



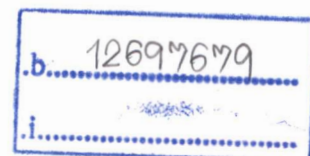
รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองแว็กซ์
โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย
Study on Wax Spray Coatings
using Supercritical Carbon Dioxide as a Solvent

นาย สุรัตน์ อาริรัตน์

R&H
ค857ก
2556

เลขที่.....
เลขทะเบียน 137777
วันเดือนปี 24 ก.ค. 2558



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **คณะวิศวกรรมศาสตร์** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องแหล่งที่มาทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองแว็กซ์
โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย

แหล่งเงิน.....งบประมาณเงินรายได้.....
ประจำปีงบประมาณ.....2556.....จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน.....200,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย.....1.....ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2555 ถึง 30 ก.ย. 2556
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นายสุรัตน์ อารีรัตน์

ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Surat Areerat

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัดส่วนการวิจัย 100%

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ 02-329-8360-3 ต่อ 144 โทรสาร 02-3298360-3 กต 4

E-mail kasurat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยการประยุกต์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ทำการศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax) บนแผ่น Poly Methyl Methacrylate (PMMA) โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย และการประยุกต์เทคนิค Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) ผ่านหัวฉีดไปยังสภาวะบรรยากาศ การทดลองนี้ได้ดำเนินการเพื่อศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัว 120-170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 40-85°C ระยะการพ่น 1-15 cm มุมการพ่น 90-150° และการเติมซอพิทอลเป็นสารก่อผลึก 0.3 wt% ต่อสมบัติของพื้นผิวหลังการเคลือบผิว ผลการดำเนินการพบว่าอนุภาคพาราฟินแว็กซ์หลังผ่านเทคนิค RESS มีขนาด 2.0-10.0 μm ขึ้นกับสภาวะในการดำเนินการ โดยการเพิ่มความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวส่งผลให้ขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์มีขนาดเล็กลงเพียงเล็กน้อย และสามารถเตรียมพื้นผิว PMMA ที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ มุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิวหลังการเคลือบผิวเพิ่มขึ้นจาก 80.0° เป็น 150.5° นอกจากนี้ยังพบว่าค่าตัวเลข Re และ Oh สามารถอธิบายผลของสภาวะการพ่นต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่สัมพันธ์กับการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้

คำสำคัญ: การขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายเหนือวิกฤต, พื้นผิวไม่ชอบน้ำยิ่งยวด, การเคลือบผิวแบบพ่นละออง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Research Title: Study on Wax Spray Coatings using Supercritical Carbon Dioxide as a Solvent

Researcher: Mr.Surat Areerat

Faculty: Engineer

Department: Chemical Engineer

Abstract

The rapid expansion of supercritical carbon dioxide solutions (RESS) process is a promising method for the production of ultrafine particles for surface coatings. The aim of this research was to study the preparation of superhydrophobic surfaces developed by the RESS coatings process. The layer of paraffin wax particle was coated on poly methyl methacrylate (PMMA) surface by supercritical solution spraying through a nozzle in atmospheric conditions. Degree of hydrophobicity was measured by meaning of the contact angle of water droplet on paraffin wax coated surface. The measured contact angles were increased from 80.0° up to 150.5° , which revealed that the degree of hydrophobicity was increased. The experiments were conducted to investigate the effects of various pre-expansion saturated pressure of 120-170 bar and temperature of $70-85^{\circ}\text{C}$. The average particle size of paraffin wax obtained after RESS was 3.0-6.0 micrometers depending upon the experimental conditions. Higher pre-expansion pressure and temperature resulted in slightly smaller particle size than that from the lower pre-expansion pressure and temperature. Moreover, both of the Re and Oh numbers could be described spraying condition related to improve the superhydrophobic surfaces.

Key words: The rapid expansion of supercritical solutions, Superhydrophobic surface, Spray coatings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย หากเกิดความผิดพลาดประการใดในงานวิจัยนี้ข้าพเจ้าขออภัยไว้ ณ ที่นี้ และข้าพเจ้ายินดีที่จะนำข้อมูลอันจะเกิดประโยชน์กับผู้สนใจ สามารถนำไปประกอบการศึกษาค้นคว้า เพื่อเป็นประโยชน์ในวันข้างหน้าข้าพเจ้าคุณประโยชน์อันใดที่พึงมาจากรายงานฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุรัตน์ อาริรัตน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการเคลือบผิว (Coating Processes).....	5
2.1.1 การทาสีหรือทาเคลือบผิว (Painting).....	5
2.1.2 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Coating).....	5
2.1.3 การเคลือบผิวแบบจุ่ม (Dip Coating).....	5
2.1.4 การเคลือบผิวแบบพ่นละออง (Spray Coating).....	5
2.2 ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluids).....	6
2.2.1 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide).....	7
2.3 กระบวนการเกิดผลึก.....	8
2.4 การเกิดอนุภาคด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	9
2.4.1 Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS).....	9
2.4.2 Particles from Gas-Saturated Solutions (PGSS).....	10
2.4.3 Gas Anti-Solvent Process (GAS).....	10
2.4.4 Supercritical Anti-Solvent Process (SAS).....	11
2.4.5 Solution Enhanced Dispersion by Supercritical Fluid (SEDS).....	11
2.5 การไหลของของไหลผ่านหัวฉีด เดอ ลาวาล (De Laval Nozzle).....	12
2.6 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว (Hydrophobicity of Surfaces).....	13
2.6.1 ปรากฏการณ์บนพื้นผิวใบบัว (Lotus Leaf Effect).....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, ^{IV} not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax).....	15
2.8 การแพร่ของสาร.....	15
2.8.1 การแพร่ของสารไปยังภูมิภาคของไหลเหนือวิกฤต.....	15
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 การทดลอง.....	18
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	18
3.3 การศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์.....	19
3.3.1 การศึกษาผลจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำและคุณลักษณะของพื้นผิว PMMA.....	19
3.3.2 การศึกษาผลจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค การเคลือบผิวแบบจุ่มต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำและคุณลักษณะของ พื้นผิว PMMA.....	20
3.4 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว.....	20
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	21
กระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS.....	21
4.1 สมดุลวัฏภาคระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์.....	21
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการเคลือบผิว แบบแผ่นของพาราฟินแว็กซ์บนแผ่น PMMA โดยเทคนิค RESS ต่อคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว.....	25
4.2.1 การศึกษาผลของระยะการพ่นและการพ่นซ้ำในกระบวนการเคลือบผิวโดย เทคนิค RESS.....	25
4.3 การเกิดอนุภาคโดยเทคนิค RESS.....	28
4.3.1 ผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	29
4.3.2 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	31
4.3.3 ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	33
4.3.4 ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	36
4.4 การศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	37
4.4.1 การประมาณค่าความดันและความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีด ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 การประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	39
4.4.3 การประมาณค่าความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	41
4.5 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว.....	42
4.5.1 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA ก่อนกระบวนการเคลือบผิว.....	42
4.5.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแร็กซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม.....	43
4.5.3 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบด้วยพาราฟินแร็กซ์โดยเทคนิค RESS.....	44
4.5.4 การปรับเปลี่ยนมุมการพ่นเพื่อปรับปรุงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแร็กซ์.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	53
กระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแร็กซ์โดยเทคนิค RESS.....	53
5.1 สมดุลวัฏภาคระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแร็กซ์.....	53
5.2 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแร็กซ์บนแผ่น PMMA โดยเทคนิค RESS ต่อคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว.....	53
5.3 การเกิดอนุภาคด้วยเทคนิค RESS	53
5.4 การศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	53
5.5 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว	54
ข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก การประมาณค่าการละลายของพาราฟินแร็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	59
ภาคผนวก ข กระบวนการเกิดอนุภาคพาราฟินแร็กซ์.....	62
ภาคผนวก ค การประมาณค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์.....	66
ภาคผนวก ง จลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	73
ภาคผนวก จ การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระของอนุภาคพาราฟินแร็กซ์.....	81
ภาคผนวก ฉ ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการพ่น.....	82
ประวัติผู้วิจัย.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความหนาแน่น ความหนืด สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแก๊ส ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว.....	7
2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการเกิดอนุภาคด้วยของไหลเหนือวิกฤต.....	12
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของหยดน้ำและสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิว.....	13
 3.1 สภาวะในการดำเนินการในกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแร็กซ์โดยเทคนิค RESS.....	 19
 4.1 ผลของระยะการพ่นและการพ่นซ้ำต่อมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองพาราฟินแร็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar.....	 25
ก.1 ผลการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแร็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิ 70°C	61
ค.1 ตัวอย่างผลการคำนวณกราฟความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40°C.....	69
ง.1 ผลการประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	79
ง.2 ผลการประมาณค่าความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	80
ง.3 ผลการประมาณค่า Re และ Oh ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	80
จ.1 ผลการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแร็กซ์ ที่สภาวะเริ่มต้นในภาชนะทนความดันที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (T_0) 85°C ความดันก่อนการขยายตัว (P_0) 120, 170 และ 200 bar.....	 81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, Not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวใบบัวที่กำลังขยายต่างๆ	
(ข) ภาพลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวใบบัวที่แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด	
(ค) ตัวอย่างวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด.....	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) ตัวอย่างแผนผังวัฏภาคและลักษณะการกระจายตัวโมเลกุลของสารบริสุทธิ์	
(ข) ลักษณะการกระจายตัวของของไหลเหนือวิกฤต.....	6
2.2 แผนผังวัฏภาคและลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ	
ที่สังเกตได้จากการจับภาพ.....	7
2.3 กระบวนการเกิดผลึก.....	8
2.4 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Rapid Expansion of Supercritical	
Solutions และผังเส้นทางการดำเนินการของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์	
และของไหลเหนือวิกฤต.....	9
2.5 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Particles from Gas-Saturated Solutions	
และผังเส้นทางการดำเนินการของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์	
และของไหลเหนือวิกฤต.....	10
2.6 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค GAS, SAS, AES, PCA, SEDS	
และผังเส้นทางการดำเนินการของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์	
และของไหลเหนือวิกฤต.....	11
2.7 การประมาณความเร็วของการไหล (V) ร่วมกับผลของอุณหภูมิ (T) และความดัน (P).....	12
2.8 ตัวอย่างลักษณะและคุณสมบัติของหยดน้ำที่สภาวะสมดุล.....	13
2.9 (ก) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวใบบัวที่กำลังขยายต่างๆ	
(ข) ลักษณะการกลิ้งของหยดน้ำบนใบบัวและการกลิ้งของหยดน้ำ	
ในการทำความสะดวกสังเกต.....	14
2.10 ตัวอย่างลักษณะของพาราฟินแว็กซ์.....	15
3.1 แผนภาพจำลองกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	19
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์	
ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 70°C.....	24
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์ปรับแก้กิจกรรมการ.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, VIII not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโอกำลังขยาย 120 เท่า แสดงลักษณะของพื้นผิว PMMA ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar.....	26
4.4 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า และลักษณะมุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar.....	26
4.5 แบบจำลองกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS.....	27
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับอัตราส่วนการละลายยิ่งยวด.....	29
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับขนาดวิกฤตของนิวเคลียส.....	30
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิกับปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต.....	30
4.9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว (ก) 120 (ข) 150 และ (ค) 170 bar.....	31
4.10 ผลของความดันก่อนการขยายตัวที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	32
4.11 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (ก) 40 (ข) 50 (ค) 70 (ง) 75 และ (จ) 85°C.....	33
4.12 ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	35
4.13 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 150 bar (ก) พาราฟินแว็กซ์ (ข) ซอบิทอล/พาราฟินแว็กซ์ 0.3 wt%.....	36
4.14 ผลของสารก่อผลึกที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์.....	36
4.15 ความดันและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ.....	38
4.16 ความดันและความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์.....	40
4.18 ความดันที่ปลายหัวฉีดและความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ.....	42
4.19 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 200 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA.....	42
4.20 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า ลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำ บนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม.....	43
4.21 ภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิว PMMA ที่เคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar	44
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันก่อนการขยายตัว และมุมสัมผัสของหยดน้ำ.....	45
4.23 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 2,000 เท่า ลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำ บนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว (ก) 120 (ข) 150 และ (ค) 170 bar.....	46
4.24 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่ระยะพื้น 1 cm อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150, 170 และ 200 bar.....	47
4.25 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่ออัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาค.....	48
4.26 การกระทบพื้นผิวกลุ่มอนุภาคเนื่องจากผลของความเร็ว และผลของแรงตึงผิวของกลุ่มอนุภาค.....	48
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re และ Oh (ก) ผลของอุณหภูมิและความดันต่อค่า Re และ Oh (ข) การเปลี่ยนแปลงค่า Oh เมื่อค่า Re คงที่ (ค) การเปลี่ยนแปลงค่า Re เมื่อค่า Oh คงที่.....	50
4.28 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า และ 2,000 เท่า ของพื้นผิว PMMA ที่เคลือบผิวด้วยพาราฟินโดยแว็กซ์และมุมสัมผัสของหยดน้ำที่พื้นด้วยมุมต่างๆ (ก) 90 (ข) 120 (ค) 135 และ (ง) 150°.....	51
ฉ.1 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการพ่น.....	82
ฉ.2 ภาพขณะพ่นความดันสูง.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สัญลักษณ์

ตัวอักษร

A_e	พื้นที่หน้าตัดที่ปลายหัวฉีด
A_i	พื้นที่หน้าตัดการกระจายตัวของอนุภาคที่พื้นผิวตกกระทบ
c	ความเร็วเสียง
C_p	ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่
C_v	ค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่
D_{Nozzle}	เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด
D_M	เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระ
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
f_i^{wax}	ฟลักซ์ดีของตัวถูกละลายหรือพาราฟินแว็กซ์
f_i^{vapor}	ฟลักซ์ดีของตัวถูกละลายหรือพาราฟินแว็กซ์ในไอหรือวัฏภาค
	คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
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	ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง
	หรือความดันก่อนการขยายตัว
R	ค่าคงที่ของแก๊ส
r^*	ขนาดวิกฤตของนิวเคลียส
Re	Reynolds Number
S	อัตราส่วนค่าการละลายที่ภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
T_C	อุณหภูมิวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

T_e	อุณหภูมิของไหลที่ปลายหัวฉีด
T_{pe}	อุณหภูมิก่อนการขยายตัว
T_0	อุณหภูมิของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความสูง
u_e	ความเร็วของไหลที่ปลายหัวฉีด
V_m	ปริมาตรโมลาร์
v_2^*	ปริมาตรเชิงโมลของตัวถูกละลาย
y_i	ค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในวัฏภาคคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
$y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})$	อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะก่อนการขยายตัว
$y^*(T, P)$	อัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะหลังการขยายตัว
Z	แฟกเตอร์สภาพอัด

ตัวอักษรกรีก

α	ค่าตัวแปรรูปทรงของปริมาตร
β	ค่าตัวแปรรูปทรงของพื้นที่
ρ	ค่าความหนาแน่นของไหล
μ	ความหนืดของไหล
θ	มุมสัมผัสที่วัดได้จากของเหลวบนของแข็ง
γ	แรงตึงผิว
ξ	องศาของการบวมตัว
ϕ	สัมประสิทธิ์ฟูกาซีดี
ω	อะเซนทริกแฟกเตอร์

ตัวห้อย

e	ตำแหน่งปลายหัวฉีด
i	ตำแหน่งพื้นผิวตกกระทบ
P	ความดันคงที่
V	ปริมาตรคงที่
AB	ตำแหน่งจาก A ไป B
M	การกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระ
i	ตัวถูกละลาย
0	เริ่มต้น
a	บรรยากาศ
c	จุดวิกฤต
pe	ตำแหน่งก่อนการขยายตัวหรือในภาชนะทนความดันสูง
m	โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

<i>SL</i>	รอยต่อของภูมิภาคระหว่างของแข็ง-ของเหลว
<i>SV</i>	รอยต่อของภูมิภาคระหว่างของแข็ง-ไอ
<i>LV</i>	รอยต่อของภูมิภาคของเหลว-ไอ

