20
3.1 สภาวะในการดำเนินการในกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS.....	26
3.2 สภาวะในการดำเนินการในกระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS.....	28
4.1 ผลของระยะการพ่นและการพ่นเข้าสู่ท่อผสมผสมของหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว $70^\circ C$ ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar.....	33
4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB.....	62
4.3 ผลการทดสอบการยึดติดระหว่างชั้นยางเหลว PB กับแผ่น PCB ระหว่างไม่เติมสาร DCP และเติมสาร DCP 0.7 phr .....	65
4.4 ผลการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB เวลาในการอบ 30, 60 และ 90 min.....	67
ก.1 ผลการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ .....	80
ค.1 ตัวอย่างผลการคำนวณกราฟความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ $40^\circ C$ .....	88
ง.1 ผลการประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	98
ง.2 ผลการประมาณค่าความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	99
ง.3 ผลการประมาณค่า $Re$ และ $Oh$ ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	99
จ.1 ผลการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ ที่สภาวะเริ่มต้นในภาชนะทนความดันที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว ( $T_0$ ) $85^\circ C$ ความดันก่อนการขยายตัว ( $P_0$ ) 120, 170 และ 200 bar.....	100
ฉ.1 ตัวอย่างข้อมูลผลการทดลองการวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 120 bar อุณหภูมิ $40^\circ C$ .....	101
ช.1 ตัวอย่างข้อมูลประสิทธิภาพการพ่นของระบบสารผสมยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยเทคนิค PGSS ความดัน 100 bar อุณหภูมิ $60^\circ C$ ระยะการพ่น 15 cm.....	104
ช.1 การทดสอบการยึดติดตามวิธีมาตรฐาน ASTM : D 3359 แบบ B.....	106

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวใบบัวที่กำลังขยายต่างๆ (ข) ภาพลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวใบบัวที่แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ยาว (ค) ตัวอย่างวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำที่ยาว.....	2
1.2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยของไหลเหนือวิกฤต.....	3
1.3 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของพื้นผิวสารผสมระหว่าง BNC และ AKD ที่สัดส่วน 5 wt% BNC/AKD (A,B) และ 100 wt% AKD (C).....	3
2.1 (ก) ตัวอย่างแผนผังวิภาคและลักษณะการกระจายตัวโมเลกุลของสารบริสุทธิ์ (ข) ลักษณะการกระจายตัวของของไหลเหนือวิกฤต.....	7
2.2 แผนผังวิภาคและลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ ที่สังเกตได้จากการจับภาพ.....	8
2.3 กระบวนการเกิดผลึก.....	9
2.4 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Rapid Expansion of Supercritical Solutions และผังเส้นทางการดำเนินการของกระบวนการแยกวิภาคระหว่างพอลิเมอร์ และของไหลเหนือวิกฤต.....	10
2.5 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Particles from Gas-Saturated Solutions และผังเส้นทางการดำเนินการของกระบวนการแยกวิภาคระหว่างพอลิเมอร์ และของไหลเหนือวิกฤต.....	11
2.6 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค GAS, SAS, AES, PCA, SEDS และผังเส้นทางการดำเนินการของกระบวนการแยกวิภาคระหว่างพอลิเมอร์ และของไหลเหนือวิกฤต.....	12
2.7 การประมาณความเร็วของการไหล ( $V$ ) ร่วมกับผลของอุณหภูมิ ( $T$ ) และความดัน ( $P$ ).....	13
2.8 ตัวอย่างลักษณะและมุมสัมผัสของหยดน้ำที่สภาวะสมดุล.....	14
2.9 (ก) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวใบบัวที่กำลังขยายต่างๆ (ข) ลักษณะการกลิ้งของหยดน้ำบนใบบัวและการกลิ้งของหยดน้ำ ในการทำความสะอาดสิ่งสกปรก .....	15
2.10 ตัวอย่างลักษณะของพาราฟินแว็กซ์.....	16
2.11 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายของ cis-1,3 บิวทาไดอิน.....	16
2.12 แผนภาพการแพร่ของสารบนพื้นผิวทรงกลม.....	18

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในยางเหลว PB ที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วย S-L EOS.....	22
2.14 ค่าความหนาแน่นของสารผสม CO <sub>2</sub> -ยางเหลว PB ที่ได้จากการทำนายด้วย S-L EOS.....	23
2.15 ค่าความหนืดจากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง Friction Theory.....	24
3.1 แผนภาพจำลองกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	26
3.2 (ก) ชุดเครื่องมือทนความดันสูง (ข) ภาพขณะทนความดันสูงแบบ Visualize Cell.....	27
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 70 °C.....	32
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์ปรับแก้แอนตรกิริยาคู่.....	32
4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโอกำลังขยาย 120 เท่า แสดงลักษณะของพื้นผิว PMMA ในกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70 °C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar.....	35
4.4 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า และลักษณะมุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70 °C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar.....	34
4.5 แบบจำลองกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS.....	35
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับอัตราส่วนการละลายยิ่งยวด.....	37
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับขนาดวิกฤตของนิวเคลียส.....	38
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิกับปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต.....	38
4.9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85 °C ความดันก่อนการขยายตัว (ก) 120 (ข) 150 และ (ค) 170 bar.....	39
4.10 ผลของความดันก่อนการขยายตัวที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11	ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (ก) 40 (ข) 50 (ค) 70 (ง) 75 และ (จ) 85°C.....41
4.12	ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....43
4.13	ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 150 bar (ก) พาราฟินแว็กซ์ (ข) ซอพิทอล/พาราฟินแว็กซ์ 0.3 wt%.....44
4.14	ผลของสารก่อผลึกที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....44
4.15	ความดันและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ.....46
4.16	ความดันและความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ.....48
4.17	ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์.....48
4.18	ความดันที่ปลายหัวฉีดและความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ.....50
4.19	ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 200 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA.....50
4.20	ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า ลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม.....51
4.21	ภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิว PMMA ที่เคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar .....52
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันก่อนการขยายตัว และมุมสัมผัสของหยดน้ำ.....53
4.23	ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 2,000 เท่า ลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว (ก) 120 (ข) 150 และ (ค) 170 bar.....54

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่ระยะฟ้น 1 cm อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150, 170 และ 200 bar.....	55
4.25 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่ออัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาค.....	56
4.26 การกระทบพื้นผิวกลุ่มอนุภาคเนื่องจากผลของความเร็ และผลของแรงตึงผิวของกลุ่มอนุภาค.....	57
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า <i>Re</i> และ <i>Oh</i> (ก) ผลของอุณหภูมิและความดันต่อค่า <i>Re</i> และ <i>Oh</i> (ข) การเปลี่ยนแปลงค่า <i>Oh</i> เมื่อค่า <i>Re</i> คงที่ (ค) การเปลี่ยนแปลงค่า <i>Re</i> เมื่อค่า <i>Oh</i> คงที่.....	58
4.28 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า และ 2,000 เท่า ของพื้นผิว PMMA ที่เคลือบผิวด้วยพาราฟินโดยแว็กซ์และมุมสัมผัสของหยดน้ำที่พ่นด้วยมุมต่างๆ (ก) 90 (ข) 120 (ค) 135 และ (ง) 150°.....	59
4.29 ตัวอย่างการบวมตัวของยางเหลว PB ที่อุณหภูมิ 40°C ความดัน 120 bar.....	60
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับเวลา ที่อุณหภูมิคงที่ 40°C.....	61
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln D$ กับ $1/T$ .....	62
4.32 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการพ่น.....	63
4.33 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการพ่น.....	64
4.34 ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว PCB (ก) แผ่น PCB ก่อนการเคลือบผิว (ข) แผ่น PCB หลังเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB.....	68
ฉ.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\zeta(t) - 1}{\zeta(\infty) - 1} \right] \right\}$ กับเวลา.....	103
ญ.1 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการพ่น.....	108
ญ.2 ภาพขณะพ่นความดันสูง.....	108
ฎ.1 ชุดอุปกรณ์การสังเกตพฤติกรรมการบวมตัวด้วยเทคนิคการจับภาพ.....	109

# สัญลักษณ์

## ตัวอักษร

$A_e$	พื้นที่หน้าตัดที่ปลายหัวฉีด
$A_i$	พื้นที่หน้าตัดการกระจายตัวของอนุภาคที่พื้นผิวตกกระทบ
$c$	ความเร็วเสียง
$C_P$	ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่
$C_V$	ค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่
$D_{\text{Nozzle}}$	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางหัวฉีด
$D_{AB}$	สัมประสิทธิ์การแพร่จาก A ไป B
$D_M$	เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระ
$D_P$	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
$f_i^{\text{wax}}$	ฟลักซ์ตัวของตัวถูกละลายหรือพาราฟินแว็กซ์
$f_i^{\text{vapor}}$	ฟลักซ์ตัวของตัวถูกละลายหรือพาราฟินแว็กซ์ในไอหรือวัฏภาคคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
$J$	อัตราการเกิดนิวเคลียส
$k$	อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
$k_B$	ค่าคงที่ของโบลซ์แมน
$L$	ความสูงของพอลิเมอร์
$L_M$	ระยะพ่นระหว่างปลายหัวฉีดและแผ่นทดสอบ
$Ma_e$	Mach Number ที่ปลายหัวฉีด
$Ma_i$	Mach Number บนพื้นผิวตกกระทบ
$N_0$	ปริมาณนิวเคลียสต่อหน่วยปริมาตร
$N^*$	ปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต
$Oh$	Ohnesorge Number
$P$	ความดันสัมบูรณ์
$P_c$	ความดันวิกฤต
$P_e$	ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด
$P_o$	ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูงหรือความดันก่อนการขยายตัว
$Q_a$	ปริมาณของพอลิเมอร์ที่เคลือบผิวอยู่บนตัวอย่าง
$Q_t$	ปริมาณของพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ใส่เข้าไปในอุปกรณ์
$R$	ค่าคงที่ของแก๊ส
$r^*$	ขนาดวิกฤตของนิวเคลียส
$Re$	Reynolds Number

$S$	อัตราส่วนค่าการละลายที่ภาวะอิมตัวยิ่งยวด
$T$	อุณหภูมิสัมบูรณ์
$T_C$	อุณหภูมิวิกฤต
$T_e$	อุณหภูมิของไหลที่ปลายหัวฉีด
$T_{pe}$	อุณหภูมิก่อนการขยายตัว
$T_0$	อุณหภูมิของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความสูง
$u_e$	ความเร็วของไหลที่ปลายหัวฉีด
$V_m$	ปริมาตรโมลาร์
$v_2^s$	ปริมาตรเชิงโมลของตัวถูกละลาย
$y_i$	ค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในวัฏภาคคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
$y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})$	อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะก่อนการขยายตัว
$y^*(T, P)$	อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะหลังการขยายตัว
$Z$	แฟกเตอร์สภาพอัด
<b>ตัวอักษรกรีก</b>	
$\alpha$	ค่าตัวแปรรูปทรงของปริมาตร
$\beta$	ค่าตัวแปรรูปทรงของพื้นที่
$\rho$	ค่าความหนาแน่นของไหล
$\mu$	ความหนืดของไหล
$\theta$	มุมสัมผัสที่วัดได้จากของเหลวบนของแข็ง
$\gamma$	แรงตึงผิว
$\xi$	องศาของการบวมตัว
$\phi$	สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตี
$\omega$	อะเซนทริกแฟกเตอร์
<b>ตัวห้อย</b>	
$e$	ตำแหน่งปลายหัวฉีด
$i$	ตำแหน่งพื้นผิวตกกระทบ
$P$	ความดันคงที่
$V$	ปริมาตรคงที่
$AB$	ตำแหน่งจาก A ไป B
$M$	การกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระ
$i$	ตัวถูกละลาย
$0$	เริ่มต้น
$a$	บรรยากาศ

<i>c</i>	จุดวิกฤต
<i>pe</i>	ตำแหน่งก่อนการขยายตัวหรือในภาวะหนืดความดันสูง
<i>m</i>	โมลาร์
<i>SL</i>	รอยต่อของภูมิภาคระหว่างของแข็ง-ของเหลว
<i>SV</i>	รอยต่อของภูมิภาคระหว่างของแข็ง-ไอ
<i>LV</i>	รอยต่อของภูมิภาคของเหลว-ไอ

ตัวยก

<i>wax</i>	พาราฟินแว็กซ์
<i>vapor</i>	ไอ



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การเคลือบผิวเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน ป้องกันการสึกหรอ ลดการเสียดสี เพิ่มสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า หรือเพิ่มความสวยงามของพื้นผิว การเลือกใช้วัสดุหรือสารสำหรับนำมาเคลือบผิวขึ้นอยู่กับสมบัติของพื้นผิวที่ต้องการหลังการเคลือบผิว ความเหมาะสมของกระบวนการและความคุ้มค่าในการดำเนินการ กระบวนการเคลือบแบบพ่นละออง (Spray Coating) เป็นการพ่นละอองอนุภาคเคลือบลงบนพื้นผิววัสดุ จุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ สามารถสร้างผิวเคลือบที่มีความบาง และดำเนินการได้กับพื้นผิวที่ยากต่อการเคลือบด้วยวิธีอื่นๆ โดยทั่วไปแว็กซ์และพอลิเมอร์เป็นสารที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเคลือบผิว แต่เนื่องจากสารเหล่านี้เป็นสารที่มีน้ำหนักสูง ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการเคลือบผิว จึงมีการใช้ตัวทำละลายและตัวถูกละลายเพื่อลดความหนืด ตัวถูกละลายและตัวทำละลายที่นิยมใช้ในกระบวนการเคลือบผิวเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีหลีกเลี่ยงการใช้สารประเภทนี้

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [1] เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะเหนือจุดวิกฤตมีสมบัติทั้งเป็นตัวทำละลายและตัวถูกละลายที่ดีในสารประเภทแว็กซ์และพอลิเมอร์ มีจุดวิกฤตต่ำ คือ อุณหภูมิสูงมากกว่าหรือเท่ากับ  $31.0^{\circ}\text{C}$  และความดันสูงมากกว่าหรือเท่ากับ  $73.8\text{ bar}$  เป็นสารที่ไม่ติดไฟ มีราคาถูกและก่อกำเนิดมลภาวะน้อยกว่าสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดังนั้นจึงมีการศึกษาการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาใช้ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยแบบพ่นละอองเพื่อทดแทนการใช้สารอินทรีย์ระเหยง่าย [2] การนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองมีหลายเทคนิคขึ้นอยู่กับพฤติกรรมร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและสารเคลือบผิวนั้น เทคนิคที่ได้รับความนิยมและนำมาประยุกต์ใช้มี 2 เทคนิคที่สำคัญ คือ Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) [2] และ Particles from Gas-Saturated Solutions (PGSS) [3]

เทคนิค RESS [2] เป็นหนึ่งในเทคนิคการผลิตอนุภาคขนาดเล็กเพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละออง มีกลไกสำคัญ คือ สารเคลือบผิวซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีความหนาแน่นมากกว่า (วัฏภาคที่อยู่ด้านล่างของระบบ) จะต้องมีความสามารถในการละลายขึ้นไปยังคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เป็นตัวทำละลายและเป็นวัฏภาคที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า (วัฏภาคที่อยู่ด้านบนของระบบ) เกิดเป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous Solution) อิมพัลส์ที่ความดันสูง สารที่มีความสามารถในการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เช่น แวกซ์และสารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลต่ำอื่นๆ หลังจากนั้นฉีดพ่นสารละลายเนื้อเดียวผ่านรูขนาดเล็กหรือท่อฉีดอย่างรวดเร็วและเกิดการแยกวัฏภาคขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายของสารดังกล่าวในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ลดลง สารเคลือบผิวจะเคลือบอยู่บนพื้นผิวในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์จะแยกวัฏภาคออกสู่สภาวะบรรยากาศ อนุภาคของสารเคลือบผิวจะปกคลุมและเคลือบอยู่บนพื้นผิว ลักษณะสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

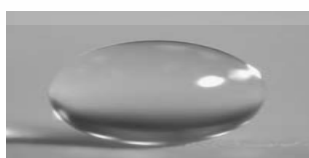
ของเทคนิคนี้ คือ ปลายท่อฉีดจะจุ่มลงไปยังวัฏภาคของสารละลายเนื้อเดียวที่เป็นสารละลายผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและสารเคลือบผิว (วัฏภาคที่อยู่ด้านบนของระบบ)

เทคนิค PGSS มีพื้นฐานมาจากความสามารถในการละลายของของไหลเหนือวิกฤตในสารเคลือบผิว เช่น พอลิเมอร์ นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยมีกลไกสำคัญแตกต่างจากเทคนิค RESS คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะมีพฤติกรรมเป็นตัวถูกละลาย (วัฏภาคที่อยู่ด้านบนของระบบ) โดยเกิดการแพร่และละลายเข้าไปในวัสดุเคลือบผิว (วัฏภาคที่อยู่ด้านล่างของระบบ) ที่ความดันและอุณหภูมิสูงเกิดเป็นสารละลายเนื้อเดียว จากนั้นลดความดันลงอย่างรวดเร็วผ่านท่อฉีดหรือรูขนาดเล็กเกิดการขยายตัว คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายอยู่จะเกิดระเหยในขณะที่สารเคลือบผิวจะเกิดการตกตะกอนเคลือบอยู่บนพื้นผิว ลักษณะสำคัญของเทคนิค PGSS ที่แตกต่างจากเทคนิค RESS คือ ปลายท่อฉีดจะจุ่มลงไปยังวัฏภาคของสารละลายเนื้อเดียวที่เป็นสารละลายผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและสารเคลือบผิว (วัฏภาคที่อยู่ด้านล่างของระบบ)

ปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการเคลือบผิวเพื่อให้พื้นผิวมีสมบัติตามที่ต้องการและใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวเป็นสมบัติพิเศษของพื้นผิวที่นิยมพัฒนา เพื่อป้องกันความชื้นของพื้นผิว การจำแนกความชอบและไม่ชอบน้ำสามารถจำแนกได้จากมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว ดังนี้ Hydrophilic Surfaces เป็นพื้นผิวที่มีสมบัติความชอบน้ำ มีมุมสัมผัสของหยดน้ำน้อยกว่า  $90^\circ$  Hydrophobic Surfaces เป็นพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ มีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่า  $90^\circ$  [4] และ Superhydrophobic Surfaces [5,6] เป็นพื้นผิวที่มีสมบัติพิเศษด้านความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด มีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่า  $150^\circ$  สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดอธิบายได้จากปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนผิวใบบัว (Lotus Effect) ซึ่งมีจุดเด่น คือ การมีสมบัติในการทำ ความสะอาดตัวเอง (Self-Cleaning) ปรากฏการณ์ธรรมชาตินี้เกิดขึ้นจากลักษณะโครงสร้างทาง เรขาคณิตของพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระ (Roughness) คล้ายหนาม มีช่องว่างในระดับ 5-10  $\mu\text{m}$  มี ผลึกคล้ายขี้ผึ้ง (Waxy Crystals) ทำให้แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวกับหยดน้ำมีค่าต่ำ ตัวอย่างของ ลักษณะพื้นผิวใบบัวและสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของพื้นผิวแสดงได้ดังรูปที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1.1 (ก) ภาพขยายกำลังขยายสูงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวใบบัวที่กำลังขยายต่างๆ (i-iii) [5]

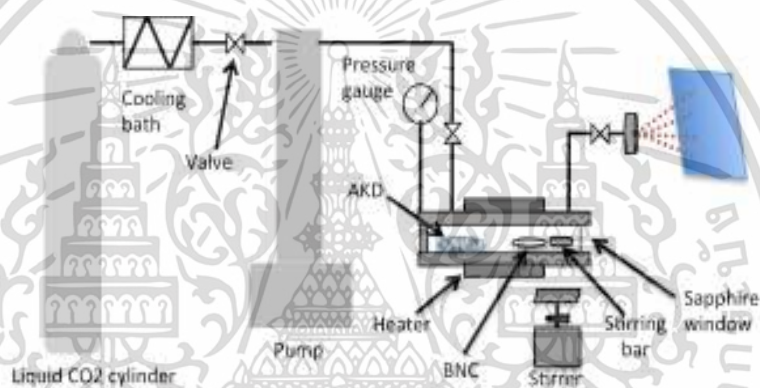
(ข) ภาพลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวใบบัวที่แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด [5]

(ค) ตัวอย่างวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด [7]

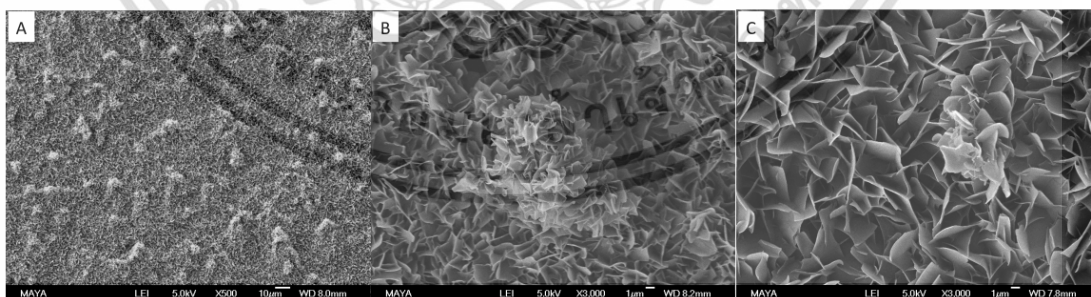
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในชื่อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยสมบัติพิเศษนี้จึงมีการศึกษาวิธีการเคลือบพื้นผิววัสดุให้มีลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวคล้ายใบบัว เพื่อให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด สามารถป้องกันการเปียกชื้นและสิ่งสกปรกบนพื้นผิววัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งสามารถป้องกันชิ้นงานจากความเสียหายต่างๆ ได้

จากงานวิจัยของ Irene Rodriguez-Meizoso และคณะ [6] ได้ทำการศึกษากระบวนการเคลือบผิววัสดุโดยใช้สารละลายผสมระหว่างแวกซ์ คือ อัลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, AKD) และสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพจากธรรมชาติ (Bioactive Natural Compound, BNC) ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตด้วยเทคนิค RESS พบว่า สามารถเตรียมพื้นผิววัสดุหลังการเคลือบที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ ตัวอย่างกระบวนการเคลือบผิวและลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิววัสดุหลังกระบวนการเคลือบผิวแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 ตามลำดับ ปัจจุบันมีการนำสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้บนพื้นผิววัสดุ ได้แก่ บริษัท Pilkington ผู้ผลิตกระจกแผ่นรายใหญ่ของอังกฤษเป็นกระจกทำความสะอาดตัวเองบานแรกของโลก [8] การเคลือบผิวบนเสื้อผ้าเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกจากสิ่งแวดล้อมและง่ายต่อการทำความสะอาด เป็นต้น



รูปที่ 1.2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยของไหลเหนือวิกฤต [6]



รูปที่ 1.3 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของพื้นผิวสารผสมระหว่าง BNC และ AKD ที่สัดส่วน 5 wt% BNC/AKD (A,B) และ 100 wt% AKD (C) [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองเพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาและออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS โดยใช้พาราฟินแวกซ์เป็นสารเคลือบผิว ทั้งนี้เนื่องจากพาราฟินแวกซ์เป็นสารที่นิยมใช้เป็นสารเคลือบผิว รวมทั้งมีความสามารถในการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ทำการเคลือบผิวบนแผ่น PMMA ซึ่งเป็นพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ เพื่อเตรียมพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ

ส่วนที่ 2 ศึกษาและออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค PGSS เพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวแผ่นวงจรพิมพ์หรือ PCB โดยใช้ยางเหลว PB เป็นสารเคลือบผิว ทั้งนี้เนื่องจากยางเหลว PB เป็นสารที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำและมีพันธะคู่สามารถเกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลได้ ส่งผลให้มีความสามารถในการยึดติดพื้นผิวได้ดี แต่เนื่องจากยางเหลว PB เป็นสารอินทรีย์ที่มีความหนืดสูงจึงก่อให้เกิดปัญหาที่สำคัญในการฉีดพ่น การออกแบบกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมการแพร่และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ซึ่งส่งผลต่อการลดความหนืดของยางเหลว PB งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมการแพร่และละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB โดยสังเกตจากสังเกตจากพฤติกรรมการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากการแพร่และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตด้วยเทคนิคการจับภาพด้วยกล้องวิดีโอ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบและกำหนดระยะเวลาในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองยางเหลว PB ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อประสิทธิภาพการพ่นของกระบวนการเคลือบผิว นอกจากนี้ทำการศึกษาผลของการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลต่อการยึดติดของแผ่นฟิล์มยางเหลว PB บนพื้นผิวแผ่น PCB และศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวหลังการเคลือบผิว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแวกซ์บนแผ่น PMMA โดยเทคนิค RESS
2. ออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแวกซ์โดยเทคนิค RESS ในระดับห้องทดลอง
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB โดยเทคนิคการจับภาพด้วยกล้องวิดีโอและประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB
3. เพื่อศึกษาและออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS บนแผ่น PCB
4. สามารถเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA และ PCB รวมทั้งเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ยาวอดหลังการเคลือบผิวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยแบบพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์โดยใช้เทคนิค RESS ที่ระยะการพ่น 1, 10 และ 15 cm อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 40, 50, 70, 75 และ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar สัดส่วนระหว่างซอพิทอลต่อพาราฟินแว็กซ์ 0.3 wt% มุมของการพ่น 90, 120, 135 และ 150° ปริมาณพาราฟินแว็กซ์ 0.25 g หัวฉีดขนาด 1.58 mm
2. ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB และประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตของยางเหลว PB ด้วยเทคนิคการจับภาพด้วยกล้องวิดีโอ ที่อุณหภูมิภายในภาชนะทนความดันสูง 40, 50 และ 60°C ความดัน 80, 100 และ 120 bar
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาในการดำเนินการต่อประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดคงที่ของกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองยางเหลว PB ด้วยเทคนิค PGSS
4. ศึกษาผลของการใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumylperoxide, DCP) 0.7 phr เป็นสารเชื่อมโยงโมเลกุลต่อสมบัติการยึดติดพื้นผิวของยางเหลว PB บนแผ่น PCB
5. ศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวแผ่น PCB หลังการเคลือบผิวแบบพ่นละอองยางเหลว PB โดยใช้เทคนิค PGSS

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยใช้เทคนิค RESS และ PGSS ในระดับห้องทดลองและเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการเคลือบผิว (Coating Processes) [9]

กระบวนการเคลือบผิวเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน ป้องกันการสึกหรอ ลดการเสียดสี เพิ่มคุณสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า งานที่ต้องการความสวยงาม และเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว เป็นต้น กระบวนการเคลือบผิวมีหลายกระบวนการดังนี้

#### 2.1.1 การทาสีหรือทาเคลือบผิว (Painting)

การทาสีหรือทาเคลือบผิวเป็นกระบวนการเคลือบผิวอย่างง่าย โดยการเคลือบผิวกระบวนการนี้มีลักษณะสำคัญ คือ สารเคลือบผิวจะถูกพาด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แปรงทาสี ลูกกลิ้งทาสี ฯลฯ ทาเคลือบบนพื้นผิว วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวที่มีพื้นที่ของการเคลือบบริเวณกว้าง โดยพื้นผิวหลังการเคลือบผิวจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากชั้นของสารเคลือบผิว กระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับพื้นผิวที่ความหนาของชั้นเคลือบผิวไม่ส่งผลต่อสมบัติที่สำคัญของพื้นผิว

#### 2.1.2 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Coating)

การเคลือบผิวด้วยวิธีการนี้เป็นการนำเอาหลักความแตกต่างของประจุไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการใน การยึดเกาะของสารเคลือบผิวกับพื้นผิว วิธีการนี้เป็นวิธีการที่สามารถสร้างชั้นของสารเคลือบผิวที่มี ชั้นของสารเคลือบที่มีความหนาน้อย แต่มีความซับซ้อนในการจัดตั้งระบบและมีค่าใช้จ่ายในการ ดำเนินการสูงจึงไม่ได้รับความนิยมใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป

#### 2.1.3 การเคลือบผิวแบบจุ่ม (Dip Coating)

การเคลือบผิวแบบจุ่มเป็นการเคลือบผิวพื้นฐานที่ใช้มานานและมีขั้นตอนการเคลือบไม่ซับซ้อน โดยมีหลักการ คือ การนำวัสดุที่ต้องการเคลือบผิวจุ่มลงในสารเคลือบผิว นิยมใช้เคลือบผิววัสดุขนาดเล็กที่ง่ายต่อการจุ่มเคลือบ วิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ ความหนาของชั้นเคลือบผิวหลังการเคลือบผิวมี ความหนามากและควบคุมความหนาได้ยาก

#### 2.1.4 การเคลือบผิวแบบพ่นละออง (Spray Coating)

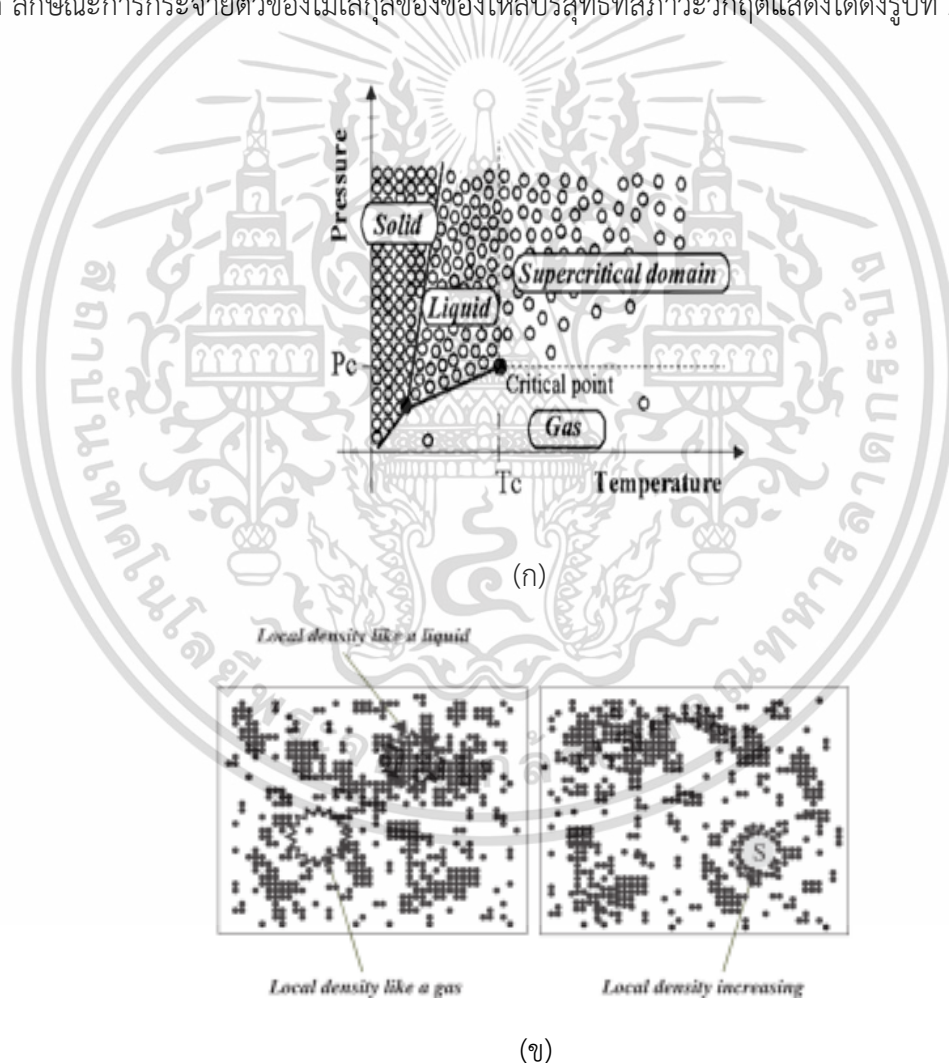
กระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองเป็นเทคนิคการเคลือบผิวที่มีลักษณะสำคัญ คือ การผลิต ละอองอนุภาค (Atomization) ของสารเคลือบผิวเคลือบบนพื้นผิว จุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ สามารถสร้างแผ่นฟิล์มบางของสารเคลือบผิว ใช้สารเคลือบผิวในปริมาณน้อย และสามารถเคลือบผิว ได้ในบริเวณที่ยากต่อการเคลือบผิว ปัจจุบันมีการพัฒนาการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมา ประยุกต์ใช้เพื่อเป็นตัวทำละลาย ตัวถูกละลาย และตัวพาสารเคลือบผิวในกระบวนการเคลือบผิวแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลักซ์ การคำนวณการเคลื่อนที่แบบฟลักซ์สามารถสร้างพื้นผิวที่มีชั้นความหนาของสารเคลือบในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร

## 2.2 ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluids) [10]

ของไหลเหนือวิกฤตเป็นของไหลที่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature,  $T_c$ ) และความดันมากกว่าความดันวิกฤต (Critical Pressure,  $P_c$ ) ลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลของของไหลบริสุทธิ์ในสถานะของแข็ง ของเหลว แก๊ส และของไหลเหนือวิกฤต พบว่าระยะห่างระหว่างโมเลกุลจะมีค่าน้อยไปหามากดังนี้ แก๊ส > ของไหลเหนือวิกฤต > ของเหลว > ของแข็ง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) ที่จุดวิกฤตความหนาแน่นของของเหลวจะมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของแก๊ส และจะไม่สามารถสังเกตเห็นรอยต่อของวัฏภาคระหว่างแก๊สและของเหลวได้ ลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลของของไหลบริสุทธิ์ที่สภาวะวิกฤตแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 (ก) ตัวอย่างแผนผังวัฏภาคและลักษณะการกระจายตัวโมเลกุลของสารบริสุทธิ์ [10]

(ข) ลักษณะการกระจายตัวของของไหลเหนือวิกฤต [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

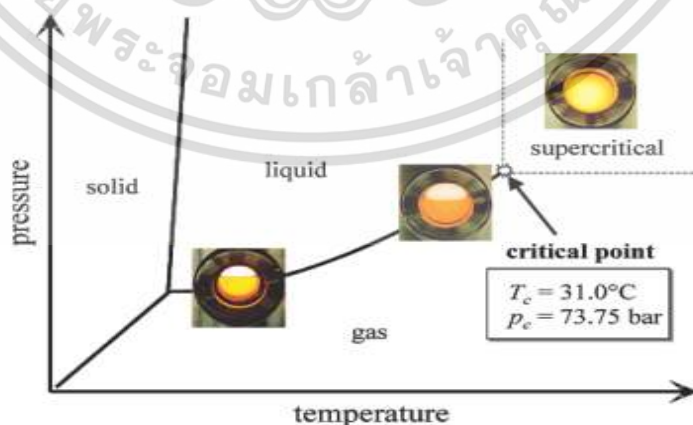
สมบัติของของไหลเหนือวิกฤตแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 พบว่าของไหลเหนือวิกฤตจะมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สและของเหลว โดยมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลว มีความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ใกล้เคียงกับแก๊ส

ตารางที่ 2.1 ความหนาแน่น ความหนืด สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแก๊ส ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว [1]

วัฏภาค	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	ความหนืด( $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )
แก๊ส	1	10	1-10
ของไหลเหนือวิกฤต	100-1,000	50-100	0.01-0.1
ของเหลว	1,000	500-1,000	0.001

### 2.2.1 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide) [11]

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะเหนือวิกฤต เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมไม่ติดไฟมีราคาถูก และจุดวิกฤตต่ำคือ มีอุณหภูมิวิกฤต  $31.0^\circ\text{C}$  และความดันวิกฤต  $73.8\text{ bar}$  และมีสมบัติเป็นทั้งตัวถูกละลายและตัวทำละลายที่ดีในสารอินทรีย์จึงมีการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น กระบวนการเคลือบผิว กระบวนการทำความสะอาด และการเร่งการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 พบว่าลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤต โดยเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์อยู่สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตที่สมดุลระหว่างสถานะของเหลวและแก๊สจะสังเกตเห็นลักษณะของวัฏภาคแบ่งออกเป็นสองชั้นอย่างชัดเจน ด้านบนแสดงวัฏภาคของแก๊ส ด้านล่างจะแสดงวัฏภาคของของเหลว และเมื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤตและสภาวะเหนือวิกฤตจะไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างวัฏภาคของแก๊สและของเหลวได้



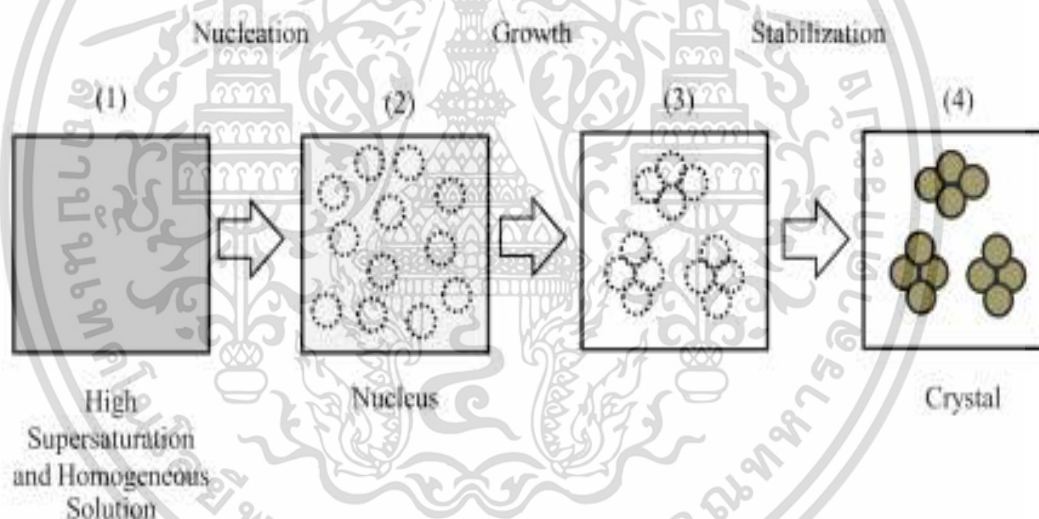
รูปที่ 2.2 แผนผังวัฏภาคและลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ ที่สังเกตได้จากการจับภาพ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 กระบวนการเกิดผลึก [13,14]

กระบวนการเกิดผลึกหรืออนุภาคโดยทั่วไปมี 4 ขั้นตอน คือ

1. การละลายเป็นสารละลายเนื้อเดียว ระหว่างวิวัฒนาการของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย ในลักษณะนี้สารทั้งสองจะเกิดการละลายกันจนถึงจุดอิ่มตัวหรือมากกว่าจุดอิ่มตัว
2. การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เมื่อרבวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลายเนื้อเดียวเกิดการแยกวิวัฒนาการของตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นนิวเคลียสของตัวถูกละลายขึ้น
3. การเจริญเติบโตของนิวเคลียส (Growth) หลังจากเกิดนิวเคลียสของตัวถูกละลายแล้ว นิวเคลียสจะเกิดการรวมตัวกันในขั้นตอนนี้ เกิดเป็นโครงสร้างของผลึกขึ้นดังในรูปที่ 2.3
4. การคงสภาพของผลึก (Stabilization) ผลึกจะหยุดการเจริญเติบโตเองการหยุดการเจริญเติบโตเนื่องจากไม่มีแรงขับในการเจริญเติบโตของเซลล์ เช่น อุณหภูมิและความดัน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดผลึก

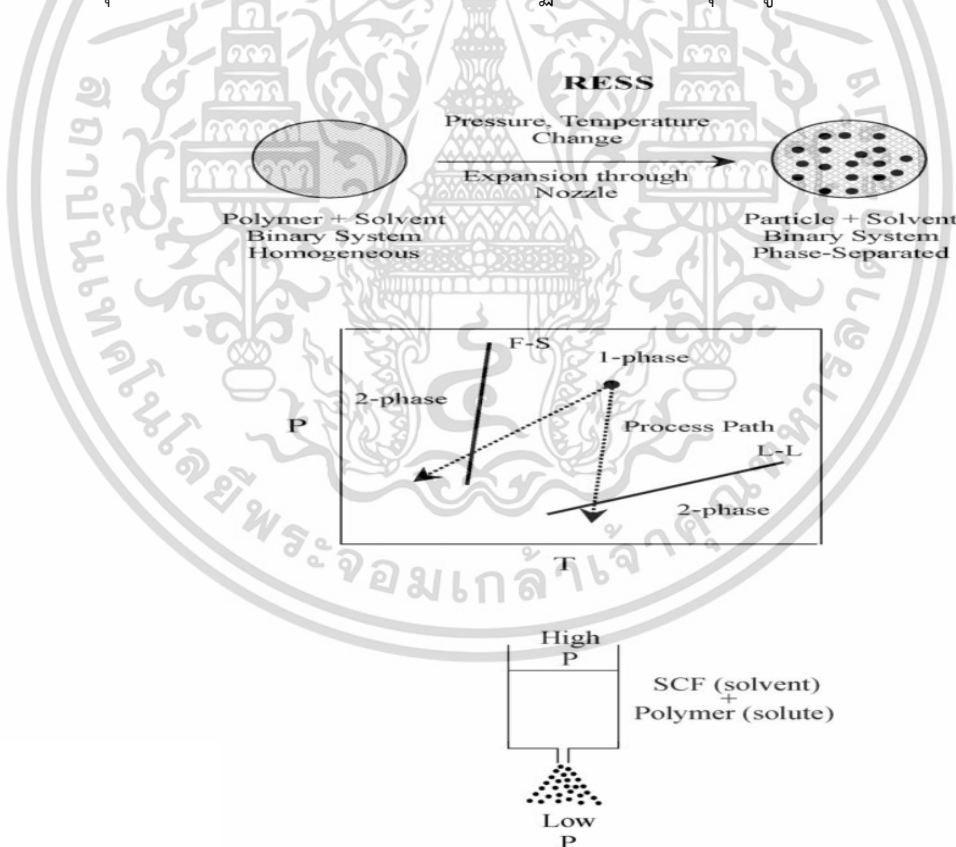
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การเกิดอนุภาคด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [3]

การเกิดของอนุภาค (Particle Formation) ด้วยของไหลเหนือวิกฤตเป็นเทคโนโลยีที่สามารถผลิตอนุภาคขนาดเล็กโดยอาศัยหลักการแยกวัฏภาค (Phase Separation) ของสารละลาย ตัวอย่างกระบวนการเกิดอนุภาคด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีดังนี้ [3]

### 2.4.1 Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS)

เทคนิคในการเกิดของอนุภาคของกระบวนการนี้จะใช้กับสารหรือพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการละลายในของไหลเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิและความดันสูง หลังจากนั้นลดความดันหรืออุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วผ่านท่อหรือรูขนาดเล็ก ทำให้ความสามารถในการละลายของวัสดุนั้นลดลงเกิดการแยกวัฏภาคเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ตัวอย่างกระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยของไหลเหนือวิกฤตโดยใช้เทคนิค RESS และผังเส้นทางของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์และของไหลเหนือวิกฤตแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 โดยสารละลายระหว่างพอลิเมอร์และของไหลเหนือวิกฤตที่มีลักษณะเป็นวัฏภาคเนื้อเดียว (Homogeneous Phase) เกิดการแยกวัฏภาคเมื่อเมื่อลดอุณหภูมิและความดันผ่านเส้นสมดุลการละลาย (F-S) และ (L-L) เป็น 2 วัฏภาคที่สภาวะอุณหภูมิต่างกันต่ำ

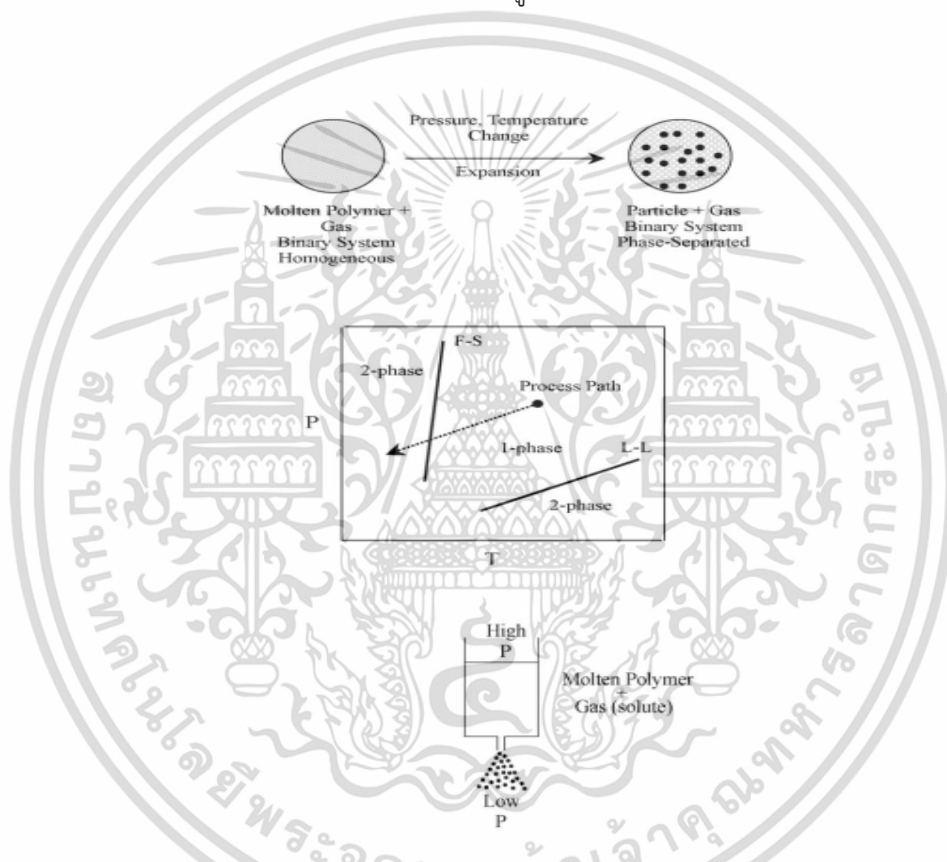


รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Rapid Expansion of Supercritical Solutions และผังเส้นทางดำเนินการของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์และของไหลเหนือวิกฤต [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 Particles from Gas-Saturated Solutions (PGSS)

การเกิดอนุภาคด้วยเทคนิค PGSS มีพื้นฐานมาจากความสามารถในการละลายของของไหลเหนือวิกฤตในสารต่างๆ เทคนิคนี้เหมาะกับการใช้งานในกรณีที่ของไหลเหนือวิกฤตเป็นตัวถูกละลาย กลไกในการเกิดอนุภาคเริ่มจากของไหลเหนือวิกฤตเกิดการแพร่และละลายเข้าไปในสารเคลือบผิวหรือพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิและความดันสูง ลดความดันลงอย่างรวดเร็วผ่านท่อหรือหัวฉีดและเกิดการขยายตัว รวมทั้งอุณหภูมิที่ลดลงตามหลักการของจูล-ทอมสัน ของไหลเหนือวิกฤตที่ละลายอยู่ในสารละลายจะระเหยกลายเป็นไอออกไป เกิดการตกตะกอนของสารละลายหรือสารเคลือบผิวกลายเป็นละอองอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยในระดับไมโครเมตรแสดง ดังรูปที่ 2.5 ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถใช้กับสารที่มีความหนืดสูงได้



รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Particles from Gas-Saturated Solutions และผังเส้นทางการดำเนินการของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์และของไหลเหนือวิกฤต [3]

## 2.4.3 Gas Anti-Solvent Process (GAS)

เทคนิคนี้เป็นกระบวนการตกตะกอนซ้ำ (Recrystallize) ของสารประกอบของแข็งที่ไม่ละลายในของไหลเหนือวิกฤต นิยมใช้กับสารประเภทพอลิเมอร์เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไม่ละลายในของไหลเหนือวิกฤตหรือแก๊ส โดยขั้นตอนเริ่มจากพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ จากนั้นของไหลเหนือวิกฤตหรือแก๊สจะทำหน้าที่เป็นตัวดำเนินการละลาย (Anti-Solvent) ของพอลิเมอร์ เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

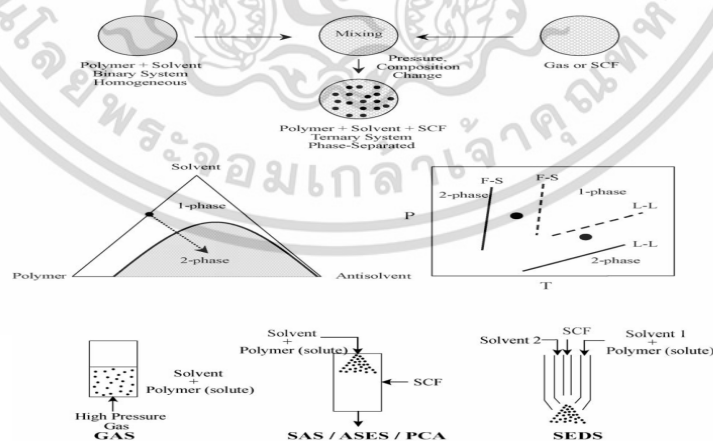
ตกตะกอนของอนุภาคพอลิเมอร์เมื่อความเข้มข้นและความดันของของไหลเหนือวิกฤตในสารละลายเพิ่มมากขึ้น

#### 2.4.4 Supercritical Anti-Solvent Process (SAS)

เทคนิคนี้ใช้ในกระบวนการสกัดแบบ Aerosol Solvent (Aerosol Solvent Extraction System, ASES) หรือกระบวนการตกตะกอนด้วยการกดอัดตัวต้านการละลาย (Compressed Anti-Solvent, PCA) เทคนิคนี้ใช้ของไหลเหนือวิกฤตเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวต้านการละลาย (Anti-Solvent) เช่นเดียวกับเทคนิค GAS มีข้อแตกต่าง คือ กลไกการสัมผัสระหว่างของไหลเหนือวิกฤตกับสารหรือพอลิเมอร์ที่ละลายในตัวทำละลายของเหลว จากนั้นพ่นสารละลายเป็นละอองเข้าไปในภาชนะที่มีของไหลเหนือวิกฤตทำหน้าที่เป็นตัวต้านการละลายไหลอยู่ ผลจากการสัมผัสกันอย่างรวดเร็วระหว่างสารสองชนิดทำให้เกิดการละลายอ้อมตัวยิ่งยวดของสารละลายสูง และเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาค ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการแบบต่อเนื่องได้ ซึ่งมีความสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

#### 2.4.5 Solution Enhanced Dispersion by Supercritical Fluid (SEDS)

เทคนิคนี้ปรับปรุงมาจากเทคนิค SAS คือ การนำสารละลายของเหลวและของไหลเหนือวิกฤตพ่นละอองไปพร้อมกัน โดยใช้หัวฉีดที่ออกแบบเป็นพิเศษแบบสองช่องทางหรือสามช่องทางสำหรับใช้ตกตะกอนสารองค์ประกอบหนึ่งหรือสองชนิด กระบวนการนี้มีจุดประสงค์ในการใช้ของไหลเหนือวิกฤตในหลายรูปแบบ คือ เป็นตัวต้านการละลายและเป็นตัวกลางให้เกิดการกระจายตัว (Dispersion Medium) การสัมผัสกันของสารละลายและของไหลเหนือวิกฤตที่ความเร็วสูงทำให้เกิดเป็นอนุภาคขึ้น กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค GAS, SAS, AES, PCA และ SEDS ผังเส้นทางการดำเนินการแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และสามารถสรุปลักษณะสำคัญของการเกิดอนุภาคด้วยเทคนิคต่างๆ ดังตารางที่ 2.2



**รูปที่ 2.6** กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค GAS, SAS, AES, PCA, SEDS และผังเส้นทางการดำเนินการของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์และของไหลเหนือวิกฤต [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการเกิดอนุภาคด้วยของไหลเหนือวิกฤต [3]

เทคนิค	หน้าที่ของของไหลเหนือวิกฤต	หน้าที่ของตัวทำละลายอินทรีย์	การแยกวัฏภาค
RESS	ตัวทำละลาย	ตัวทำละลายร่วม	ผลของความดันและอุณหภูมิ
PGSS	ตัวถูกละลาย	-	ผลของความดันอุณหภูมิและตัวทำละลาย
GAS	ตัวต้านการละลาย	ตัวทำละลาย	ผลของตัวทำละลาย
SAS	ตัวต้านการละลาย	ตัวทำละลาย	ผลของตัวทำละลาย
SEDS	ตัวต้านการละลาย	ตัวทำละลาย	ผลของตัวทำละลาย

## 2.5 การไหลของของไหลผ่านหัวฉีด เดอ ลาวาล (De Laval Nozzle) [17,18]

การไหลของของไหลผ่านหัวฉีดขนาดเล็กอธิบายโดยหลักการของ เดอ ลาวาล สามารถจำแนกการไหลโดยอาศัยคุณสมบัติที่ต่างกันของความเร็วในการไหลดังนี้ แก๊สที่ความเร็วใต้เสียง (Subsonic) มีความเร็วเท่าเสียง (Sonic) และความเร็วเหนือเสียง (Supersonic) ซึ่งจำแนกได้จากค่า Mach Number ซึ่งแสดงอัตราส่วนของค่าความเร็วของการไหล ( $V$ ) ที่ความเร็วของเสียง ( $c$ ) การไหลของแก๊สผ่านหัวฉีด เดอ ลาวาล แสดงความสัมพันธ์ของการไหลของความเร็ว อุณหภูมิและความดัน แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การประมาณความเร็วของการไหล ( $V$ ) ร่วมกับผลของอุณหภูมิ ( $T$ ) และความดัน ( $P$ ) [17,18]

โดย  $M < 1$  คือ การไหลที่ความเร็วใต้เสียง

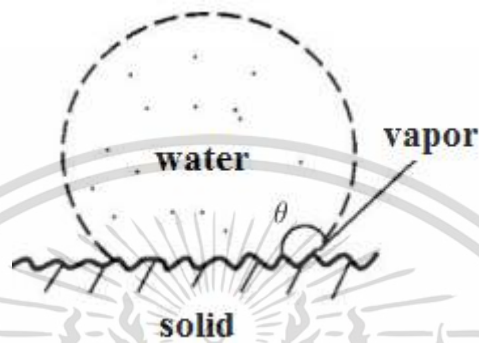
$M = 1$  คือ การไหลที่ความเร็วเสียง

$M > 1$  คือ การไหลที่ความเร็วเหนือเสียง

การไหลของแก๊สผ่านหัวฉีด เดอ ลาวาล เป็นแบบ Isentropic และความเร็วใต้เสียง แก๊สมีลักษณะอัดตัวได้และมีการเปลี่ยนแปลงความดันเกิดขึ้นที่คอหรือจุดปลายของหัวฉีด (Throat) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด ความเร็วของแก๊สจะกลายเป็นความเร็วเสียง เมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นหลังผ่านหัวฉีดแก๊สจะยังคงขยายตัวทำให้ความเร็วการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นกลายเป็นความเร็วเหนือเสียง การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว (Hydrophobicity of Surfaces)

สมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของพื้นผิววัสดุสามารถอธิบายได้จากแรงกระทำของหยดน้ำที่กระจายบนพื้นผิว [18] หรือวัดจากมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Water Contact Angle) ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าแรงตึงผิวระหว่างพื้นผิวสัมผัส ดังนี้



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างลักษณะและมุมสัมผัสของหยดน้ำที่สภาวะสมดุล [19]

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2-1)$$

โดย  $\theta$  คือ ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของของเหลวบนของแข็ง (-)

$\gamma_{SV}$  คือ ค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ไอ (N/m)

$\gamma_{SL}$  คือ ค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว (N/m)

$\gamma_{LV}$  คือ แรงตึงผิวของของเหลว (N/m)

การจำแนกสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิวจากมุมสัมผัสของหยดน้ำ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของหยดน้ำและสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิว

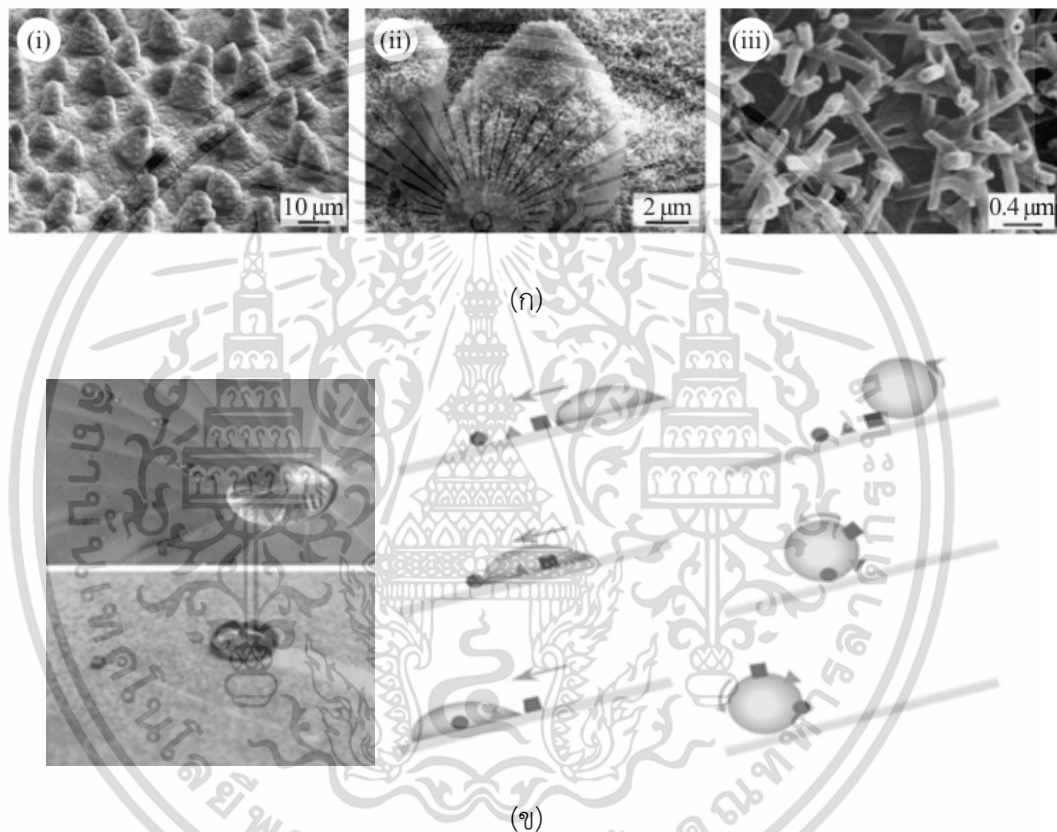
มุมสัมผัสของหยดน้ำ ( $\theta$ )	สมบัติความชอบน้ำของพื้นผิว
น้อยกว่า $90^\circ$	พื้นผิวแสดงสมบัติความชอบน้ำ
มากกว่า $90^\circ$	พื้นผิวแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำ
มากกว่า $150^\circ$	พื้นผิวแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด

สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวขึ้นกับสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ สมบัติทางกายภาพของพื้นผิวซึ่งขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวที่ส่งผลต่อแรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว และสมบัติทางเคมีซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันภายในสารเคมีของพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 ปรากฏการณ์บนพื้นผิวใบบัว (Lotus Leaf Effect) [5-6, 19]

สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด [8] ของพื้นผิวอธิบายได้จากปรากฏการณ์หยดน้ำกลิ้งบนผิวใบบัวซึ่งมีจุดเด่น คือ มีสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง ปรากฏการณ์ธรรมชาตินี้เกิดขึ้นจากลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ คล้ายหนาม มีช่องว่างในระดับ 5-10  $\mu\text{m}$  มีผลึกคล้ายขี้ผึ้ง ทำให้แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวกับหยดน้ำมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัวและสมบัติการทำความสะอาดตัวเองจะอาศัยแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของหยดน้ำกับสิ่งสกปรกเกิดกระบวนการทำความสะอาดขึ้นดังแสดงในดังรูปที่ 2.9 (ข)



รูปที่ 2.9 (ก) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวใบบัวที่กำลังขยายต่างๆ (i-iii) [5]  
 (ข) ลักษณะการกลิ้งของหยดน้ำบนใบบัวและการกลิ้งของหยดน้ำในการทำความสะอาดสิ่งสกปรก [19]

## 2.7 พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax) [9,20]

แว็กซ์เป็นสารหรือวัสดุทางเคมีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องสำอาง สารหล่อลื่น ใช้เป็นวัสดุขัดเงาและเคลือบผิว เป็นต้น

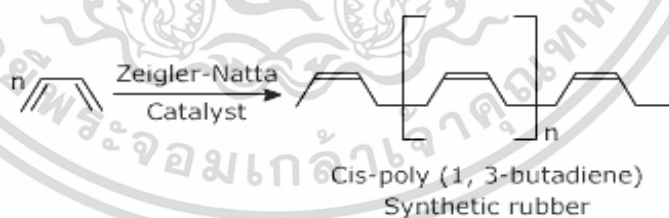
พาราฟินแว็กซ์เป็นแว็กซ์ที่สกัดหรือแยกได้จากน้ำมันปิโตรเลียม ปริมาณและชนิดของแว็กซ์จะขึ้นกับแหล่งกำเนิดของน้ำมันปิโตรเลียม สมบัติต่างๆ ของแว็กซ์จะขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์อะตอมในโมเลกุลของแว็กซ์ ตัวอย่างพาราฟินแว็กซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างลักษณะของพาราฟินแว็กซ์

## 2.8 ยางบิวทาไดอีน (Polybutadiene, PB) [21,22]

ยางบิวทาไดอีนหรือยาง PB เป็นพอลิเมอร์ประเภทยางสังเคราะห์ โดยทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมากกว่า  $100,000 \text{ g.mol}^{-1}$  และมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่อิมิตัวและมีการจัดเชื่อมต่อกันหลายแบบ เช่น แบบ cis-1,4, แบบ tran-1,4, แบบ vinyl-1,2 หรือแบบ cis-1,3 ขึ้นอยู่กับชนิดของสารริเริ่ม (Initiator) ที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ยาง PB ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution Polymerization) แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายของ cis-1,3 บิวทาไดอีน

ยาง PB มีสมบัติเด่นในด้านความไม่ชอบน้ำทำให้ยาง PB มีความสามารถในการป้องกันความชื้นได้ดี มีความทนทานต่อการขีดสี มีความยืดหยุ่นสูง และมีสมบัติการกระด้างกระดอน (Rebound Resilience) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับยางชนิดอื่น แต่มีความทนต่อแรงดึงต่ำ จึงมักผสมยางชนิดนี้กับยางธรรมชาติ (Natural Rubber) หรือยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene Butadiene Rubber หรือยาง SBR) เพื่อให้ยางคงรูปและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยาง PB มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) ประมาณ  $-90^{\circ}\text{C}$  และมีสมบัติการหักงอที่

อุณหภูมิต่ำดีมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1 ยางเหลว PB (Liquid Butadiene Rubber, LPB)

ยางเหลว PB เป็นยาง PB ที่มีมวลโมเลกุลเฉลี่ยในช่วง 500-10,000 g.mol<sup>-1</sup> และความหนืดประมาณ 50-50,000 cps ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นยางที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์และกระบวนการลดน้ำหนักโมเลกุลเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติของยาง PB ที่ปกติมีลักษณะเป็นของแข็งเพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้านมากขึ้น

## 2.9 การแพร่ของสาร [23]

กลไกสำคัญของการเกิดอนุภาคด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยใช้เทคนิค RESS และ PGSS นั้น คือ การแพร่ของสารเกิดอนุภาคและคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่แสดงถึงลักษณะเฉพาะของทั้งสองเทคนิค เทคนิค RESS เป็นเทคนิคที่มีกลไกที่สำคัญ คือ สารเกิดอนุภาคมีความสามารถในการแพร่และละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ส่วนเทคนิค PGSS เป็นเทคนิคที่มีกลไกสำคัญ คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความสามารถในการแพร่และละลายเข้าไปยังสารที่ต้องการผลิตอนุภาค ดังนั้นการศึกษากลไกหรือทิศทางของการแพร่ของสารจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบการทดลองและศึกษากระบวนการ

### 2.9.1 การแพร่ของสารไปยังวัฏภาคของไหลเหนือวิกฤต

การแพร่ คือ การกระจายตัวของโมเลกุลของสารจากจุดหรือบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังจุดที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าด้วยการเคลื่อนที่เชิงสุ่มของโมเลกุล การแพร่จะทำให้เกิดการผสมของสารอย่างช้า การแพร่ก็ยังคงเกิดขึ้นแม้ว่าจะสารจะผสมกันโดยสมบูรณ์หรือเข้าสู่ภาวะสมดุล

การแพร่ของโมเลกุลโดยทั่วไปเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) [23] ดังสมการที่ 2-2

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C \quad (2-2)$$

โดย  $C$  คือ ความเข้มข้น (mol/dm<sup>3</sup>)

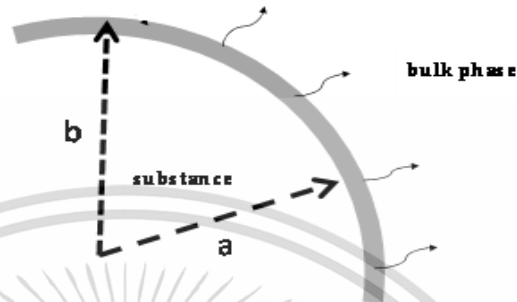
$t$  คือ เวลา (s)

$D_{AB}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จาก A ไป B (m<sup>2</sup>/s)

จากสมการที่ 2-2 พบว่า พจน์ด้านซ้ายแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อเวลา และพจน์ด้านขวาแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่แนวแกนใดๆของระบบ โดยมี  $D_{AB}$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงอัตราการแพร่ของสารผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ค่า  $D_{AB}$  จะขึ้นกับอุณหภูมิและความดันของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะต้องพิจารณาลักษณะของพื้นผิวของการแพร่ว่ามีลักษณะเป็นแบบระนาบ ทรงกระบอก หรือทรงกลม ตัวอย่างการแพร่ของสารบนพื้นผิว ทรงกลมแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 [23]



รูปที่ 2.12 แผนภาพการแพร่ของสารบนพื้นผิวทรงกลม

โดยสามารถเขียนการแพร่ผ่านทรงกลมกลางได้ดังสมการที่ 2-3 [23]

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2(a^2 + ab + b^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{b \cos n\pi - a}{n} \right)^2 \exp\{-D_{AB} n^2 t / (b-a)^2\} \quad (2-3)$$

จากสมการที่ 2-3 สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สภาวะดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมาณระยะเวลาในกระบวนการต่างๆ ได้

### 2.9.2 การบวมตัวของพอลิเมอร์เนื่องจากการแพร่และการละลายของของไหลเหนือวิกฤต

การศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์ [24] เนื่องจากการแพร่และการละลายของของไหลเหนือวิกฤตแสดงได้ในรูปองศาการบวมตัว (Swelling Factor) ที่สัมพันธ์กับเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 2-4

$$\xi(t) = \frac{V_0 + \Delta V(t)}{V_0} = \frac{L_0 + \Delta L(t)}{L_0} \quad (2-4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างองค์การบวมตัวและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แสดงได้ดังสมการที่ 2-5

$$\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1} \right] \right\} = \frac{-D_{AB}\pi^2 t}{4L^2} \quad (2-5)$$

- โดย  $\xi(t)$  คือ องค์การบวมตัวที่เวลาใดๆ (-)  
 $\xi(\infty)$  คือ องค์การบวมตัวที่สมดุล (-)  
 $D_{AB}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จาก A ไป B ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 $V$  คือ ปริมาตรของพอลิเมอร์ (ml)  
 $L$  คือ ความสูงของพอลิเมอร์ (cm)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สและของไหลเหนือวิกฤตในพอลิเมอร์อย่างง่าย [25] อธิบายได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสดังสมการที่ 2-6 และ 2-7 ตามลำดับ

$$D_{AB} = D_0 \exp \left( -\frac{E_D}{R T} \right) \quad (2-6)$$

$$\log D_0 = \frac{E_D \times 10^{-3}}{R} - 4 \pm 0.4 \quad (2-7)$$

- โดย  $D_{AB}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จาก A ไป B ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 $D_0$  คือ ค่าพรีเอกซ์โพเนนเชียลแฟกเตอร์ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 $E_D$  คือ ค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ ( $\text{kJ/mol}$ )  
 $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ( $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ )  
 $T$  คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)

ค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ของแก๊สในพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพคล้ายยางสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2-8 และขนาดโมเลกุลของแก๊สแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 ตามลำดับ

$$10^{-3} \frac{E_D}{R} = \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_{N_2}} \right)^2 \left[ 7.5 - 2.5 \times 10^{-4} (298 - T_g)^2 \right] \pm 0.6 \quad (2-8)$$

- โดย  $\sigma_x$  คือ ขนาดของโมเลกุลแก๊ส (nm)  
 $T_g$  คือ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่าอุณหภูมิของ Lennerd-Jones ( $\epsilon/k, ^\circ K$ ) และขนาดโมเลกุลของแก๊สต่างๆ ( $\sigma, nm$ ) [25]

Gas	( $\epsilon/k, ^\circ K$ )	( $\sigma, nm$ )
He	10.22	25.51
Air	78.6	37.11
N <sub>2</sub>	71.4	37.98
O <sub>2</sub>	106.7	34.67
H <sub>2</sub>	59.7	28.27
CO <sub>2</sub>	195.2	39.41
CO	91.7	36.90
Ar	93.3	35.42
CCl <sub>4</sub>	322.7	59.47
CH <sub>4</sub>	148.6	37.58

### 2.9.3 สมดุลของการดูดซับ [26]

Crank และ Park (1968) ได้ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ (Sorption) และการคายซับ (Desorption) ของแก๊สและไอ (Vapors) เข้าไปในพอลิเมอร์ และนำเสนอปริมาณของแก๊สที่ละลายในพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ ที่อยู่ในฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การแพร่แสดงได้ดังสมการที่ 2-9

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{L_0} \left[ \frac{D_{AB} t}{\pi} \right]^{1/2} = 0.99 \quad (2-9)$$

โดย  $M_t$  คือ ปริมาณแก๊สทั้งหมดที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (g)  
 $M_\infty$  คือ ปริมาณแก๊สทั้งหมดที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (g)  
 $L_0$  คือ ความหนาของพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น (mm)  
 $t$  คือ เวลาในการแพร่ของแก๊ส (s)

จากสมการที่ 2-6, 2-8 และ 2-9 สามารถนำไปคำนวณหาเวลาในการแพร่ของแก๊สในพอลิเมอร์จนเข้าสู่สภาวะสมดุลได้

## 2.10 ประสิทธิภาพการพ่น (Transfer Efficiency) [27]

ประสิทธิภาพการพ่นเป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนของปริมาณของพอลิเมอร์ที่เคลือบบนผิวตัวอย่างต่อปริมาณของพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ใส่ในอุปกรณ์หรือภาชนะทนความดันก่อนการฉีดพ่น มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2-10

$$\text{ประสิทธิภาพการพ่น} = \left( \frac{Q_a}{Q_t} \right) \times 100\% \quad (2-10)$$

โดย  $Q_a$  คือ ปริมาณของพอลิเมอร์ที่เคลือบผิวอยู่บนตัวอย่าง (g)

$Q_t$  คือ ปริมาณของพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ใส่เข้าไปในอุปกรณ์ (g)

ประสิทธิภาพการพ่นมีค่ามากหมายถึงปริมาณพอลิเมอร์ที่เคลือบบนผิวตัวอย่างจะมากหรือสะสมภายในอุปกรณ์ปริมาณน้อย ในลักษณะเดียวกันหากประสิทธิภาพการพ่นมีค่าน้อยหมายถึงพอลิเมอร์ที่เคลือบบนผิวตัวอย่างมีปริมาณน้อยหรือปริมาณสะสมภายในอุปกรณ์มาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียพอลิเมอร์หรือใช้พอลิเมอร์จำนวนมากเกินความจำเป็น