ตัวยก

wax

พาราฟินแว็กซ์

vapor

ไอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การเคลือบผิวเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน ป้องกันการสึกหรอ ลดการเสียดสี เพิ่มสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า หรือเพิ่มความสวยงามของพื้นผิว การเลือกใช้วัสดุหรือสารสำหรับนำมาเคลือบผิวขึ้นอยู่กับสมบัติของพื้นผิวที่ต้องการหลังการเคลือบผิว ความเหมาะสมของกระบวนการและความคุ้มค่าในการดำเนินการ กระบวนการเคลือบแบบพ่นละออง (Spray Coating) เป็นการพ่นละอองอนุภาคเคลือบลงบนพื้นผิววัสดุ จุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ สามารถสร้างผิวเคลือบที่มีความบาง และดำเนินการได้กับพื้นผิวที่ยากต่อการเคลือบด้วยวิธีอื่นๆ โดยทั่วไป แร็กซ์และพอลิเมอร์เป็นสารที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเคลือบผิว แต่เนื่องจากสารเหล่านี้เป็นสารที่มีหนืดสูงก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการเคลือบผิว จึงมีการใช้ตัวทำละลายและตัวถูกละลายเพื่อลดความหนืด ตัวถูกละลายและตัวทำละลายที่นิยมใช้ในกระบวนการเคลือบผิวเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีหลักการการใช้สารประเภทนี้

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [1] เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะเหนือจุดวิกฤตมีสมบัติทั้งเป็นตัวทำละลายและตัวถูกละลายที่ดีในสารประเภทแร็กซ์และพอลิเมอร์ มีจุดวิกฤตต่ำ คืออุณหภูมิสูงมากกว่าหรือเท่ากับ 31.0°C และความดันสูงมากกว่าหรือเท่ากับ 73.8 bar เป็นสารที่ไม่ติดไฟ มีราคาถูก และก่อให้เกิดมลภาวะน้อยกว่าสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดังนั้นจึงมีการศึกษาการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาใช้ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยแบบพ่นละอองเพื่อทดแทนการใช้สารอินทรีย์ระเหยง่าย [2] การนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองมีหลายเทคนิคขึ้นอยู่กับพฤติกรรมร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและสารเคลือบผิวนั้น เทคนิคที่ได้รับความนิยมและนำมาประยุกต์ใช้ เทคนิคที่สำคัญ คือ Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) [2,3]

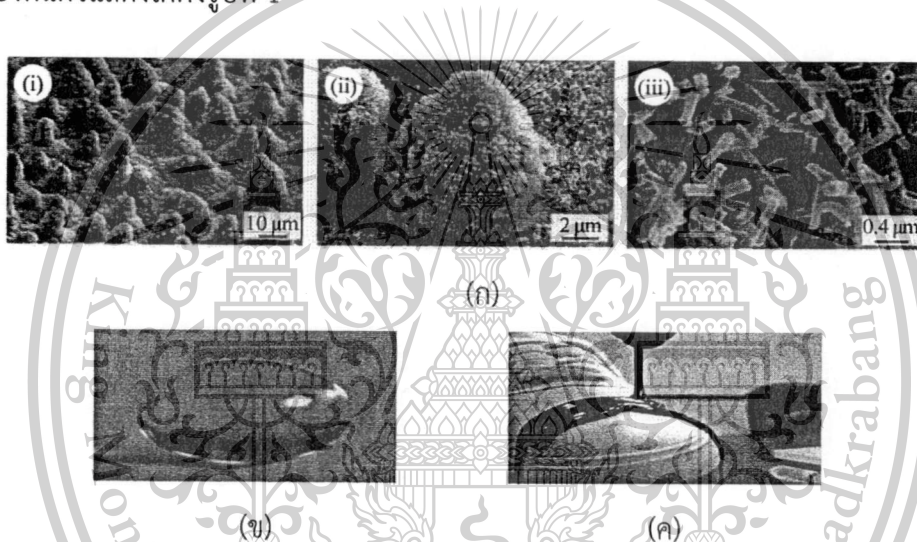
เทคนิค RESS เป็นหนึ่งในเทคนิคการผลิตอนุภาคขนาดเล็กเพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละออง มีกลไกสำคัญ คือ สารเคลือบผิวซึ่งเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นมากกว่า (วัสดุที่อยู่ด้านล่างของระบบ) จะต้องมีความสามารถในการละลายขึ้นไปยังคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เป็นตัวทำละลายและเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า (วัสดุที่อยู่ด้านบนของระบบ) เกิดเป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous Solution) อัดตัวที่มีความดันสูง สารที่มีความสามารถในการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เช่น แร็กซ์และสารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลต่ำอื่นๆ หลังจากนั้นฉีดพ่นสารละลายเนื้อเดียวผ่านรูขนาดเล็กหรือท่อฉีดอย่างรวดเร็วและเกิดการแยกวัสดุภาคขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายของสารดังกล่าวในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ลดลง สารเคลือบผิวจะเคลือบอยู่บนพื้นผิวในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์จะแยกวัสดุภาคออกสู่สภาวะบรรยากาศ อนุภาคของสารเคลือบผิวจะปกคลุมและเคลือบอยู่บนพื้นผิว ลักษณะสำคัญของเทคนิคนี้ คือ ปลายท่อฉีดจะจมลงไปยังวัสดุภาคของสารละลายเนื้อเดียวที่เป็นสารละลายผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและสารเคลือบผิว (วัสดุที่อยู่ด้านบนของระบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการเคลือบผิวเพื่อให้พื้นผิวมีสมบัติตามที่ต้องการและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวเป็นสมบัติพิเศษของพื้นผิวที่นิยมพัฒนาเพื่อป้องกันความชื้นของพื้นผิว การจำแนกความชอบและไม่ชอบน้ำสามารถจำแนกได้จากมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว ดังนี้ Hydrophilic Surfaces เป็นพื้นผิวที่มีสมบัติความชอบน้ำ มีมุมสัมผัสของหยดน้ำน้อยกว่า 90° Hydrophobic Surfaces เป็นพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ มีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่า 90° [4] และ Superhydrophobic Surfaces [5,6] เป็นพื้นผิวที่มีสมบัติพิเศษด้านความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด มีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่า 150° สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด อธิบายได้จากปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนผิวใบบัว (Lotus Effect) ซึ่งมีจุดเด่น คือ การมีสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง (Self-Cleaning) ปรากฏการณ์ธรรมชาตินี้เกิดขึ้นจากลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระ (Roughness) คล้ายหนาม มีช่องว่างในระดับ 5-10 μm มีผลึกคล้ายขี้ผึ้ง (Waxy Crystals) ทำให้แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวกับหยดน้ำมีค่าต่ำ ตัวอย่างของลักษณะพื้นผิวใบบัวและสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของพื้นผิวแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 (ก) ภาพขยายกำลังขยายสูงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวใบบัวที่กำลังขยายต่างๆ (i-iii) [5]
 (ข) ภาพลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวใบบัวที่แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด [5]
 (ค) ตัวอย่างวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด [7]

ด้วยสมบัติพิเศษนี้จึงมีการศึกษาวิธีการเคลือบพื้นผิววัสดุให้มีลักษณะพื้นฐานวิทยาของพื้นผิวคล้ายใบบัว เพื่อให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด สามารถป้องกันการเปียกชื้นและสิ่งสกปรกบนพื้นผิววัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งสามารถป้องกันชิ้นงานจากความเสียหายต่างๆ ได้

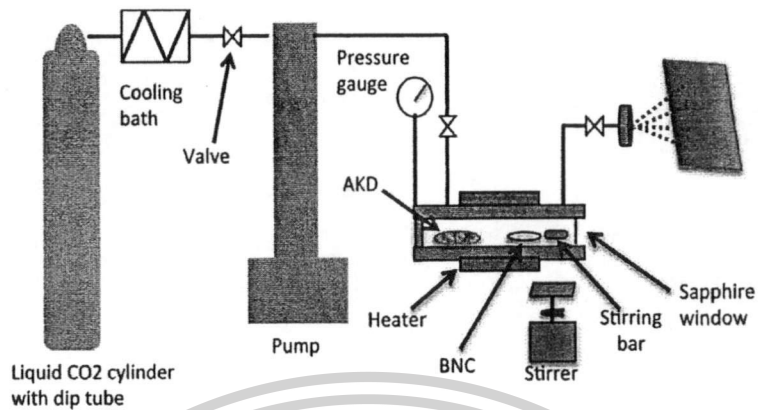
จากงานวิจัยของ Irene Rodriguez-Meizoso และคณะ [6] ได้ทำการศึกษากระบวนการเคลือบผิววัสดุโดยใช้สารละลายผสมระหว่างแวกซ์ คือ อัลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, AKD) และสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพจากธรรมชาติ (Bioactive Natural Compound, BNC ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตด้วยเทคนิค RESS พบว่า สามารถเตรียมพื้นผิววัสดุหลังการเคลือบที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ ตัวอย่างกระบวนการเคลือบผิวและลักษณะพื้นฐานวิทยาของพื้นผิววัสดุหลังกระบวนการเคลือบผิวแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 ตามลำดับ ปัจจุบันมีการนำสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้บน

เอกสารนี้ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่คิดค่าลิขสิทธิ์จากสำนักงานทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์แห่งประเทศไทย
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

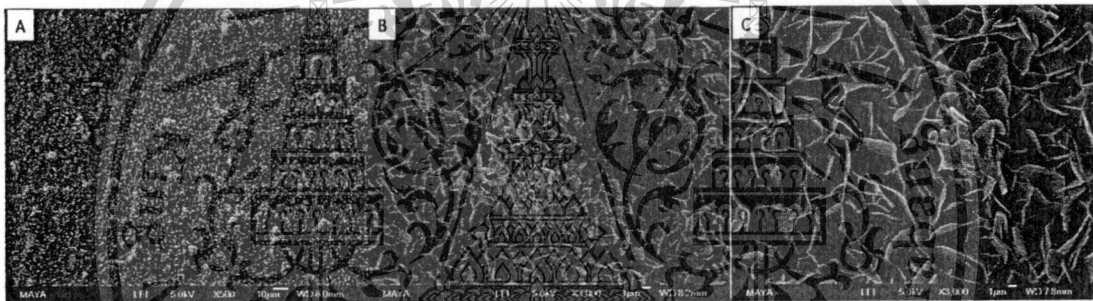
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตัวเองบานแรกของโลก [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]

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระบบการเคลือบผิวแบบพ่นละอองเพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว โดยศึกษาและออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS โดยใช้พาราฟินแว็กซ์เป็นสารเคลือบผิว ทั้งนี้เนื่องจากพาราฟินแว็กซ์เป็นสารที่นิยมใช้เป็นสารเคลือบผิวรวมทั้งมีความสามารถในการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ทำการเคลือบผิวบนแผ่น PMMA ซึ่งเป็นพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ เพื่อเตรียมพื้นผิวที่มีความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ (Goniometer) และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแว็กซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์บนแผ่น PMMA โดยเทคนิค RESS
2. ออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ในระดับห้องทดลอง
3. สามารถเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาและสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว 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

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS ด้วยชุดอุปกรณ์ทนความดันสูง
2. วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วย Goniometer และศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของแว็กซ์ด้วย SEM

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยใช้เทคนิค RESS ในระดับห้องทดลองและเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 สารเคลือบผิวจะถูกพาดด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แปรงทาสี ลูกกลิ้งทาสี ฯลฯ ทาเคลือบบนพื้นผิว วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวที่มีพื้นที่ของการเคลือบบริเวณกว้าง โดยพื้นผิวหลังการเคลือบผิวจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากชั้นของสารเคลือบผิว กระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับพื้นผิวที่ความหนาของชั้นเคลือบผิวไม่ส่งผลต่อสมบัติที่สำคัญของพื้นผิว

2.1.2 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Coating)

การเคลือบผิวด้วยวิธีการนี้เป็นการนำเอาหลักความแตกต่างของประจุไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการยึดเกาะของสารเคลือบผิวกับพื้นผิว วิธีการนี้เป็นวิธีการที่สามารถสร้างชั้นของสารเคลือบผิวที่มีชั้นของสารเคลือบที่มีความหนาน้อย แต่มีความซับซ้อนในการจัดตั้งระบบและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงจึงไม่ได้รับความนิยมใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป

2.1.3 การเคลือบผิวแบบจุ่ม (Dip Coating)

การเคลือบผิวแบบจุ่มเป็นการเคลือบผิวพื้นฐานที่ใช้นานและมีขั้นตอนการเคลือบไม่ซับซ้อนโดยมีหลักการ คือ การนำวัสดุที่ต้องการเคลือบผิวจุ่มลงในสารเคลือบผิว นิยมใช้เคลือบผิววัสดุขนาดเล็กที่ง่ายต่อการจุ่มเคลือบ วิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ ความหนาของชั้นเคลือบผิวหลังการเคลือบผิวมีความหนามากและควบคุมความหนาได้ยาก

2.1.4 การเคลือบผิวแบบพ่นละออง (Spray Coating)

กระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองเป็นเทคนิคการเคลือบผิวที่มีลักษณะสำคัญ คือ การผลิตละอองอนุภาค (Atomization) ของสารเคลือบผิวเคลือบบนพื้นผิว จุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ สามารถสร้างแผ่นฟิล์มบางของสารเคลือบผิว ใช้สารเคลือบผิวในปริมาณน้อย และสามารถเคลือบผิวได้ในบริเวณที่ยากต่อการเคลือบผิว ปัจจุบันมีการพัฒนาการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นตัวทำละลาย ตัวถูกละลาย และตัวพาสารเคลือบผิวในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละออง กระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองสามารถสร้างพื้นผิวที่มีชั้นความหนาของสารเคลือบในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร

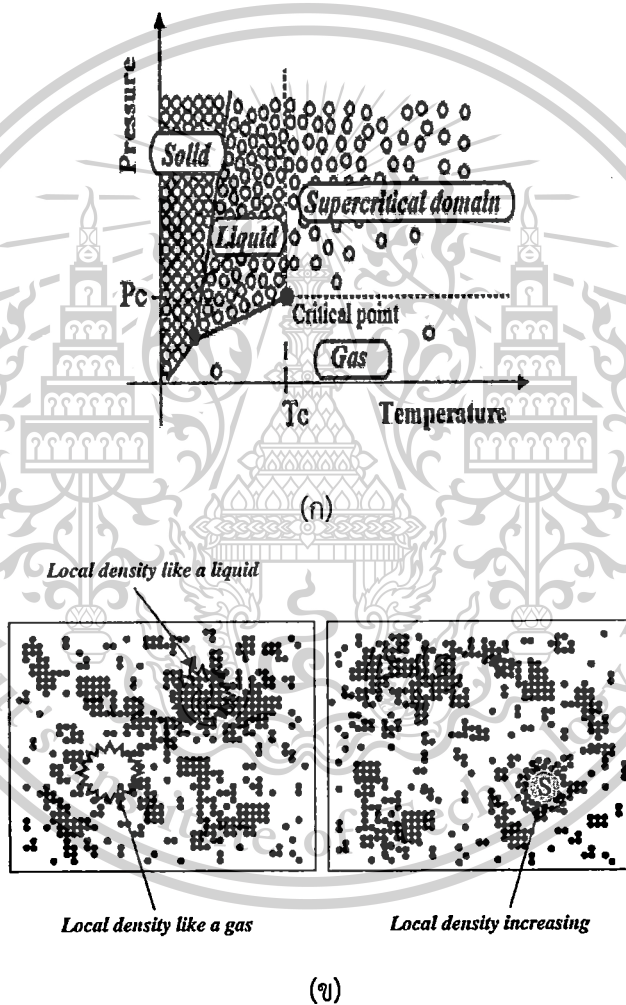
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2 ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluids) [10]

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



รูปที่ 2.1 (ก) ตัวอย่างแผนผังวัฏภาคและลักษณะการกระจายตัวโมเลกุลของสารบริสุทธิ์ [10]

(ข) ลักษณะการกระจายตัวของของไหลเหนือวิกฤต [10]

สมบัติของของไหลเหนือวิกฤตแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 พบว่าของไหลเหนือวิกฤตจะมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สและของเหลว โดยมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลว มีความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ใกล้เคียงกับแก๊ส

เอกสารนี้ใกล้เคียงกับเอกสารอื่น ๆ ที่ใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