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Irene Rodriguez-Meizoso และคณะ [6] ได้ศึกษาการเตรียมพื้นผิวที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดด้วยเทคนิค RESS โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย การเตรียมพื้นผิวทำได้โดยใช้สารละลายผสมระหว่างแวกซ์ คือ อัลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, AKD) และสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพจากธรรมชาติ (Bioactive Natural Compound, BNC) ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต พบว่า BNC ทำให้เกิดการตกตะกอนขนาดเล็กของ AKD โดยขนาด AKD แบ่งออกได้เป็น 2 ระดับคือ 2  $\mu\text{m}$  และ 10-20  $\mu\text{m}$  ลักษณะสัณฐานวิทยาที่มีพื้นผิวขรุขระนี้ทำให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบมากขึ้น

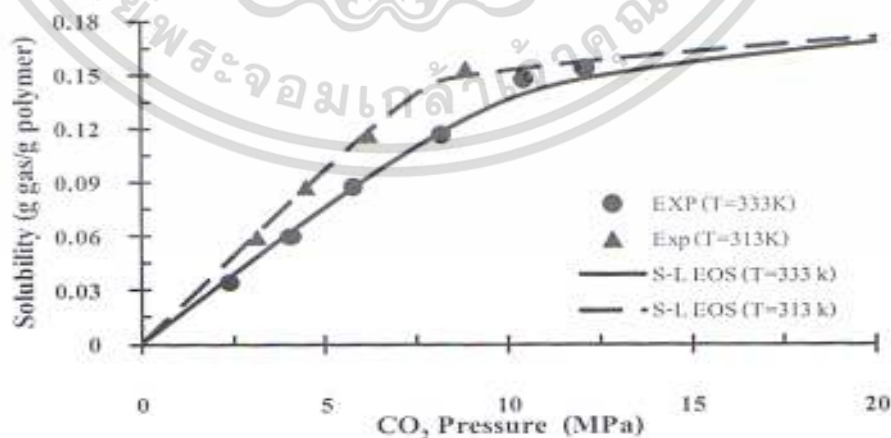
Yury Chernyak และคณะ [2] ได้ศึกษาการเคลือบผิวด้วยเพอร์ฟลูออโรพอลิเอทเธอร์ไดเอไมด์ (Perfluoropolyether Diamide, PFD) โดยใช้เทคนิค RESS พบว่าสามารถผลิตหยดขนาดเล็กของสารละลาย PFD ในคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่ใช้ตัวทำละลายร่วม และวัดสมมูลการละลาย PFD ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ความดันจุดหมอก (Cloud Point) ความเข้มข้น 0.92, 1.42, 2.06, 2.64, 4.12 และ 5.29 wt% PFD และวัดประสิทธิภาพการพ่นของ PFD โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังพ่นสารละลาย การทดลองใช้หัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15  $\mu\text{m}$  หัวฉีดยาว 11 mm ความดัน 165 bar โดยนิยามของประสิทธิภาพการพ่น คือ ปริมาณ PFD ทั้งหมดที่เคลือบอยู่บนตัวอย่างต่อปริมาณของ PFD ทั้งหมดที่อยู่ในสารละลาย พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิก่อนการพ่นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดหมอกและการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ประสิทธิภาพของการพ่นของ PFD สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jae-Jin Shim และคณะ [28] ศึกษาการเคลือบผิวด้วยพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค RESS ซึ่งอยู่ในลักษณะสารแขวนลอยในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของขนาดหัวฉีด (Nozzle Size) แบ่งเป็น 3 ขนาด คือ 30, 50 และ 100  $\mu\text{m}$  ระยะการพ่น (Spray Distance) 3 ระยะ คือ 1 mm, 1 cm และ 5 cm ความเร็วของไหล (Fluid Velocity) 4 ช่วง คือ ความเร็วต่ำ (30-80 m/s) ความเร็วปานกลาง (70-100 m/s) ความเร็วสูง (160-200 m/s) และความเร็วสูงสุด (250-300 m/s) ระยะเวลาการพ่น (Spray Duration) 4 ช่วง ได้แก่ ระยะเวลาสั้นมาก (1 s) ระยะเวลาสั้น (2-3 s) ระยะเวลาปานกลาง (5-6 s) และระยะเวลายาว (10-12 s) พบว่าขนาดของหัวฉีดส่งผลต่อลักษณะของฟิล์มที่เคลือบผิวเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระยะการพ่นและความเร็วของของไหล ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่อระยะพ่นห่างมากหยดของพอลิเมอร์จะมีขนาดเล็กลง เมื่อความเร็วสูงทำให้เกิดหยดของพอลิเมอร์ขนาดเล็ก และเมื่อระยะเวลาการพ่นนานขึ้นจะทำให้เกิดพื้นที่การเคลือบผิวกว้าง รวมทั้งฟิล์มมีความหนามากกว่าการพ่นในระยะเวลาสั้นๆ

Can Quan และคณะ [29] ได้ศึกษาการเตรียมพื้นผิวของกระดาษที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดด้วยการเคลือบผิวกระดาษด้วย AKD โดยใช้เทคนิค RESS พบว่าสามารถสร้างพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดที่มีมุมสัมผัสหยดน้ำ  $173.0^\circ$  เมื่อเทียบกับกระบวนการเคลือบผิวด้วย AKD หลอมเหลวที่สามารถเตรียมพื้นผิวกระดาษด้วย AKD ที่มีมุมสัมผัสหยดน้ำ  $109.0^\circ$  และทำการศึกษาผลความดันก่อนการขยายตัว 100-300 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว  $40-60^\circ\text{C}$  ระยะการพ่น 10 และ 50 mm ที่มีผลต่อขนาดอนุภาค AKD พบว่าสามารถสร้างอนุภาค AKD ที่มีขนาดอนุภาค 1-2  $\mu\text{m}$  โดยขนาดอนุภาคจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว และลดระยะการพ่นสั้นลง

อลิฟ ดือเร๊ะ และคณะ [30] ได้ศึกษาสมการการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB โดยตั้งสมมติฐานว่ายางเหลว PB ไม่สามารถละลายเข้าไปในวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ทำให้มีเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สามารถแพร่และละลายเข้าสู่วัฏภาคของยางเหลว PB การประมาณค่าการละลายที่เป็นผลมาจากความดันและอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 2.13

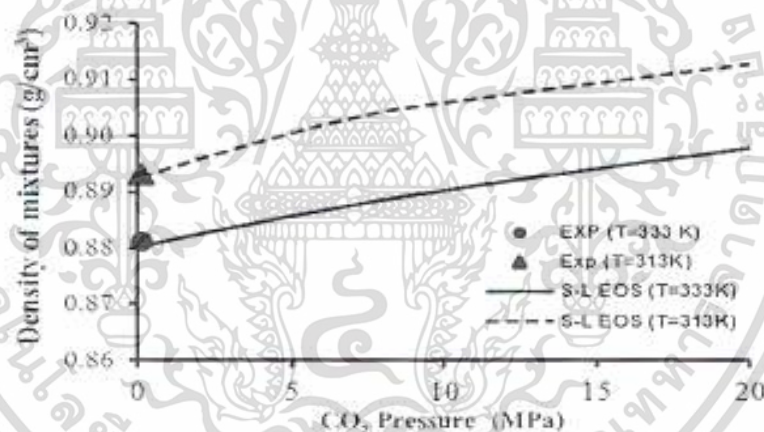


รูปที่ 2.13 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในยางเหลว PB ที่ได้จากการทดลอง และการทำนายด้วย S-L EOS [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

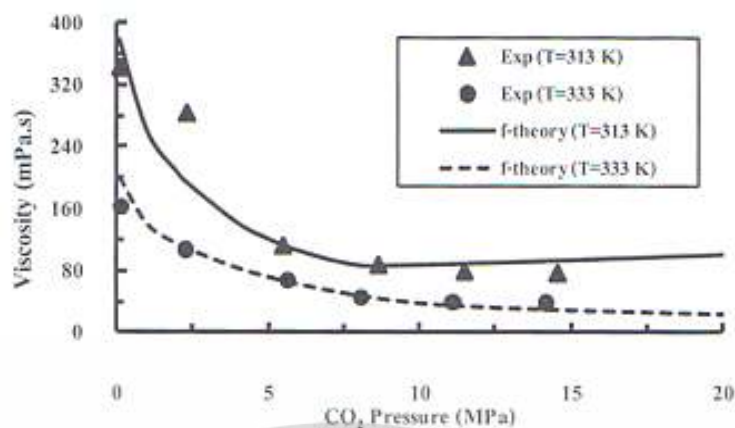
จากรูปที่ 2.13 เส้นทึบและเส้นประแสดงค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ที่ได้จากการประมาณค่าโดยสมการสถานะของ Sanchez และ Lacombe (S-L EOS) จุดสามเหลี่ยมและวงกลมแสดงค่าการละลายที่ได้จากการทดลอง ผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่มีต่อค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB พบว่าเมื่อเพิ่มความดันคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะละลายในยางเหลว PB เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความดันน้อยกว่า 10 MPa และค่าการละลายจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความดันมากกว่า 10 MPa ผลอุณหภูมิต่อค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ลดลงแสดงถึงการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB เป็นแบบคายความร้อน

การทำนายความหนาแน่นของสารผสมระหว่างยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตด้วยสมการสถานะที่อุณหภูมิ 40 และ 60°C โดยเขียนกราฟระหว่างค่าความหนาแน่นของสารผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตกับยางเหลว PB ในสถานะอิ่มตัวกับความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับการทดลองวัดความหนาแน่นของสารผสมที่ความดันบรรยากาศแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ค่าความหนาแน่นของสารผสม CO<sub>2</sub>-ยางเหลว PB ที่ได้จากการทำนายด้วย S-L EOS [28]

จากรูปที่ 2.14 พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของสารผสมที่ได้จากการทำนายด้วยสมการสถานะ ความหนาแน่นของสารผสมที่ได้จากการทำนายจะเพิ่มขึ้นตามความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นทำการทดลองผลของความดันและอุณหภูมิต่อความหนืดของสารผสมระหว่างยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์ ณ จุดสมดุลง และใช้แบบจำลอง Friction Theory (f-theory) ประมาณค่าความหนืดของสารผสมที่อุณหภูมิ 40 และ 60°C แสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ค่าความหนืดจากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง Friction Theory [30]

จากรูปที่ 2.15 พบว่าความหนืดของสารผสมระหว่างยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อความดันคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลการเพิ่มความดันคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 0-5 MPa มีผลมากต่อการลดความหนืดของสารผสม และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 40°C ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ 15 MPa ความหนืดของสารผสมลดลง 4.4 เท่าเมื่อเทียบกับความหนืดของยางเหลว PB ที่ความดัน 0 MPa และที่อุณหภูมิ 60°C และความดันคาร์บอนไดออกไซด์ 15 MPa ความหนืดของสารผสมระหว่างยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 4.2 เท่าเมื่อเทียบกับความหนืดของยางเหลว PB ที่ความดัน 0 MPa ทั้งนี้ความหนืดของสารผสมลดลงเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ละลายเข้าไปในเนื้อยางเหลว PB โดยทำหน้าที่เป็นตัวทำลายและช่วยลดการพันเกี่ยวของสายโซ่พอลิเมอร์รวมทั้งช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free Volume) ภายในโมเลกุลยางเหลว PB ส่งผลให้ความหนืดของสารผสมลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความหนืดของสารผสมพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มความหนืดของยางเหลว PB มีค่าลดลงสามารถอธิบายในเชิงอุณหพลศาสตร์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่ละโมเลกุลอยู่ห่างกันมากขึ้นหรือมีปริมาตรของสารเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาตรของสารเพิ่มขึ้นความสามารถในการไหลของสารจะสามารถไหลได้ดีขึ้นความหนืดของสารจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

## บทที่ 3

### การทดลอง

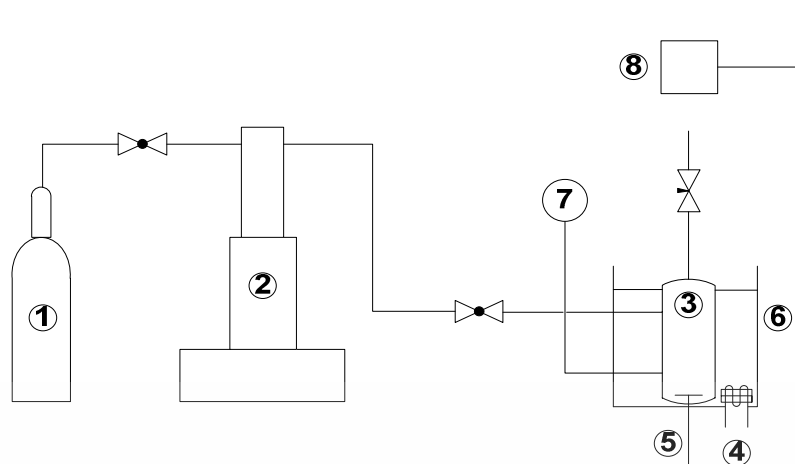
#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พาราฟินแว็กซ์ (Octacosane, น้ำหนักโมเลกุล  $394.76 \text{ g.mol}^{-1}$ , อุณหภูมิหลอมเหลว  $59-65^{\circ}\text{C}$ , Analytical Grade จาก Sigma Aldrich)
2. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (99.95 % Minimum Purity Grade)
3. ซอพิทอล
4. โทลูอิน (AR Grade จาก RCI Labscan,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ )
5. ยางเหลว PB (น้ำหนักโมเลกุล  $1,400 \text{ g.mol}^{-1}$ )
6. สารไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ 98.0 % (Dicumylperoxide, DCP)

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ป้อนอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D)
2. เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater)
3. เครื่องกวน (Stirrer)
4. อ่างน้ำมันซิลิโคนให้ความร้อน
5. เทอร์โมคัพเปิล (Thermocouple)
6. แผ่น PMMA ขนาดพื้นที่หน้าตัด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$
7. แผ่นกระจก ขนาดพื้นที่หน้าตัด  $10 \times 10 \text{ cm}^2$
8. แผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board, PCB) ขนาดพื้นที่หน้าตัด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$
9. เครื่องชั่งที่มีความแม่นยำ  $\pm 0.00001 \text{ g}$  (Mettler Toledo รุ่น XS 320011)
10. หัวฉีด (Nozzle) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $1.58 \text{ mm}$
11. เครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Goniometer)
12. ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  Cylinder)
13. ภาชนะทนความดันสูง ปริมาตร  $15 \text{ cm}^3$  (Taiatsu Techno)
14. ภาชนะทนความดันสูงแบบ Visualize Cell
15. ผู้ดูแลสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2. บั๊มอัดแรงดัน 3. ภาชนะทนความดันสูง 4. เครื่องกำเนิดความร้อน  
5. เครื่องกวน 6. อ่างน้ำซิลิโคน 7. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) 8. แผ่นทดสอบ

รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองกระบวนการเคลือบผิวแบบฟ้นละอองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

### 3.3 การศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์

#### 3.3.1 การศึกษาผลจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำและคุณลักษณะของพื้นผิว PMMA

ซึ่งนำหนักพาราฟินแว็กซ์ ปริมาณ 0.25 g ใส่ในภาชนะทนความดันสูง (ชอปปิตอล 0.3 wt% สำหรับระบบผสม 3 องค์ประกอบ) ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1 อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าภาชนะทนความดันสูง โดยให้ความร้อนผ่านเครื่องให้ความร้อนโดยน้ำมันซิลิโคนเป็นเวลา 2-18 h จากนั้นเปิดวาล์วเพื่อฟ้นละอองพาราฟินแว็กซ์ไปยังแผ่น PMMA ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำด้วยเครื่อง Goniometer เพื่อวัดระดับความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยศึกษาผลของระยะการฟ้น (ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่น PMMA) กระบวนการฟ้นซ้ำ อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว ที่มีผลต่อคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองพาราฟินแว็กซ์ โดยสามารถสรุปสถานะการดำเนินการได้ดังตารางที่ 3.1

#### ตารางที่ 3.1 สถานะในการดำเนินการในกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS

สถานะในการดำเนินการ	
ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดและแผ่นทดสอบ หรือระยะการฟ้น (cm)	1, 10 และ 15
จำนวนครั้งของการฟ้นซ้ำ (ครั้ง)	4, 5 และ 6
ความดันก่อนการขยายตัว (bar)	120, 150 และ 170
อุณหภูมิก่อนการขยายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )	40, 50, 70, 75 และ 85
มุมของการฟ้นบนกับแผ่นทดสอบ ( $\theta$ )	$90^{\circ}$ , $120^{\circ}$ , $135^{\circ}$ และ $150^{\circ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

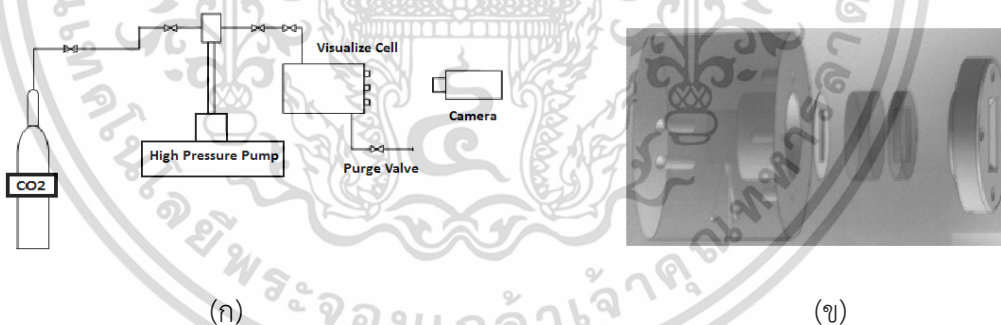
### 3.3.2 การศึกษาผลจากระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่มต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำและคุณลักษณะของพื้นผิว PMMA

1. ชั่งน้ำหนักพาราฟินแว็กซ์ปริมาณ 2.5 g
2. นำพาราฟินแว็กซ์ใส่ในบีกเกอร์
3. ละลายพาราฟินแว็กซ์ด้วยสารละลายโทลูอีน ปริมาตร 50 ml
4. นำแผ่น PMMA วางไว้ในตู้ดูดสารเคมีให้โทลูอีนระเหยออกจากพาราฟินแว็กซ์เป็นเวลา 24 h

### 3.4 การศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB

#### 3.4.1 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB

เตรียมยางเหลว PB 0.3 g บรรจุในภาชนะทนความดันสูงแบบ Visualize Cell ดังรูปที่ 3.2 อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใน Visualize Cell ความดัน 80-120 bar โดยใช้ปั๊มอัดแรงดันสูง (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D) ให้ความร้อนด้วยเครื่องกำเนิดความร้อนที่อุณหภูมิ 40-60°C และบันทึกภาพการบวมตัวด้วยกล้องวิดีโอ (SONY รุ่น ExwaveHAD) เป็นเวลา 120 min จากนั้นนำภาพที่บันทึกได้มาคำนวณค่าองศาการบวมตัวจากสมการที่ 2-4 และประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากสมการที่ 2-5



รูปที่ 3.2 (ก) ชุดเครื่องมือทนความดันสูง (ข) ภาชนะทนความดันสูงแบบ Visualize Cell

#### 3.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการพ่นในกระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS

ชั่งน้ำหนักยางเหลว PB ปริมาณ 0.3-0.5 g ใส่ในภาชนะทนความดันสูง (DCP 0.7 phr สำหรับระบบผสม 3 องค์ประกอบ) ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1 อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าภาชนะทนความดันสูง ให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำมันซิลิโคน ปลอ่ยให้เข้าสู่สมดุลการละลายเป็นเวลา 2 h จากนั้นเปิดวาล์วเพื่อพ่นสารผสมระหว่างยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์ไปยังแผ่นกระจกและ PCB ที่ระยะการพ่น 15 cm (ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นกระจกและ PCB) ในงานวิจัยนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาผลของ อุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาในการดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพการพ่นของระบบ จากนั้นศึกษาผลการเติมสาร DCP 0.7 phr ที่อุณหภูมิการอบ  $160^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 min ต่อสมบัติการยึดติดของยางเหลว PB กับแผ่น PCB ตามมาตรฐาน ASTM : D3359 แบบ B หลังจากนั้นนำไปวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว โดยสามารถสรุปสถานะการดำเนินการได้ดังตารางที่ 3.2

**ตารางที่ 3.2** สถานะในการดำเนินการในกระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS

สถานะในการดำเนินการ	
ระยะเวลาในการดำเนินการ (min)	5, 10, 15, 30, 90 และ 120
ความดันในภาชนะแรงดันสูง (bar)	80, 100, และ 120
อุณหภูมิในภาชนะแรงดันสูง ( $^{\circ}\text{C}$ )	40, 60 และ 80
มุมของการพ่นบนกับแผ่นทดสอบ ( $\theta$ )	$90^{\circ}$

### 3.5 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

การทดสอบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำทำการทดสอบด้วยด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact Angle Measurement) ซึ่งเป็นการวัดมุมระหว่างเส้นสัมผัสของหยดของน้ำที่ไม่เคลื่อนที่บนพื้นผิว การวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของแข็งจะใช้เครื่อง Goniometer การทดสอบจะใช้วิธีการที่เรียกว่า Sessile Drop โดยหยดหยดน้ำผ่านหลอดหยดขนาดเล็ก (Syringe) กำหนดปริมาตรหยดน้ำ 3-5  $\mu\text{l}$  จากนั้นเลื่อนแผ่นทดสอบขึ้นไปสัมผัสกับหยดน้ำประมาณ 2-5 s หลังจากนั้นเลื่อนแผ่นทดสอบลง หยดน้ำจะเกาะอยู่บนพื้นผิวของแผ่นทดสอบบันทึกภาพด้วยกล้องความละเอียดสูงและส่งภาพไปยังโปรแกรมคำนวณมุมสัมผัสของหยดน้ำ

### 3.6 การทดสอบการยึดติดแบบเทป (Tape Test)

การทดสอบการยึดติดของสารเคลือบผิวกับแผ่นทดสอบทำการทดสอบตามวิธีการทดสอบ ASTM : D 3359 แบบ B นำชิ้นงานมากรีดเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $2 \times 2$  mm จำนวน 100 ช่อง ดึงเทปกาวออกด้วยมือโดยทำมุม  $180^{\circ}$  กับแนวระดับ พิจารณาผลการยึดติดตาม ASTM : D 3359 แบบ B

### 3.7 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว

1. วิเคราะห์พื้นผิวเบื้องต้นด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโอกำลังขยายสูง (SONY รุ่น ExwaveHAD) กำลังขยาย 120 เท่า เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวเบื้องต้น
2. การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM
3. การวัดขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยใช้เทคนิคเคลือบผิว 2 เทคนิค คือ เทคนิค RESS และ PGSS โดยแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

#### ตอนที่ 1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS

##### 4.1 สมดุลวัฏภาคระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์ [31]

ในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS กลไกสำคัญของกระบวนการนี้ คือ การละลายของวัสดุหรือสารเคลือบผิวในวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งมีผลต่อการกำหนดสถานะในการดำเนินการ เพื่อให้เข้าใจกลไกดังกล่าว จึงได้ศึกษาสมดุลวัฏภาคระหว่างพาราฟินแว็กซ์และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยสมดุลวัฏภาคสามารถเขียนในรูปของสมมูลฟูกาซิตี (Fugacity) ได้ดังสมการที่ 4-1

$$f_i^{wax} = f_i^{vapor} \quad (4-1)$$

โดย  $f_i^{wax}$  คือ ฟูกาซิตีของตัวถูกละลายหรือพาราฟินแว็กซ์  
 $f_i^{vapor}$  คือ ฟูกาซิตีของตัวถูกละลายหรือพาราฟินแว็กซ์ในไอหรือวัฏภาคคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ฟูกาซิตีของพาราฟินแว็กซ์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4-2

$$f_i^{wax} = P_i^{sub} \phi_i^{wax} \exp \left[ \frac{v_i^{wax} (P - P_i^{sub})}{RT} \right] \quad (4-2)$$

โดย  $P_i^{sub}$  คือ ความดันย่อยของพาราฟินแว็กซ์ (bar) ที่อุณหภูมิ  $T$  (K)  
 $v_i^{wax}$  คือ ปริมาตรเชิงโมลของพาราฟินแว็กซ์ ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ )  
 $\phi_i^{wax}$  คือ สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของพาราฟินแว็กซ์ (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟูกาซิตีในวัฏภาคของไหลเหนือวิกฤตสามารถเขียนได้ดังสมการ 4-3

$$f_i^{\text{vapor}} = y_i \phi_i^{\text{vapor}} P \quad (4-3)$$

โดย  $y_i$  คือ ค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในวัฏภาคคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต  
 $\phi_i^{\text{vapor}}$  คือ สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

เมื่อแทนค่าสมการ 4-3 และ 4-2 ลงในสมการ 4-1 จะสามารถประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในวัฏภาคคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ดังสมการที่ 4-4

$$y_i = \frac{P_i^{\text{sub}}}{\phi_i^{\text{vapor}} P} \exp \left[ \frac{v_i^{\text{vax}} (P - P_i^{\text{sub}})}{RT} \right] \quad (4-4)$$

เนื่องจากความดันในระบบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความดันสูงจึงไม่สามารถพิจารณาวัฏภาคแก๊สเป็นแก๊สอุดมคติได้ ดังนั้นจึงใช้สมการสถานะของแก๊สจริงในการประมาณค่า  $\phi_i^{\text{vapor}}$  สมการสถานะ Peng-Robinson สามารถทำนายค่าการละลายของไฮโดรคาร์บอนในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้แม่นยำ โดยมีความผิดพลาดร้อยละ 10-20 เนื่องจากค่าการละลายของไฮโดรคาร์บอนในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าน้อยมาก จึงกำหนดให้การละลายของไฮโดรคาร์บอนในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารละลายเจือจางอนันต์ (Infinite Dilution) โดยสามารถเขียน  $\phi_i^{\text{vapor}}$  หรือ  $\phi_2$  จากสมการสถานะ Peng-Robinson ได้ดังสมการที่ 4-5 ถึง 4-13 ดังนี้

$$\ln \phi_2 = \frac{b_2}{b_1} (Z_1 - 1) - \ln \left[ Z_1 - \frac{b_1 P}{RT} \right] - q_1 I_1 \left[ 2 \frac{(a_1 a_2)^{0.5}}{a_1} (1 - k_{12}) - \frac{b_2}{b_1} \right] \quad (4-5)$$

โดย  $q_1 = \frac{a_1}{2RT\sqrt{2}b_1} \quad (4-6)$

$$I_1 = \ln \left[ \frac{Z_1 + (1 + \sqrt{2}) \left( \frac{b_1 P}{RT} \right)}{Z_1 + (1 - \sqrt{2}) \left( \frac{b_1 P}{RT} \right)} \right] \quad (4-7)$$

เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่ของสมการสถานะ Peng-Robinson,  $Z$  คือ แฟกเตอร์สภาพอัด (Compressibility Factor) คำนวณได้จากสมการที่ 4-8 ถึง 4-13 และ  $k_{12}$  คือ ค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับแก้อันตรกิริยาคู่ (Binary Interaction Parameter) ตัวเลขห้อย 1 คือ พาราฟินแวกซ์บริสุทธิ์ และตัวเลขห้อย 2 คือ พาราฟินแวกซ์ที่ละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

$$a_i = 0.45724 \left( \frac{R^2 T_{ci}^2}{P_{ci}} \right) \psi \quad (4.8)$$

$$\psi = \left[ 1 + (0.37464 + 1.54226\omega_i - 0.26992\omega_i^2)(1 - \sqrt{T_r}) \right]^2 \quad (4-9)$$

$$b_i = 0.0778 \left( \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \right) \quad (4-10)$$

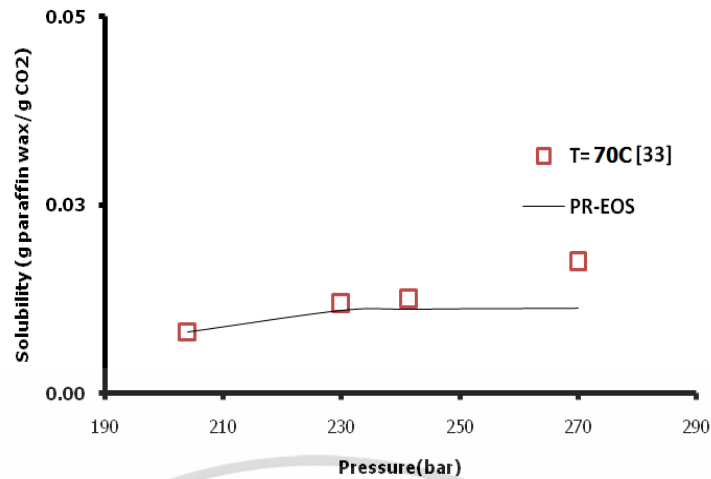
โดยที่  $\omega$  คือ อะเซนทริกแฟกเตอร์ (Acentric Factor) ของสารบริสุทธิ์ และ  $T_r$  คือ อุณหภูมิ ลดที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ โดยมีค่าเท่ากับ  $T_r = \frac{T}{T_c}$

$$Z^3 - (1-B)Z^2 + (A-3B^2-2B)Z - (AB-B^2-B^3) = 0 \quad (4-11)$$

$$A = \frac{aP}{R^2T} \quad (4-12)$$

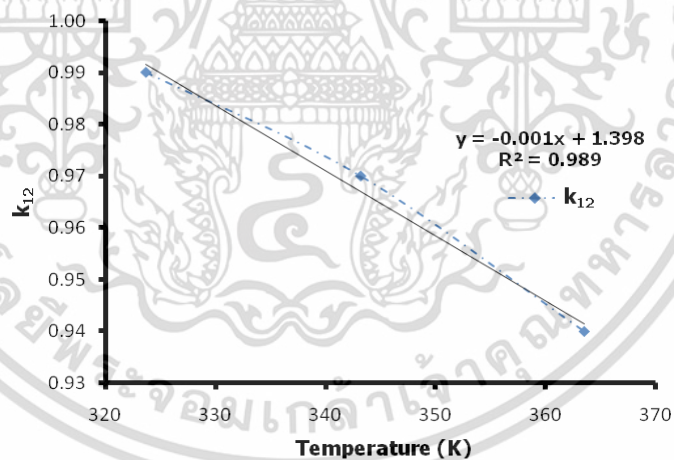
$$B = \frac{bP}{RT} \quad (4-13)$$

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม Matlab ในการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ตัวอย่างการประมาณค่าการละลายแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ที่อุณหภูมิ คงที่ 70°C ความดันประมาณ 200-270 bar พบว่าเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการ ละลายของพาราฟินแวกซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่ามากขึ้น โดยมีค่าการละลายน้อยกว่า 5 wt%



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์  
ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 70°C

ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $k_{12}$  เป็นค่าพารามิเตอร์ปรับแก้แอนตรกิริยาคู่ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงได้ศึกษาการนำค่าการละลาย [32,33] เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_{12}$  และอุณหภูมิ นำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการประมาณค่า  $k_{12}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าค่า  $k_{12}$  มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า  $k_{12}$  จะมีค่าลดลงหรือมีแอนตรกิริยาลดลงดังแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์ปรับแก้แอนตรกิริยาคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์บนแผ่น PMMA โดยเทคนิค RESS ต่อคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

### 4.2.1 การศึกษาผลของระยะการพ่นและการพ่นซ้ำในกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS

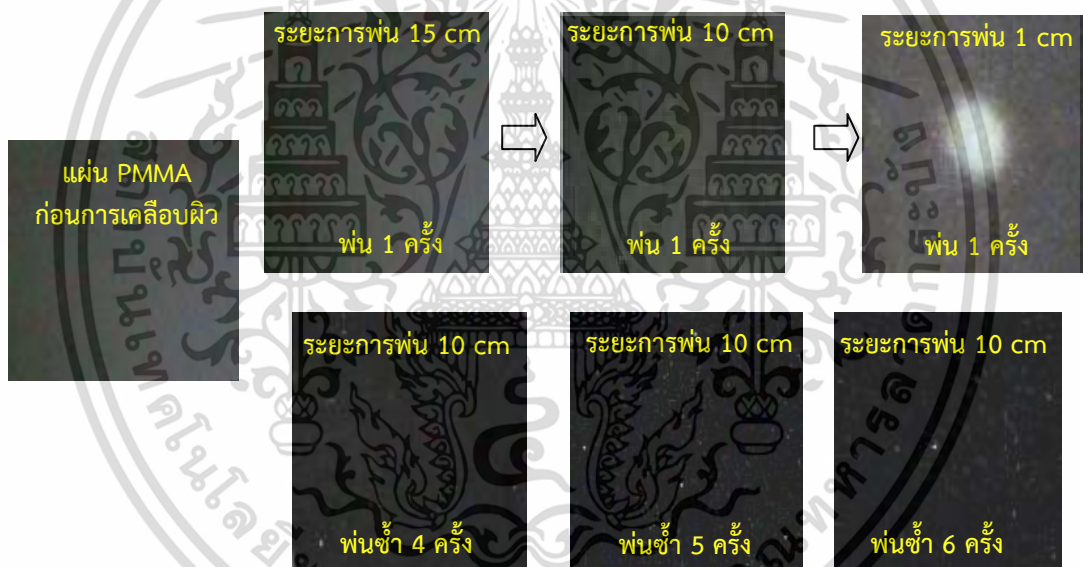
จากการศึกษาผลของระยะการพ่นในกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS ต่อคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว ที่ระยะการพ่น 15, 10 และ 1 cm ตามลำดับ และศึกษาผลการพ่นซ้ำบนพื้นผิวที่ระยะ 10 cm โดยทำการพ่นซ้ำ 4, 5 และ 6 ครั้ง ตามลำดับ ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของระยะการพ่นและการพ่นซ้ำต่อมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar

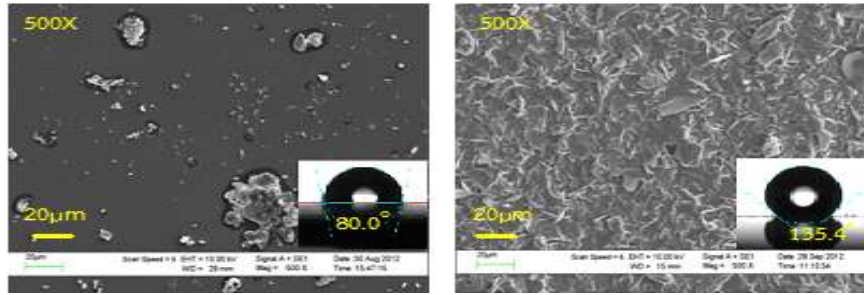
ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของแผ่น PMMA ก่อนกระบวนการเคลือบผิว( $\theta$ )	ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของแผ่น PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ( $\theta$ )					
	ระยะการพ่น	15 cm	10 cm			1 cm
80.0°	พ่น	104.7°	99.8°			135.4°
	การพ่นซ้ำ		4 ครั้ง	5 ครั้ง	6 ครั้ง	
			95.8°	106.8°	102.5°	

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสมบัติความไม่ชอบน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวเมื่อลดระยะการพ่นจาก 15 เป็น 10 cm สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยมามีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเพิ่มขึ้นจาก 80.0° (แผ่น PMMA ก่อนการเคลือบผิว) เป็น 104.7° ที่ระยะการพ่น 15 cm และเมื่อลดระยะการพ่นลงโดยทำการพ่นที่ระยะ 10 cm ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิวมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 99.8° จากนั้นจึงทำการพ่นซ้ำที่ระยะ 10 cm โดยพ่นซ้ำ 4-6 ครั้ง พบว่าการพ่นซ้ำไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำในช่วง 95.8-106.8° และเมื่อลดระยะการพ่นโดยทำการพ่นที่ระยะ 1 cm พบว่าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่า 135.4° ดังแสดงในตารางที่ 4.1

จากนั้นทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวเบื้องต้นของแผ่น PMMA ทั้งก่อนและหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยการถ่ายภาพจากกล้องวิดีโอกำลังขยาย 120 เท่า และเทคนิค SEM ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าเมื่อลดระยะการพ่นจาก 15, 10 และ 1 cm โดยทำการพ่นซ้ำที่ระยะ 10 cm พบว่าที่ระยะการพ่น 1 cm สามารถสังเกตเห็นอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ที่เคลือบบนแผ่น PMMA ได้อย่างชัดเจน คือ มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวเคลือบบนพื้นผิว PMMA ที่มีสีดำดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิวแผ่น PMMA ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และจากการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM บนพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบผิวที่ระยะ 10 และ 1 cm พบว่าที่ระยะการพ่น 1 cm มีอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์เคลือบอยู่หนาแน่นและต่อเนื่องมากกว่าที่ระยะ 10 cm ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พื้นผิว PMMA มีคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำมากกว่าที่ระยะการพ่น 10 cm ดังรูปที่ 4.4 จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ระยะการพ่นมีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิว และพบว่าที่ระยะการพ่น 1 cm เป็นระยะการพ่นที่มีความเหมาะสมในกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโอกำลังขยาย 120 เท่า แสดงลักษณะของพื้นผิว PMMA ในกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar

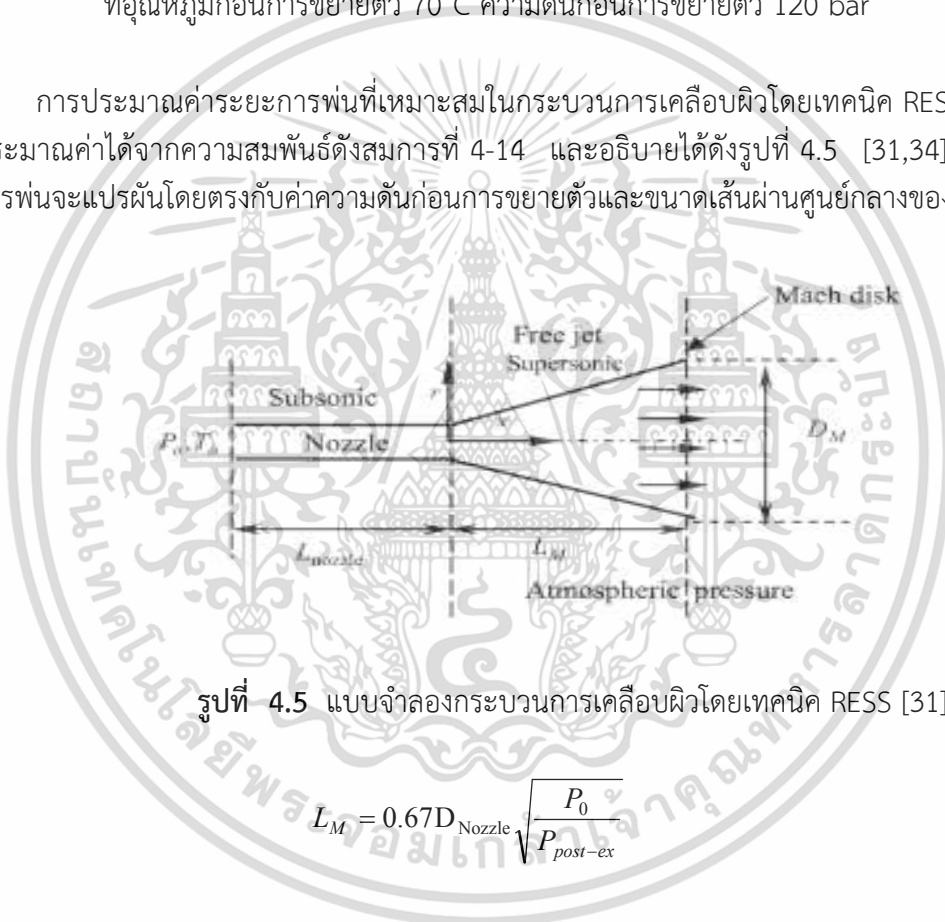


(ก) ระยะการพ่น 10 cm

(ข) ระยะการพ่น 1 cm

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า และลักษณะมุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar

การประมาณค่าระยะการพ่นที่เหมาะสมในกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS สามารถประมาณค่าได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-14 และอธิบายได้ดังรูปที่ 4.5 [31,34] โดยระยะการพ่นจะแปรผันโดยตรงกับค่าความดันก่อนการขยายตัวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด



รูปที่ 4.5 แบบจำลองกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS [31]

$$L_M = 0.67D_{\text{Nozzle}} \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{post-ex}}}} \quad (4-14)$$

$$D_M = 0.5265L_M \quad (4-15)$$

- โดย  $L_M$  คือ ระยะพ่นระหว่างปลายหัวฉีดและแผ่นทดสอบ (cm)  
 $D_{\text{Nozzle}}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (cm)  
 $D_M$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระ (cm)  
 $P_0$  คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในสถานะความดันสูง หรือความดันก่อนการขยายตัว (bar)  
 $P_{\text{post-ex}}$  คือ ความดันในบริเวณพื้นที่ของการพ่นหรือบริเวณเกิดการขยายตัวอย่างอิสระ (bar)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณค่าระยะการพ่น ( $L_M$ ) จากสมการที่ 4-14 ที่ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar และความดันที่สภาวะการขยายตัว 1 bar พบว่ามีระยะการพ่นประมาณ 0.7 cm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับระยะการพ่นที่ได้ทำการทดลอง คือ ที่ระยะ 1.0 cm ซึ่งช่วยยืนยันความเหมาะสมของระยะการพ่นที่ใช้ในการออกแบบการทดลองนี้ได้ นอกจากนี้สมการที่ 4-15 สามารถนำไปใช้ในการอธิบายอัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ซึ่งส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS ในหัวข้อที่ 4.5 ต่อไป

### 4.3 การเกิดอนุภาคโดยเทคนิค RESS

การเกิดอนุภาคโดยเทคนิค RESS [29,31] สามารถอธิบายได้จากอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation Ratio,  $S$ ) โดยอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Rate) และอัตราการเติบโต (Growth Rate) ซึ่งส่งผลต่อขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดเป็นการเปรียบเทียบค่าการละลายหรืออัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย (พาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต) ที่สภาวะความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวเทียบกับที่สภาวะหลังการขยายตัว ค่าอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดเปรียบเสมือนแรงขับ (Driving Force) ของการเกิดนิวเคลียสและอนุภาค อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายในอุดมคติ (Ideal Solution) แสดงได้จากสมการ 4-16 ดังนี้

$$S = \frac{y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})}{y^*(T, P)} \quad (4-16)$$

โดย  $S$  คือ อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (-)  
 $y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})$  คือ อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะก่อนการขยายตัว (-)  
 $y^*(T, P)$  คือ อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะหลังการขยายตัว (-)

ขนาดวิกฤตของนิวเคลียส (Critical Nucleus Size) และปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต (Number Concentration of Critical Nuclei) อธิบายได้จากสมการที่ 4-17 และ 4-18 ตามลำดับ

$$r^* = \frac{2\sigma v_2^s}{k_B T_{pe} (\ln S)} \quad (4-17)$$

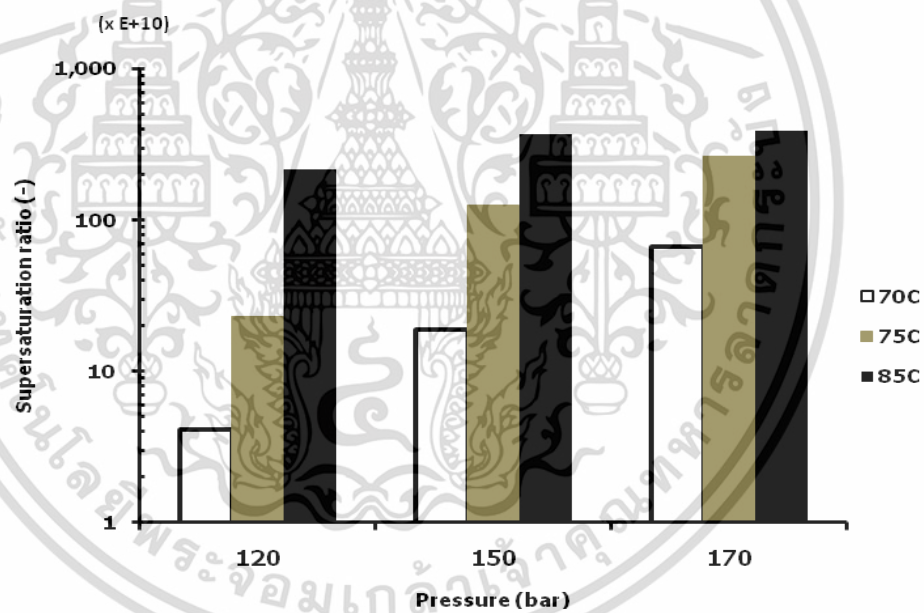
$$N^* = N_2 \exp\left(\frac{16\pi}{3} \left(\frac{\sigma(v_2^s)^{2/3}}{k_B T_{pe}}\right) \left(\frac{1}{\ln S}\right)^2\right) \quad (4-18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดย  $r^*$  คือ ขนาดวิกฤตของนิวเคลียส (m)  
 $N^*$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต (particles/cm<sup>3</sup>)  
 $\sigma$  คือ แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (N/m)  
 $v_2^s$  คือ ปริมาตรเชิงโมลของตัวถูกละลาย (cm<sup>3</sup>/mol)  
 $k_B$  คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน (Boltzmann's Constant,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)  
 $T_{pe}$  คือ อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (K)

#### 4.3.1 ผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

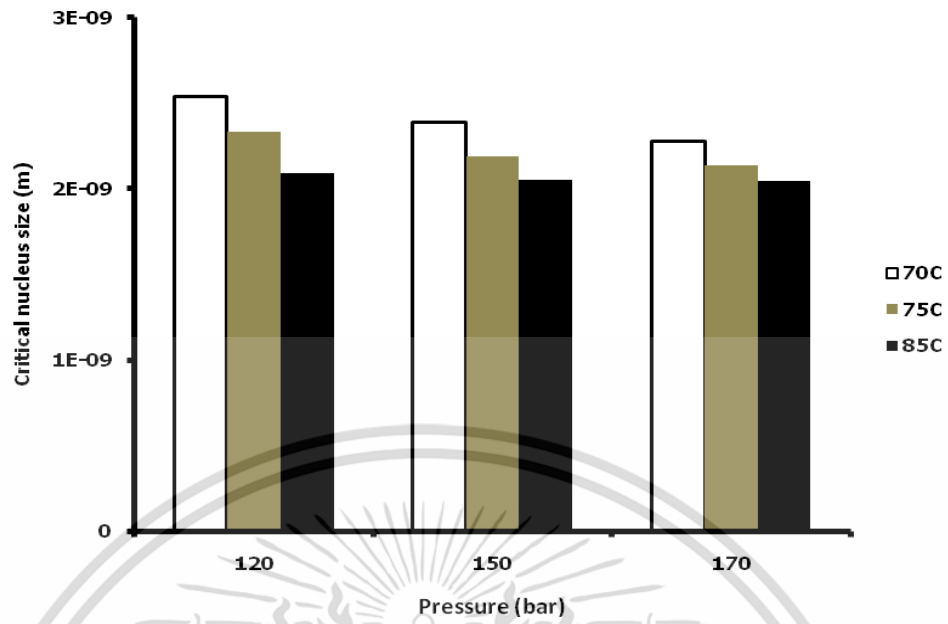
จากหัวข้อที่ 4.1 พบว่าการเพิ่มความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวของระบบทำให้ความสามารถในการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวดที่ประมาณค่าจากสมการที่ 4-16 มีค่าสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว 70-85 °C และ 120-170 bar กับอัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวดแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



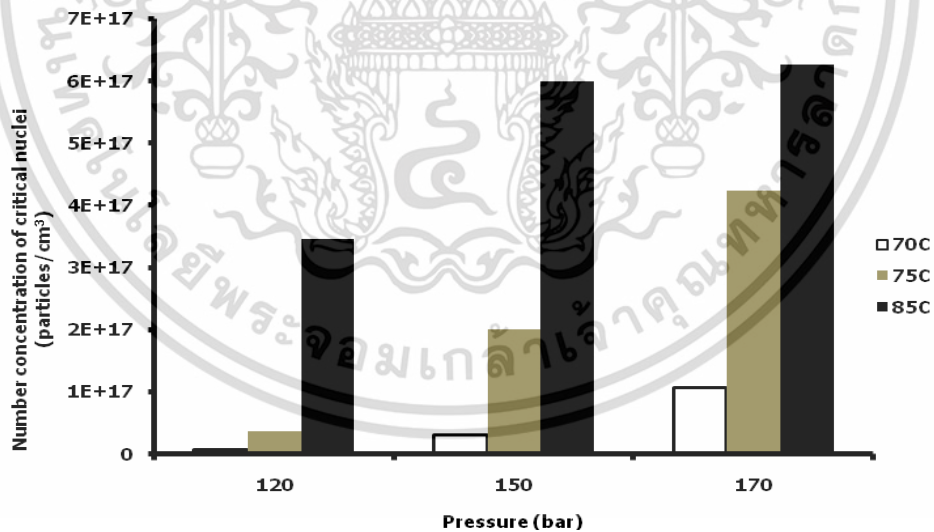
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับอัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวด

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัว อัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวดมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าประมาณ  $10^{10}$ - $10^{13}$  ทำให้ระบบมีแรงขับในการเกิดนิวเคลียสเพิ่มมากขึ้น [29] ทำให้ขนาดวิกฤตของนิวเคลียสในการเกิดอนุภาคมีขนาดเล็กกลง โดยขนาดวิกฤตของนิวเคลียสแสดงถึงขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าขนาดวิกฤตของนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีขนาดประมาณ 2-3 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับขนาดวิกฤตของนิวเคลียส และพบว่าปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวดเพิ่มขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 โดยมีค่าประมาณ  $10^{17}$  particles/cm<sup>3</sup>

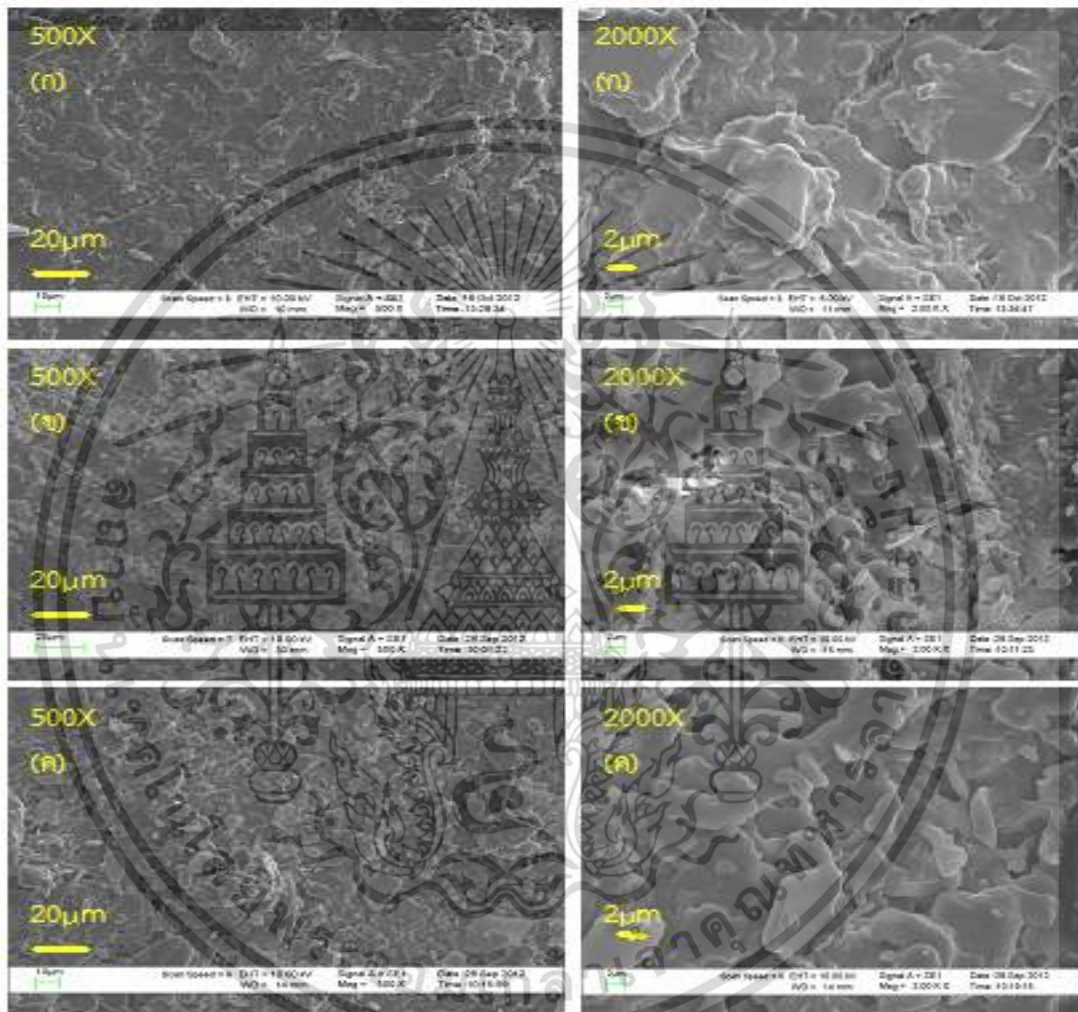


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

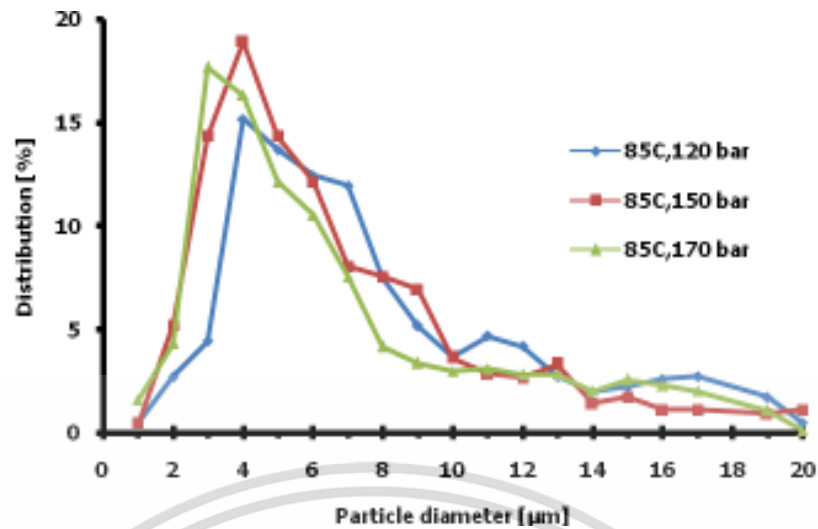
#### 4.3.2 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

จากการศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่  $85^{\circ}\text{C}$  พบว่า เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar ตามลำดับ ขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 4 เป็น 3  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่  $85^{\circ}\text{C}$  ความดันก่อนการขยายตัว (ก) 120 (ข) 150 และ (ค) 170 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลของความดันก่อนการขยายตัวที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์อธิบายได้จากอัตราการเกิดนิวเคลียส โดยเมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นอัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวดมีค่าเพิ่มมากขึ้น อัตราการเกิดนิวเคลียส ( $J$ ) จะเร็วขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลง [13,37] ดังรูปที่ 4.9 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวของระบบจาก 150 เป็น 170 bar จะสังเกตเห็นกลุ่มก้อนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของพาราฟินแว็กซ์ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดแรงเชื่อมระหว่างอนุภาค (Binding Force) [13,35] เกิดขึ้น ทำให้เกิดกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนขึ้นดังรูปที่ 4.9 อัตราการเกิดนิวเคลียสอธิบายได้ดังสมการที่ 4.19 [36]

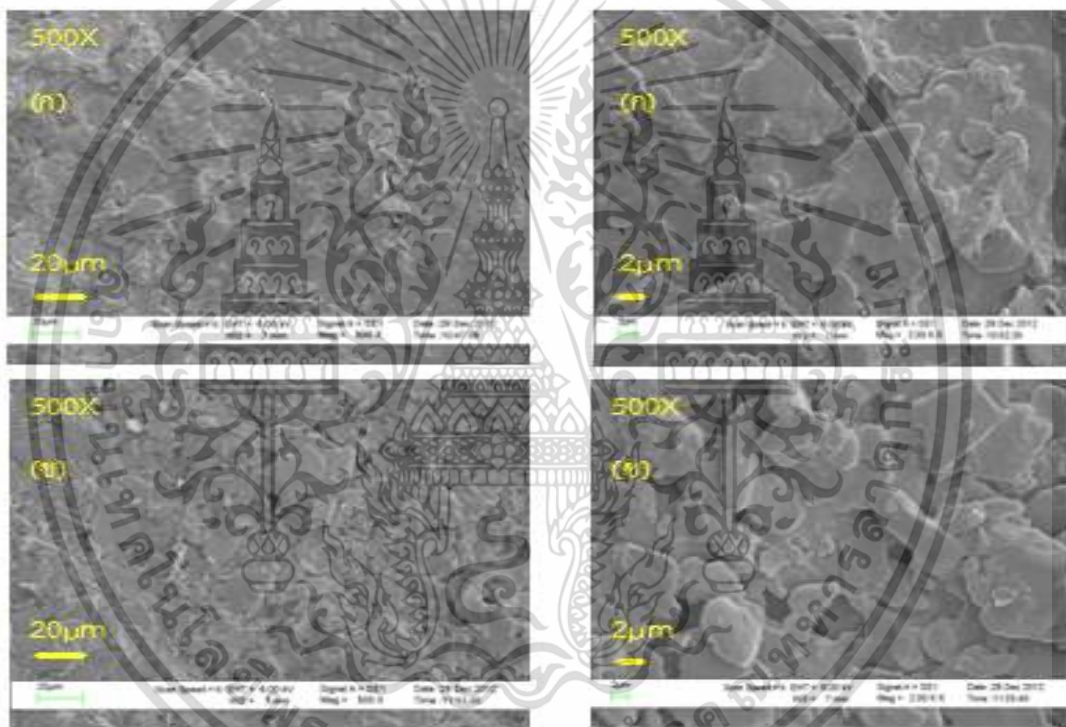
$$J = N_0 v \exp\left(\frac{-4\beta^3 v^2 \gamma_{12}^3}{27\alpha^2 (k_B T)^3 (\ln S)^2}\right) \quad (4.19)$$

- โดย  $J$  คือ อัตราการเกิดนิวเคลียส  
 $N_0$  คือ ปริมาณนิวเคลียสต่อหน่วยปริมาตร  
 $v$  คือ ความถี่ของโมเลกุลนิวเคลียสที่ถ่ายเทระหว่างวัฏภาคของไหลและนิวเคลียส  
 $\beta$  คือ ค่าตัวแปรรูปทรงของพื้นที่  
 $v$  คือ ปริมาตรเชิงโมลของสาร  
 $\gamma_{12}$  คือ ค่าพลังงานระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยพื้นที่  
 $\alpha$  คือ ค่าตัวแปรรูปทรงของปริมาตร  
 $k_B$  คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน  
 $T$  คือ อุณหภูมิ  
 $S$  คือ อัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวด

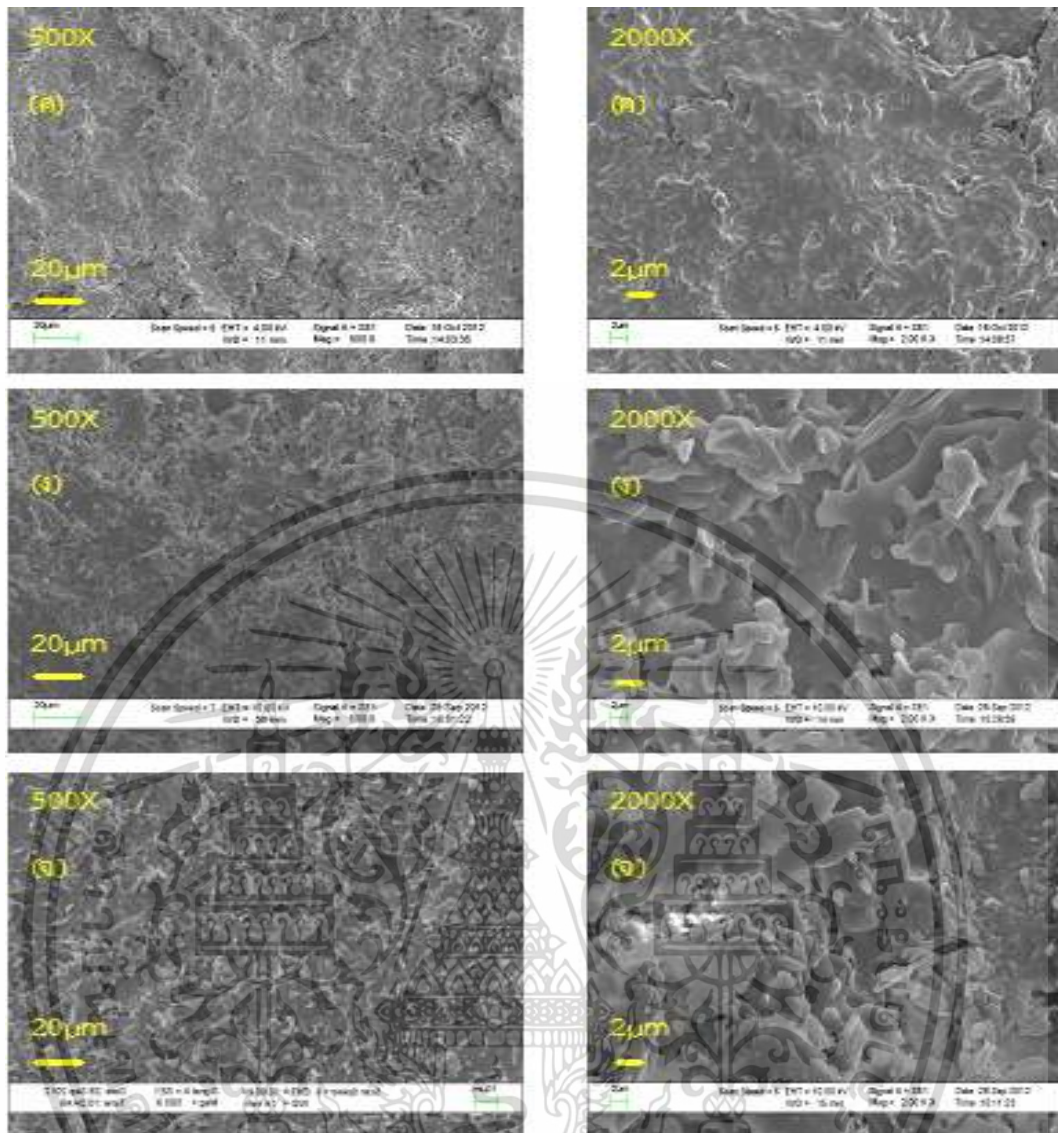
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

การศึกษาผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่เกิดขึ้นโดยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar ทำศึกษาผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ 2 ช่วง คือ ช่วงที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพาราฟินแว็กซ์ 40 และ 50°C และช่วงอุณหภูมิก่อนการขยายตัวเหนือจุดหลอมเหลวของพาราฟินแว็กซ์ 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนการขยายตัวขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์มีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.11 โดยแบ่งช่วงขนาดของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ออกเป็น 2 ช่วงคือขนาดขนาดลดลง 10 เป็น 9  $\mu\text{m}$  ที่บริเวณต่ำกว่าจุดหลอมเหลว อุณหภูมิ 40 และ 50°C ตามลำดับ และลดลงจาก 6  $\mu\text{m}$  เป็น 4  $\mu\text{m}$  ที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว ในช่วง 70-85°C ดังแสดงในรูปที่ 4.12

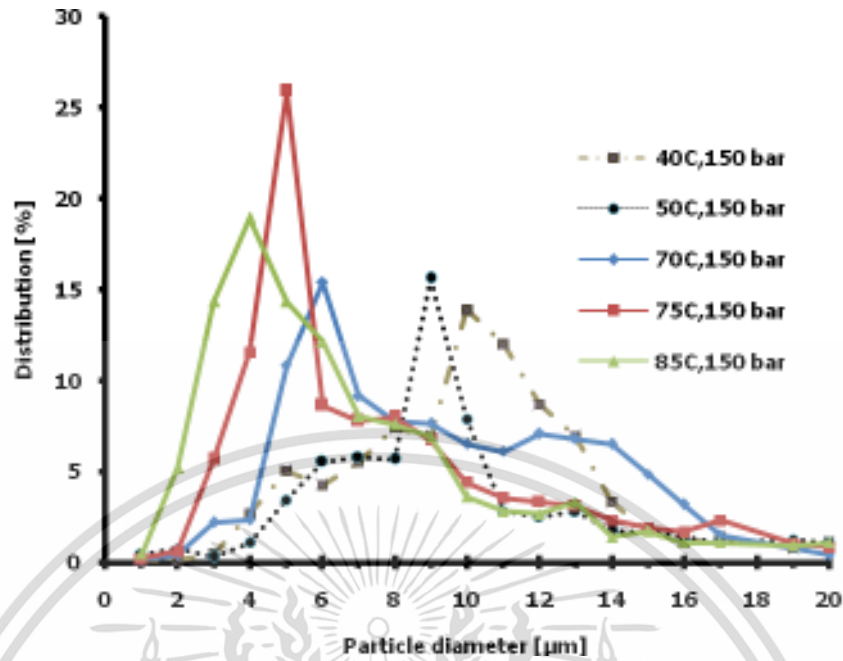


รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (ก) 40 (ข) 50 (ค) 70 (ง) 75 และ (จ) 85°C



รูปที่ 4.11 (ต่อ) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (ก) 40 (ข) 50 (ค) 70 (ง) 75 และ (จ) 85°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์อธิบายได้จากอัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวดและความหนืดของสารละลายระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตกับพาราฟินแว็กซ์ โดยเมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าสูงขึ้นทำให้อัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวดมีค่าทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการเกิดนิวเคลียสส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสเร็วในการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้น ขนาดอนุภาคจึงมีขนาดเล็กลง [13,37] นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของสารละลายมีค่าลดลงส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียส ( $J$ ) มีค่าเร็วขึ้นส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดนิวเคลียสและความหนืดของสารละลายแสดงได้ดังสมการที่ 4-20 [36]

$$J = \frac{K}{\eta_0} \left( \frac{-\Delta G^* - \Delta G_a}{k_B T} \right) \quad (4-20)$$

โดย  $J$  คือ อัตราการเกิดนิวเคลียส

$\eta_0$  คือ ค่าความหนืดของสารละลาย

$\Delta G^*$  คือ พลังงานอิสระสูงสุดของการเกิดนิวเคลียส

$\Delta G_a$  คือ พลังงานกระตุ้นของการถ่ายเทระหว่างนิวเคลียสและวัฏภาคของไหล

$k_B$  คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน

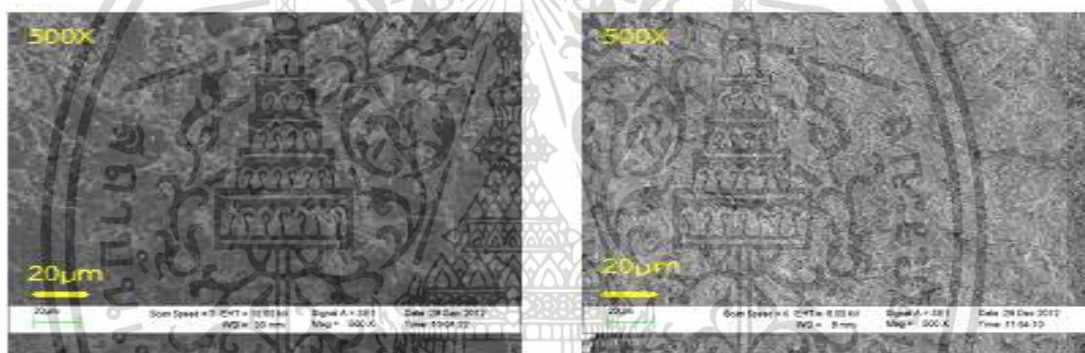
$T$  คือ อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้พบว่าผลความแตกต่างระหว่างวัฏภาคของพาราฟินแว็กซ์กับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะส่งผลต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ โดยพาราฟินแว็กซ์ที่สถานะของเหลวหรือที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวจะละลายและผสมร่วมกับวัฏภาคในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ดีและเร็วกว่าพาราฟินแว็กซ์ที่สถานะของแข็งหรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เนื่องจากพาราฟินแว็กซ์ที่สถานะของเหลวมีค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตน้อยกว่าทำให้มีอัตราการเกิดนิวเคลียสเร็วส่งผลให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า

#### 4.3.4 ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

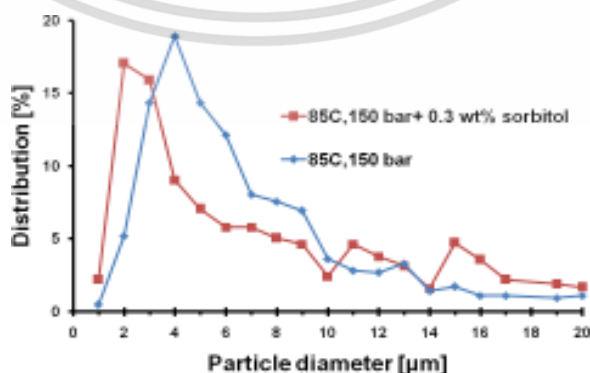
การศึกษาผลของสารก่อผลึก (Nucleating Agent) [38] ต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 สารก่อผลึกที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ซอบิทอล โดยใช้ปริมาณซอบิทอลต่อพาราฟินแว็กซ์ 0.3 wt% ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar พบว่าขนาดของอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์เล็กลงจากประมาณ 4 เป็น 2  $\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 150 bar (ก) พาราฟินแว็กซ์ (ข) ซอบิทอล/พาราฟินแว็กซ์ 0.3 wt%



รูปที่ 4.14 ผลของสารก่อผลึกที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของซอบิทอลต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่เล็กลงอธิบายได้จากซอบิทอลมีสมบัติช่วยลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดนิวเคลียสทำให้อัตราเกิดนิวเคลียสเร็วขึ้น และยังส่งผลต่อขั้นตอนการเติบโตของอนุภาค โดยจะลดโอกาสในการรวมตัวกันของอนุภาค [13,36] ดังนั้นขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์จึงมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังพบว่าผลของการเติมซอบิทอลช่วยลดช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 4.14 จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ซอบิทอลสามารถใช้เป็นสารก่อผลึกในระบบร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ได้ ซึ่งสามารถลดขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ให้เล็กลงและลดช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

#### 4.4 การศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การศึกษาจลนศาสตร์การไหลและสมบัติทางกายภาพของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตภายในระบบมีความสำคัญในการศึกษาและออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยเทคนิค RESS ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของพื้นผิวหลังการเคลือบผิว ในการศึกษานี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยตั้งสมมุติฐานว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นของไหลที่อัดตัวได้ไหลผ่านท่อและหัวฉีดขนาดเล็ก ปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่ละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 5 wt%) ดังนั้นสมบัติรวมของของไหลจึงเป็นสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

##### 4.4.1 การประมาณค่าความดันและความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

อัตราส่วนความดันที่ทางเข้าและทางออกสำหรับการไหลผ่านหัวฉีดที่ปลายหัวฉีดโดยมีความเร็วมากกว่าหรือเท่ากับความเร็วเสียงสำหรับแก๊สที่อัดตัวได้และมีการไหลแบบ isentropic ความดันเริ่มต้นและปลายหัวฉีดเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับ Mach Number แสดงดังสมการที่ 4-21 [39,40]

$$\frac{P_e}{P_0} = \left[ 1 + \left( \frac{k-1}{2} \right) Ma_e^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (4-21)$$