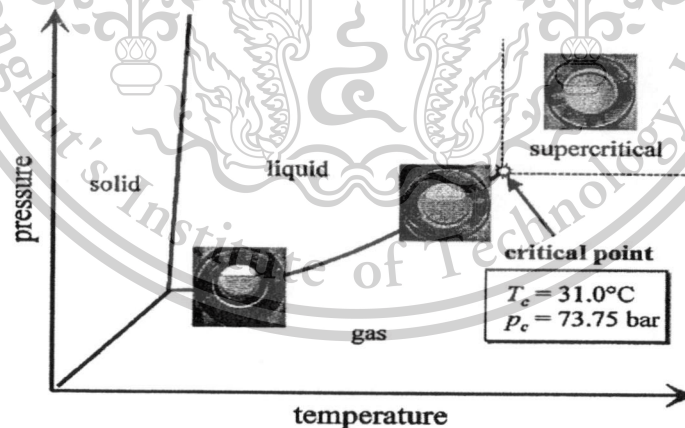
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.1 ความหนาแน่น ความหนืด สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแก๊ส ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว [1]

วัฏภาค	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความหนืด($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (mm^2/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]

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะเหนือวิกฤต เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมไม่ติดไฟมีราคาถูก และจุดวิกฤตต่ำ คือ มีอุณหภูมิวิกฤต 31.0°C และความดันวิกฤต 73.8 bar และมีสมบัติเป็นทั้งตัวถูกละลายและตัวทำละลายที่ดี ในสารอินทรีย์จึงมีการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น กระบวนการเคลือบผิว กระบวนการทำความสะอาด และการเร่งการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 พบว่าลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเข้าสู่ภาวะวิกฤต โดยเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์อยู่สถานะต่ำกว่าจุดวิกฤตที่สมดุลระหว่างสถานะของเหลวและแก๊สจะสังเกตลักษณะของวัฏภาคแบ่งออกเป็นสองชั้นอย่างชัดเจน ด้านบนแสดงวัฏภาคของแก๊ส ด้านล่างจะแสดงวัฏภาคของของเหลว และเมื่อเข้าสู่ภาวะวิกฤตและสถานะเหนือวิกฤตจะไม่สามารถสังเกตลักษณะความแตกต่างระหว่างวัฏภาคของแก๊สและของเหลวได้



รูปที่ 2.2 แผนผังวัฏภาคและลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ ที่สังเกตได้จากการจับภาพ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

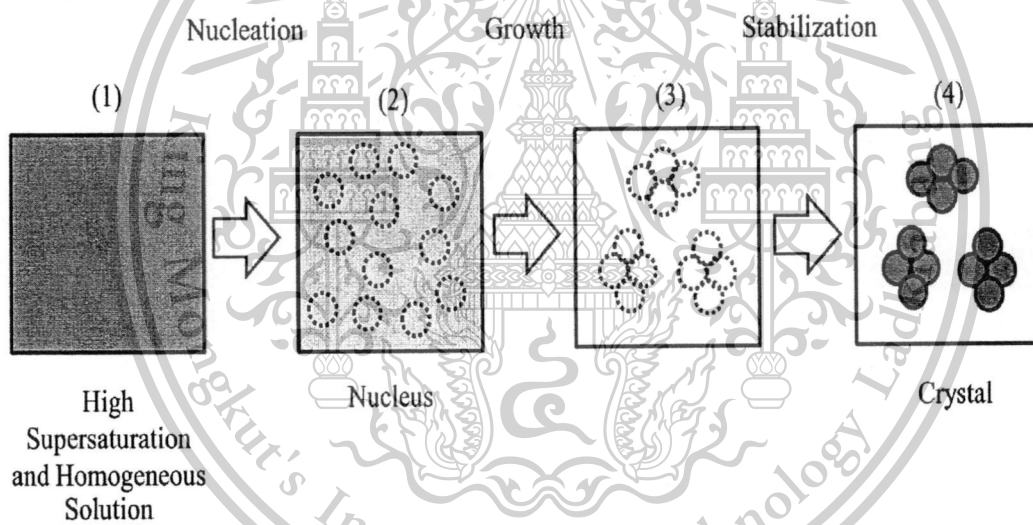
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3 กระบวนการเกิดผลึก [13,14]

กระบวนการเกิดผลึกหรืออนุภาคโดยทั่วไปมี 4 ขั้นตอน คือ

1. การละลายเป็นสารละลายเนื้อเดียว ระหว่างวัฏภาคของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย ในลักษณะนี้สารทั้งสองจะเกิดการละลายกันจนถึงจุดอิ่มตัวหรือมากกว่าจุดอิ่มตัว
2. การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เมื่อระบบสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลายเนื้อเดียวเกิดการแยกวัฏภาคของตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นนิวเคลียสของตัวถูกละลายขึ้น
3. การเจริญเติบโตของนิวเคลียส (Growth) หลังจากเกิดนิวเคลียสของตัวถูกละลายแล้ว นิวเคลียส จะเกิดการรวมตัวกันในขั้นตอนนี้ เกิดเป็นโครงสร้างของผลึกขึ้นดังในรูปที่ 2.3
4. การคงสภาพของผลึก (Stabilization) ผลึกจะหยุดการเจริญเติบโตเองการหยุดการเจริญเติบโต เนื่องจากไม่มีแรงขับเคลื่อนในการเจริญเติบโตของเซลล์ เช่น อุณหภูมิและความดัน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

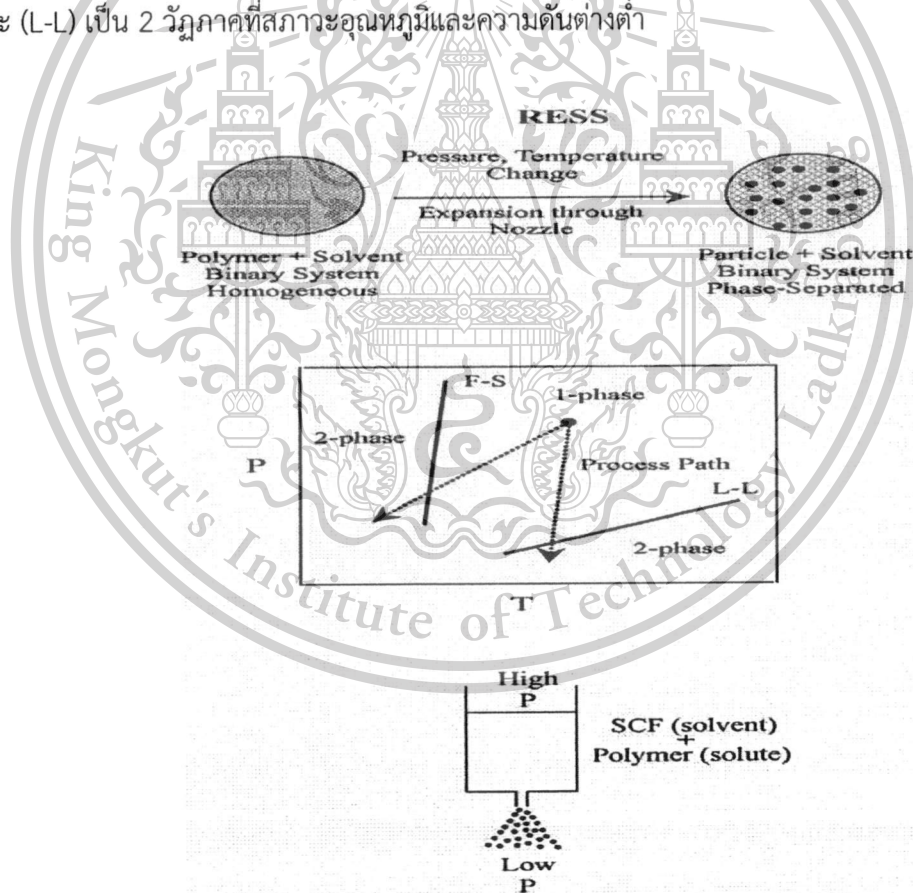
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 ทำให้ความสามารถในการละลายของวัสดุนั้นลดลงเกิดการแยก วัฏภาคเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ตัวอย่างกระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยของไหลเหนือวิกฤตโดยใช้เทคนิค RESS และผังเส้นทางของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์และของไหลเหนือวิกฤตแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 โดยสารละลายระหว่างพอลิเมอร์และของไหลเหนือวิกฤตที่มีลักษณะเป็นวัฏภาคเนื้อเดียว (Homogeneous Phase) เกิดการแยกวัฏภาคเมื่อเมื่อลดอุณหภูมิและความดันผ่านเส้นสมดุลการละลาย (F-S) และ (L-L) เป็น 2 วัฏภาคที่สถานะอุณหภูมิและความดันต่างต่ำ



รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Rapid Expansion of Supercritical

Solutions และผังเส้นทางดำเนินการของกระบวนการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์

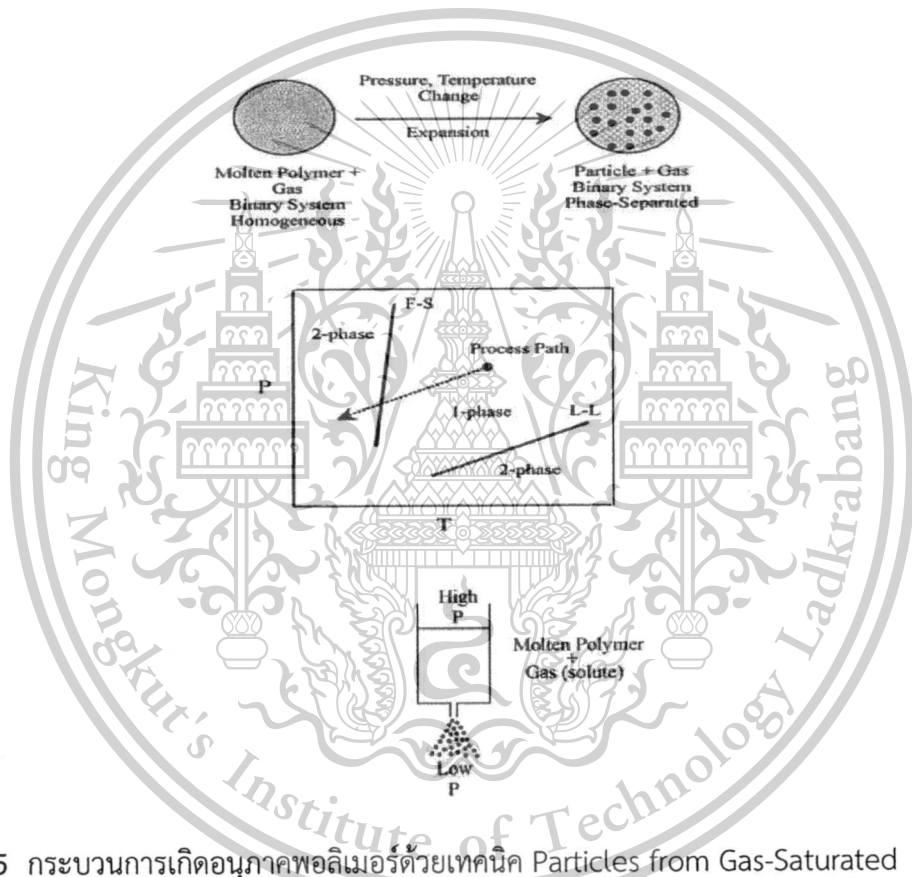
และของไหลเหนือวิกฤต [3]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.2 Particles from Gas-Saturated Solutions (PGSS)

การเกิดอนุภาคด้วยเทคนิค PGSS มีพื้นฐานมาจากความสามารถในการละลายของของไหลเหนือวิกฤตในสารต่างๆ เทคนิคนี้เหมาะกับการใช้งานในกรณีที่ต้องการของไหลเหนือวิกฤตเป็นตัวถูกละลาย กลไกในการเกิดอนุภาคเริ่มจากของไหลเหนือวิกฤตเกิดการแพร่และละลายเข้าไปในสารเคลือบผิวหรือพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิและความดันสูง ลดความดันลงอย่างรวดเร็วผ่านท่อหรือหัวฉีดและเกิดการขยายตัว รวมทั้งอุณหภูมิที่ลดลงตามหลักการของจุล-ทอมสัน ของไหลเหนือวิกฤตที่ละลายอยู่ในสารละลายจะระเหยกลายเป็นไอออกไป เกิดการตกตะกอนของสารละลายหรือสารเคลือบผิวกลายเป็นละอองอนุภาคนาขนาดเล็กที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยในระดับไมโครเมตรแสดง 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 จากนั้นของไหลเหนือวิกฤตหรือแก๊สจะทำหน้าที่เป็นตัวต้านการละลาย (Anti-Solvent) ของพอลิเมอร์ เกิดการตกตะกอนของอนุภาคพอลิเมอร์เมื่อความเข้มข้นและความดันของของไหลเหนือวิกฤตในสารละลายเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

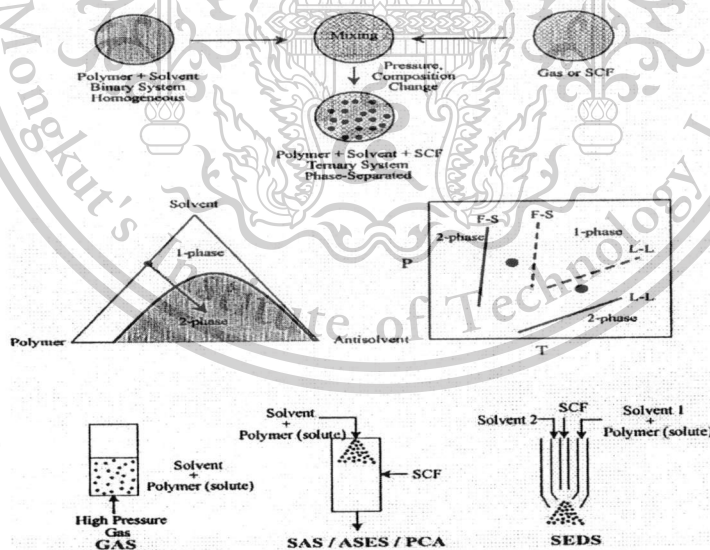
2.4.4 Supercritical Anti-Solvent Process (SAS)

เทคนิคนี้ใช้ในระบบการสกัดแบบ Aerosol Solvent (Aerosol Solvent Extraction System, ASES) หรือกระบวนการตกตะกอนด้วยการกดอัดตัวด้านการละลาย (Compressed Anti-Solvent, PCA) เทคนิคนี้ใช้ของไหลเหนือวิกฤตเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวด้านการละลาย (Anti-Solvent) เช่นเดียวกับเทคนิค GAS มีข้อแตกต่าง คือ กลไกการสัมผัสระหว่างของไหลเหนือวิกฤตกับสารหรือพอลิเมอร์ที่ละลายในตัวทำละลายของเหลว จากนั้นพ่นสารละลายเป็นละอองเข้าไปในภาชนะที่มีของไหลเหนือวิกฤตทำหน้าที่เป็นตัวด้านการละลายไหลอยู่ ผลจากการสัมผัสกันอย่างรวดเร็วระหว่างสารสองชนิดทำให้เกิดการละลายอิมตัวยิ่งยวดของสารละลายสูง และเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาค ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการแบบต่อเนื่องได้ ซึ่งมีความสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

2.4.5 Solution Enhanced Dispersion by Supercritical Fluid (SEDS)

เทคนิคนี้ปรับปรุงมาจากเทคนิค SAS คือ การนำสารละลายของเหลวและของไหลเหนือวิกฤต พ่นละอองไปพร้อมกัน โดยใช้หัวฉีดที่ออกแบบเป็นพิเศษแบบสองช่องทางหรือสามช่องทางสำหรับใช้ตกตะกอนสารองค์ประกอบหนึ่งหรือสองชนิด กระบวนการนี้มีจุดประสงค์ในการใช้ของไหลเหนือวิกฤตในหลายรูปแบบ คือ เป็นตัวด้านการละลายและเป็นตัวกลางให้เกิดการกระจายตัว (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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

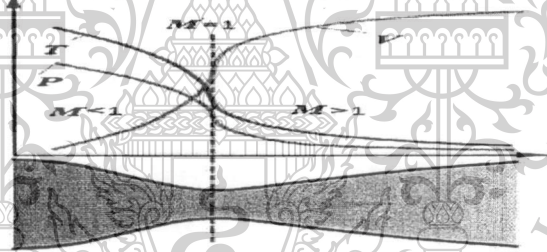
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการเกิดอนุภาคด้วยของไหลเหนือวิกฤต [3]