โดย  $P_e$  คือ ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (bar)

$P_0$  คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง  
หรือความดันก่อนการขยายตัว (bar)

$k$  คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)

$Ma_e$  คือ Mach Number ที่ปลายหัวฉีด (-)

จากความสัมพันธ์ของแก๊สอุดมคติอัตราส่วนความจุความร้อน ( $k$ ) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังสมการที่ 4-22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (4-22)$$

โดย  $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (kJ/kg.K)

$C_v$  คือ ค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่ (kJ/kg.K)

อัตราส่วนอุณหภูมิเริ่มต้นและที่ปลายหัวฉีดสำหรับการไหลผ่านหัวฉีดสามารถแสดงดังได้สมการที่ 4-23 [39,40]

$$\frac{T_0}{T_e} = \left[ 1 + \left( \frac{k-1}{2} \right) Ma_e^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (4-23)$$

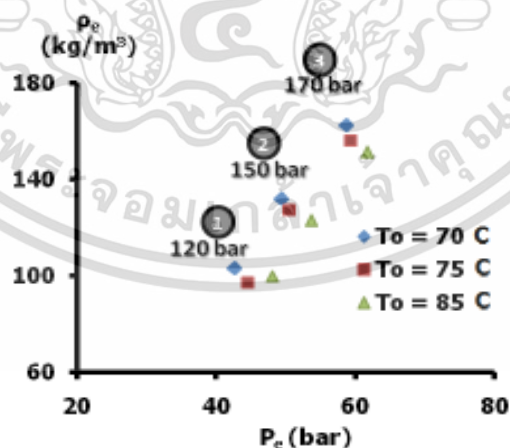
โดย  $T_e$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ปลายหัวฉีด (K)

$T_0$  คือ อุณหภูมิของไหลเริ่มต้นในภาวะทวนความดันสูงหรืออุณหภูมิก่อนการขยายตัว (K)

$k$  คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)

$Ma_e$  คือ Mach Number ที่ปลายหัวฉีด (-)

เมื่อทราบความดันและอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด ทำการประมาณค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่บริเวณปลายหัวฉีดผ่านสมการสถานะ Peng-Robinson ผลการประมาณค่าความดันและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตแสดงดังรูปที่ 4.15



**รูปที่ 4.15** ความดันและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการประมาณค่าความหนาแน่นและความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ จากรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและความดันที่ปลายหัวฉีดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 100-200 kg/m<sup>3</sup> และ 40-60 bar ตามลำดับ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวสูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีดลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพลังงานจลน์ภายในระบบมีค่าสูงขึ้น โมเลกุลของสารมีการกระจายตัวกันมากขึ้นทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความหนาแน่นลดลง

#### 4.4.2 การประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การคำนวณความเร็วที่ปลายหัวฉีดโดยไม่มีผลการสูญเสียความเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่อแสดงได้ดังสมการที่ 4-24 [41]

$$u_e^2 = \frac{2kP_0}{(k-1)\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_0} \right)^{1-(1/k)} \right] \quad (4-24)$$

โดย  $u_e$  คือ ความเร็วของไหลที่ปลายหัวฉีด (m/s)

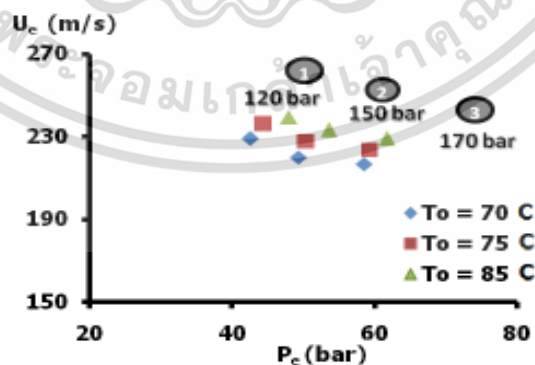
$P_e$  คือ ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (bar)

$P_0$  คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง (bar)

$k$  คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)

$\rho_0$  คือ ค่าความหนาแน่นของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง (kg/m<sup>3</sup>)

ผลการประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดจากสมการที่ 4-24 แสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความดันและความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด

ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว

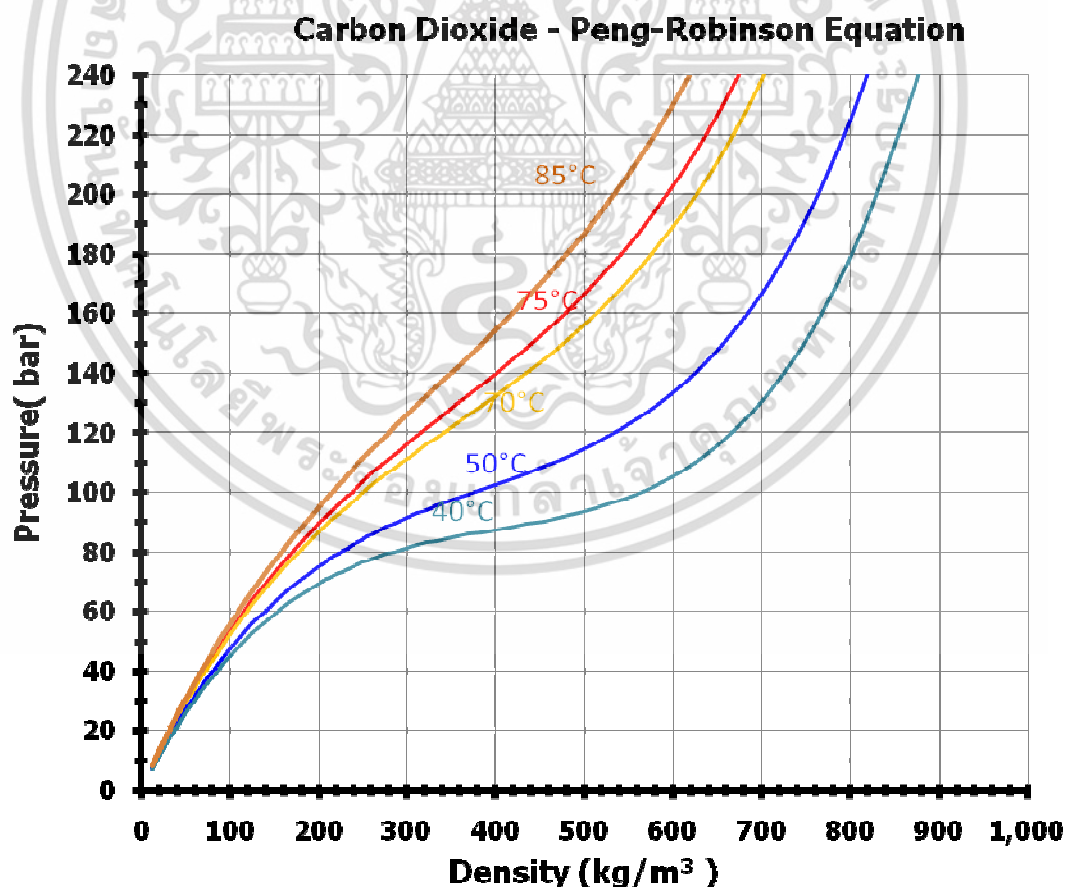
70, 75 และ 85°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 ผลการประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดมีค่าประมาณ 200 m/s โดยเมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีดมีค่าสูงขึ้น อธิบายได้จากผลของพลังงานจลน์ที่เพิ่มสูงขึ้นและความหนืดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความเร็วที่ปลายหัวฉีดค่าสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีดมีค่าลดลง อธิบายได้จากเมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีผลต่อความเร็วเชิงเส้นในการไหลภายในท่อมากกว่าผลต่างระหว่างความดันเริ่มต้นและความดันที่ปลายหัวฉีด ดังสมการที่ 4-24 จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าความหนาแน่นก่อนการขยายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีผลต่อความเร็วปลายท่อมากกว่าระดับความแตกต่างระหว่างความดันเริ่มต้นและความดันที่ปลายหัวฉีด

- ผลของความดันและอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 40-85°C ความดัน 10-240 bar โดยประมาณค่าจากสมการสถานะ Peng-Robinson [42] แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 พบว่าที่อุณหภูมิคงที่ เมื่อเพิ่มความดันความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น และที่ความดันคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจึงความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าลดลง



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 การประมาณค่าความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การประมาณค่าความเร็วตกกระทบบนพื้นผิวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตประมาณผ่าน Mach Number โดยตั้งสมมุติฐานว่าบริเวณที่ตกกระทบบนพื้นผิว คาร์บอนไดออกไซด์เกิดการขยายตัวอย่างอิสระในระดับความเร็วเหนือเสียง โดยที่แก๊สอุดมคติความเร็วเสียงมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปของอัตราส่วนความจุความร้อนแสดงดังสมการที่ 4-25

$$c = \sqrt{\frac{kP}{\rho}} \quad (4-25)$$

โดย  $c$  คือ ความเร็วเสียง (m/s)  
 $P$  คือ ความดันของไหล (bar)  
 $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )

การประมาณ Mach Number ของแก๊สที่พื้นผิวตกกระทบสามารถหาได้จากสมการที่ 4-26 [43]

$$Ma_i = \left[ k_1 \frac{A_i}{A_e} + (1 - k_1) \right]^{k_2} \quad (4-26)$$

โดย  $A_e$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่ปลายหัวฉีด ( $\text{mm}^2$ )  
 $A_i$  คือ พื้นที่หน้าตัดการกระจายตัวของอนุภาคที่พื้นผิวตกกระทบ ( $\text{mm}^2$ )  
 $k_1$  และ  $k_2$  คือ ฟังก์ชันของอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊ส (-)

$$k_1 = 218.0629 - 243.576k + 71.7925k^2$$

$$k_2 = -0.122450 + 0.281300k$$

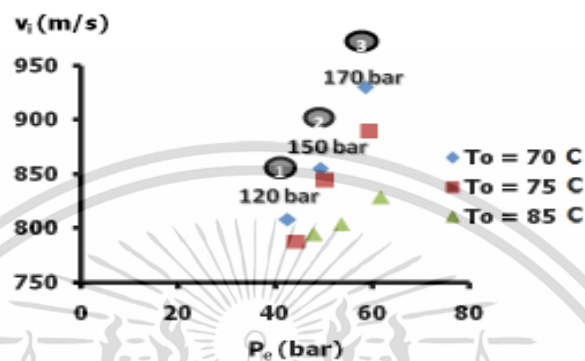
ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ออกจากปลายหัวฉีดมีความสัมพันธ์กับความเร็วเสียงดังสมการที่ 4-27

$$V_i = Ma_i \times c \quad (4-27)$$

โดย  $Ma_i$  คือ Mach Number บนพื้นผิวตกกระทบ (-)  
 $c$  คือ ความเร็วเสียง (m/s)  
 $V_i$  คือ ความเร็วของไหลตกกระทบของไหล (m/s)

ผลการประมาณความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 พบว่ามีความเร็วตกกระทบประมาณ 800-900 m/s จากการประมาณค่าดังกล่าวพบว่าที่ความดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนการขยายตัวและความดันปลายหัวฉีดสูง ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่บริเวณก่อนการขยายตัวอย่างอิสระหรือปลายหัวฉีด จากนั้นเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วในบริเวณการขยายตัวอย่างอิสระทำให้มีความเร็วในการกระแทกมีค่ามากขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวสูงขึ้น ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงส่งผลให้อัตราการขยายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตลดลง ความเร็วตกกระแทกจึงมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.18

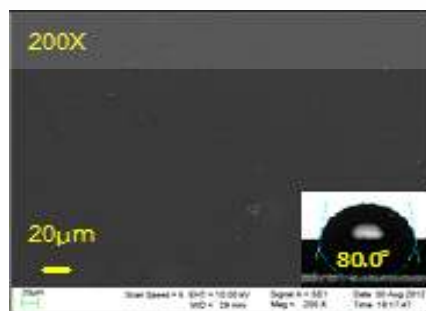


รูปที่ 4.18 ความดันที่ปลายหัวฉีดและความเร็วตกกระแทกของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85 °C ตามลำดับ

## 4.5 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

### 4.5.1 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA ก่อนกระบวนการเคลือบผิว

ผลการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำและการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว PMMA ด้วยเทคนิค SEM พบว่า พื้นผิว PMMA มีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำเป็น 80.0° ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติทางเคมีของ PMMA ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลทำให้พื้นผิว PMMA มีคุณลักษณะที่เป็นพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว PMMA พบว่ามีพื้นผิวทางกายภาพเป็นพื้นเรียบ ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำและลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว PMMA แสดงได้ดังรูปที่ 4.19

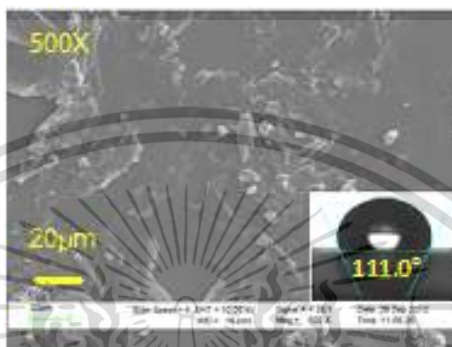


รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 200 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟิน แวกซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม

การศึกษาระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแวกซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่มซึ่งเป็นวิธีการพื้นฐานที่นิยมในการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแวกซ์ โดยใช้พาราฟินแวกซ์ปริมาณ 2.5 g ละลายในโทลูอีน 50 ml หลังจากนั้นปล่อยให้เกิดกระบวนการตกผลึกที่สภาวะบรรยากาศเป็นเวลา 24 h ผลจากการเคลือบผิวแบบจุ่มแสดงได้ดังรูปที่ 4.20

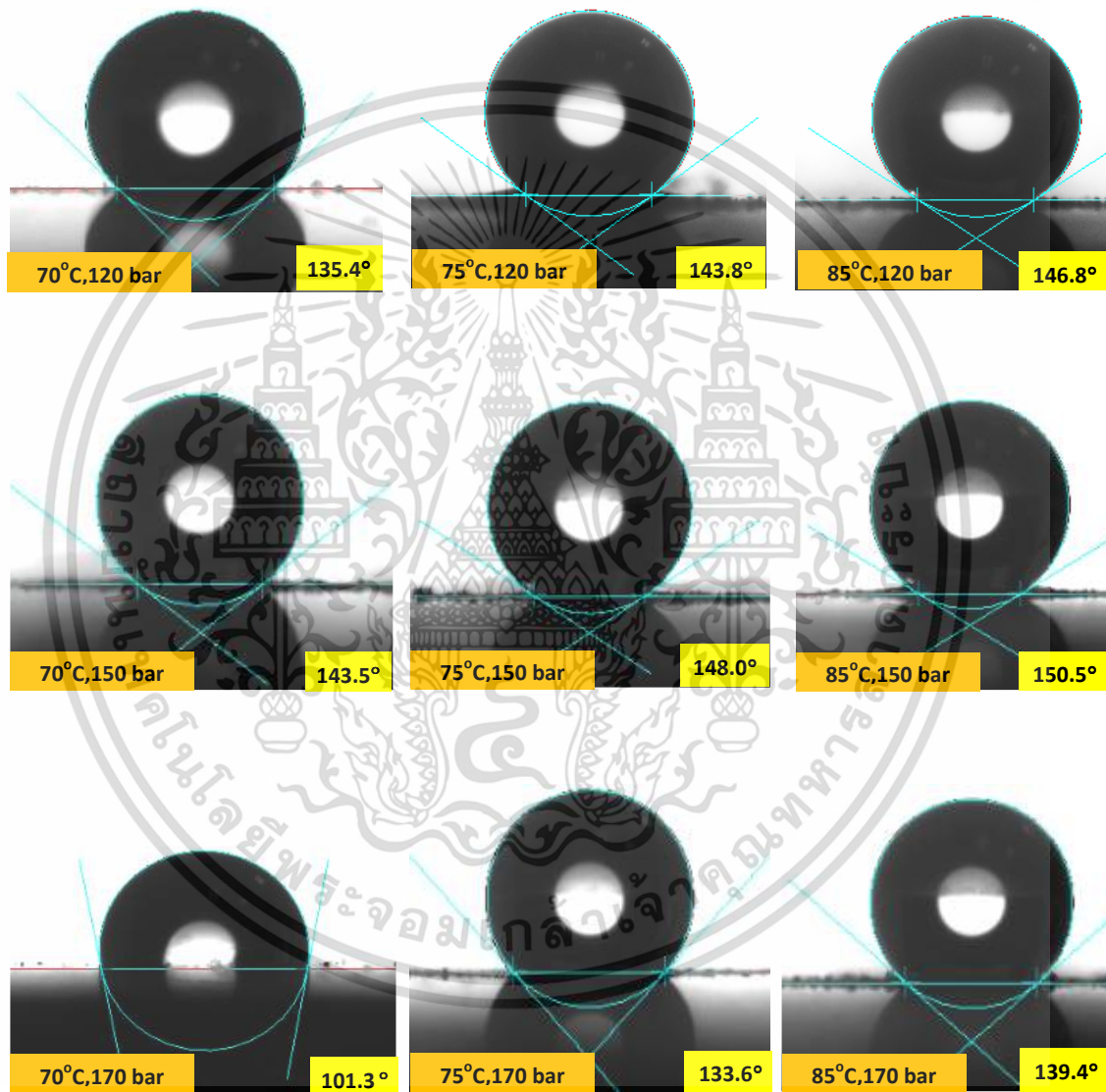


รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า ลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแวกซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม

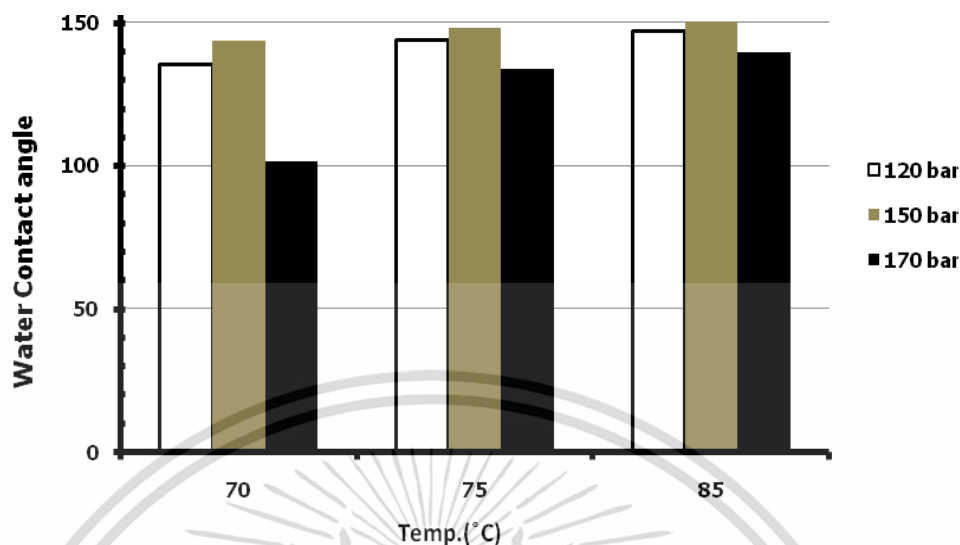
จากรูปที่ 4.20 พบว่าพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบจุ่มมีลักษณะเป็นแผ่นบางเรียบของพาราฟินแวกซ์เคลือบอยู่บนพื้นผิว ทั้งนี้เนื่องจากจากสมบัติทางเคมีของพาราฟินแวกซ์ที่มีความไม่ชอบน้ำที่เคลือบบน PMMA ส่งผลให้สมบัติความไม่ชอบน้ำของ PMMA มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยค่ามุมสัมผัสหยดของน้ำเท่ากับ  $111.0^{\circ}$

#### 4.5.3 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS

ผลการศึกษารูปร่างการเคลือบผิว PMMA ด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ระยะการพ่น 1 cm ผลการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำแสดงได้ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิว PMMA ที่เคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันก่อนการขยายตัว และมุมสัมผัสของหยดน้ำ

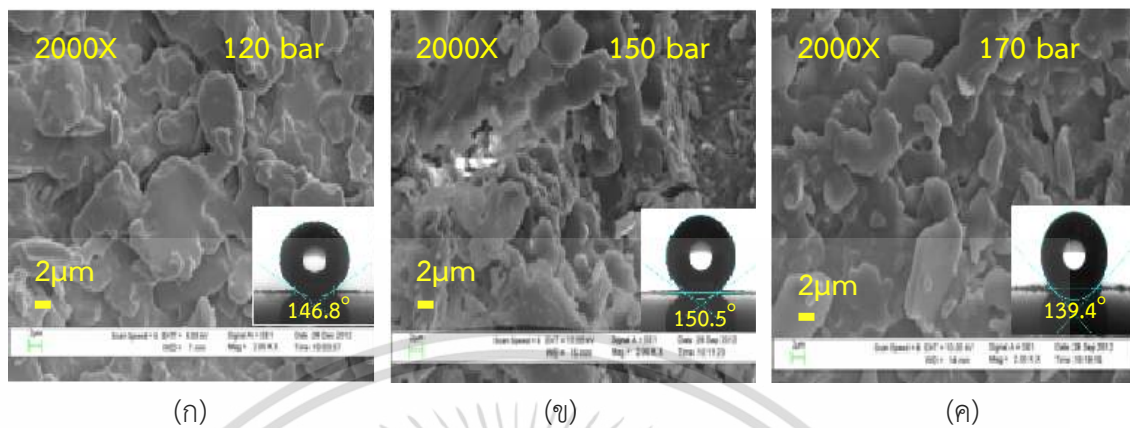
จากการศึกษากระบวนการเคลือบผิว PMMA ด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS สามารถสร้างพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นจาก  $80.0^{\circ}$  เป็น  $101.3-150.5^{\circ}$  พบว่าที่สภาวะความดันก่อนการขยายตัว 150 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว  $85^{\circ}\text{C}$  สามารถเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ยั่งยืนได้ โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำ  $150.5^{\circ}$

จากรูปที่ 4.22 พบว่าผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนการขยายตัว มุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อธิบายได้จากค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่เคลือบบนพื้นผิวมีปริมาณ ความหนาแน่น และความขรุขระเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์เล็กลงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2 ส่งผลให้พื้นผิว PMMA มีโอกาสในการเกิดระดับของความขรุขระเพิ่มสูงขึ้น [13]

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 พบว่า ระดับความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 120 เป็น 150 bar ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อธิบายได้จากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้มีปริมาณและความหนาแน่นของพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิว PMMA มากขึ้น รวมทั้งขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์มีขนาดเล็กลง ทำให้โอกาสในการเกิดระดับของความขรุขระเพิ่มสูงขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังรูปที่ 4.23 และช่วงที่ 2 เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 150 เป็น 170 bar ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ อธิบายได้จากความดันในกระบวนการพ่นส่งผลต่อแรงปะทะที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดการกระเด็นของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิว PMMA ในระหว่างการฉีดพ่นซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องถึงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายตัวและความขรุขระของพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิว PMMA โดยสามารถอธิบายผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของพาราฟินแว็กซ์ดังนี้



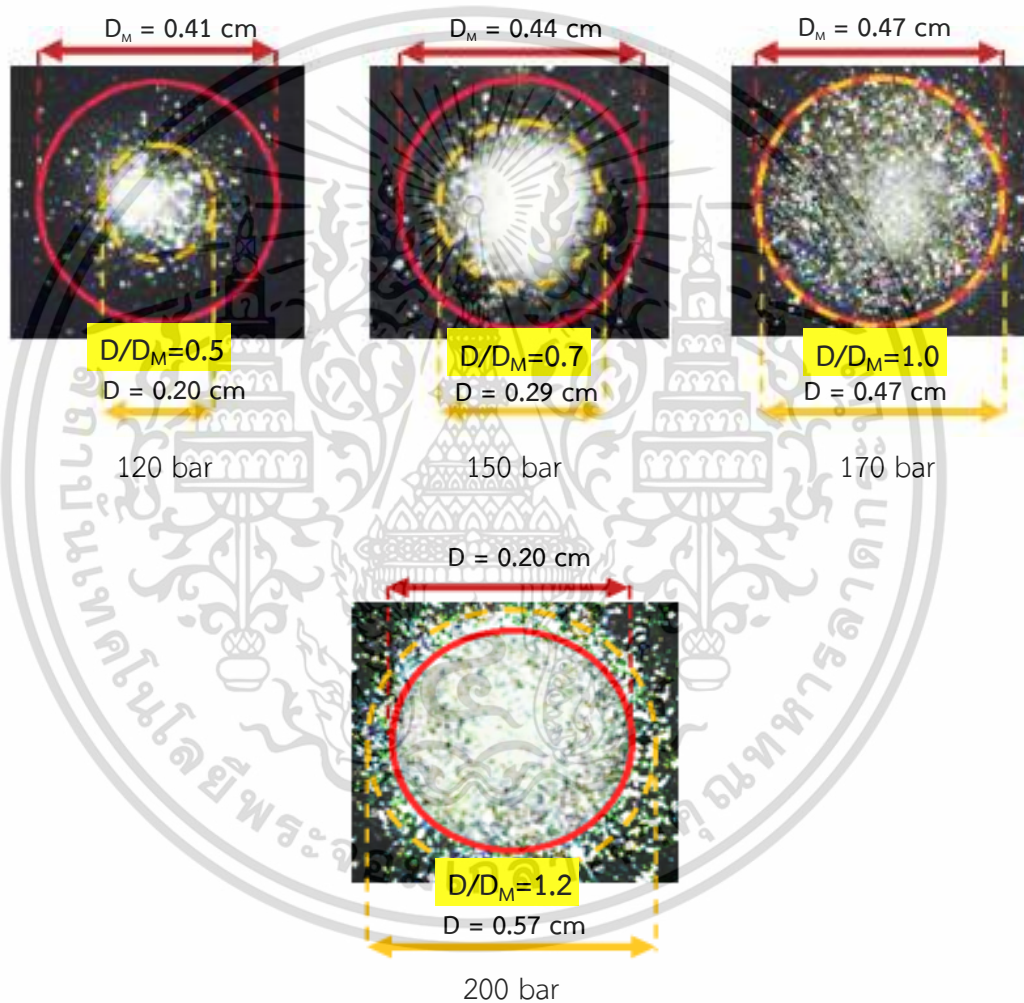
รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 2,000 เท่า ลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว (ก) 120 (ข) 150 และ (ค) 170 bar

การศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อการตกกระทบและการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิว PMMA เพื่อจำแนกลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ อธิบายได้จากค่าอัตราส่วนการกระจายตัวเฉลี่ย (Spread Ratio,  $D/D_M$ ) โดยอัตราส่วนการกระจายตัวเฉลี่ยของอนุภาคเป็นการเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวการเคลือบที่ได้จากการทดลอง ( $D$ ) เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวการเคลือบในทางทฤษฎี ( $D_M$ ) หรือเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระซึ่งแปรผันตรงกับความดันก่อนการขยายตัวโดย ค่า  $D_M$  [31,34] ประมาณค่าได้จากสมการที่ 4-15 โดยตั้งสมมุติฐานว่าพื้นผิวการเคลือบมีลักษณะเป็นวงกลมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคณะ P.Hirunsit และ B. Helfgen [31,34] ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์สามารถจำแนกได้จากอัตราส่วนการกระจายตัวดังนี้

- โดย  $D/D_M < 1$  แสดงถึงการตกกระทบและการกระจายตัวเกิดการทับถมปกติ (Deposition)
- $D/D_M = 1$  แสดงถึงการตกกระทบและการกระจายตัวเกิดการเหนียวนำไปเกิดการกระเด็นของอนุภาค (Induced Splashing)
- $D/D_M > 1$  แสดงถึงการตกกระทบและการกระจายตัวเกิดการกระเด็นของอนุภาคขึ้น (Splashing)

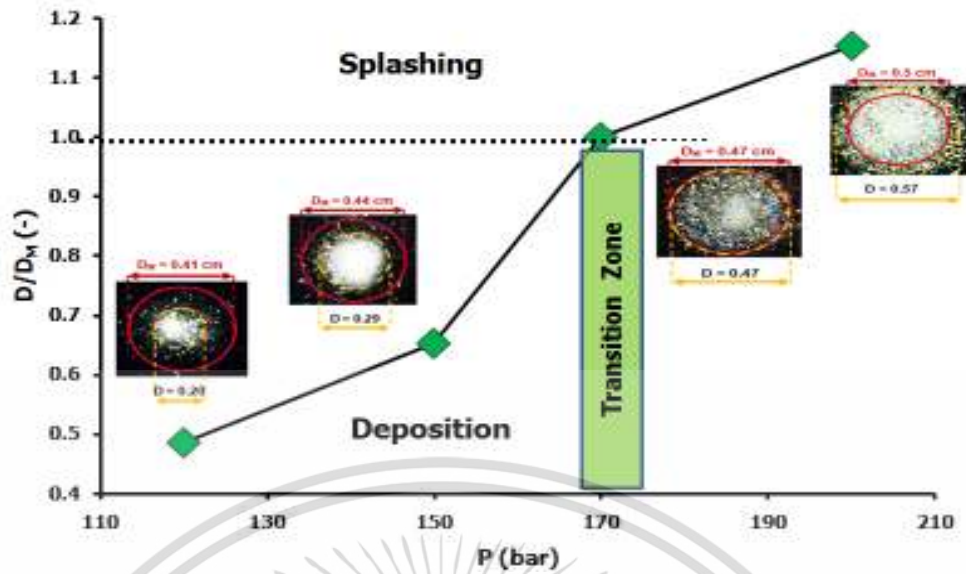
จากการศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัวต่ออัตราส่วนการกระจายตัวของพาราฟินแว็กซ์ผ่านการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายกำลังขยายสูง 120 เท่า โดยกำหนดค่า  $D$  คือ เส้นประ และ  $D_M$  คือ เส้นทึบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวอัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์จะมีค่ามากขึ้น โดยที่ความดันก่อนการขยายตัว 120 และ 150 bar อนุภาคพาราฟินแว็กซ์ส่วนใหญ่จะกระจายอยู่ในพื้นที่การเคลือบผิวทางทฤษฎีหรือ  $D_M$  และมีอัตราส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัว ( $D/D_M$ ) 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ อัตราส่วนการกระจายตัวที่น้อยกว่า 1 นี้แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่มีลักษณะเป็นแบบ Deposition [44,45] แต่เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวที่ 170 bar อนุภาคพาราฟินแว็กซ์จะมีอัตราส่วนการกระจายตัวเท่ากับ 1.0 ดังนั้นที่ความดัน 170 bar การกระทบของอนุภาคจะอยู่ในภาวะเหนียวทำให้เกิด Induced Splashing [44,45] ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์สูงขึ้นส่งผลต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของพื้นผิวมีความขรุขระน้อยลงและมีพาราฟินแว็กซ์ปกคลุมไม่ทั่วบริเวณหรือไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นมุมสัมผัสหยดน้ำที่ทดสอบได้จึงมีค่าลดลง ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่ออัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.25



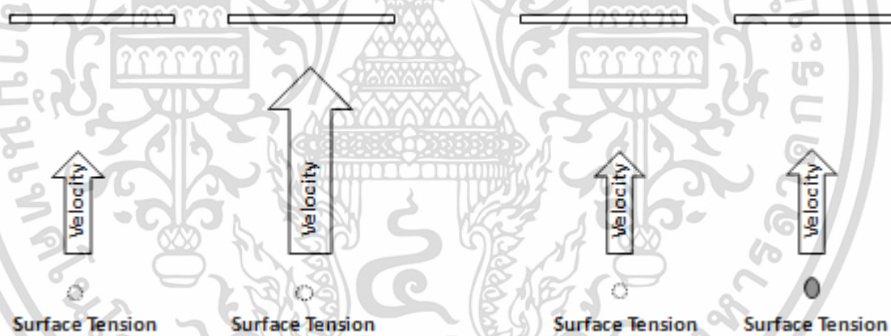
รูปที่ 4.24 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่ระยะพ่น 1 cm อุณหภูมิก่อนการขยายตัว  $85^{\circ}\text{C}$  ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150, 170 และ 200 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ผลของความดันก่อนการขยายตัวของอัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาค

การกระเด็นของอนุภาคสามารถอธิบายได้จากกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) อธิบายผ่านค่า Reynolds Number ( $Re$ ) และ Ohnesorge Number ( $Oh$ ) ได้ดังนี้ [44,45]



รูปที่ 4.26 การกระทบพื้นผิวกลุ่มอนุภาคเนื่องจากผลของความเร็วและผลของแรงตึงผิว ของกลุ่มอนุภาค

จากรูปที่ 4.26 พบว่าผลของความเร็วและแรงตึงผิวของของไหลที่เข้าชนแผ่น PMMA จะส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวและการทับถมของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ อธิบายได้ในรูปของ  $Re$  ซึ่งเป็นเลขดัชนีที่ใช้บอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล เป็นอัตราส่วนของ Inertia/Viscous แสดงได้ดังสมการที่ 4-28 [44,45]

$$Re = \frac{\rho L v_{\perp} D_d}{\mu_L} \quad (4-28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Oh$  แสดงอัตราส่วนระหว่าง Viscous/Surface Tension ดังสมการที่ 4-29 [44,45]

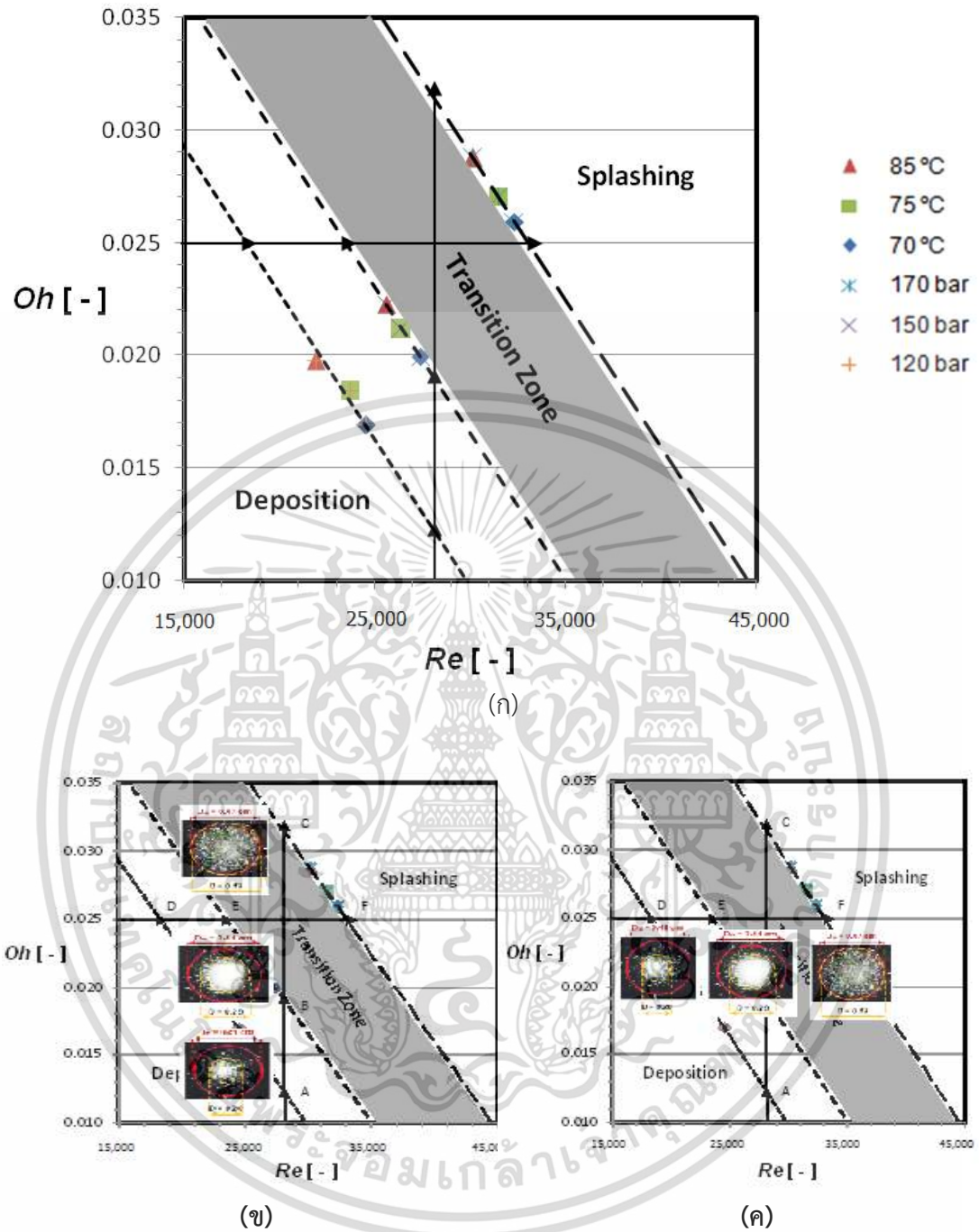
$$Oh = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma_L D_d}} \quad (4-29)$$

- โดย  $Re$  คือ Reynolds Number (-)  
 $Oh$  คือ Ohnesorge Number (-)  
 $\rho_L$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $v_{\perp}$  คือ ความหนืดโคเนมาติก ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $D_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)  
 $\mu_L$  คือ ความหนืดไดนามิกส์ของของไหล (Pa.s)  
 $\sigma_L$  คือ แรงตึงผิวของของไหล (N/m)

ค่า  $Re$  และ  $Oh$  สามารถอธิบายถึงลักษณะการกระทบของกลุ่มอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ว่ามีลักษณะที่เกิด Deposition หรือ Splashing ซึ่งส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิว ดังนี้

จากรูปที่ 4.27 (ก และ ข) เมื่อพิจารณาที่  $Re$  หรือความเร็วตกกระทบคงที่ ณ จุด A ที่ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar ซึ่งอยู่ในบริเวณการเกิด Deposition และมีค่าแรงตึงผิวค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวที่ 150 bar ณ จุด B ที่ความเร็วคงที่พบว่าค่าแรงตึงผิวมีค่าลดลงทำให้ค่า  $Oh$  มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าสู่ Transition Zone ซึ่ง ณ จุด B ยังคงอยู่ในบริเวณการเกิด Deposition แต่เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวจนทำให้ค่าแรงตึงผิวลดลงมากพอที่จะทำให้ค่าเกิด Induced Splashing ขึ้น ณ จุด C ที่ 170 bar พบว่าอนุภาคจะเริ่มเกิดการกระเด็น ซึ่งที่จุด C นี้เป็นจุดวิกฤต (Critical Point) ของการเปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์การเกิด Deposition และ Splashing และช่วงที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Transition Zone ดังแสดงในรูปที่ 4.27

ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 4.27 (ก และ ค) เมื่อพิจารณาที่ค่า  $Oh$  หรือแรงตึงผิวของของไหลคงที่ ณ จุด D ที่ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar ซึ่งอยู่ในบริเวณการเกิด Deposition โดยมีค่าความเร็วตกกระทบค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวที่ 150 bar ณ จุด E ความเร็วตกกระทบมีค่าสูงขึ้นทำให้ค่า  $Re$  มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าสู่ Transition Zone ซึ่ง ณ จุด E ยังคงอยู่ในบริเวณการเกิด Deposition แต่เมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นจนทำให้ความเร็วตกกระทบมากพอที่จะทำให้เกิด Induced Splashing ขึ้น ณ จุด F ที่ 170 bar พบว่าอนุภาคจะเกิด Induced Splashing ซึ่งที่ จุด C นี้เป็นจุดวิกฤต (Critical Point) ของการเปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์การเกิด Deposition และ Splashing ดังนั้นเมื่อพิจารณาเส้นประที่ผ่านจุด C และ F ซึ่งเป็นเส้นความดันคงที่จะสามารถกำหนดเส้นวิกฤตของการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิด Deposition และ Splashing ได้ และช่วงที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Transition Zone ดังแสดงในรูปที่ 4.27



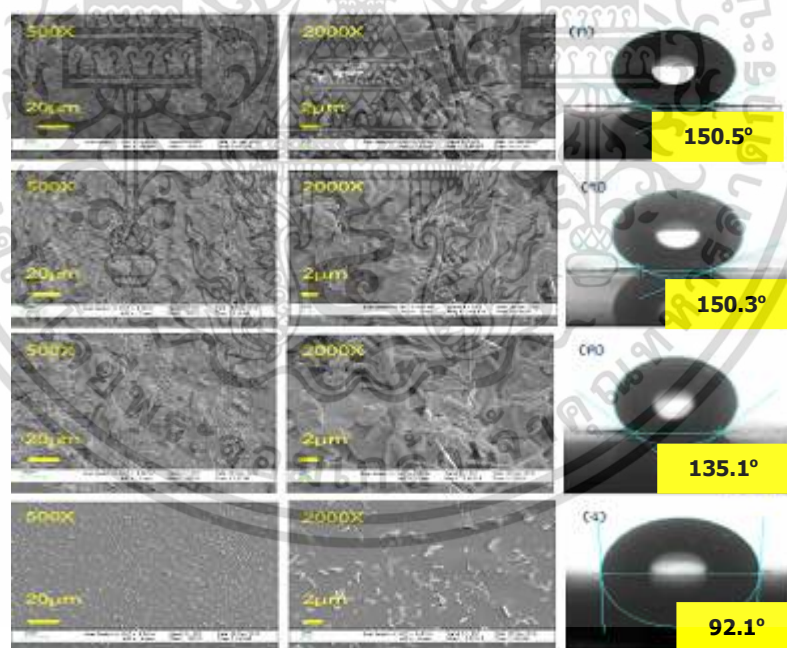
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Re$  และ  $Oh$   
 (ก) ผลของอุณหภูมิและความดันต่อค่า  $Re$  และ  $Oh$   
 (ข) การเปลี่ยนแปลงค่า  $Oh$  เมื่อค่า  $Re$  คงที่  
 (ค) การเปลี่ยนแปลงค่า  $Re$  เมื่อค่า  $Oh$  คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วย พาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยที่สำคัญ ปัจจัยแรก คือ ค่าการละลายของ พาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและความดันก่อนการ ขยายตัว โดยเมื่ออุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่ ละลายได้มีปริมาณมากขึ้นและมีขนาดอนุภาคเล็กลง จึงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดลักษณะสัณฐานวิทยา ของพื้นผิวที่มีความขรุขระมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ปัจจัยที่สอง คือ ลักษณะ การชนและการปะทะของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์กับแผ่น PMMA จากการศึกษาพบว่าความดันก่อน การขยายตัวส่งผลต่ออัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาค เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัว อัตราส่วนการกระจายตัวจะมีค่ามากขึ้นส่งผลทำให้สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA ลดลง หรือมีมุมสัมผัสของหยดน้ำลดลง

#### 4.5.4 การปรับเปลี่ยนมุมการพ่นเพื่อปรับปรุงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค พาราฟินแว็กซ์

ผลของมุมการพ่นระหว่างหัวฉีดกับแผ่น PMMA ที่มุม 90, 120, 135 และ 150° ตามลำดับ ต่อ ลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว ที่สภาวะอุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 150 bar แสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า และ 2,000 เท่า ของพื้นผิว PMMA ที่เคลือบผิวด้วย พาราฟินโดยแว็กซ์และมุมสัมผัสของหยดน้ำที่พ่นด้วยมุมต่างๆ (ก) 90 (ข) 120 (ค) 135 และ (ง) 150°

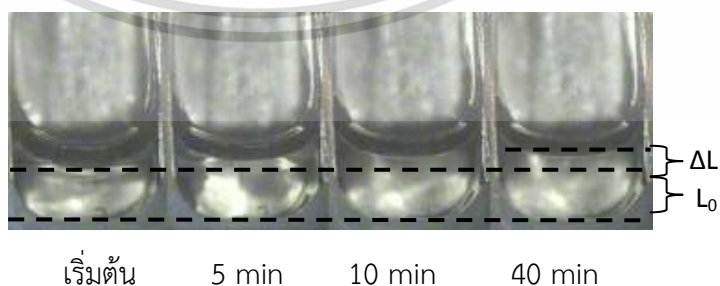
การศึกษาผลของมุมการพ่นระหว่างหัวฉีดและแผ่น PMMA ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและมุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่น PMMA หลังการเคลือบด้วยพาราฟินแว็กซ์ ที่การพ่นด้วยมุมตกกระทบ 90, 120, 135 และ 150° พบว่าที่มุมการพ่น 90 และ 120° ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเพียงเล็กน้อย โดยยังมีลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคที่มีการทับถมตัวในลักษณะแบบสุ่ม การกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่เคลือบอยู่บนแผ่น PMMA มีความแตกต่างกันน้อยมาก ทำให้มีมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ใกล้เคียงกัน คือ 150.5 และ 150.3° ตามลำดับ แต่การกระจายตัวดังกล่าวจะเริ่มเห็นผลชัดเจนที่มุมการพ่น 135° และเห็นความแตกต่างอย่างเด่นชัดเมื่อเปลี่ยนมุมการพ่นเป็น 150° พาราฟินแว็กซ์จะมีการกระจายตัวที่เป็นระเบียบและมีการทับถมของพาราฟินแว็กซ์เพียงชั้นเดียว ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคจะเกิดการสไลด์บนแผ่นหรือเกิดลักษณะคล้ายกับการปาดหน้าเค้กทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลต่อปริมาณความหนาแน่นของพาราฟินแว็กซ์บนแผ่น PMMA ลดลงทำให้มีมุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเหลือ 135.1 และ 92.1° ตามลำดับ เมื่อเพิ่มมุมของการพ่น

## ตอนที่ 2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS

### 4.6 การศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ด้วยเทคนิคการจับภาพ

กลไกสำคัญของกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองโดยเทคนิค PGSS คือ การแพร่และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในวัสดุหรือสารเคลือบผิวนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ผ่านเทคนิคการจับภาพด้วยกล้องวิดีโอ (Visualize Technique) โดยการสังเกตพฤติกรรมการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB โดยใช้กษณะทึบความดันสูงที่สามารถสังเกตการบวมตัวผ่านกระจกใส (Visualize Cell) ทำได้โดยการบันทึกภาพการบวมตัวของยางเหลว PB ที่เวลาต่างๆ ด้วยกล้องวิดีโอ จากการทดลองสามารถสังเกตค่าการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของยางเหลว PB กับเวลาต่างๆ ได้ โดยใช้ปริมาณยางเหลว PB 0.3 g ดังตัวอย่างรูปที่ 4.29

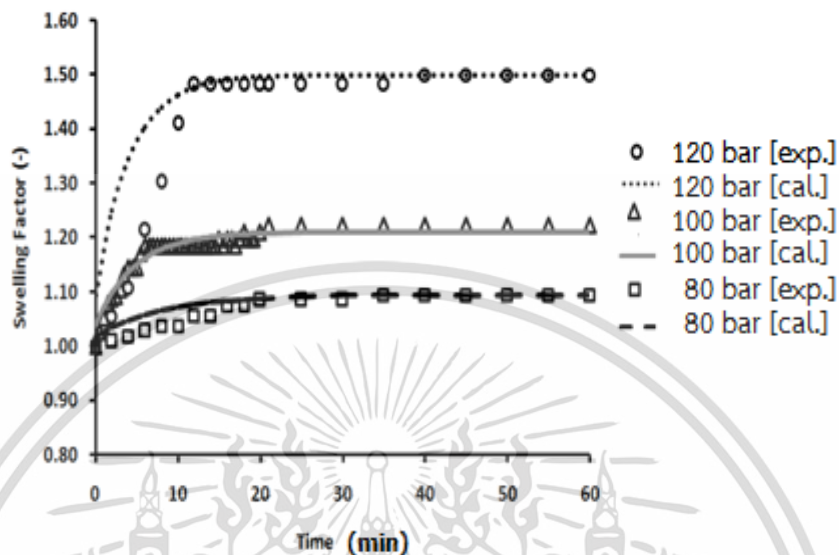


--- คือ เส้นบอกตำแหน่งอ้างอิงและระดับความสูงของยางเหลว PB ที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 4.29 ตัวอย่างการบวมตัวของยางเหลว PB ที่อุณหภูมิ 40°C ความดัน 120 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 สามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความสูง ( $\Delta L$ ) ของยางเหลว PB ที่เวลาต่างๆ เทียบกับความสูงเริ่มต้น ( $L_0$ ) ได้เพื่อคำนวณ หาค่า Swelling Factor จากสมการที่ 2-4 และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับเวลาที่อุณหภูมิคงที่  $40^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.30 พบว่าการบวมตัวของยางเหลว PB จะเกิดขึ้นในช่วง 10-20 min โดยสังเกตจากลักษณะความชันของกราฟที่เปลี่ยนแปลงไป ความชันของกราฟที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลจากการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์หรือวิกฤตเข้าไปในยางเหลว PB หลังจากนั้นการบวมตัวของยางเหลว PB จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนถึงภาวะสมดุลการแพร่หรือไม่มีการบวมตัวเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของความดันต่อการบวมตัวของยางเหลว PB พบว่าค่า Swelling Factor แปรผันตรงกับความดัน โดยเมื่อเพิ่มความดันยางเหลว PB จะบวมตัวมากขึ้น เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์หรือวิกฤตละลายในยางเหลว PB เพิ่มมากขึ้น [30] ทำให้ปริมาตรรวมของสารผสมเพิ่มขึ้นดังที่สังเกตได้จากการบวมตัวที่เกิดขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์หรือวิกฤตสามารถละลายเข้าไปในยางเหลว PB และสามารถนำยางเหลว PB มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค PGSS ได้

จากผลการทดลองสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ในยางเหลว PB ได้จากสมการที่ 2-5 ผลการประมาณค่าแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่ามากขึ้น เนื่องจากพลังงานจลน์ของระบบเพิ่มขึ้นและความหนืดของพอลิเมอร์ที่ลดลงเกิดการแพร่ได้เร็วขึ้นตามแนวโน้มความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส [46]

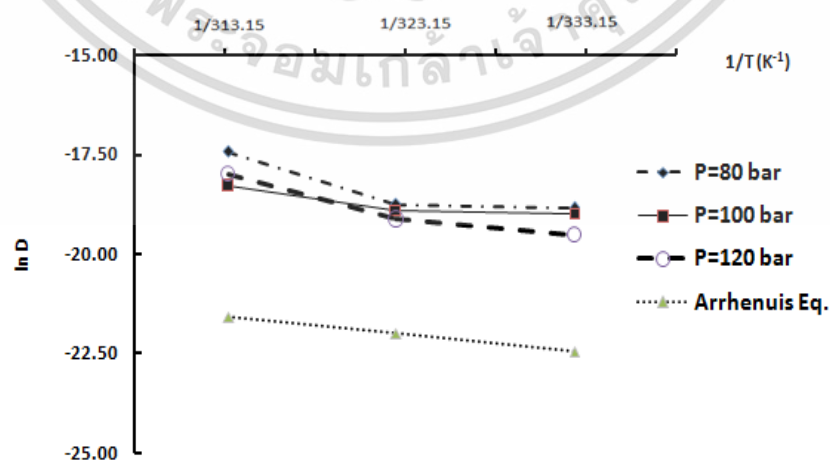
ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB

ความดัน (bar)	สัมประสิทธิ์การแพร่ $scCO_2$ ในยางเหลว PB ( $m^2/s$ )		
	40°C	50°C	60°C
80	$6.5 \times 10^{-9}$	$7.2 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-8}$
100	$5.7 \times 10^{-9}$	$6.2 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-8}$
120	$1.7 \times 10^{-8}$	$4.9 \times 10^{-9}$	-
100	-	$*1.1 \times 10^{-9}$	-
1	** $1.8 \times 10^{-10}$	** $2.8 \times 10^{-10}$	** $4.2 \times 10^{-10}$

\* จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตของ Masaaki Kojima และคณะ ในยาง Isoprene 2,200 [47]

\*\* ค่าจากการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสที่ความดันบรรยากาศ 1 bar [46]

จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln D$  กับ  $1/T$  พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสมีความสอดคล้องกัน คือ มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.31 และพบว่าความดันมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลของอุณหภูมิ โดยสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถประมาณเวลาในการดำเนินการของกระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB ด้วยเทคนิค PGSS เบื้องต้นได้



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln D$  กับ  $1/T$

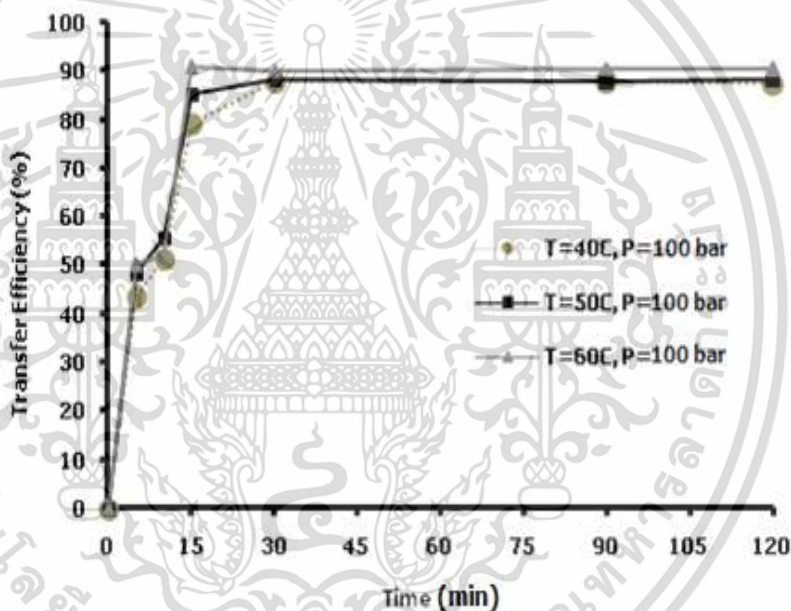
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันต่อประสิทธิภาพการพ่นของกระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS

ประสิทธิภาพการพ่นของระบบเป็นค่าที่แสดงถึงความคุ้มค่าของกระบวนการ โดยแสดงอัตราส่วนของปริมาณพอลิเมอร์ที่เคลือบบนพื้นผิวเทียบกับปริมาณใส่เข้าไปในภาชนะทนความดันสูง การศึกษานี้จึงทำการทดลองผลอุณหภูมิและความดันที่มีต่อประสิทธิภาพการพ่น โดยประสิทธิภาพการพ่นประมาณค่าได้จากสมการที่ 2-10

##### 4.7.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการพ่น

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการพ่นที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ความดันคงที่ 100 bar ระยะการพ่น 15 cm ปริมาณยางเหลว PB 0.3 g ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.32

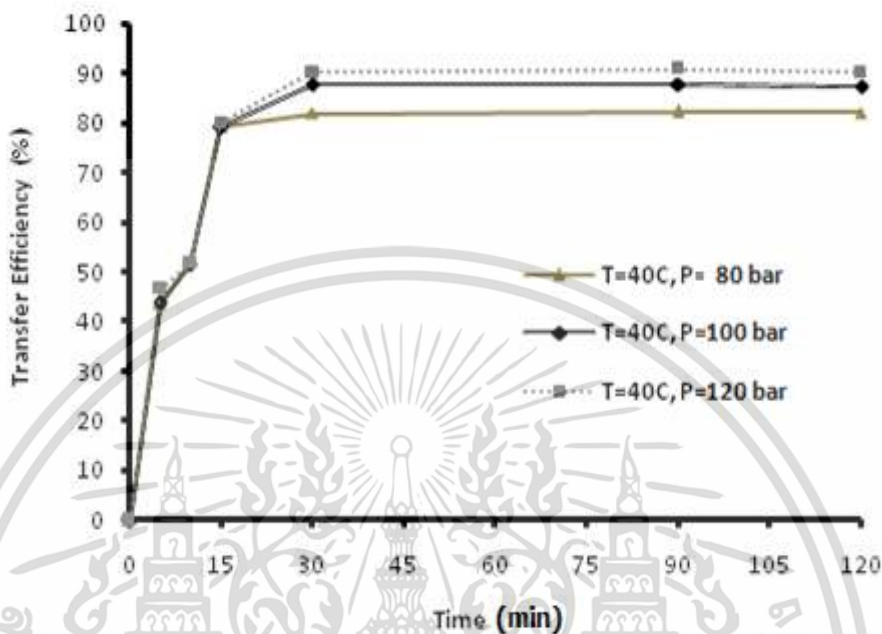


รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการพ่น

จากรูปที่ 4.32 เมื่อพิจารณาแกนนอนพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เวลาที่ระบบมีประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดคงที่มีค่าลดลง โดยอุณหภูมิ 40°C เวลาที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดคงที่ประมาณ 15 min และที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C เวลาที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดคงที่ประมาณ 30 min โดยมีประสิทธิภาพการพ่นประมาณ 90% ผลการทดลองสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีสัมประสิทธิ์การแพร่ในยางเหลว PB เพิ่มขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ระบบมีระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการละลายระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและยางเหลว PB เร็วขึ้น

#### 4.7.2 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการพ่น

การศึกษาผลของความดันต่อประสิทธิภาพการพ่นที่ความดัน 80, 100 และ 120 bar อุณหภูมิคงที่ 40°C ระยะการพ่น 15 cm ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 4.33






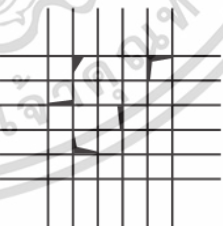
รูปที่ 4.33 ผลของความดันประสิทธิภาพการพ่น

จากรูปที่ 4.33 เมื่อพิจารณาแก่นนอนพบว่า การเพิ่มความดันไม่ส่งผลต่อเวลาที่ระบบมีประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดมีค่าคงที่ คือ 30 min เท่ากัน อธิบายได้จากความดันส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่เพียงเล็กน้อยทำให้เวลาที่เข้าสู่สมดุลของแพร์คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB มีระยะเวลาที่ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาแก่นตั้งพบว่า เมื่อเพิ่มความดันจาก 80, 100 และ 120 bar ที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดคงที่เพิ่มขึ้นจาก 80, 88 และ 90% ตามลำดับ อธิบายได้จากเมื่อเพิ่มความดันความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB มีค่าสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอิลฟ์และคณะ [30] และอธิบายได้จากพฤติกรรมการบวมตัวที่มากขึ้นทำให้ความหนืดของสารผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตกับยางเหลว PB มีค่าลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดคงที่ของระบบจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

#### 4.8 การศึกษาผลของสารเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลต่อการยึดติดกับพื้นผิว

จากการศึกษาผลของสาร DCP ต่อการยึดติดระหว่างฟิล์มยางเหลว PB กับแผ่น PCB ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM : D 3359 แบบ B โดยใช้ยางเหลว PB 0.5 g และสาร DCP 0.7 phr ที่สภาวะการพ่น อุณหภูมิ 60°C ความดัน 80 bar บนแผ่น PCB จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 30 min ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อใส่สาร DCP ทำให้ระดับการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB ซึ่งทำจากทองแดงเพิ่มมากขึ้น คือ ที่ระดับ 4B เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใส่สาร DCP ซึ่งมีระดับการยึดติดกับแผ่น PCB ที่ระดับ 0B ทั้งนี้เนื่องจากสาร DCP ทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลยางหรือเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน ส่งผลให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ เปลี่ยนสภาพยางเหลว PB จากสภาพอ่อนและไหลได้แบบเทอร์โมพลาสติกเป็นเทอร์โมเซตส่งผลให้ยางแข็งตัวมีการยึดติดหรือมีความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้นรวมทั้งมีคุณสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

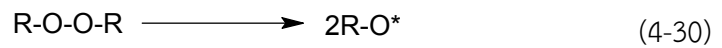
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการยึดติดระหว่างชั้นยางเหลว PB กับแผ่น PCB ระหว่างไม่เติมสาร DCP และเติมสาร DCP 0.7 phr

ชนิดของชิ้นงาน	ชิ้นงานหลังการทดสอบ	ลักษณะตามมาตรฐาน ASTM : D 3359	ระดับการยึดติด
ไม่ใส่สาร DCP			0B
ใส่สาร DCP 0.7 phr			4B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางเหลว PB ด้วยเปอร์ออกไซด์สามารถอธิบายกลไกการเกิดได้ดังนี้

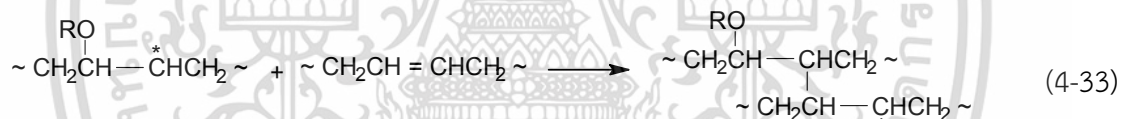
เมื่อสารเปอร์ออกไซด์ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน แสงแดด หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต เปอร์ออกไซด์ก็จะเกิดการสลายตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระดังสมการที่ 4-30



สำหรับ DCP เมื่อเกิดการสลายตัวจะได้อนุมูลอิสระของอัลคอกซี 2 ตัว ดังสมการที่ 4-31 [22]



สำหรับยางเหลว PB ซึ่งมีพันธะคู่ภายในโมเลกุล อนุมูลอิสระของ DCP ที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับยางเหลว PB ที่ตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นอนุมูลอิสระของยางเหลว PB และทำปฏิกิริยารวมกันเกิดการเชื่อมขวางทางเคมีขึ้น ดังสมการที่ 4-32 และ 4-33 ตามลำดับ [48]


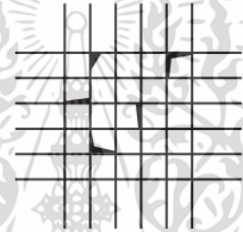
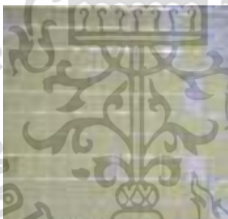


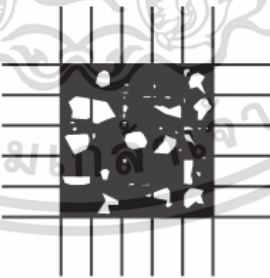


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9 ศึกษาผลของเวลาในการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของยางเหลว PB ต่อการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB

การศึกษาผลของเวลาในการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลหรือการอบของยางเหลว PB ต่อการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM : D 3359 แบบ B โดยพ่นละอองสารละลายยางเหลว PB 0.5 g ที่เติมสาร DCP 0.7 phr บนแผ่น PCB ที่ความดัน 80 bar อุณหภูมิ 60°C จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 160°C โดยใช้เวลาอบ 30, 60 และ 90 min ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

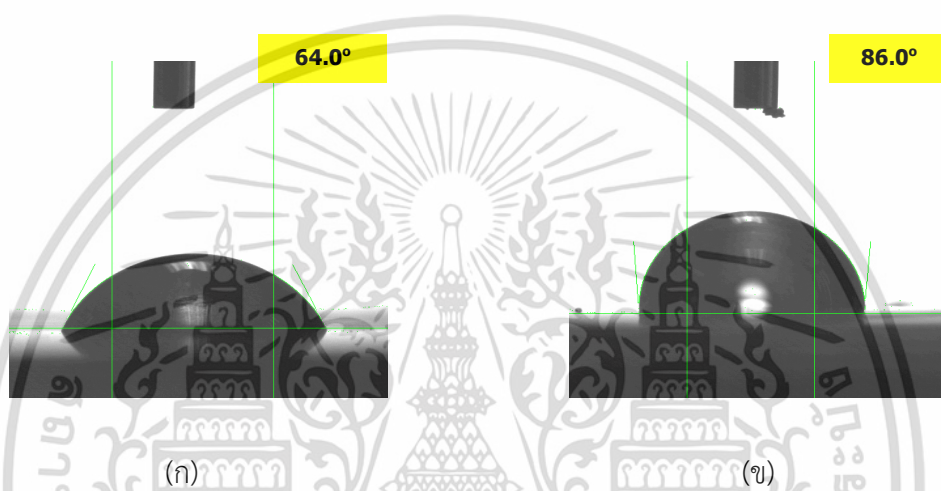
ตารางที่ 4.4 ผลการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB เวลาในการอบ 30, 60 และ 90 min

เวลาอบ (min)	ชิ้นงานหลังการทดสอบ	ลักษณะตามมาตรฐาน ASTM : D 3359	ระดับการยึดติด
30			4B
60			3B
90			0B

จากตารางที่ 4.4 พบว่าที่เวลา 30 min มีระดับการยึดติดที่ดีที่สุดที่ระดับ 4B และระดับการยึดติดลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการอบเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนของยางเหลว PB ทำให้ระดับการยึดติดพื้นผิวลดต่ำลง

#### 4.10 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

การทดสอบการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว PCB ก่อนและหลังการเคลือบด้วยยางเหลว PB โดยใช้เทคนิค PGSS เพื่อทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว แสดงได้ดังรูปที่ 4.34 พบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว PCB ก่อนการเคลือบด้วยยางเหลว PB เท่ากับ  $64.0^{\circ}$  และสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวแผ่น PCB หลังการเคลือบด้วยยางเหลว PB มีค่าเท่ากับ  $86.0^{\circ}$  ซึ่งแสดงถึงระดับความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเคลือบยางเหลว PB บนแผ่น PCB สามารถเพิ่มระดับความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวได้



รูปที่ 4.34 ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว PCB  
 (ก) แผ่น PCB ก่อนการเคลือบผิว  
 (ข) แผ่น PCB หลังเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### ตอนที่ 1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS

##### 5.1 สมดุลวัฏภาคระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์

การศึกษาสมดุลวัฏภาคระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์ พบว่าพาราฟินแว็กซ์เป็นสารที่มีความสามารถในการละลายในวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันพาราฟินแว็กซ์จะมีความสามารถในการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเพิ่มมากขึ้น

##### 5.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์บนแผ่น PMMA โดยเทคนิค RESS ต่อคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS พบว่าที่ระยะการพ่น 1 cm เป็นระยะที่มีความเหมาะสมกับกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิคดังกล่าว โดยมีสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวเพิ่มขึ้นจาก  $80.0^{\circ}$  เป็น  $135.4^{\circ}$

##### 5.3 การเกิดอนุภาคโดยเทคนิค RESS

การเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว  $40-85^{\circ}\text{C}$  ความดันก่อนการขยายตัว 120-170 bar ระยะการพ่น 1 cm จากการศึกษาพบว่าสามารถผลิตอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ที่มีขนาด 2.0-10.0  $\mu\text{m}$  โดยสามารถควบคุมปัจจัยที่มีขนาดอนุภาคได้ 3 ปัจจัย คือ เมื่ออุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้น และการเติมซอพิทอลเป็นสารก่อผลึกส่งผลให้พาราฟินแว็กซ์มีขนาดอนุภาคเล็กลง

##### 5.4 การศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ผลจากการศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตของกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว  $70-85^{\circ}\text{C}$  ความดันก่อนการขยายตัว 120-170 bar ระยะการพ่น 1 cm โดยสมมุติให้ระบบการไหลภายในท่อเป็นแบบ isentropic ผลการศึกษาสามารถประมาณค่าสมบัติทางกายภาพต่างๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความดันที่ปลายหัวฉีดมีค่าประมาณ 40-60 bar
- ความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีดมีค่าประมาณ 300-500 kg/m<sup>3</sup>
- ความเร็วเชิงเส้นที่ปลายหัวฉีดมีค่าประมาณ 200 m/s
- ความเร็วตกกระทบบนพื้นผิว PMMA มีค่าประมาณ 800-900 m/s

## 5.5 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

ผลจากการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแร็กซ์ พบว่าเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่มด้วยสารละลายผสมระหว่างพาราฟินแร็กซ์และโทลูอีนสามารถเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA จาก 80.0° เป็น 111.0° และสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแร็กซ์โดยเทคนิค RESS พบว่าสามารถสร้างพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำ 150.5° ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 150 bar

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแร็กซ์โดยเทคนิค RESS ไปปรับปรุงและเป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิววัสดุหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ PMMA เป็นองค์ประกอบ เช่น กระจกนาฬิกา เป็นต้น หรือประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิวกระดาษเพื่อป้องกันความชื้นได้

## ตอนที่ 2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS

### 5.6 การศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ด้วยเทคนิคการจับภาพ

จากการศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB โดยสังเกตจากพฤติกรรมการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากการละลายคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 40-60°C ความดัน 80-120 bar พบว่า สามารถสังเกตการบวมตัวได้อย่างชัดเจนโดยการบวมตัวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น และสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB อยู่ในช่วง 10<sup>-8</sup>-10<sup>-9</sup> m/s โดยสัมประสิทธิ์การแพร่จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

## 5.7 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันต่อประสิทธิภาพการพ่นของกระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อระยะเวลาที่ระบบมีประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดของระบบที่อุณหภูมิ 40 และ 50°C ระบบมีระยะเวลาที่มีประสิทธิภาพการพ่นสูงสุด 30 min และที่ 60°C มีระยะเวลา 15 min โดยประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดคงที่มีค่าประมาณ 90% และพบว่าเมื่อเพิ่มความดันประสิทธิภาพการพ่นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น

## 5.8 การศึกษาผลของสารเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลต่อการยึดติดกับพื้นผิว

ผลของการใส่สาร DCP ต่อการยึดติดพื้นผิวตามวิธีทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM : D 3359 แบบ B พบว่าเมื่อใส่สาร DCP ทำให้ระดับการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB มากขึ้นจากระดับ 0B เป็น 4B

## 5.9 ศึกษาผลของเวลาในการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของยางเหลว PB ต่อการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB

การศึกษาผลของเวลาในการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของยางเหลว PB ต่อการยึดติดระหว่างยางเหลว PB กับแผ่น PCB พบว่าที่เวลา 30 min มีระดับการยึดติดที่ดีที่สุดที่ระดับ 4B และระดับการยึดติดลดลงเมื่อเวลาการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น

## 5.10 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

จากการศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวแผ่น PCB ก่อนและหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยยางเหลว PB พบว่ามีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นจาก 64.0° เป็น 86.0°

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำการเคลือบผิวโดยเทคนิค PGSS ด้วยยางเหลว PB ไปปรับปรุงและเป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ในการป้องกันความชื้นของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้นได้

## ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษากระบวนการเคลือบผิว PMMA ด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ควรมีการปรับปรุงการยึดติดของพาราฟินแว็กซ์กับพื้นผิว PMMA โดยทำการศึกษาการนำสารเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลและองค์ประกอบที่มีพันธะไม่อิ่มตัวมาผสมรวมในระบบ

2. ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำเอาสารเคลือบผิวและแผ่นทดสอบชนิดอื่น เพื่อความหลากหลายในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

3. ในกระบวนการเคลือบแผ่น PCB ด้วยยางเหลว PB โดยเทคนิค PGSS ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในการเพิ่มสารเติมแต่งในระบบ เพื่อปรับปรุงความขรุขระของพื้นผิวหลังการเคลือบผิวที่จะช่วยเพิ่มระดับความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] M. F. Kemmere and T. Meyer. **Supercritical Carbon Dioxide in Polymer Reaction Engineering**. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & KGaA, Inc. 2005.
- [2] Y. Chernyak, F. Henon, R. B. Harris, R. D. Gould, R. K. Franklin, J. R. Edwards, J. M. De Simone and R. G. Carbonell, "Formation of Perfluoropolyether Coatings by the Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) Process. Part 1 : Experimental." **Ind. Eng. Chem. Res.**, vol. 41, 2001. pp. 6,118-6,126.
- [3] S. Yeo and E. Kiran, "Formation of Polymer Particles with Supercritical Fluids : A Review." **J. of Supercritical Fluids**, vol. 34, 2005. pp. 287-308.
- [4] D. A. Doshi, P. B. Shah, S. Singh, E. D. Branson, A. P. Malanoski, E. B. Watkins, J. Majewski, F. van Swol and C. J. Brinker, "Investigating the Interface of Superhydrophobic Surfaces in Contact with Water." **Langmuir**, vol. 21 (No. 17), 2005. pp. 7,805-7,811.
- [5] B. Bhusan, Y. C. Jung and K. Koch, "Micro-, Nano- and Hierarchical Structures for Superhydrophobicity, Self-Cleaning and Low Adhesion." **Phil. Trans. R. Soc**, vol. 367, 2009. pp. 1,631-1,672.
- [6] I. Rodriguez-Meizoso, P. Olin, J. Illergard, L. Wagberg, and C. Turner. "Rapid Expansion of Supercritical Solutions from Ternary Mixtures" **10th International Symposium on Supercritical Fluids**. 13-16 May 2012.
- [7] **Nanotechnology could soon help bring out clothes that don't need a wash**. [Online]. Available: <http://www.deccanchronicle.com/channels/sci-tech/future/nanotechnology-could-soon-help-bring-out-clothes-dont-need-wash-171.2012>.
- [8] **Smart Surfaces with Nano Technology**. [Online]. Available: [http://digital\\_collect.lib.buu.ac.th/journal/Science/v16n1/124-130.pdf](http://digital_collect.lib.buu.ac.th/journal/Science/v16n1/124-130.pdf).2012.
- [9] A. A. Tracton. **Coatings Technology Handbook**. 3rd ed. North Weat : Taylor & Francis Group, LLC, Inc. 2006.
- [10] F. ois Cansell, C. Aymonier and A. Loppinet-Serani, "Review on Materials Science and Supercritical Fluids." **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, vol. 7, 2003. pp. 331-340.
- [11] S. P. Nalawade, F. Picchioni and L. P. B. M. Janssen, "Supercritical Carbon Dioxide as a Green Solvent for Processing Polymer Melts : Processing Aspects and Applications." **Prog. Polym. Sci.**, vol. 31, 2006. pp. 19-43.
- [12] W. Leitner, "Supercritical Carbon Dioxide as a Green Reaction Medium for Catalysis." **Acc. Chem. Res.**, vol. 35, 2002. pp. 746-756.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] E. L. Paul, H. Tung and M. Midler, "Organic Crystallization Processes." **Powder Technology**, vol. 150, 2005. pp. 133-143.
- [14] J. B. Rawlings, S. M. Miller and W. R. Witkowski, "Model Identification and Control of Solution Crystallization Processes : A Review." **Ind. Eng. Chem. Res.**, vol. 32, 1993. pp. 1,275-1,296.
- [15] Y. Sun, M. J. Meziani, P. Pathak and L. Qu, "Polymeric Nanoparticles from Rapid Expansion of Supercritical Fluid Solution." **Chem. Eur. J.**, vol. 11, 2005. pp. 1,366-1,373.
- [16] A. V. M. Nunes and C. M. M. Duarte, "Dense CO<sub>2</sub> as a Solute, Co-Solute or Co-Solvent in Particle Formation Processes : A Review." **Materials**, vol. 4, 2011. pp. 2,017-2,041.
- [17] Wikipedia. **Gas Flow Through De Laval Nozzle**. [online]. Available:[http://en.wikipedia.org/wiki/De\\_Laval\\_nozzle](http://en.wikipedia.org/wiki/De_Laval_nozzle). 2013.
- [18] McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Physics. **Mach Number of Compressible Flow**. [online]. Available: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/compressible+flow>. 2012.
- [19] J. Genzer and K. Efimenko, "Recent Developments in Superhydrophobic Surfaces and Their Relevance to Marine Fouling : A Review." **Biofouling**, vol. 22, 2006. pp. 339-360.
- [20] L. Huynh, Q. Do, N. S. Kasim and Y. Ju, "Isolation and Analysis of Wax Esters from Activated Sludge." **Bioresource Technology**, vol. 102, 2011. pp. 9,518-9,523.
- [21] **Semi Refined White Paraffin Wax**. [Online]. Available: [http://boss-wax.com/Semi\\_Refined\\_Paraffin\\_Wax.php](http://boss-wax.com/Semi_Refined_Paraffin_Wax.php). 2012.
- [21] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). 2547.
- [22] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. สารเคมียาง. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). 2548.
- [23] J. Crank. **The Mathematics of Diffusion**. 2nd ed. London : Oxford University Press, Inc. 1975.
- [24] S. Areerat, E. Funami, Y. Hayata, D. Nakagawa and M. Oshima, "Measurement and Prediction of Diffusion Coefficients of Supercritical CO<sub>2</sub> in Molten Polymers." **Polym. Eng. Sci.**, vol. 44, 2004. pp. 1,915-1,924.
- [25] D. G. Baird and D. I. Collias. **Polymer Processing Principle and Design**. New York : John Willey & Son, Inc. 1998.
- [26] W. R. Vieth. **Diffusion and Through Polymers**. New York : Hanser, Inc. 1990.
- [27] F. Bulian and J. A. Graystone. **Industrial Wood Coatings : Theory and Practice**. Amsterdam (Netherlands) : Elsevier, Inc. 2009.