เทคนิค	หน้าที่ของของไหลเหนือวิกฤต	หน้าที่ของตัวทำละลายอินทรีย์	การแยกวิภาค
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) [15,16]

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



รูปที่ 2.7 การประมาณความเร็วของการไหล (V) ร่วมกับผลของอุณหภูมิ (T) และความดัน (P) [15,16]

โดย $M < 1$ คือ การไหลที่ความเร็วใต้เสียง

$M = 1$ คือ การไหลที่ความเร็วเสียง

$M > 1$ คือ การไหลที่ความเร็วเหนือเสียง

การไหลของแก๊สผ่านหัวฉีด เดอ ลาวาล เป็นแบบ Isentropic และความเร็วใต้เสียง แก๊สมีลักษณะอัดตัวได้และมีการเปลี่ยนแปลงความดันเกิดขึ้นที่คอหรือจุดปลายของหัวฉีด (Throat) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด ความเร็วของแก๊สจะกลายเป็นความเร็วเสียง เมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นหลังผ่านหัวฉีดแก๊สจะยังคงขยายตัวทำให้ความเร็วการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นกลายเป็นความเร็วเหนือเสียง

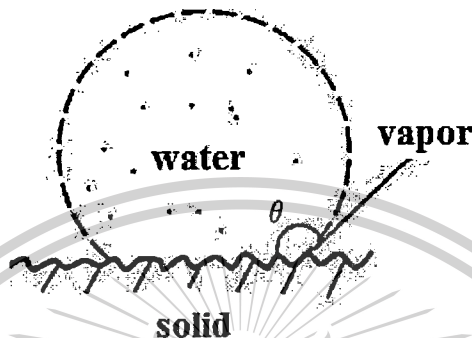
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.6 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว (Hydrophobicity of Surfaces)

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



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างลักษณะและมุมสัมผัสของหยดน้ำที่สภาวะสมดุล [17]

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

(2-1)

โดย θ คือ ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของของเหลวบนของแข็ง (-)

γ_{SV} คือ ค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ไอ (N/m)

γ_{SL} คือ ค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว (N/m)

γ_{LV} คือ แรงตึงผิวของของเหลว (N/m)

การจำแนกสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิวจากมุมสัมผัสของหยดน้ำ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของหยดน้ำและสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิว

มุมสัมผัสของหยดน้ำ (θ)	สมบัติความชอบน้ำของพื้นผิว
น้อยกว่า 90°	พื้นผิวแสดงสมบัติความชอบน้ำ
มากกว่า 90°	พื้นผิวแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำ
มากกว่า 150°	พื้นผิวแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด

สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวขึ้นกับสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ สมบัติทางกายภาพของพื้นผิวซึ่งขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวที่ส่งผลต่อแรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว และสมบัติทางทางเคมีซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันภายในสารเคมีของพื้นผิว

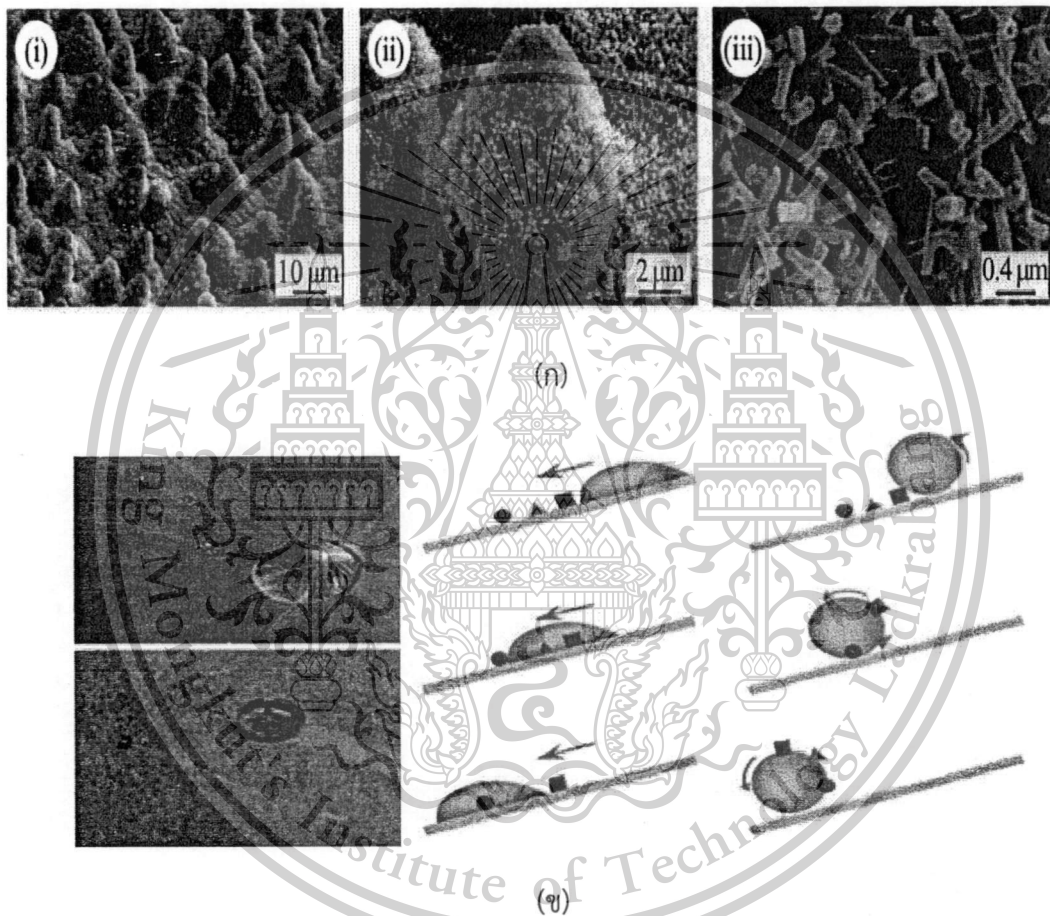
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.6.1 ปรากฏการณ์บนพื้นผิวใบบัว (Lotus Leaf Effect) [5-6, 17]

สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด [8] ของพื้นผิวอธิบายได้จากปรากฏการณ์หยดน้ำกลิ้งบนผิวใบบัวซึ่งมีจุดเด่น คือ มีสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง ปรากฏการณ์ธรรมชาตินี้เกิดขึ้นจากลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ คล้ายหนาม มีช่องว่างในระดับ 5-10 μm มีผลึกคล้ายซี่ฟัน ทำให้แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวกับหยดน้ำมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัวและสมบัติการทำความสะอาดตัวเองจะอาศัยแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของหยดน้ำกับสิ่งสกปรกเกิดกระบวนการทำความสะอาดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข)



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

(ข) ลักษณะการกลิ้งของหยดน้ำบนใบบัวและการกลิ้งของหยดน้ำในการทำมาสะอาดสิ่งสกปรก [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

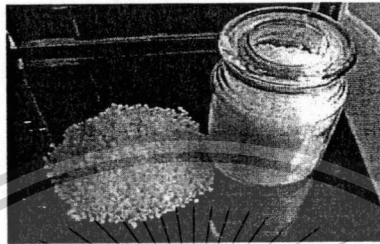
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.7 พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax) [9,19]

แว็กซ์เป็นสารหรือวัสดุทางเคมีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องสำอาง สารหล่อลื่น ใช้เป็นวัสดุขัดเงาและเคลือบผิว เป็นต้น

พาราฟินแว็กซ์เป็นแว็กซ์ที่สกัดหรือแยกได้จากน้ำมันปิโตรเลียม ปริมาณและชนิดของแว็กซ์จะขึ้นกับแหล่งกำเนิดของน้ำมันปิโตรเลียม สมบัติต่างๆ ของแว็กซ์จะขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์อะตอมในโมเลกุลของแว็กซ์ ตัวอย่างพาราฟินแว็กซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างลักษณะของพาราฟินแว็กซ์

2.8 การแพร่ของสาร [20]

กลไกสำคัญของการเกิดอนุภาคด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยใช้เทคนิค RESS และ PGSS นั้น คือ การแพร่ของสารเกิดอนุภาคและคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่แสดงถึงลักษณะ เฉพาะของทั้งสองเทคนิค เทคนิค RESS เป็นเทคนิคที่มีกลไกที่สำคัญ คือ สารเกิดอนุภาคมีความสามารถในการแพร่และละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ส่วนเทคนิค PGSS เป็นเทคนิคที่มีกลไกสำคัญ คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความสามารถในการแพร่และละลายเข้าไปยังสารที่ต้องการผลิตอนุภาค ดังนั้นการศึกษากลไกหรือทิศทางของการแพร่ของสารจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบการทดลองและศึกษากระบวนการ

2.8.1 การแพร่ของสารไปยังวัฏภาคของไหลเหนือวิกฤต

การแพร่ คือ การกระจายตัวของโมเลกุลของสารจากจุดหรือบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังจุดที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าด้วยการเคลื่อนที่เชิงสุ่มของโมเลกุล การแพร่จะทำให้เกิดการผสมของสารอย่างช้า การแพร่ก็ยังคงเกิดขึ้นแม้ว่าจะสารจะผสมกันโดยสมบูรณ์หรือเข้าสู่ภาวะสมดุล

การแพร่ของโมเลกุลโดยทั่วไปเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) [20] ดังสมการที่ 2-2

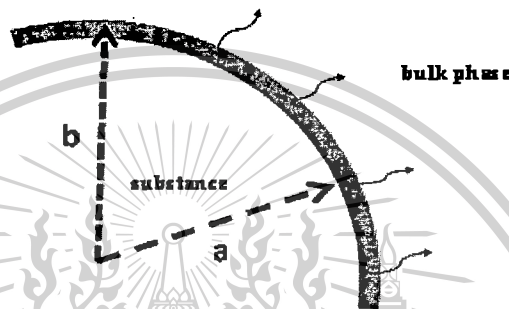
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C \quad (2-2)$$

โดย C คือ ความเข้มข้น (mol/dm^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 คือ เวลา (s)
 D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จาก A ไป B (m^2/s)

จากสมการที่ 2-2 พบว่า พจน์ด้านซ้ายแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อเวลา และ พจน์ด้านขวาแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่แนวแกนใดๆของระบบ โดยมี D_{AB} เป็นสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงอัตราการแพร่ของสารผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ค่า D_{AB} จะขึ้นกับอุณหภูมิและความดันของสาร

โดยทั่วไปการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะต้องพิจารณาลักษณะของพื้นผิวของการแพร่ว่ามีลักษณะเป็นแบบระนาบ ทรงกระบอก หรือทรงกลม ตัวอย่างการแพร่ของสารบนพื้นผิว ทรงกลม แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 [20]



รูปที่ 2.11 แผนภาพการแพร่ของสารบนพื้นผิวทรงกลม

โดยสามารถเขียนการแพร่ผ่านทรงกลมกลวงได้ดังสมการที่ 2-3 [20]

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

จากสมการที่ 2-3 สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองเมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สภาวะดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมาณระยะเวลาในกระบวนการต่างๆ ได้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Irene Rodriguez-Meizoso และคณะ [6] ได้ศึกษาการเตรียมพื้นผิวที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ยิ่งยวดด้วยเทคนิค RESS โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย การเตรียมพื้นผิวทำได้โดยใช้สารละลายผสมระหว่างแก๊ซ คือ อัลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, AKD) และสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพจากธรรมชาติ (Bioactive Natural Compound, BNC) ในคาร์บอนได ออกไซด์เหนือวิกฤต พบว่า BNC ทำให้เกิดการตกตะกอนขนาดเล็กของ AKD โดยขนาด AKD แบ่งออกได้เป็น 2 ระดับ คือ 2 μm และ 10-20 μm ลักษณะสัณฐานวิทยาที่มีพื้นผิวขรุขระนี้ทำให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ได้เฉพาะเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Yury Chernyak และคณะ [2] ได้ศึกษาการเคลือบผิวด้วยเพอร์ฟลูออโรพอลิเอเทอร์ไดเอไมด์ (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 μm หัวฉีดยาว 11 mm ความดัน 165 bar โดยนิยามของประสิทธิภาพการพ่น คือ ปริมาณ PFD ทั้งหมดที่เคลือบอยู่บนตัวอย่างต่อปริมาณของ PFD ทั้งหมดที่อยู่ในสารละลาย พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิก่อนการพ่นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดหมอกและการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ประสิทธิภาพของการพ่นของ PFD สูงขึ้น

Jae-Jin Shim และคณะ [21] ศึกษาการเคลือบผิวด้วยพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค RESS ซึ่งอยู่ในลักษณะสารแขวนลอยในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของขนาดหัวฉีด (Nozzle Size) แบ่งเป็น 3 ขนาด คือ 30, 50 และ 100 μm 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 รวมทั้งฟิล์มมีความหนาแน่นมากกว่าการพ่นในระยะเวลานั้นๆ

Can Quan และคณะ [22] ได้ศึกษาการเตรียมพื้นผิวของกระดาษที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดด้วยการเคลือบผิวกระดาษด้วย AKD โดยเทคนิค RESS พบว่าสามารถสร้างพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดที่มีมุมสัมผัสหยดน้ำ 173.0° เมื่อเทียบกับกระบวนการเคลือบผิวด้วย AKD หลอมเหลวที่สามารถเตรียมพื้นผิวกระดาษด้วย AKD ที่มีมุมสัมผัสหยดน้ำ 109.0° และทำการศึกษาผลความดันก่อนการขยายตัว 100-300 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว $40-60^\circ\text{C}$ ระยะการพ่น 10 และ 50 mm ที่มีผลต่อขนาดอนุภาค AKD พบว่าสามารถสร้างอนุภาค AKD ที่มีขนาดอนุภาค 1-2 μm โดยขนาดอนุภาคจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว และลดระยะการพ่นสั้นลง

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, $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$)

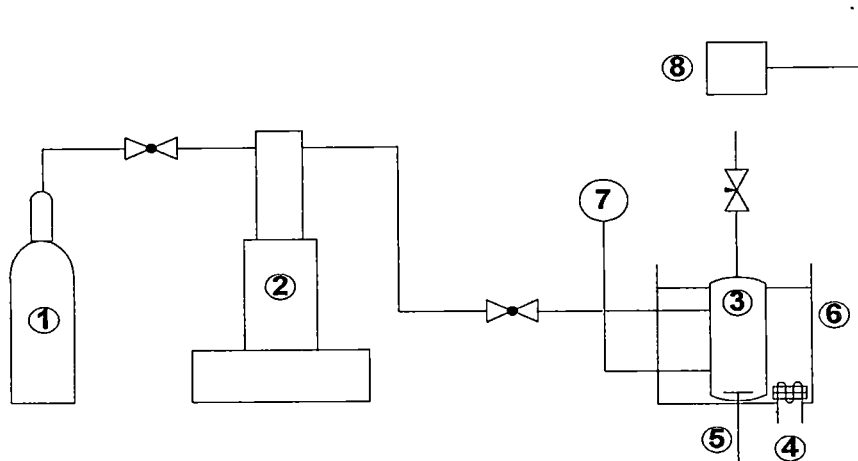
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ปั๊มอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D)
2. เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater)
3. เครื่องกวน (Stirrer)
4. อ่างน้ำมันซิลิโคนให้ความร้อน
5. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)
6. แผ่น PMMA 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 mm
12. ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Cylinder)
13. ภาชนะทนความดันสูง ปริมาตร 15 cm^3 (Taiatsu Techno)
14. ภาชนะทนความดันสูงแบบ Visualize Cell
15. ตู้ดูดสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

3.3 การศึกษากระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์

3.3.1 การศึกษาผลจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำและคุณลักษณะของพื้นผิว PMMA

ชั่งน้ำหนักพาราฟินแว็กซ์ ปริมาณ 0.25 g ใส่ในภาชนะทนความดันสูง (ข้อบัพทอล 0.3 wt% สำหรับระบบผสม 3 องค์ประกอบ) ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1 อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าภาชนะทนความดันสูง โดยให้ความร้อนผ่านเครื่องให้ความร้อนโดยน้ำมันซิลิโคนเป็นเวลา 2-18 h จากนั้นเปิดวาล์วเพื่อพ่นละอองพาราฟินแว็กซ์ไปยังแผ่น PMMA ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำด้วยเครื่อง Goniometer เพื่อวัดระดับความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยศึกษาผลของระยะการพ่น (ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่น PMMA) กระบวนการพ่นซ้ำ อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว ที่มีผลต่อคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองพาราฟินแว็กซ์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินการได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการดำเนินการในกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS

สภาวะในการดำเนินการ	
ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดและแผ่นทดสอบ	
หรือระยะการพ่น (cm)	1, 10 และ 15
จำนวนครั้งของการพ่นซ้ำ (ครั้ง)	4, 5 และ 6
ความดันก่อนการขยายตัว (bar)	120, 150 และ 170
อุณหภูมิก่อนการขยายตัว ($^{\circ}\text{C}$)	40, 50, 70, 75 และ 85
มุมของการพ่นบนกับแผ่นทดสอบ (θ)	90° , 120° , 135° และ 150°

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.2 การศึกษาผลจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่มต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำและคุณลักษณะของพื้นผิว PMMA

1. ชั่งน้ำหนักพาราฟินแว็กซ์ปริมาณ 2.5 g
2. นำพาราฟินแว็กซ์ใส่ในปิกเกอร์
3. ละลายพาราฟินแว็กซ์ด้วยสารละลายโทลูอิน ปริมาตร 50 ml
4. นำแผ่น PMMA วางไว้ในตู้ดูดสารเคมีให้โทลูอินระเหยออกจากพาราฟินแว็กซ์เป็นเวลา 24 h

3.4 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

การทดสอบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำทำการทดสอบด้วยด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact Angle Measurement) ซึ่งเป็นการวัดมุมระหว่างเส้นสัมผัสของหยดของน้ำที่ไม่เคลื่อนที่บนพื้นผิว การวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของแข็งจะใช้เครื่อง Goniometer การทดสอบจะใช้วิธีการที่เรียกว่า Sessile Drop โดยหยดหยดน้ำผ่านหลอดหยดขนาดเล็ก (Syringe) กำหนดปริมาตรหยดน้ำ 3-5 μl จากนั้นเลื่อนแผ่นทดสอบขึ้นไปสัมผัสกับหยดน้ำประมาณ 2-5 s หลังจากนั้นเลื่อนแผ่นทดสอบลง หยดน้ำจะเกาะอยู่บนพื้นผิวของแผ่นทดสอบบันทึกภาพด้วยกล้องความละเอียดสูงและส่งภาพไปยังโปรแกรมคำนวณมุมสัมผัสของหยดน้ำ

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยใช้เทคนิค RESS ดังนี้

กระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS

4.1 สมดุลวัฏภาคระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์

ในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS กลไกสำคัญของกระบวนการนี้ คือ การละลายของวัสดุหรือสารเคลือบผิวในวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [23] 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 (cm^3/mol)
 ϕ_i^{wax} คือ สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของพาราฟินแว็กซ์ (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ฟูกาซิตีในวัฏภาคของไหลเหนือวิกฤตสามารถเขียนได้ดังสมการ 4-3

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

โดย y_i คือ ค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ในวัฏภาคคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
 ϕ_i^{vapor} คือ สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของพาราฟินแวกซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

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

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

เนื่องจากความดันในระบบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความดันสูงจึงไม่สามารถพิจารณาวัฏภาคแก๊สเป็นแก๊สอุดมคติได้ ดังนั้นจึงใช้สมการสถานะของแก๊สจริงในการประมาณค่า ϕ_i^{vapor} สมการสถานะ Peng-Robinson สามารถทำนายค่าการละลายของไฮโดรคาร์บอนในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้แม่นยำ โดยมีความผิดพลาดร้อยละ 10-20 เนื่องจากค่าการละลายของไฮโดรคาร์บอนในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าน้อยมาก จึงกำหนดให้การละลายของไฮโดรคาร์บอนในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารละลายเจือจางอนันต์ (Infinite Dilution) โดยสามารถเขียน ϕ_i^{vapor} หรือ ϕ_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 $q_1 = \frac{a_1}{2RT\sqrt{2b_1}} \quad (4-6)$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น เมื่อผู้นานใช้เอกสารฉบับนี้เพื่อใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

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

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

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

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

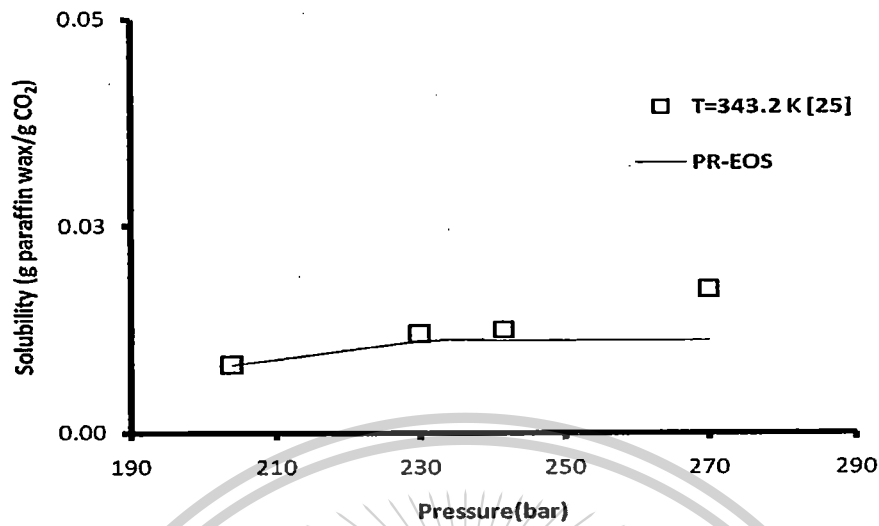
$$B = \frac{bP}{RT} \quad (4-13)$$

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม Matlab ในการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ตัวอย่างการประมาณค่าการละลายแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ความดันประมาณ 200-270 bar พบว่าเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่ามากขึ้น โดยมีค่าการละลายน้อยกว่า 5 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

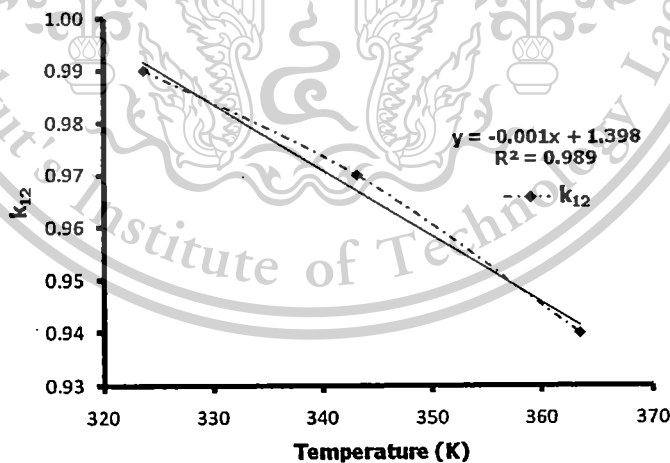
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 70°C

ทั้งนี้เนื่องจากค่า k_{12} เป็นค่าพารามิเตอร์ปรับแก้แอนตรกิริยาที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงได้ศึกษาการนำค่าการละลาย [24,25] เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิ นำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการประมาณค่า k_{12} ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าค่า k_{12} มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า k_{12} จะมีค่าลดลงหรือมีแอนตรกิริยาลดลงดังแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์ปรับแก้แอนตรกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

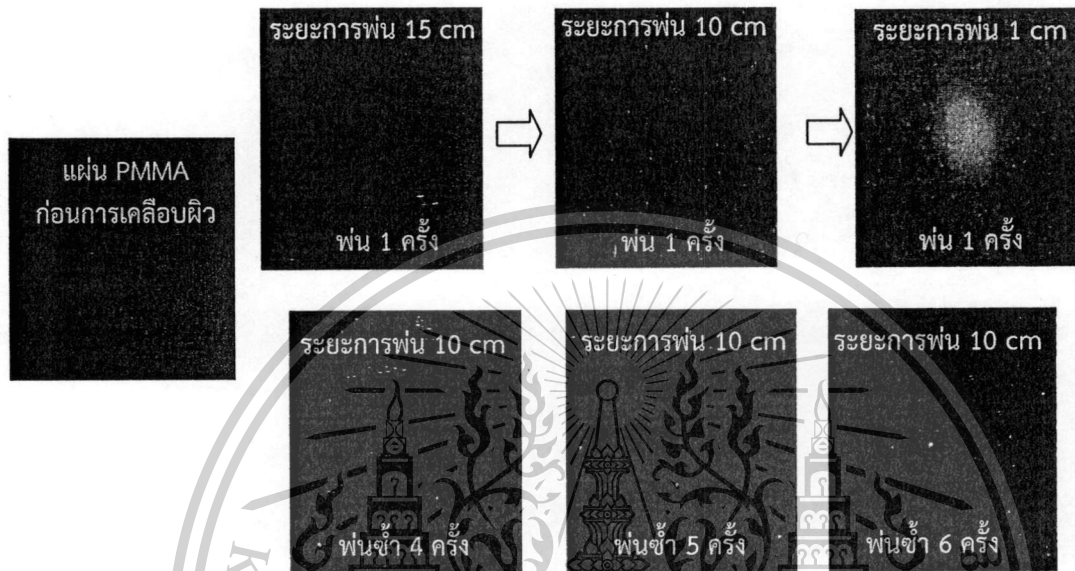
ค่ามุมสัมผัสของ หยดน้ำของแผ่น PMMA ก่อนกระบวนการ เคลือบผิว(θ)	ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของแผ่น PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วย ละอองพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS (θ)				
	ระยะการ พ่น	15 cm	10 cm		1 cm
80.0°		104.7°	99.8°		135.4°
	การพ่นซ้ำ		4 ครั้ง	5 ครั้ง	6 ครั้ง
			95.8°	106.8°	102.5°

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสมบัติความไม่ชอบน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวเมื่อลดระยะการพ่นจาก 15 เป็น 10 cm สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญโดยมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ เพิ่มขึ้นจาก 80.0° (แผ่น PMMA ก่อนการเคลือบผิว) เป็น 104.7° ที่ระยะการพ่น 15 cm และเมื่อลดระยะการพ่นลงโดยทำการพ่นที่ระยะ 10 cm ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของพื้นผิวมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 99.8° จากนั้นจึงทำการพ่นซ้ำที่ระยะ 10 cm โดยพ่นซ้ำ 4-6 ครั้ง พบว่าการพ่นซ้ำไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำในช่วง $95.8-106.8^{\circ}$ และเมื่อลดระยะการพ่นโดยทำการพ่นที่ระยะ 1 cm พบว่าค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่า 135.4° ดังแสดงในตารางที่ 4.1

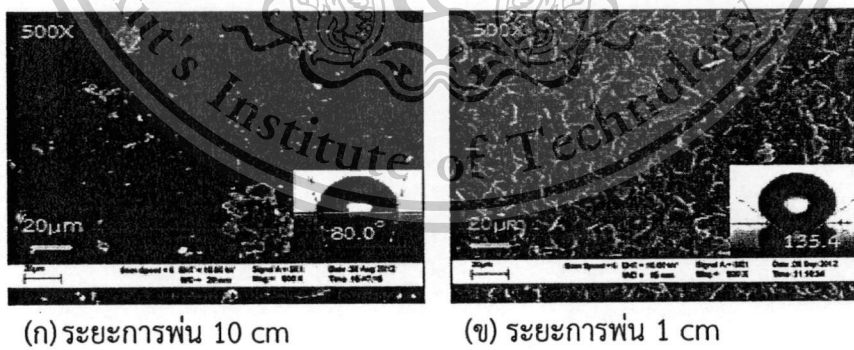
จากนั้นทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวเบื้องต้นของแผ่น PMMA ทั้งก่อนและหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยการถ่ายภาพจากกล้องวิดีโอกำลังขยาย 120 เท่า และเทคนิค SEM ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าเมื่อลดระยะการพ่นจาก 15, 10 และ 1 cm โดยทำการพ่นซ้ำที่ระยะ 10 cm พบว่าที่ระยะการพ่น 1 cm สามารถสังเกตเห็นอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ที่เคลือบบนแผ่น PMMA ได้อย่างชัดเจน คือ มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวเคลือบบนพื้นผิว PMMA ที่มีสีดำดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิวแผ่น PMMA ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และจากการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM บนพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบผิวที่ระยะ 10 และ 1 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าที่ระยะการพ่น 1 cm มีอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์เคลือบอยู่หนาแน่นและต่อเนื่องมากกว่าที่ระยะ 10 cm ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พื้นผิว PMMA มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำมากกว่าที่ระยะการพ่น 10 cm ดังรูปที่ 4.4 จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ระยะการพ่นมีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิว และพบว่าที่ระยะการพ่น 1 cm เป็นระยะการพ่นที่มีความเหมาะสมในกระบวนการเคลือบผิวด้วยละอองพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS

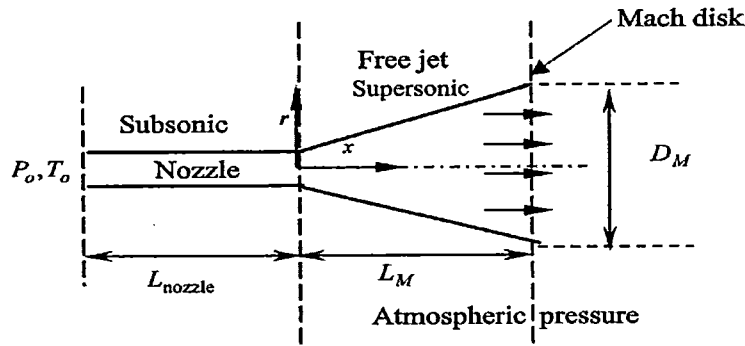


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโอกำลังขยาย 120 เท่า แสดงลักษณะของพื้นผิว PMMA ในกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar



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

การประมาณค่าระยะการพ่นที่เหมาะสมในกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS สามารถประมาณค่าได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-14 และอธิบายได้ดังรูปที่ 4.5 หัน [23,26] โดยระยะการพ่นจะแปรผันโดยตรงกับค่าความดันก่อนการขยายตัวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด



รูปที่ 4.5 แบบจำลองกระบวนการเคลื่อนผิวโดยเทคนิค RESS [23]

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

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

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

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 หลังกระบวนการเคลื่อนผิวด้วยเทคนิค RESS ในหัวข้อที่ 4.5 ต่อไป

4.3 การเกิดอนุภาคโดยเทคนิค RESS

การเกิดอนุภาคโดยเทคนิค RESS [21,23] สามารถอธิบายได้จากอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation Ratio, S) โดยอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Rate) และอัตราการเติบโต (Growth Rate) [27,28] ซึ่งส่งผลต่อขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดเป็นการเปรียบเทียบค่าการละลายหรืออัตราส่วนโมลของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย (พาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต) ที่สภาวะความดันและอุณหภูมิ ก่อนการขยายตัวเทียบกับที่สภาวะหลังการขยายตัว 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

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

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

โดย r^* คือ ขนาดวิกฤตของนิวเคลียส (m)
 N^* คือ ปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต (particles/cm³)
 σ คือ แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (N/m)
 v_2^s คือ ปริมาตรเชิงโมลของตัวถูกละลาย (cm³/mol)
 k_B คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน (Boltzmann's Constant, 1.38×10^{-23} J/K)
 T_{pe} คือ อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (K)