- [28] J. Shim, M. Z. Yates and K. P. Johnston, "Polymer Coatings by Rapid Expansion of Suspensions in Supercritical Carbon Dioxide." **Ind. Eng. Chem. Res.**, vol. 38, 1999. pp. 3,655-3,662.
- [29] C. Quan, O. Werner, L. Wagberg, and C. Turner, "Generation of Superhydrophobic Paper Surfaces by a Rapidly Expanding Supercritical Carbon Dioxide-Alkyl Ketene Dimer Solution." **J. of Supercritical Fluids**, vol. 49, 2009. pp. 117-124
- [30] อลิฟ ตือเร๊ะ. "การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยกระบวนการเคมีเชิงแสงและการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2011.
- [31] P. Hirunsit, Z. Huang, T. Srinophakun, M. Charoenchaitrakool and S. Kawi, "Particle Formation of Ibuprofen-Supercritical CO<sub>2</sub> System from Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) : A Mathematical Model." **Powder Technology**, vol. 154, 2005. pp. 83-94.
- [32] A. H. Mohammadi, A. Eslamimanesh and D. Richon, "Wax Solubility in Gaseous System: Thermodynamic Consistency Test of Experimental Data." **Ind. Eng. Chem. Res.**, vol. 50, 2011. pp. 4,731-4,740.
- [33] R. B. Gupta and J. Shim. **Solubility in Supercritical Carbon Dioxide**. 1st ed. New York : Taylor & Francis Group, Inc. 2007.
- [34] B. Helfgen , M. Turk and K. Schaber, "Theoretical and Experimental Investigations of the Micronization of Organic Solids by Rapid Expansion of Supercritical Solutions." **Powder Technology**. vol. 110, 2000. pp. 22-28.
- [35] D. Erdemir, A. Y. Lee and A. S. Myerson, "Nucleation of Crystals from Solution : Classical and Two-Step Models." **Accounts of Chemical Research**. vol. 42, 2009. pp. 621-629.
- [36] N. Rodriguez-Hornedo and D. Murphy, "Significance of Controlling Crystallization Mechanisms and Kinetics in Pharmaceutical Systems." **J. of Pharmaceutical Sciences**. vol. 88, 1999. pp. 651-660.
- [37] H. Kwak, J. W. Jung, S. Y. Bae and H. Kumazawa, "Preparation of Anthracene Fine Particles by Rapid Expansion of a Supercritical Solution Process Utilizing Supercritical CO<sub>2</sub>." **Korean J. Chem. Eng.** vol. 21, 2004. pp. 1,245-1,249.
- [38] Y. Jin, A. Hiltner and E. Baer, "Effect of a Sorbitol Nucleating Agent on Fractionated Crystallization of Polypropylene Droplets." **J. of Polymer Science**. vol. 45, 2007. 1,788-1,797.
- [39] M. Li and P. D. Christodes, "Modeling and Analysis of HVOF Thermal Spray Process Accounting for Powder Size Distribution." **Chemical Engineering Science**. vol. 58, 2003. pp. 849-857.

- [40] B. Jodoin, “Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation.” **J. of Thermal Spray Technology**. vol. 11, 2012. pp. 496-507.
- [41] W. L. McCabe, J. C. Smith and Peter Harriott. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7th ed. New York : McGraw-Hill, Inc. 2005.
- [42] J. Tsai and Y. Chen, “Application of a Volume-Translated Peng Robinson Equation of State on Vapor-Liquid Equilibrium Calculations.” **Fluid Phase Equilibrium**. vol. 145, 1998. pp. 193-215.
- [43] M. Grujicic, C.L. Zhao, C. Tong, W.S. DeRosset and D. Helfritch, “Analysis of the Impact Velocity of Powder Particles in the Cold-Gas Dynamic-Spray Process.” **Materials Science and Engineering**. vol. A368, 2004. pp. 222-230.
- [44] R. D. Andrade, O. Skurtys and F. A. Osorio, “Atomizing Spray Systems for Application of Edible Coatings.” **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. vol. 11, 2012. pp. 323-337.
- [45] D. Suzzi, S. Radl and J. G. Khinast, “Local Analysis of the Tablet Coating Process : Impact of Operation Conditions on Film Quality.” **Chemical Engineering Science**. vol. 65, 2010. pp. 5,699-5,715.
- [46] D. G. Baird and D. I. Collias. **Polymer Processing Principles and Design**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [47] M. Kojima, M. Tosaka, E. Funami, K. Nitta, M. Ohshima And S. Kohjiya. “Phase Behavior of Cross-linked Polyisoprene Rubber and Supercritical Carbon Dioxide.” **J. of Supercritical Fluids**. vol. 35, 2005. pp. 175-181
- [48] L. D. LOAN. “Peroxide Cross Linking Reactions of Polymers.” **Pure Appl. Chem.**, vol. 30, 1972. pp. 173-180.
- [49] M. O’Brien. **The Tale of the Tape-ASTM D 3359**. [Online]. Available : [www.butlerme.com/serices/The-Tale-of-the-Tape-ASTM-D3359.pdf](http://www.butlerme.com/serices/The-Tale-of-the-Tape-ASTM-D3359.pdf).2012.
- [50] ASTM International. **ASTM D 3359-02 Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test**. [Online]. Available : <http://65.209.24.102/DOWNLOAD/D3359.1272742-1.pdf>.2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
การประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์  
ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการสถานะของ Peng-Robinson ผ่านโปรแกรมการคำนวณ Matlab 7.7.0 (R2008b) สามารถเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```
%%Cal Solubility
clear all
clc

%% Input data
T=input('Input T :')
P=input('Input P :')
k12=0.12;
%end Input data
%% parameter
Tcco2=304.2; Pcco2=73.83; wco2=0.239; Trco2=T/Tcco2;
Tcc28= 804.0; Pcc28=9.80; wc28=1.071;RG=8.314; %I. Nieuwoud c28

Trc28=T/Tcc28 ;
aco2=(0.45724)*((RG^2)*((Tcco2^2)/Pcco2)) ;
bco2=(0.0778)*((RG*Tcco2)/Pcco2) ;
ac28=(0.45724)*((RG^2)*((Tcc28^2)/Pcc28)) ;
bc28=(0.0778)*((RG*Tcc28)/Pcc28) ;
afco2=(1+((0.37464+(1.54226.*wco2)-(0.26992.*(wco2^2)))*(1-
Trco2^0.5)))^2 ;
afc28=(1+((0.37464+(1.54226.*wc28)-(0.26992.*(wc28^2)))*(1-
Trc28^0.5)))^2 ;
aTco2=aco2*afco2 ;
aTc28=ac28*afc28 ;
sigma=1+(2^0.5) ;
fclon=1-(2^0.5) ;
% end parameter

%% sub Solve for Z

Aco2=(aco2*afco2)*(P/((RG^2)*(T^2))) ;
Bco2=(bco2*P)/(RG*T) ;
Ac28=(ac28*afc28)*(P/((RG^2)*(T^2))) ;
Bc28=(bc28*P)/(RG*T) ;

syms x
c1=1; c2=1-Bco2; c3=Aco2-(3.*(Bco2.^2))-(2.*Bco2); c4=(Aco2.*Bco2)-(
(Bco2.^2)-(Bco2.^3));
%c=[c1 -c2 c3 -c4] ;
%z=roots(c) ;
%z1=z(3);
Z=(c1*(x^3))-(c2*(x^2))+(c3*x)-c4 ;
z=solve(Z,x);
z=z(1);
z=subs(z,{c1,c2,c3,c4},{c1,c2,c3,c4});
```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ทำซ้ำได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

```

% end sub solve for Z

%% sub fugacity

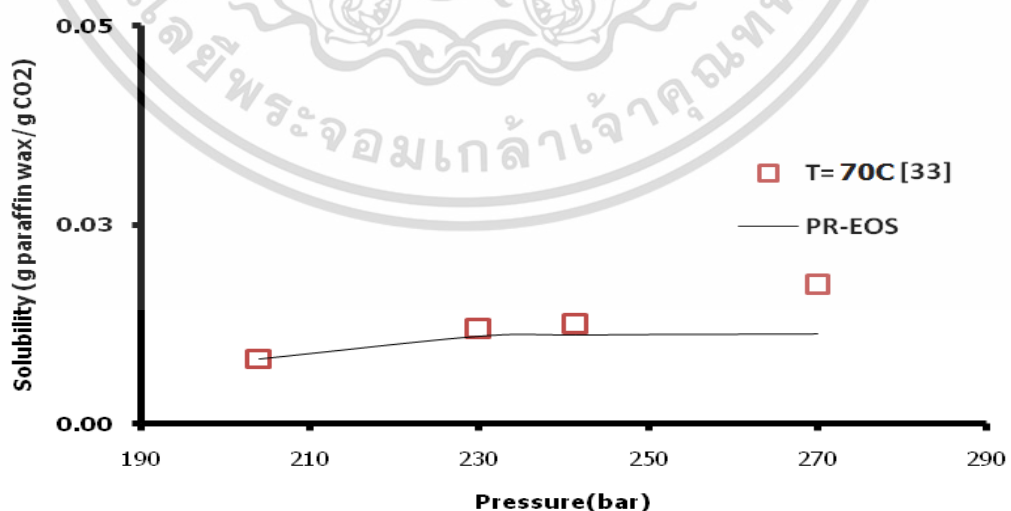
qco2=(aTco2)/(2*(2^0.5)*(bco2*RG*T));
Ico2=log((z+(sigma*Bco2))/(z+(fclon*Bco2)));
qi=Ico2*qco2;
Q1=(Bc28/Bco2).*(z-1);
Q2=log(z-Bco2);
k=(2*(1-k12)*((aTco2*aTc28)^0.5)/aTco2)-(bc28/bco2);
Q3=qi*k;
Q=Q1-Q2-Q3;
fuga=exp(Q);
% end sub fugacity

%% estimation of Psub
Nc=28;
A=3.04549+(2.23175*Nc);
B=2080.07-(1129.73*Nc);
C=2.303;
n=A+(B/T)+C;
Psub=exp(n);
% end Estimation of Psub