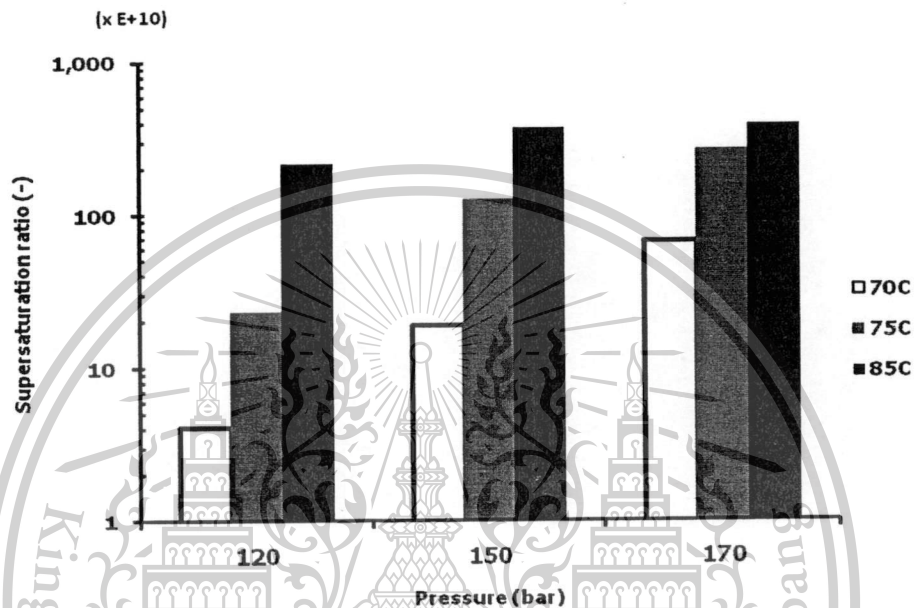
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

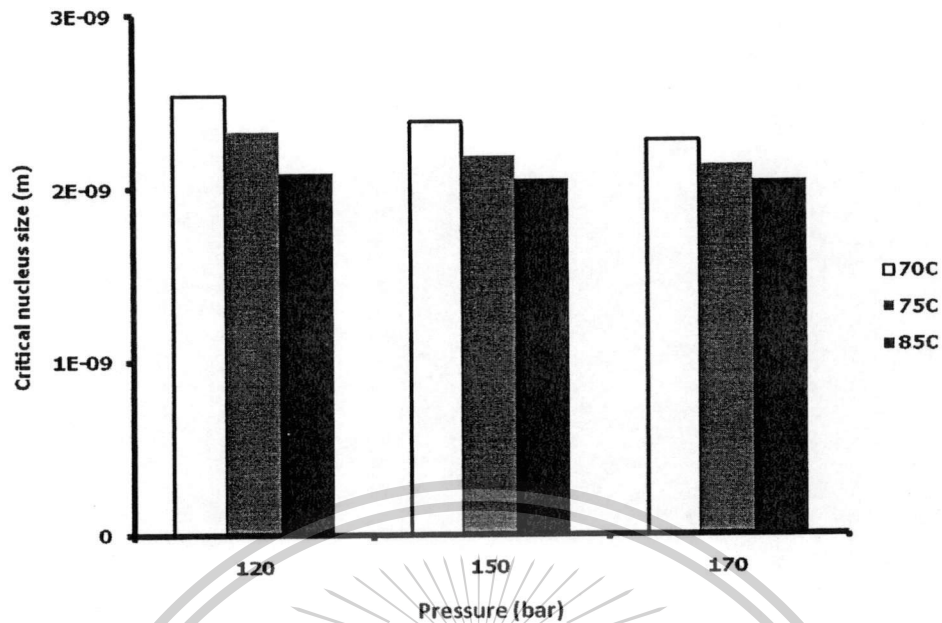
4.3.1 ผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

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



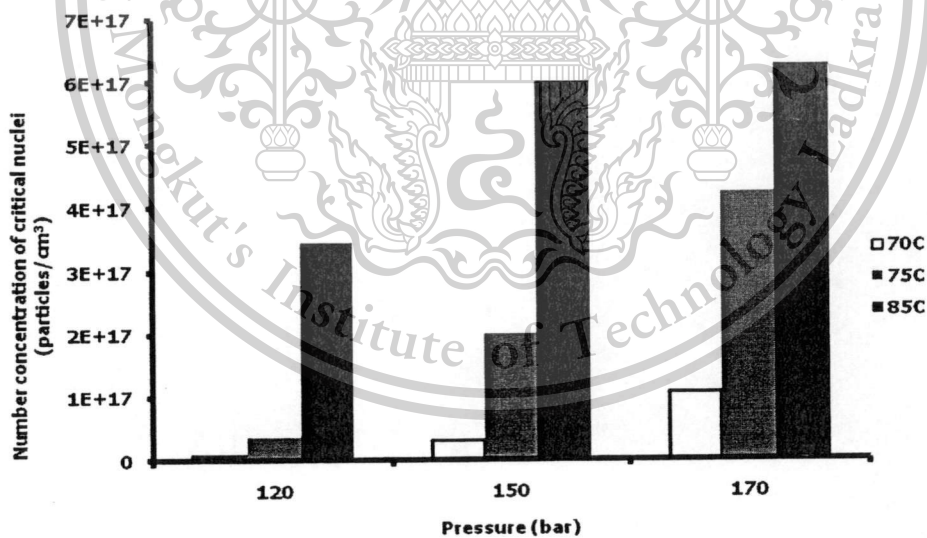
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับอัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวด

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



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับขนาดวิกฤตของนิวเคลียส

และพบว่าปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยาว เพิ่มขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 โดยมีค่าประมาณ 10^{17} particles/cm³



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวกับปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต

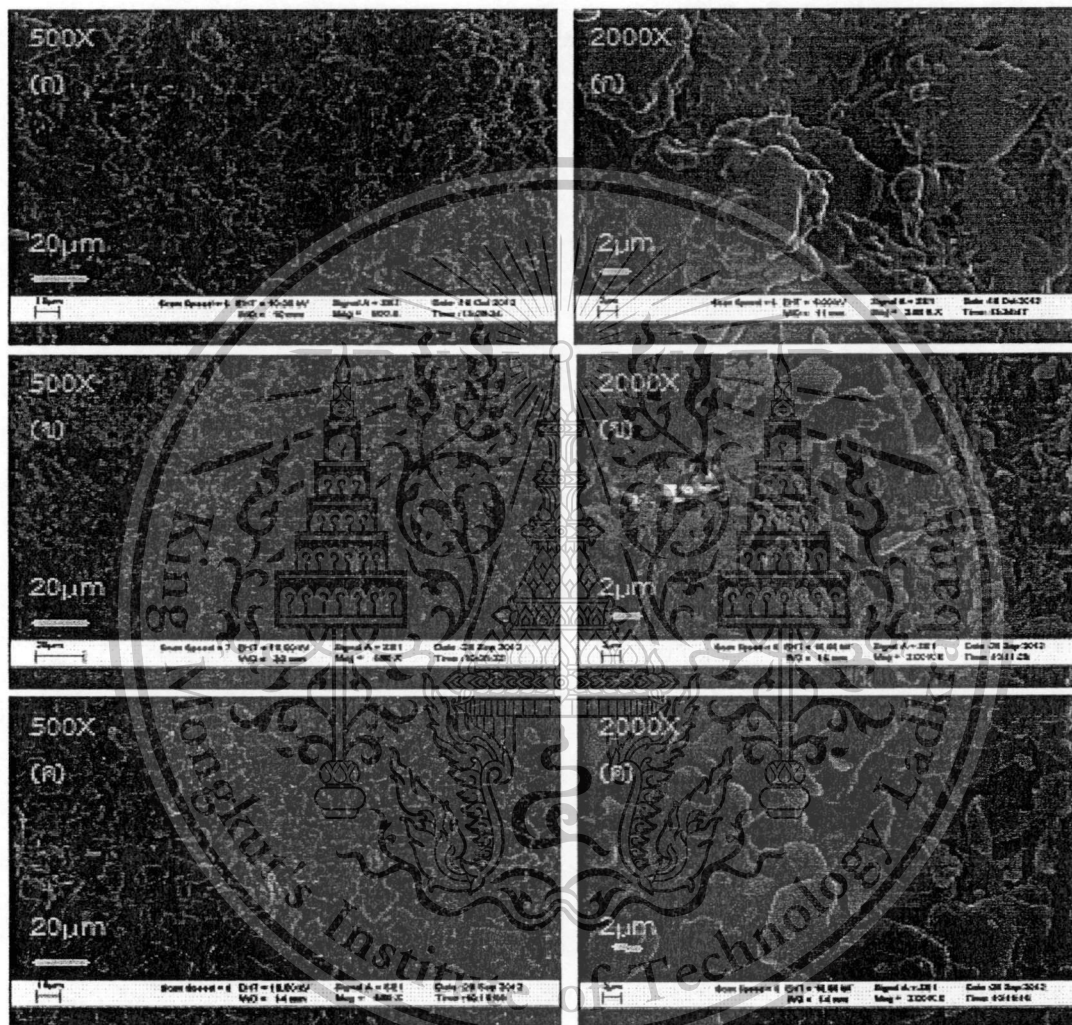
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.2 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

จากการศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C พบว่า เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar ตามลำดับ ขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 4 เป็น 3 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

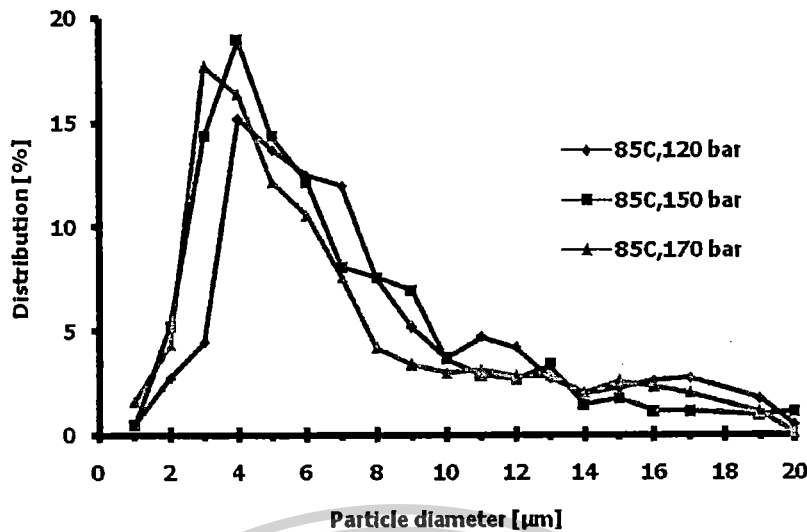


รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว (ก) 120 (ข) 150 และ (ค) 170 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.10 ผลของความดันก่อนการขยายตัวที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์อธิบายได้จากอัตราการเกิดนิวเคลียส โดยเมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดมีค่าเพิ่มมากขึ้น อัตราการเกิดนิวเคลียส (J) จะเร็วขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลง [13,29] ดังรูปที่ 4.9 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวของระบบจาก 150 เป็น 170 bar จะสังเกตเห็นกลุ่มก่อนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของพาราฟินแว็กซ์ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดแรงเชื่อมระหว่างอนุภาค (Binding Force) [13,27] เกิดขึ้น ทำให้เกิดกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนขึ้นดังรูปที่ 4.9 อัตราการเกิดนิวเคลียสอธิบายได้ดังสมการที่ 4.19 [28]

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

- โดย J คือ อัตราการเกิดนิวเคลียส
 N_0 คือ ปริมาณนิวเคลียสต่อหน่วยปริมาตร
 v คือ ความถี่ของโมเลกุลนิวเคลียสที่ถ่ายเทระหว่างวัฏภาคของไหลและนิวเคลียส
 β คือ ค่าตัวแปรรูปทรงของพื้นที่
 v คือ ปริมาตรเชิงโมลของสาร
 γ_{12} คือ ค่าพลังงานระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยพื้นที่
 α คือ ค่าตัวแปรรูปทรงของปริมาตร
 k_B คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน
 T คือ อุณหภูมิ
 S คือ อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวด

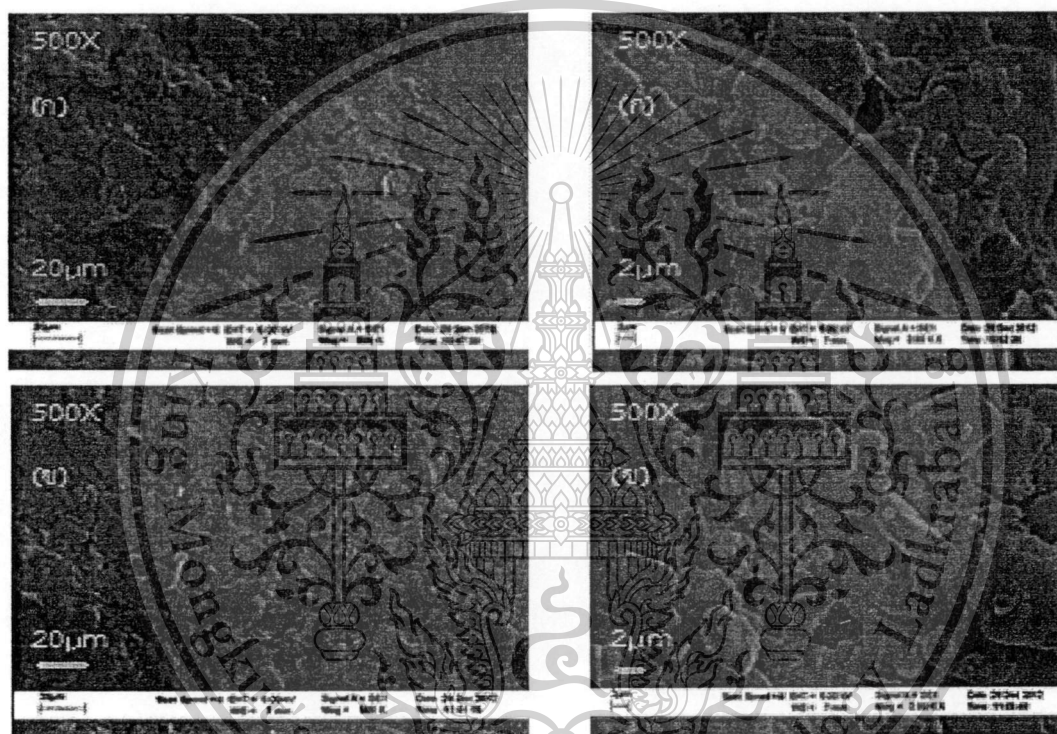
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 μm ที่บริเวณต่ำกว่าจุดหลอมเหลว อุณหภูมิ 40 และ 50°C ตามลำดับ และลดลงจาก 6 μm เป็น 4 μm ที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว ในช่วง 70-85°C ดังแสดงในรูปที่ 4.12

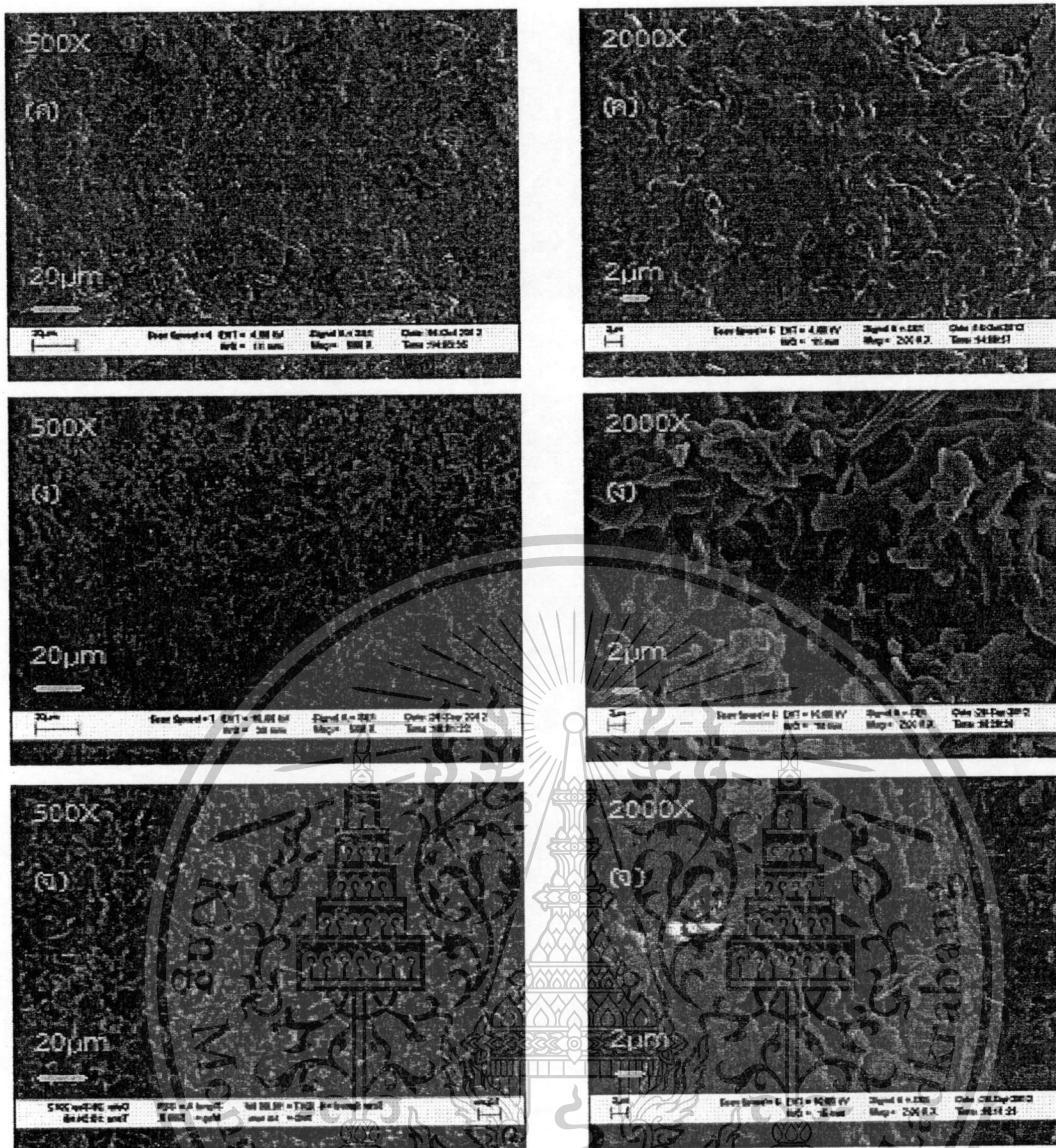


รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (ก) 40 (ข) 50 (ค) 70 (ง) 75 และ (จ) 85°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