%% solubility
Pratio=(Psub/P);
exT=exp(((402.4)*(P-Psub))/(RG*T));
y2=Pratio*(exT/fuga); % mole%
Y2=(y2*398)/((y2*398)+((1-y2)*44)); % mass%
% end solubility
%%end Cal Solubility

```

ตัวอย่างผลการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 70°C

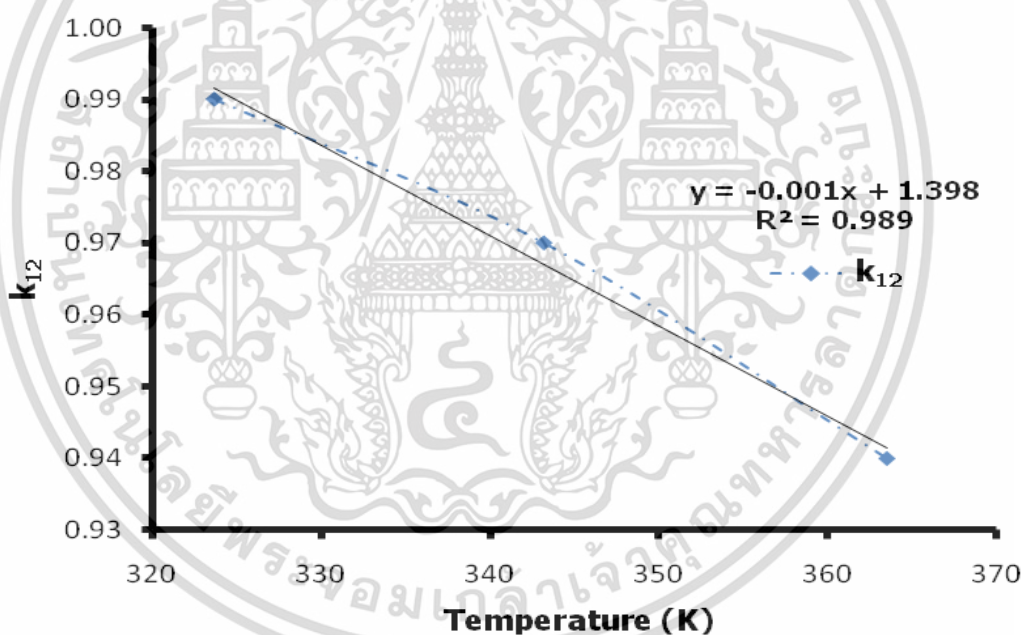
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ตัวอย่างข้อมูลการละลายแสดงได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 70°C

ความดัน (bar)	ค่าการละลายจากการทดลอง [33] ( $\text{g}_{\text{wax}}/\text{g}_{\text{CO}_2}$ )	ค่าการละลายประมาณค่าด้วยสมการสถานะของ Peng-Robinson ( $\text{g}_{\text{wax}}/\text{g}_{\text{CO}_2}$ )	ค่าการเบี่ยงเบน %AAD
204.0	0.008208	0.008186	0.26
230.0	0.011921	0.011020	7.56
241.5	0.012533	0.011194	10.69
270.0	0.017430	0.011253	35.44

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และ  $k_{12}$  ดังแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์ปรับแก้อันตรกิริยาคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### กระบวนการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

ในการศึกษากระบวนการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยเทคนิค RESS สามารถอธิบายผ่านตัวแปรที่สำคัญ คือ อัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวด ขนาดวิกฤตของนิวเคลียส ความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต โดยสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

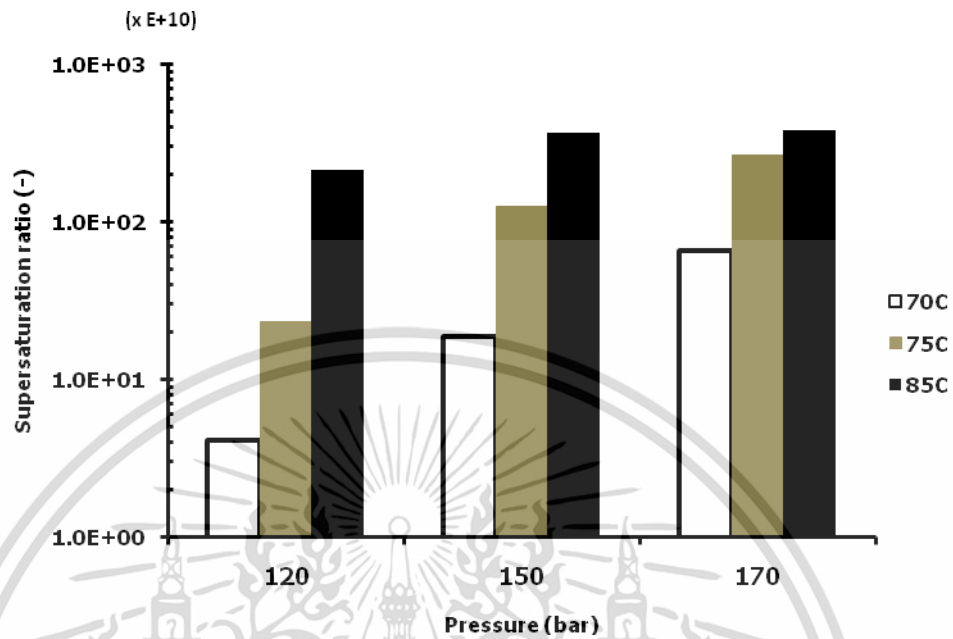
$$S = \frac{y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})}{y^*(T, P)} \quad (4-16)$$

โดย  $S$  คือ อัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวด (-)  
 $y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})$  คือ อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะก่อนการขยายตัว (-)  
 $y^*(T, P)$  คือ อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะหลังการขยายตัว (-)

ในการประมาณค่าอัตราส่วนการละลายในการศึกษานี้ อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายประมาณค่าได้จากค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในของไหลเหนือวิกฤต โดยประมาณค่าการละลายจากสมการสภาวะ Peng-Robinson ผ่านโปรแกรม Matlab 7.7.0 (2008b) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในภาคผนวก ก ตัวอย่างการประมาณค่าที่อุณหภูมิ 85 °C ความดัน 150 bar แสดงได้ดังนี้

$$S = \frac{0.01(85^\circ\text{C}, 150\text{bar})g_{wax} / g_{co_2}}{2.88 \times 10^{-15} (25^\circ\text{C}, 1\text{bar})g_{wax} / g_{co_2}} = 3.70 \times 10^{12}$$

ตัวอย่างผลการประมาณค่าแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับอัตราส่วนการละลายยิ่งยวด

ตัวอย่างการประมาณค่ารัศมีวิกฤตของนิวเคลียสและปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤตที่อุณหภูมิ 85°C ความดัน 150 bar แสดงได้ดังนี้

$$r^* = \frac{2\sigma v_2^s}{kT_{pe} (\ln S)} \quad (4-17)$$

$$N^* = N_2 \exp\left(\frac{16\pi}{3} \left(\frac{\sigma(v_2^s)^{2/3}}{kT_{pe}}\right) \left(\frac{1}{\ln S}\right)^2\right) \quad (4-18)$$

- โดย  $r^*$  คือ ขนาดวิกฤตของนิวเคลียส (m)  
 $N^*$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต (particles/cm<sup>3</sup>)  
 $\sigma$  คือ แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (N/m)  
 $v_2^s$  คือ ปริมาตรเชิงโมลของตัวถูกละลาย (cm<sup>3</sup>/mol)  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน  
 $T_{pe}$  คือ อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (K)  
 $N_2$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (cm<sup>-3</sup>)

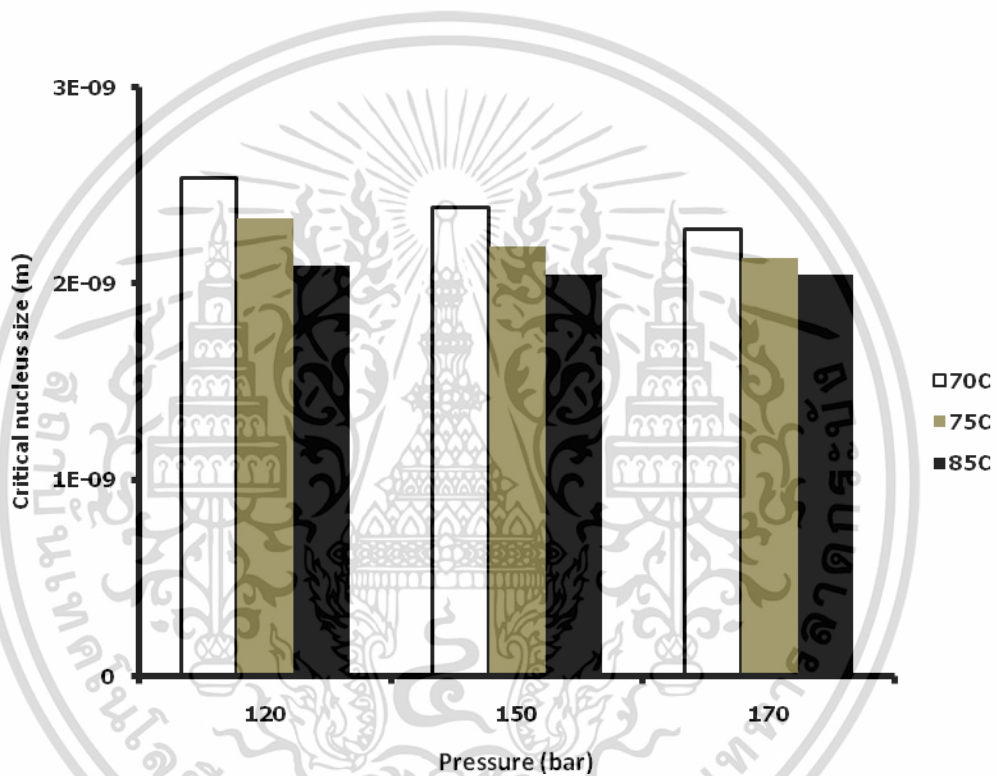
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r^* = \frac{(2)(0.2\text{N/m})(7.33 \times 10^{-22} \text{cm}^3)}{(1.38 \times 10^{-23} \text{J/K})(273.2 + 85\text{K})(\ln(3.7 \times 10^{12}))} = 2.05 \times 10^{-9} \text{m}$$

$$N^* = (6.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}) \exp\left(\frac{16\pi}{3} \left(\frac{(0.2\text{N/m})(7.33 \times 10^{-22} \text{cm}^3)^{2/3}}{(1.38 \times 10^{-23} \text{J/K})(273.2 + 85\text{K})}\right)\right)$$

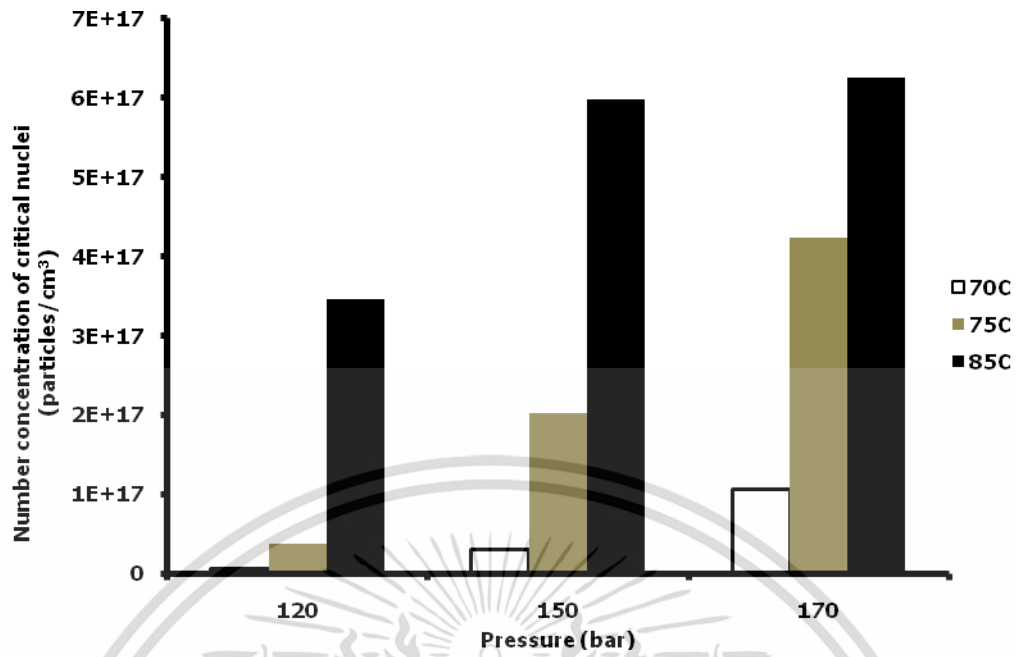
$$= 5.98 \times 10^{17} \text{particles/cm}^3$$

ผลการประมาณค่าแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับขนาดวิกฤตของนิวเคลียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## การประมาณค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

การประมาณค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยอาศัยสมการสถานะของ Peng-Robinson แสดงได้ดังสมการที่ (ค-1) - (ค-5)

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 - 2bV_m - b^2} \quad (\text{ค-1})$$

$$a = \frac{0.457235R^2T_c^2}{P_c} \quad (\text{ค-2})$$

$$b = \frac{0.077796RT_c}{P_c} \quad (\text{ค-3})$$

$$\alpha = \left[ 1 + k \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^{0.5} \right) \right]^2 \quad (\text{ค-4})$$

$$k = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (\text{ค-5})$$

โดย	$P$	คือ ความดันสัมบูรณ์ (bar)
	$V_m$	คือ ปริมาตรโมลาร์ ( $\text{m}^3/\text{mol}$ )
	$T$	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	$R$	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ( $\text{ml}\cdot\text{bar}/\text{mol}\cdot\text{K}$ )
	$P_c$	คือ ความดันวิกฤต (bar)
	$T_c$	คือ อุณหภูมิวิกฤต (K)
	$\omega$	คือ อะเซนทริกแฟกเตอร์

ค่าคงที่ต่างๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์มีดังนี้

$$R = 83.1451 \text{ ml}\cdot\text{bar}/\text{mol}\cdot\text{K}$$

$$P_c = 72.808 \text{ atm} = 73.772706 \text{ bar}$$

$$T_c = 30.9782^\circ\text{C} = 304.1282 \text{ K}$$

$$\omega = 0.22394$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าคงที่ต่างๆ ลงในสมการที่ (ค-2) (ค-3) และ (ค-4) จะได้ค่าคงที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ จากสมการสถานะ Peng-Robinson ดังนี้

ที่อุณหภูมิ 40°C (313.15 K)

$$a = \frac{0.457235 \left( 83.1451 \text{ ml} \cdot \frac{\text{bar}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \right)^2 (304.1282 \text{ K})^2}{73.772706 \text{ bar}}$$

$$= 3,911,241.4 \text{ ml}^2 / \text{mol}$$

$$b = \frac{0.077796 \left( 83.1451 \text{ ml} \cdot \frac{\text{bar}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \right) (304.1282 \text{ K})}{73.772706 \text{ bar}}$$

$$= 26.67 \text{ ml/mol}$$

$$k = 0.37464 + 1.54226(0.22394) - 0.26992(0.22394)^2$$

$$= 0.706477453$$

$$\alpha = \left[ 1 + k \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^{0.5} \right) \right]^2$$

(ค-4)

$$\alpha = \left[ 1 + 0.706477453 \left( 1 - \left( \frac{313.15}{304.13} \right)^{0.5} \right) \right]^2$$

$$\alpha = 0.9793$$

กำหนดค่าปริมาตรจำเพาะ ( $V_m$ ) 82 ml/g หรือ 3,608.7790 ml/mol

ค่าความหนาแน่น ( $\rho = (1/V_m)$ ) 12.1951 kg/m<sup>3</sup> แทนค่าลงในสมการที่ (ค-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \frac{83.1451 \frac{\text{ml.bar}}{\text{mol.K}} (313.15)}{3,608.7790 \frac{\text{ml}}{\text{mol}} - 26.6670 \frac{\text{ml}}{\text{mol}}}$$

$$\frac{\left(3,911,241.4 \frac{\text{ml}^2}{\text{mol}^2}\right) (0.9793)}{\left(3,608.7790 \frac{\text{ml}}{\text{mol}}\right)^2 - 2\left(26.6670 \frac{\text{ml}}{\text{mol}}\right)\left(3,608.7790 \frac{\text{ml}}{\text{mol}}\right) - \left(26.6670 \frac{\text{ml}}{\text{mol}}\right)}$$

$$P = 6.9718$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ตัวอย่างผลการคำนวณกราฟความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

ที่อุณหภูมิ 40°C

ที่อุณหภูมิ 40°C มีค่า  $\alpha = 0.9793$

Temperature (°C)	Pressure (bar)	Molar Vol. (ml/mol)	Specific Vol. (ml/g)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
40	6.9718	3608.7790	82.0000	12.1951
40	7.0549	3564.7695	81.0000	12.3457
40	7.1400	3520.7600	80.0000	12.5000
40	7.2271	3476.7505	79.0000	12.6582
40	7.3165	3432.7410	78.0000	12.8205
40	7.4080	3388.7315	77.0000	12.9870
40	7.5019	3344.7220	76.0000	13.1579
40	7.5982	3300.7125	75.0000	13.3333
40	7.6970	3256.7030	74.0000	13.5135
40	7.7984	3212.6935	73.0000	13.6986
40	7.9025	3168.6840	72.0000	13.8889
40	8.0094	3124.6745	71.0000	14.0845
40	8.1192	3080.6650	70.0000	14.2857
40	8.2321	3036.6555	69.0000	14.4928
40	8.3482	2992.6460	68.0000	14.7059
40	8.4676	2948.6365	67.0000	14.9254
40	8.5905	2904.6270	66.0000	15.1515
40	8.7169	2860.6175	65.0000	15.3846
40	8.8472	2816.6080	64.0000	15.6250
40	8.9814	2772.5985	63.0000	15.8730
40	9.1197	2728.5890	62.0000	16.1290
40	9.2624	2684.5795	61.0000	16.3934
40	9.4095	2640.5700	60.0000	16.6667
40	9.5615	2596.5605	59.0000	16.9492
40	9.7184	2552.5510	58.0000	17.2414
40	9.8805	2508.5415	57.0000	17.5439
40	10.0481	2464.5320	56.0000	17.8571
40	10.2215	2420.5225	55.0000	18.1818
40	10.4010	2376.5130	54.0000	18.5185
40	10.5869	2332.5035	53.0000	18.8679
40	10.7796	2288.4940	52.0000	19.2308
40	10.9794	2244.4845	51.0000	19.6078
40	11.1867	2200.4750	50.0000	20.0000
40	11.4020	2156.4655	49.0000	20.4082
40	11.6257	2112.4560	48.0000	20.8333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ตัวอย่างผลการคำนวณกราฟความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

ที่อุณหภูมิ 40°C

ที่อุณหภูมิ 40°C มีค่า  $\alpha = 0.9793$

Temperature (°C)	Pressure (bar)	Molar Vol. (ml/mol)	Specific Vol. (ml/g)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
40	12.1005	2024.4370	46.0000	21.7391
40	12.3528	1980.4275	45.0000	22.2222
40	12.6157	1936.4180	44.0000	22.7273
40	12.8901	1892.4085	43.0000	23.2558
40	13.1766	1848.3990	42.0000	23.8095
40	13.4761	1804.3895	41.0000	24.3902
40	13.7896	1760.3800	40.0000	25.0000
40	14.1179	1716.3705	39.0000	25.6410
40	14.4622	1672.3610	38.0000	26.3158
40	14.8237	1628.3515	37.0000	27.0270
40	15.2036	1584.3420	36.0000	27.7778
40	15.6035	1540.3325	35.0000	28.5714
40	16.0249	1496.3230	34.0000	29.4118
40	16.4696	1452.3135	33.0000	30.3030
40	16.9396	1408.3040	32.0000	31.2500
40	17.4371	1364.2945	31.0000	32.2581
40	17.9645	1320.2850	30.0000	33.3333
40	18.5248	1276.2755	29.0000	34.4828
40	19.1209	1232.2660	28.0000	35.7143
40	19.7564	1188.2565	27.0000	37.0370
40	20.4353	1144.2470	26.0000	38.4615
40	21.1623	1100.2375	25.0000	40.0000
40	21.9425	1056.2280	24.0000	41.6667
40	22.7820	1012.2185	23.0000	43.4783
40	23.6877	968.2090	22.0000	45.4545
40	24.6676	924.1995	21.0000	47.6190
40	25.7313	880.1900	20.0000	50.0000
40	26.8896	836.1805	19.0000	52.6316
40	28.1557	792.1710	18.0000	55.5556
40	29.5449	748.1615	17.0000	58.8235
40	31.0758	704.1520	16.0000	62.5000
40	32.7706	660.1425	15.0000	66.6667
40	34.6562	616.1330	14.0000	71.4286
40	36.7655	572.1235	13.0000	76.9231
40	39.1387	528.1140	12.0000	83.3333
40	41.8257	484.1045	11.0000	90.9091
40	44.8878	440.0950	10.0000	100.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปภายนอกหน่วยงานการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ตัวอย่างผลการคำนวณกราฟความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

ที่อุณหภูมิ 40°C

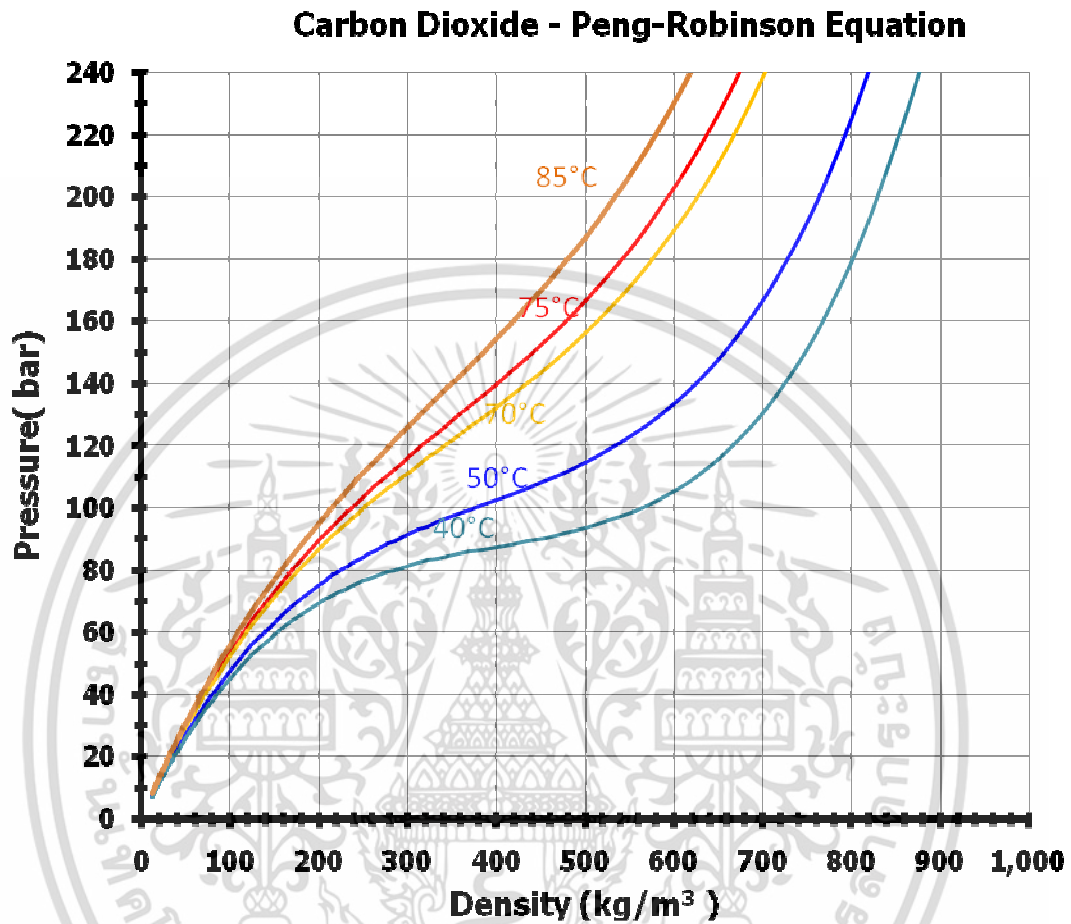
ที่อุณหภูมิ 40°C มีค่า  $\alpha = 0.9793$

Temperature (°C)	Pressure (bar)	Molar Vol. (ml/mol)	Specific Vol. (ml/g)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
40	70.2333	211.2456	4.8000	208.3333
40	70.9170	206.8447	4.7000	212.7660
40	71.6070	202.4437	4.6000	217.3913
40	72.3028	198.0428	4.5000	222.2222
40	73.0039	193.6418	4.4000	227.2727
40	73.7098	189.2409	4.3000	232.5581
40	74.4197	184.8399	4.2000	238.0952
40	75.1330	180.4390	4.1000	243.9024
40	75.8488	176.0380	4.0000	250.0000
40	76.5665	171.6371	3.9000	256.4103
40	77.2849	167.2361	3.8000	263.1579
40	78.0034	162.8352	3.7000	270.2703
40	78.7208	158.4342	3.6000	277.7778
40	79.4364	154.0333	3.5000	285.7143
40	80.1494	149.6323	3.4000	294.1176
40	80.8594	145.2314	3.3000	303.0303
40	81.5661	140.8304	3.2000	312.5000
40	82.2699	136.4295	3.1000	322.5806
40	82.9724	132.0285	3.0000	333.3333
40	83.6759	127.6276	2.9000	344.8276
40	84.3854	123.2266	2.8000	357.1429
40	85.1082	118.8257	2.7000	370.3704
40	85.8561	114.4247	2.6000	384.6154
40	86.6473	110.0238	2.5000	400.0000
40	87.5088	105.6228	2.4000	416.6667
40	88.4813	101.2219	2.3000	434.7826
40	89.6257	96.8209	2.2000	454.5455
40	91.0334	92.4200	2.1000	476.1905
40	92.8422	88.0190	2.0000	500.0000
40	95.2623	83.6181	1.9000	526.3158
40	98.6182	79.2171	1.8000	555.5556
40	103.4203	74.8162	1.7000	588.2353
40	110.4888	70.4152	1.6000	625.0000
40	121.1782	66.0143	1.5000	666.6667
40	137.8049	61.6133	1.4000	714.2857
40	164.5057	57.2124	1.3000	769.2308
40	209.0971	52.8114	1.2000	833.3333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์กับความดันและอุณหภูมิแสดง  
ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## จลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ในการพ่นอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากการละลายพาราฟินแว็กซ์ขึ้นไปในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าน้อยมาก จึงสมมติให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่พ่นออกมา คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการไหลแบบอัดตัวได้ มีสมการที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้

1. การคำนวณความดันที่ปลายหัวฉีดแสดงดังสมการที่ 4-21

$$\frac{P_e}{P_0} = \left[ 1 + \left( \frac{k-1}{2} \right) Ma_e^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (4-21)$$

โดย  $P_e$  คือ ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (bar)  
 $P_0$  คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง  
 หรือความดันก่อนการขยายตัว (bar)  
 $k$  คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)  
 $Ma_e$  คือ Mach Number ที่ปลายหัวฉีด (-)

เนื่องจากการไหลผ่านท่อขนาดเล็กสามารถกำหนด Mach Number ที่ปลายหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 1

จากความสัมพันธ์แก๊สอุดมคติอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $k$ ) แสดงดังสมการ 4-22

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (4-22)$$

โดย  $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (kJ/kg.K)  
 $C_v$  คือ ค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่ (kJ/kg.K)

## 2. การคำนวณอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดแสดงดังสมการที่ 4-23

$$\frac{T_0}{T_e} = \left[ 1 + \left( \frac{k-1}{2} \right) Ma_e^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (4-23)$$

- โดย  $T_0$  คือ อุณหภูมิของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูงหรืออุณหภูมิก่อนการขยายตัว (K)  
 $T_e$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ปลายหัวฉีด (K)  
 $k$  คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)  
 $Ma_e$  คือ Mach Number ที่ปลายหัวฉีด (-)

## 3. การคำนวณความเร็วที่ปลายหัวฉีดแสดงดังสมการที่ 4-24

$$u_e^2 = \frac{2kP_0}{(k-1)\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_0} \right)^{1-(1/k)} \right] \quad (4-24)$$

- โดย  $u_e$  คือ ความเร็วของไหลที่ปลายหัวฉีด (m/s)  
 $P_e$  คือ ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (bar)  
 $P_0$  คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง  
 หรือความดันก่อนการขยายตัว (bar)  
 $k$  คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)  
 $\rho_0$  คือ ค่าความหนาแน่นของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง ( $\text{kg/m}^3$ )

## 4. การคำนวณความเร็วเสียงแสดงดังสมการที่ 4-25

$$c = \sqrt{\frac{kP}{\rho}} \quad (4-25)$$

- โดย  $c$  คือ ความเร็วเสียง (m/s)  
 $P$  คือ ความดันของไหล (bar)  
 $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )

## 5. การคำนวณความเร็วตกกระทบ

จากระยะการพ่นและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระแสดงดังสมการที่ 4-14 และ 4-15

$$L_M = 0.67D_{\text{Nozzle}} \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{post-ex}}}} \quad (4-14)$$

$$D_M = 0.5265L_M \quad (4-15)$$

โดย  $L_M$  คือ ระยะพ่นระหว่างปลายหัวฉีดและแผ่นทดสอบ (cm)  
 $D_{\text{Nozzle}}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (cm)  
 $D_M$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระ  
 $P_0$  คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง  
 หรือความดันก่อนการขยายตัว  
 $P_{\text{post-ex}}$  คือ ความดันในบริเวณพื้นที่ของการพ่นหรือบริเวณเกิดการขยายตัวอย่างอิสระ (bar)

การเปลี่ยนแปลงของ Mach Number ของแก๊สที่พื้นผิวตกกระทบสามารถหาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดเทียบกับพื้นที่ตกกระทบของของไหลเหนือวิกฤตแสดงดังสมการที่ 4-26

$$Ma_i = \left[ k_1 \frac{A_i}{A_e} + (1 - k_1) \right]^{k_2} \quad (4-26)$$

โดย  $A_e$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่ปลายหัวฉีด (mm)  
 $A_i$  คือ พื้นที่หน้าตัดการกระจายตัวของอนุภาคที่พื้นผิวตกกระทบ (mm)  
 $k_1$  และ  $k_2$  คือ ฟังก์ชันของอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊ส (-)

$$k_1 = 218.0629 - 243.576k + 71.7925k^2$$

$$k_2 = -0.122450 + 0.281300k$$

$$A_e = \frac{4\pi D^2}{4}$$

และ

$$A_i = \frac{4\pi D_M^2}{4}$$

ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ออกจากหัวฉีดจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วเสียงดังสมการที่ 4-27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  $V_i = Ma_i \times c$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด (4-27)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $Ma_i$  คือ Mach Number บนพื้นผิวตกกระทบ (-)  
 $c$  คือ ความเร็วเสียง (m/s)  
 $V_i$  คือ ความเร็วของไหลที่พื้นผิวตกกระทบ (m/s)

6. การคำนวณ Reynolds Number และค่า Ohnesorge Number แสดงดังสมการที่ 4-28 และ 4-29 ตามลำดับ

$$Re = \frac{\rho_L v_{\perp} D_d}{\mu_L} \quad (4-28)$$

$$Oh = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma_L D_d}} \quad (4-29)$$

โดย  $Re$  คือ Reynolds Number (-)  
 $Oh$  คือ Ohnesorge Number (-)  
 $\rho_L$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $v_{\perp}$  คือ ความหนืดโคเนมาติก ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $D_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)  
 $\mu_L$  คือ ความหนืดไดนามิกส์ของของไหล (Pa.s)  
 $\sigma_L$  คือ แรงตึงผิวของของไหล (N/m)

ตัวอย่างการคำนวณ  
ข้อมูลเบื้องต้น

- เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ( $D$ ) = 0.00158 m
- ที่สภาวะอุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  และความดัน 120 bar  
 $C_p = 2.7379 \text{ kJ/kg.K}$  และ  $C_v = 0.9181 \text{ kJ/kg.K}$   
 $\rho = 343 \text{ kg/m}^3$

แทนค่า  $C_p$  และ  $C_v$  ในสมการอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊ส

$$k = \frac{2.7379}{0.9181} = 2.9822$$

แทนค่า  $k$ ,  $P_0$  และ  $Ma_e$  ในสมการที่ 4-21 และ 4-23 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_e}{120\text{bar}} = \left[ 1 + \left( \frac{2.9822 - 1}{2} \right) 1^2 \right]^{\frac{2.9822}{2.9822 - 1}}$$

$$P_e = 42.58\text{bar}$$

$$\frac{70^\circ\text{C}}{T_e} = \left[ 1 + \left( \frac{2.9822 - 1}{2} \right) 1^2 \right]$$

$$T_e = 35.16^\circ\text{C}$$

แทนค่าความดันของไหลที่ปลายหัวฉีดในสมการที่ 4-24

$$u_e^2 = \frac{2.9822(120\text{bar})}{(2.9822 - 1)343 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \left[ 1 - \left( \frac{42.58}{120\text{bar}} \right) \right]^{1 - (1/2.9822)}$$

$$u_e = 228.91\text{m/s}$$

สมบัติต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลายหัวฉีด

- ที่สภาวะอุณหภูมิ  $T_e = 35.16^\circ\text{C}$  และความดัน  $P_e = 42.58\text{ bar}$  มีค่าดังนี้

$$C_p = 1.6853 \text{ kJ/kg.K} \text{ และ } C_v = 0.8342 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\rho_e = 103.21 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_e = 19.03 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$$

$$\sigma = 0.0022 \text{ N/m}$$

แทนค่า  $C_p$  และ  $C_v$  ในสมการที่ 4-22

$$k = \frac{1.6853}{0.8342} = 2.020$$

แทนค่า  $k$  ในสมการที่ 4-25

$$c = \sqrt{\frac{2.020(42.58\text{bar})}{103.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$c = 288.70\text{m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 52 bar ในสมการที่ 4-14 และ 4-15 ตามลำดับ

$$L_M = 0.67(0.00158\text{m})\sqrt{\frac{52\text{bar}}{1\text{bar}}} = 0.0076\text{m}$$

แทนค่าระยะการพ่นในสมการที่ 4-15

$$D_M = 0.5625(0.007632) = 0.0043\text{m}$$

แทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระ เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดที่หัวฉีดและพื้นที่หน้าตัดการกระจายตัวของอนุภาคที่พื้นผิวตกกระทบ

$$A_e = \frac{4(3.14)(0.00158)^2}{4} = 7.84 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$A_i = \frac{4(3.14)(0.0043)^2}{4} = 5.80 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

แทนค่า  $k$  ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะมาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.3 kJ/kg.K เพื่อหาค่า  $k_1$  และ  $k_2$  ดังนี้

$$k_1 = 218.0629 - 243.576(1.3) + 71.7925(1.3)^2 = 22.7429$$

$$k_2 = -0.122450 + 0.28130(1.3) = 0.2432$$

แทนค่าในสมการที่ 4-26

$$Ma_i = \left[ (22.74291) \left( \frac{5.80 \times 10^{-5}}{7.84 \times 10^{-6}} \right) + (1 - (22.7429)) \right]^{0.24324} = 2.8$$

แทนค่า  $Ma_i$  และ  $c$  ในสมการที่ 4-27

$$V_i = 2.8 \times 288.7$$

$$V_i = 808.37\text{m/s}$$

แทนค่าความเร็วของไหลที่พื้นผิวตกกระทบ ( $V_i$ ) และ คุณสมบัติต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลายหัวฉีดในสมการที่ 4-28 ความสัมพันธ์ของ Reynolds Number และ สมการที่ 4-29 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของ Ohnesorge Number โดยที่สภาวะอุณหภูมิ 35.16°C และความดัน 42.58 bar มีขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ ( $D_p$ ) เท่ากับ 5.6  $\mu\text{m}$

$$Re = \frac{(103.21\text{kg/m}^3)(808.37\text{m/s})(5.6 \times 10^{-6}\text{m})}{(19.03 \times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s})}$$

$$Re = 24,546$$

และ

$$Oh = \frac{19.03 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}}{\sqrt{(103.21\text{kg/m}^3)(0.0022\text{N/m})(5.6 \times 10^{-6}\text{m})}}$$

$$Oh = 0.0169$$

ตารางที่ ง.1 ผลการประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

$T_0$ (°C)	$P_0$ (bar)	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg.K)	$C_v$ (kJ/kg.K)	$k$	$Ma_e$	$P_e$ (bar)	$T_e$ (°C)	$u_e$ (m/s)
70	120	343	2.7379	0.9180	2.982	1	42.58	35.16	228.91
70	150	478	3.1765	0.9410	3.375	1	49.31	32.00	220.04
70	170	549	2.9259	0.9344	3.131	1	58.56	33.89	216.66
75	120	317	2.5106	0.9049	2.775	1	44.45	39.74	235.91
75	150	442	3.0482	0.9355	3.258	1	50.41	35.23	227.89
75	170	513	2.8595	0.9313	3.070	1	59.26	36.85	223.59
85	120	297	2.1510	0.8840	2.433	1	47.95	49.52	239.31
85	150	412	2.7157	0.9208	2.949	1	53.58	43.05	233.19
85	170	481	2.6470	0.9217	2.872	1	61.70	43.90	228.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลการประมาณค่าความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

$T_e$ (°C)	$P_e$ (bar)	$\rho_e$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_e$ (Pa.s)X10 <sup>6</sup>	$C_p$ (kJ/kg.K)	$C_v$ (kJ/kg.K)	$k$	$\sigma$ (N/m)
35.16	42.58	103	19.03	1.6853	0.8342	2.0203	0.0022
32.00	49.31	132	22.28	2.2509	0.8997	2.5020	0.0018
33.89	58.56	163	23.38	2.8382	0.9268	3.0623	0.0010
39.74	44.45	97	16.83	1.3700	0.7895	1.7353	0.0017
35.23	50.41	127	20.33	1.9876	0.8665	2.2938	0.0015
36.85	59.26	156	20.74	2.3700	0.8920	2.6569	0.0008
49.52	47.95	100	17.19	1.3297	0.7364	1.8057	0.0016
43.05	53.58	123	17.35	1.5466	0.8177	1.8914	0.0011
43.91	61.70	151	18.06	1.8302	0.8521	2.1479	0.0006

ตารางที่ ง.3 ผลการประมาณค่า  $Re$  และ  $Oh$  ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

$T_e$ (°C)	$P_e$ (bar)	$c$ (m/s)	$Ma_i$	$V_i$ (m/s)	$D_p$ ( $\mu$ m)	$Re$	$Oh$
35.16	42.58	288.70	2.8	808.37	5.6	2,4546	0.01688
32.00	49.31	305.55	2.8	855.53	5.4	2,7403	0.01994
33.89	58.56	332.13	2.8	929.96	5.0	3,2334	0.02593
39.74	44.45	281.40	2.8	787.91	5.2	2,3710	0.01841
35.23	50.41	301.35	2.8	843.78	5.0	2,6420	0.02116
36.85	59.26	317.46	2.8	888.89	4.7	3,1474	0.02706
49.52	47.95	294.48	2.8	794.88	4.8	2,1925	0.01974
43.05	53.58	287.20	2.8	804.17	4.5	2,5626	0.02225
43.91	61.70	295.97	2.8	828.72	4.3	3,0162	0.02876

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก จ**  
**การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระ**  
**ของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์**

เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระ ( $D_M$ ) และระยะการพ่น ( $L_M$ ) แสดงดังสมการ 4-14 และ 4-15 ตามลำดับ

$$L_M = 0.67D_{\text{Nozzle}} \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{post-ex}}}} \quad (4-14)$$

$$D_M = 0.5265L_M \quad (4-15)$$

ที่สภาวะเริ่มต้นในภาชนะทนความดันที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว  $85^\circ\text{C}$  ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar มีค่าความดันของไหลที่ปลายหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 44 bar

$$L_M = 0.67(0.158\text{cm}) \sqrt{\frac{48\text{bar}}{1\text{bar}}} = 0.7330\text{cm}$$

แทนค่าระยะการพ่น ( $L_M$ ) เพื่อหาเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระ

$$D_M = 0.5625(0.7330\text{cm}) = 0.41\text{ cm}$$

**ตารางที่ จ.1** ผลการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ ที่สภาวะเริ่มต้นในภาชนะทนความดันที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว ( $T_0$ )  $85^\circ\text{C}$  ความดันก่อนการขยายตัว ( $P_0$ ) 120, 170 และ 200 bar

$T_0$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P_0$ (bar)	$P_e$ (bar)	$D_{\text{Nozzle}}$ (cm)	$L_M$ (cm)	$D_M$ (cm)
85	120	48	0.158	0.73	0.41
85	150	54	0.158	0.77	0.44
85	170	62	0.158	0.83	0.47
85	200	74	0.158	0.91	0.51

ภาคผนวก ฉ  
การศึกษาการบวมตัวของยางเหลว PB  
เนื่องจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ตารางที่ ฉ.1 ตัวอย่างข้อมูลผลการทดลองการวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 120 bar อุณหภูมิ 40°C

Time (min)	Swelling Factor (-)
	120 bar
0.0	1.0000
0.5	0.9863
1.0	1.0000
1.5	1.0000
2.0	0.9863
2.5	1.0000
3.0	1.0000
3.5	1.0000
4.0	1.0000
4.5	1.0411
5.0	1.1507
5.5	1.2466
6.0	1.3562
6.5	1.4384
7.0	1.4658
7.5	1.4658
8.0	1.4658
8.5	1.4658
9.0	1.4658
9.5	1.4658
10.0	1.4658
10.5	1.4658

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลผลการทดลองการวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 120 bar อุณหภูมิ 40°C

Time (min)	Swelling Factor (-)
	120 bar
11.0	1.4658
11.5	1.4658
12.0	1.4658
12.5	1.4658
13.0	1.4658
13.5	1.4658
14.0	1.4658
14.5	1.4658
15.0	1.4658
15.5	1.4795
16.0	1.4795
16.5	1.4795
17.0	1.4795
17.5	1.4795
18.0	1.4795
18.5	1.4795
19.0	1.4795
19.5	1.4795
20.0	1.4795
25.0	1.4795
30.0	1.4795
35.0	1.4795
40.0	1.4795
45.0	1.4795
50.0	1.4795
55.0	1.4795
60.0	1.4795

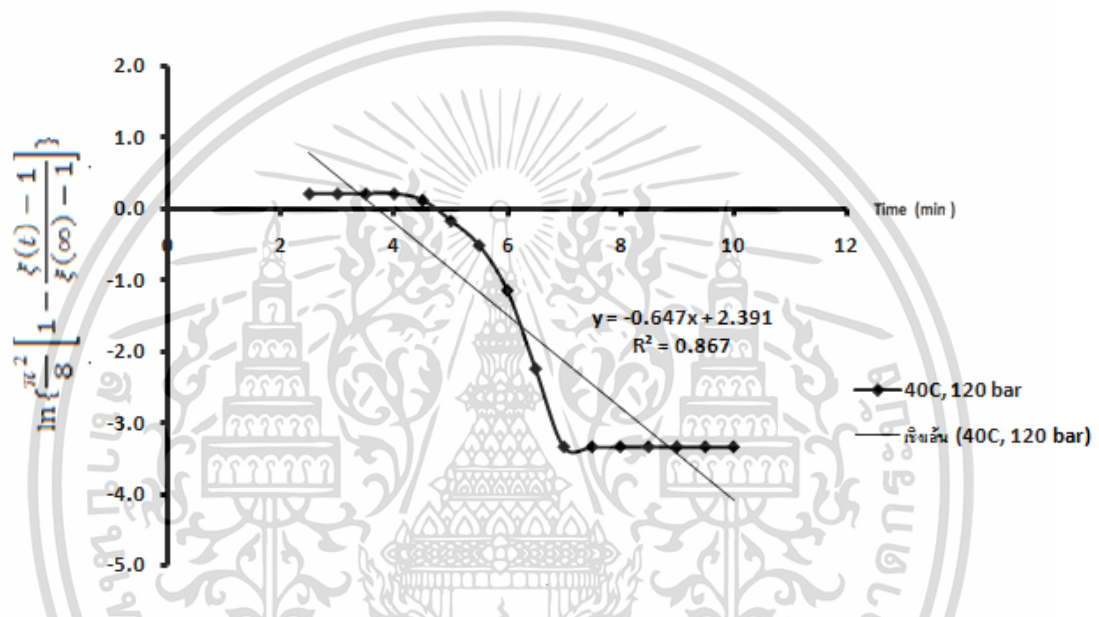
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนื่อวิกฤตในยางเหลว PB การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ คำนวณได้จากข้อมูลในตารางที่ ฉ-1 และสมการที่ 2-5

$$\ln\left\{\frac{\pi^2}{8}\left[1-\frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1}\right]\right\} = \frac{-D_{AB}\pi^2 t}{4L^2} \quad (2-5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\ln\left\{\frac{\pi^2}{8}\left[1-\frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1}\right]\right\}$  กับเวลา จะได้ความชันเท่ากับ  $\frac{-D_{AB}\pi^2}{4L^2}$

และได้กราฟดังรูปที่ ฉ.1



รูปที่ ฉ.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left\{\frac{\pi^2}{8}\left[1-\frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1}\right]\right\}$  กับเวลา

สมการความสัมพันธ์คือ  $y = -0.647x + 2.391$  ความชันกราฟเท่ากับ  $-0.647$  จะได้

$$\frac{-D_{AB}\pi^2}{4L^2} = -0.647 \text{ min}^{-1}$$

แทนค่าความหนาเริ่มต้นของยาง ( $L_0$ ) เท่ากับ 3.16 mm

$$D_{AB} = \frac{0.647 \times 4 \times (4 \times 10^{-3})}{\pi^2 \times 60}$$

$$= 1.7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## การศึกษาประสิทธิภาพการพ่นของระบบสารผสมยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตด้วยเทคนิค PGSS

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างข้อมูลประสิทธิภาพการพ่นของระบบสารผสมยางเหลว PB และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยเทคนิค PGSS ความดัน 100 bar อุณหภูมิ 60°C ระยะการพ่น 15 cm

เวลา (min)	น้ำหนักแผ่นกระดาษ (g)		ประสิทธิภาพการพ่น (%)
	ก่อนการพ่น	หลังการพ่น	
0	-	-	-
5	47.64571	47.78931	48.41
10	47.62385	47.78841	55.73
15	47.62389	47.87987	85.41
30	47.62472	47.88282	88.46
90	47.62124	47.88301	88.03
120	47.62853	47.88582	88.57

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการพ่นของระบบ จากสมการที่ 2-10

$$\text{ประสิทธิภาพการพ่น} = \left( \frac{Q_a}{Q_t} \right) \times 100\% \quad (2-10)$$

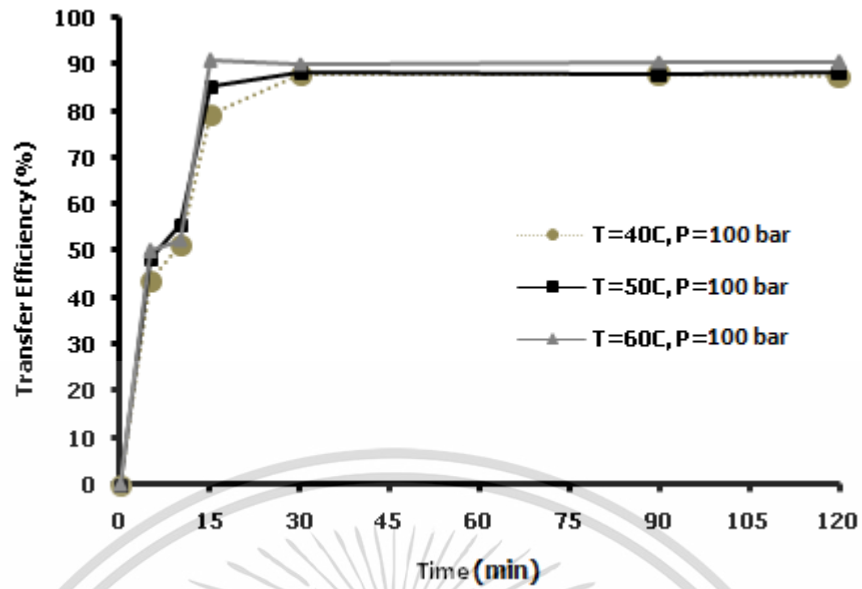
โดย  $Q_a$  คือ ปริมาณของพอลิเมอร์ที่เคลือบผิวอยู่บนตัวอย่าง (g)

$Q_t$  คือ ปริมาณของพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ใส่เข้าไปในอุปกรณ์ (g)

ประสิทธิภาพการพ่นที่เวลา 90 min โดยในการทดลองใช้ยางเหลว PB ประมาณ 0.26177 g

$$= \left( \frac{47.88301 - 47.62124}{0.26177} \right) \times 100\% = 88.03\%$$

สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน เวลา และประสิทธิภาพการพ่นได้ ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการพ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ซ

## การทดสอบการยึดติดทางกายภาพด้วยวิธีมาตรฐาน [49]

การทดสอบการยึดติดทางกายภาพเป็นวิธีที่ใช้หาค่าความแข็งแรงของสารยึดติดกับพื้นผิววัสดุที่นำมาติด เพื่อประเมินความแข็งแรง ทนทานระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยควบคุมตัวแปรต่างๆที่ส่งผลในระหว่างการทดสอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความดัน เป็นต้น

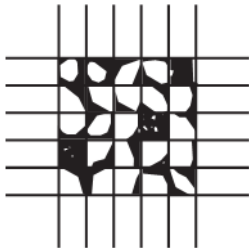
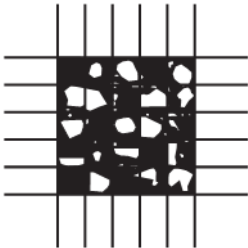
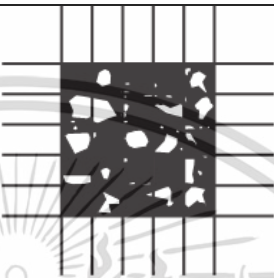
การทดสอบสภาพการยึดติดด้วยเทป (Measuring Adhesion by Tape Test) นิยมใช้กันโดยทั่วไปในการคำนวณหาค่าการยึดติดของระบบการเคลือบบนพื้นผิวของโลหะ โดยมาตรฐานที่ใช้ในการวัดได้แก่ มาตรฐาน ASTM : D 3359 แบ่งออกเป็น 2 วิธีการ ได้แก่ แบบ A นิยมใช้กันทั่วไปบริเวณโรงงานและแบบ B นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ การจัดประเภทของวิธีการแบบ B แสดงดังตารางที่ ซ.1

ตารางที่ ซ.1 การทดสอบการยึดติดตามวิธีมาตรฐาน ASTM : D 3359 แบบ B [50]

ระดับการยึดติด	การหลุดร่อน	ลักษณะตามมาตรฐาน	ASTM : D 3359
5B	0%		
4B	น้อยกว่า 5%		
3B	5-25%		
2B	25-35%		

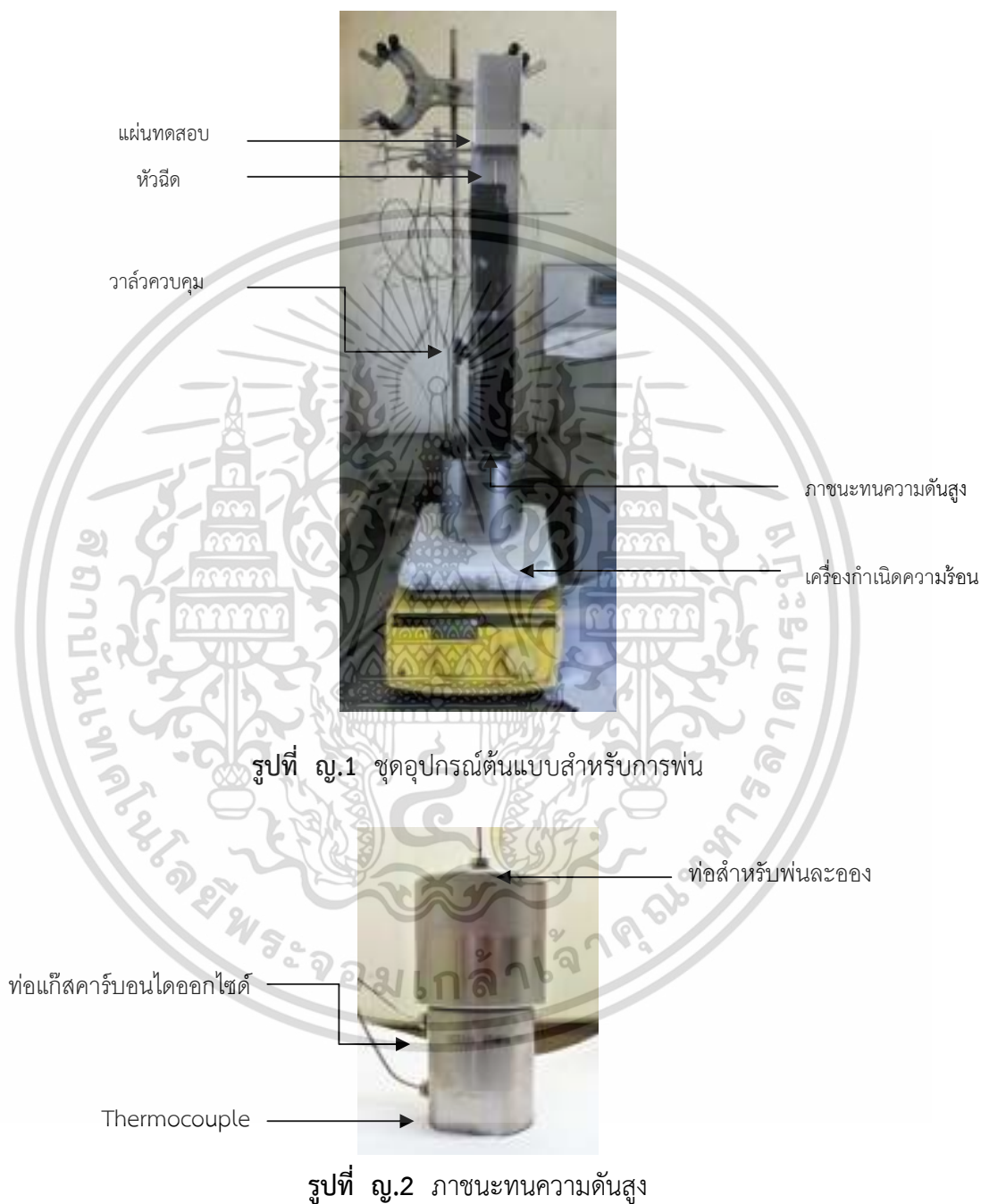
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) การทดสอบการยึดติดตามวิธีมาตรฐาน ASTM : D 3359 แบบ B [50]

ระดับการยึดติด	การหลุดร่อน	ลักษณะตามมาตรฐาน	ASTM : D 3359
1B	35-65%		
0B	มากกว่า 65%		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ญ ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการพ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
ชุดอุปกรณ์การสังเกตพฤติกรรมการบวมตัว  
ด้วยเทคนิคการจับภาพ



กล้องวิดีโอกำลังขยาย 120 เท่า

ภาชนะทนความดันสูงแบบ Visualize Cell

รูปที่ ก.1 ชุดอุปกรณ์การสังเกตพฤติกรรมการบวมตัวด้วยเทคนิคการจับภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล    ปรีทัศน์ เหมือนจันทร์

วันเดือนปีเกิด    27 พฤษภาคม 2531

อีเมลล์            paritat.pm@gmail.com



### ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปีที่สำเร็จการศึกษา	ชื่อสถานศึกษา
วศ บ. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี	2554	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์ในการทำงาน

- ฝึกงานที่บริษัท ค็อกนิสไทย จำกัด (Cognis Thai) ในหน่วยงานวิศวกรกระบวนการ ระหว่างวันที่ 1 เมษายน – 27 พฤษภาคม 2553

### ผลงานทางวิชาการ

- ปรีทัศน์ เหมือนจันทร์ ชิตพลตามประดิษฐ์ เพิ่มวิทย์ เหล่าพิรุฬห์ และสุรัตน์ อารีรัตน์, “การศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลวพอลิบิวตาไดอิน,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, 25-26 ตุลาคม 2555, หน้า 80-81.
- Paritat Muanchan, Apisara Veerachayapron, Suchawadee Sanburan, and Surat Areerat, “Preparation of Superhydrophobic Poly Methyl Methacrylate Surface by Rapid expansion of Supercritical Carbon Dioxide-Paraffin Wax Solution Spray Coatings,” Proceeding of the 78<sup>th</sup> Annual Meeting of SCEJ (The Society of Chemical Engineers, Japan), Toyonaka Campus of Osaka University, Japan, March 17-19, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้