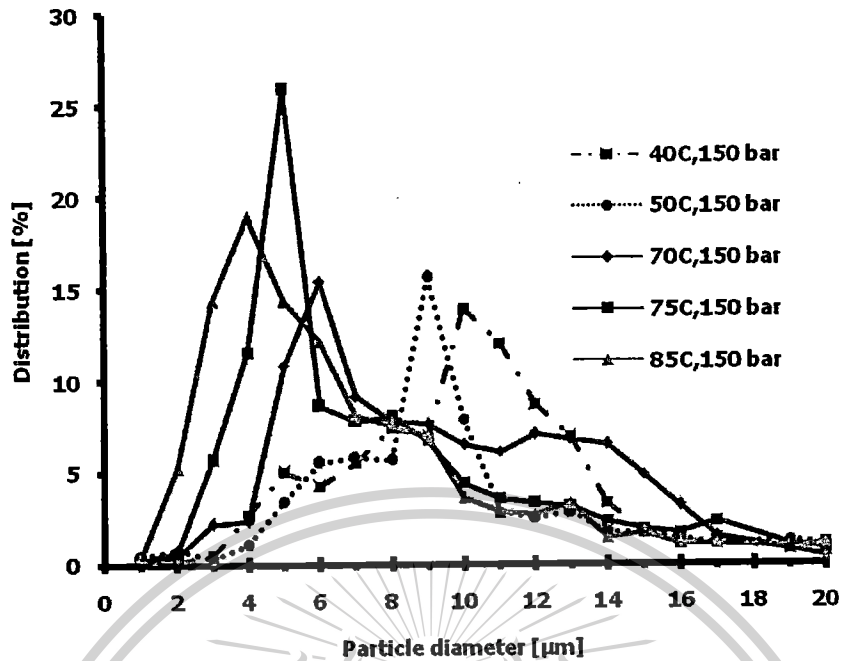


รูปที่ 4.11 (ต่อ) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (ก) 40 (ข) 50 (ค) 70 (ง) 75 และ (จ) 85°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวที่มีต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์อธิบายได้จากอัตราส่วนการละลาย อิมตัวยิ่งยวดและความหนืดของสารละลายระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตกับพาราฟินแว็กซ์ โดยเมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือ วิกฤตมีค่าสูงขึ้นทำให้อัตราส่วนการละลายอิมตัวยิ่งยวดมีค่าทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการเกิดนิวเคลียสส่งผลให้ อัตราการเกิดนิวเคลียสเร็วในการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้น ขนาดอนุภาคจึงมีขนาดเล็กลง [13,29] นอกจากนี้เมื่อ อุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของสารละลายมีค่าลดลงส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียส (J) มีค่าเร็วขึ้นส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดนิวเคลียสและความหนืดของ สารละลายแสดงได้ดังสมการที่ 4-20 [28]

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

โดย J คือ อัตราการเกิดนิวเคลียส

η_0 คือ ค่าความหนืดของสารละลาย

ΔG^* คือ พลังงานอิสระสูงสุดของการเกิดนิวเคลียส

ΔG_a คือ พลังงานกระตุ้นของการถ่ายเทระหว่างนิวเคลียสและวัฏภาคของไหล

k_B คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน

T คือ อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

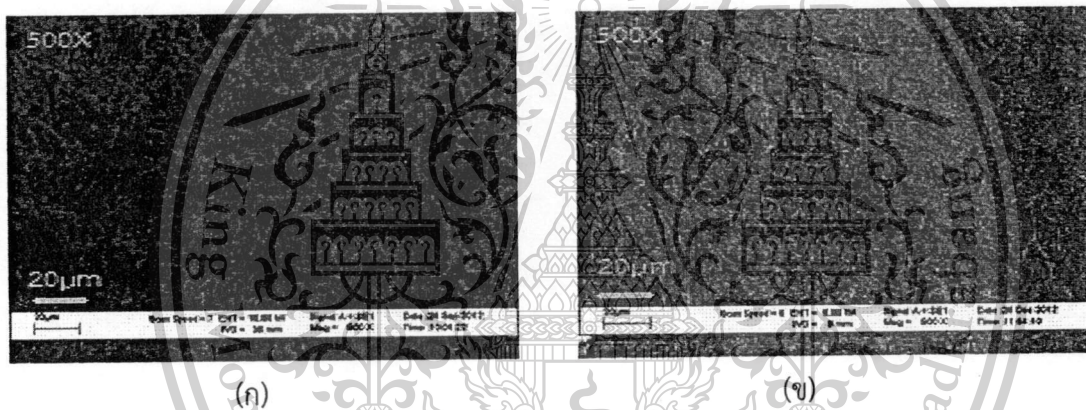
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

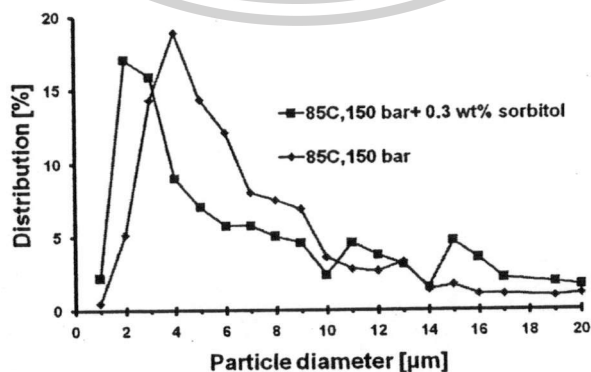
นอกจากนี้พบว่าผลความแตกต่างระหว่างวัฏภาคของพาราฟินแว็กซ์กับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะส่งผลต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ โดยพาราฟินแว็กซ์ที่สถานะของเหลวหรือที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวจะละลายและผสมร่วมกับวัฏภาคในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ดีและเร็วกว่าพาราฟินแว็กซ์ที่สถานะของแข็งหรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เนื่องจากพาราฟินแว็กซ์ที่สถานะของเหลวมีค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต น้อยกว่าทำให้มีอัตราการเกิดนิวเคลียสเร็วส่งผลให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า

4.3.4 ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

การศึกษาผลของสารก่อผลึก (Nucleating Agent) [30] ต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 สารก่อผลึกที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ซอบิทอล โดยใช้ปริมาณซอบิทอลต่อพาราฟินแว็กซ์ 0.3 wt% ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar พบว่าขนาดของอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์เล็กลงจากประมาณ 4 เป็น 2 μm ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้กฎหมายว่าด้วยการคุ้มครองสิทธิบัตรและเครื่องหมายการค้า การใช้เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลของซอบิทอลต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่เล็กลงอธิบายได้จากซอบิทอลมีสมบัติช่วยลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดนิวเคลียสทำให้อัตราเกิดนิวเคลียสเร็วขึ้น และยังส่งผลต่อขั้นตอนการเติบโตของอนุภาค โดยจะลดโอกาสในการรวมตัวกันของอนุภาค [13,28] ดังนั้นขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์จึงมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังพบว่าผลของการเติมซอบิทอลช่วยลดช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 4.14 จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ซอบิทอลสามารถใช้เป็นสารก่อผลึกในระบบร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ได้ ซึ่งสามารถลดขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ให้เล็กลงและลดช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.4 การศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การศึกษากลศาสตร์การไหลและสมบัติทางกายภาพของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตภายในระบบมีความสำคัญในการศึกษาและออกแบบกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองโดยเทคนิค RESS ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพื้นผิวหลังการเคลือบผิว ในการศึกษานี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยตั้งสมมุติฐานว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นของไหลที่อัดตัวได้ไหลผ่านท่อและหัวฉีดขนาดเล็ก ปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่ละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 5 wt%) ดังนั้นสมบัติรวมของของไหลจึงเป็นสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

4.4.1 การประมาณค่าความดันและความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

อัตราส่วนความดันที่ทางเข้าและทางออกสำหรับการไหลผ่านหัวฉีดที่ปลายหัวฉีดโดยมีความเร็วมากกว่าหรือเท่ากับความเร็วเสียงสำหรับแก๊สที่อัดตัวได้และมีการไหลแบบ isentropic ความดันเริ่มต้นและปลายหัวฉีดเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับ Mach Number แสดงดังสมการที่ 4-21 [31,32]

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

โดย P_e คือ ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (bar)

P_0 คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง
หรือความดันก่อนการขยายตัว (bar)

k คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)

Ma_e คือ Mach Number ที่ปลายหัวฉีด (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากความสัมพันธ์ของแก๊สอุดมคติอัตราส่วนความจุความร้อน (k) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดง
ได้ดังสมการที่ 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)

อัตราส่วนอุณหภูมิเริ่มต้นและที่ปลายหัวฉีดสำหรับการไหลผ่านหัวฉีดสามารถแสดงดังได้
สมการที่ 4-23 [31,32]

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

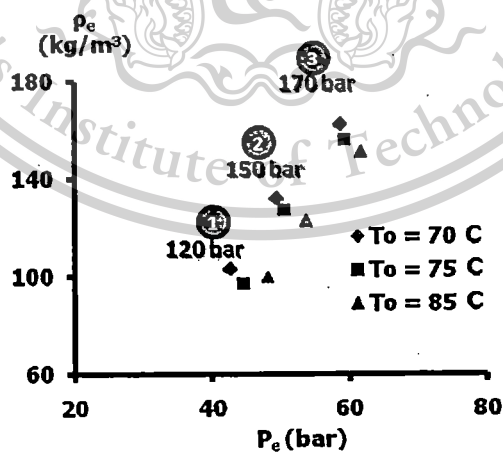
โดย T_e คือ อุณหภูมิของไหลที่ปลายหัวฉีด (K)

T_0 คือ อุณหภูมิของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูงหรืออุณหภูมิก่อนการขยายตัว (K)

k คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)

Ma_e คือ Mach Number ที่ปลายหัวฉีด (-)

เมื่อทราบความดันและอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด ทำการประมาณค่าความหนาแน่นของ
คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่บริเวณปลายหัวฉีดผ่านสมการสถานะ Peng-Robinson ผลการประมาณ
ค่าความดันและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตแสดงได้ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความดันและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด

ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
70, 75 และ 85°C ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการประมาณค่าความหนาแน่นและความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ตามลำดับ จากรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและความดันที่ปลายหัวฉีดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 100-200 kg/m³ และ 40-60 bar ตามลำดับ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวสูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีดลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นพลังงานจลน์ภายในระบบมีค่าสูงขึ้น โมเลกุลของสารมีการกระจายตัวกันมากขึ้นทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความหนาแน่นลดลง

4.4.2 การประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การคำนวณความเร็วที่ปลายหัวฉีดโดยไม่มีการการสูญเสียความเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่อ แสดงได้ดังสมการที่ 4-24 [33]

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

โดย u_e คือ ความเร็วของไหลที่ปลายหัวฉีด (m/s)

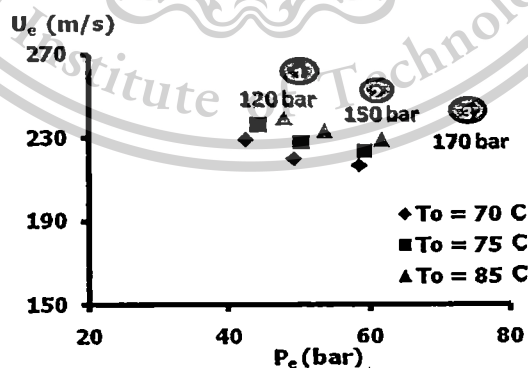
P_e คือ ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (bar)

P_0 คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง (bar)

k คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)

ρ_0 คือ ค่าความหนาแน่นของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง (kg/m³)

ผลการประมาณความเร็วที่ปลายหัวฉีดจากสมการที่ 4-24 แสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความดันและความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีด

ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว

70, 75 และ 85°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

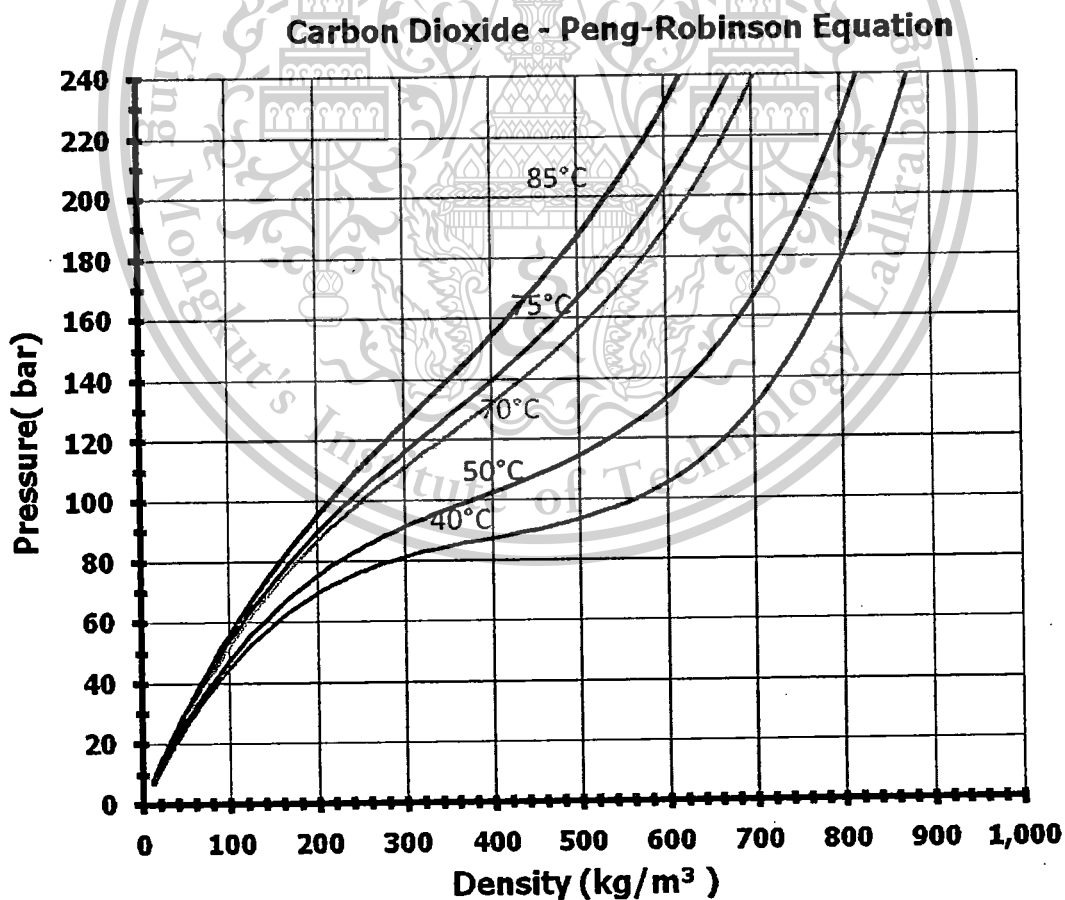
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.16 ผลการประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดมีค่าประมาณ 200 m/s โดยเมื่ออุณหภูมิ ก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีดมีค่าสูงขึ้น อธิบายได้จากผลของพลังงานจลน์ที่เพิ่มสูงขึ้นและความหนืดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความเร็วที่ปลายหัวฉีดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อความดันก่อนการขยายตัว เพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ปลายหัวฉีดมีค่าลดลง อธิบายได้จากเมื่อความ ดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีผลต่อความเร็วเชิง เส้นในการไหลภายในท่อมากกว่าผลต่างระหว่างความดันเริ่มต้นและความดันที่ปลายหัวฉีด ดังสมการที่ 4- 24 จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าความหนาแน่นก่อนการขยายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือ วิกฤตมีผลต่อความเร็วปลายท่อมากกว่าระดับความแตกต่างระหว่างความดันเริ่มต้นและความดันที่ปลาย หัวฉีด

- ผลของความดันและอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 40-85°C ความดัน 10-240 bar โดยประมาณค่าจากสมการสถานะ Peng-Robinson [34] แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 พบว่าที่ อุณหภูมิคงที่ เมื่อเพิ่มความดันความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น และที่ความดันคงที่เมื่อ เพิ่มอุณหภูมิความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าลดลง



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4.3 การประมาณค่าความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การประมาณค่าความเร็วตกกระทบบนพื้นผิวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตประมาณผ่าน Mach Number โดยตั้งสมมติฐานว่าบริเวณที่ตกกระทบบนพื้นผิว คาร์บอนไดออกไซด์เกิดการขยายตัวอย่างอิสระในระดับความเร็วเหนือเสียง โดยที่แก๊สอุดมคติความเร็วเสียงมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปของอัตราส่วนความจุความร้อนแสดงดังสมการที่ 4-25

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

โดย c คือ ความเร็วเสียง (m/s)

P คือ ความดันของไหล (bar)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)

การประมาณ Mach Number ของแก๊สที่พื้นผิวตกกระทบสามารถหาได้จากสมการที่ 4-26 [35]

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

โดย A_e คือ พื้นที่หน้าตัดที่ปลายหัวฉีด (mm^2)

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดการกระจายตัวของอนุภาคที่พื้นผิวตกกระทบ (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

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

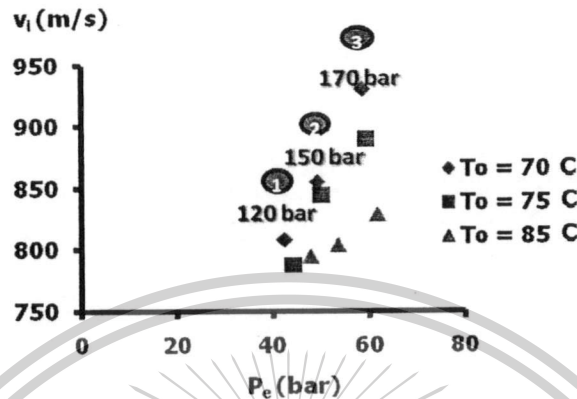
โดย Ma_i คือ Mach Number บนพื้นผิวตกกระทบ (-)

c คือ ความเร็วเสียง (m/s)

V_i คือ ความเร็วของไหลตกกระทบของของไหล (m/s)

ผลการประมาณความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 พบว่ามีความเร็วตกกระทบประมาณ 800-900 m/s จากการประมาณค่าดังกล่าวพบว่าที่ความดันก่อนการขยายตัวและความดันปลายหัวฉีดสูง ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณก่อนการขยายตัวอย่างอิสระหรือปลายหัวฉีด จากนั้นเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วในบริเวณการขยายตัวอย่างอิสระทำให้มีความเร็วในการกระทบมีค่ามากขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวสูงขึ้น ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงส่งผลให้อัตราการขยายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตลดลง ความเร็วตกกระทบจึงมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.18

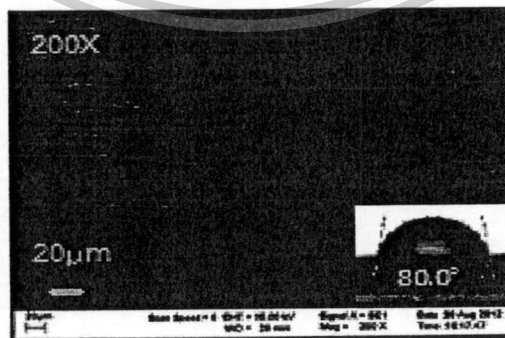


รูปที่ 4.18 ความดันที่ปลายหัวฉีดและความเร็วตกกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85 °C ตามลำดับ

4.5 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

4.5.1 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA ก่อนกระบวนการเคลือบผิว

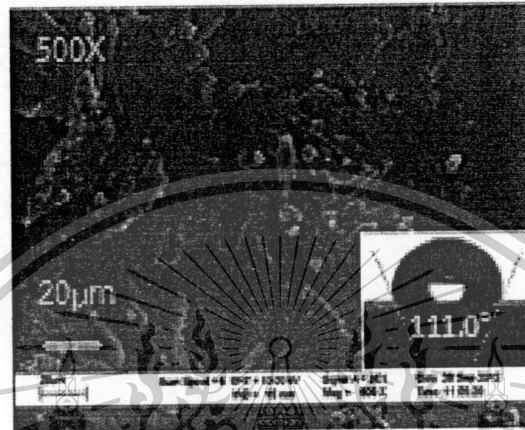
ผลการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำและการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว PMMA ด้วยเทคนิค SEM พบว่า พื้นผิว PMMA มีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำเป็น 80.0° ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติทางเคมีของ PMMA ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลทำให้พื้นผิว PMMA มีคุณลักษณะที่เป็นพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ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



รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 200 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA

4.5.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม

การศึกษาระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่มซึ่งเป็นวิธีการพื้นฐานที่นิยมในการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยใช้พาราฟินแว็กซ์ปริมาณ 2.5 g ละลายในโทลูอีน 50 ml หลังจากนั้นปล่อยให้เกิดกระบวนการตกผลึกที่สภาวะบรรยากาศเป็นเวลา 24 h ผลจากการเคลือบผิวแบบจุ่มแสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 500 เท่า ลักษณะพื้นผิวของ PMMA และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม

จากรูปที่ 4.20 พบว่าพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบจุ่มมีผลลักษณะเป็นแผ่นบางเรียบของพาราฟินแว็กซ์เคลือบอยู่บนพื้นผิว ทั้งนี้เนื่องจากจากสมบัติทางเคมีของพาราฟินแว็กซ์ที่มีความไม่ชอบน้ำที่เคลือบบน PMMA ส่งผลให้สมบัติความไม่ชอบน้ำของ PMMA มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยค่ามุมสัมผัสหยดของน้ำเท่ากับ 111.0°

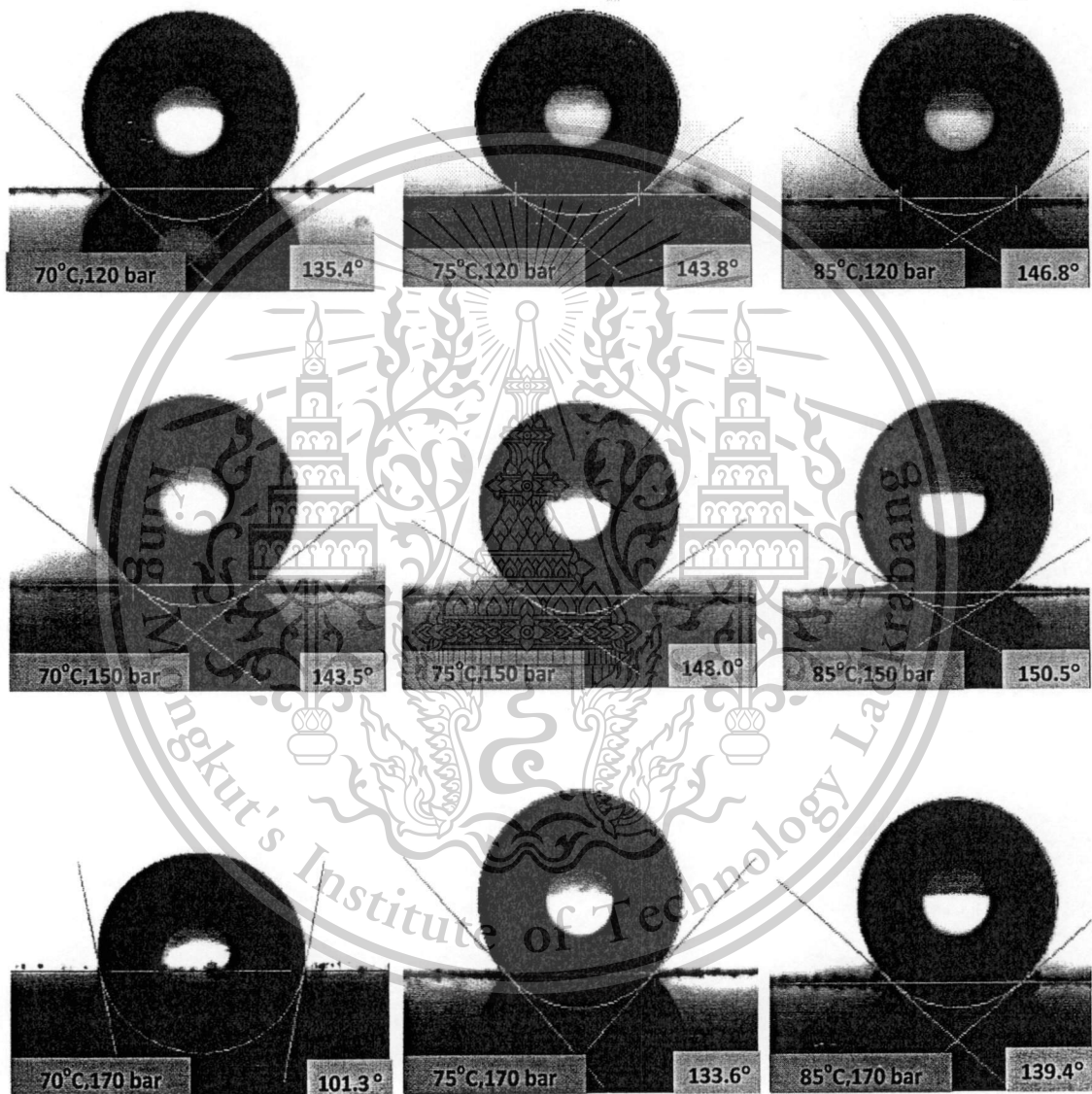
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5.3 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของแผ่น PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยเทคนิค RESS

ผลการศึกษาการเคลือบผิว 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

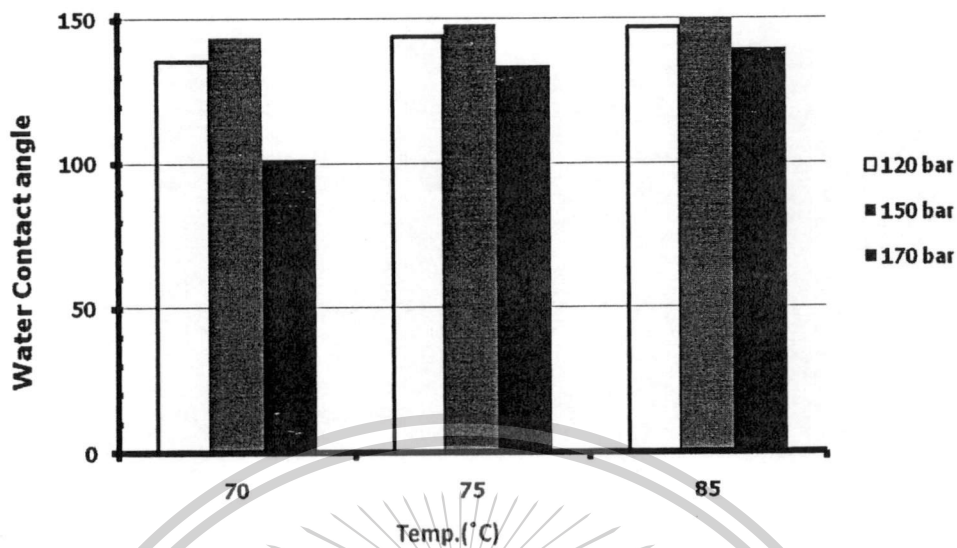


รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำของพื้นผิว PMMA ที่เคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 75 และ 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150 และ 170 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันก่อนการขยายตัว และมุมสัมผัสของหยดน้ำ

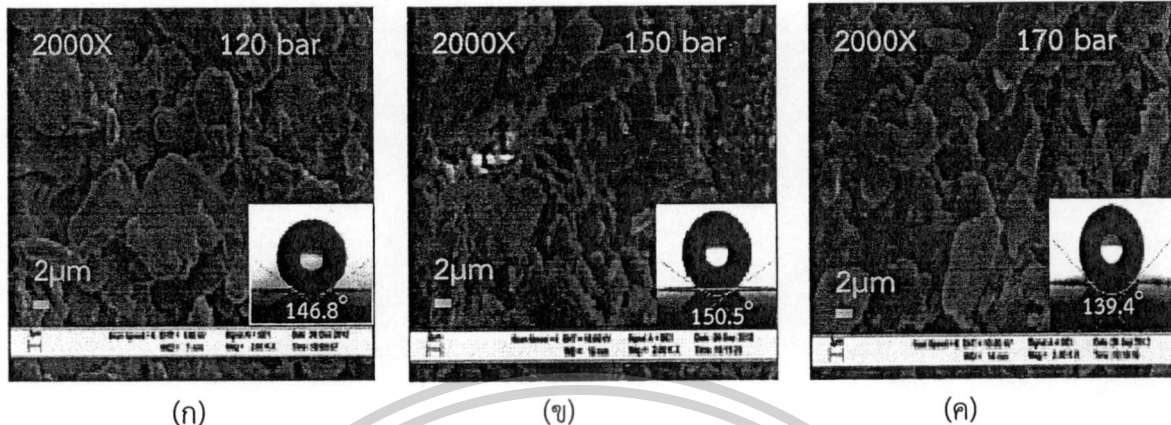
จากการศึกษากระบวนการเคลือบผิว PMMA ด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS สามารถสร้างพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นจาก 80.0° เป็น $101.3-150.5^\circ$ พบว่าที่สภาวะความดันก่อนการขยายตัว 150 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C สามารถเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำ 150.5°

จากรูปที่ 4.22 พบว่าผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนการขยายตัว มุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อธิบายได้จากค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่เคลือบบนพื้นผิวมีปริมาณ ความหนาแน่น และความขรุขระเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์เล็กลงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 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 ทำให้โอกาสในการเกิดระดับของความขรุขระเพิ่มสูงขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นดังรูปที่ 4.23 และช่วงที่ 2 เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 150 เป็น 170 bar ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ อธิบายได้จากความดันในกระบวนการพ่นส่งผลต่อแรงปะทะที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการกระเด็นของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิว PMMA ใน

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 เพื่อจำแนกลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์อธิบายได้จากค่าอัตราส่วนการกระจายตัวเฉลี่ย (Spread Ratio, D/D_M) โดยอัตราส่วนการกระจายตัวเฉลี่ยของอนุภาคเป็นการเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวการเคลือบที่ได้จากการทดลอง (D) เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวการเคลือบในทางทฤษฎี (D_M) หรือเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระซึ่งแปรผันตรงกับความดันก่อนการขยายตัวโดย ค่า D_M [23,26] ประมาณค่าได้จากสมการที่ 4-15 โดยตั้งสมมุติฐานว่าพื้นผิวการเคลือบมีลักษณะเป็นวงกลมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคณะ P.Hirunsit และ B. Helfgen [23,26] ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์สามารถจำแนกได้จากอัตราส่วนการกระจายตัวดังนี้

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

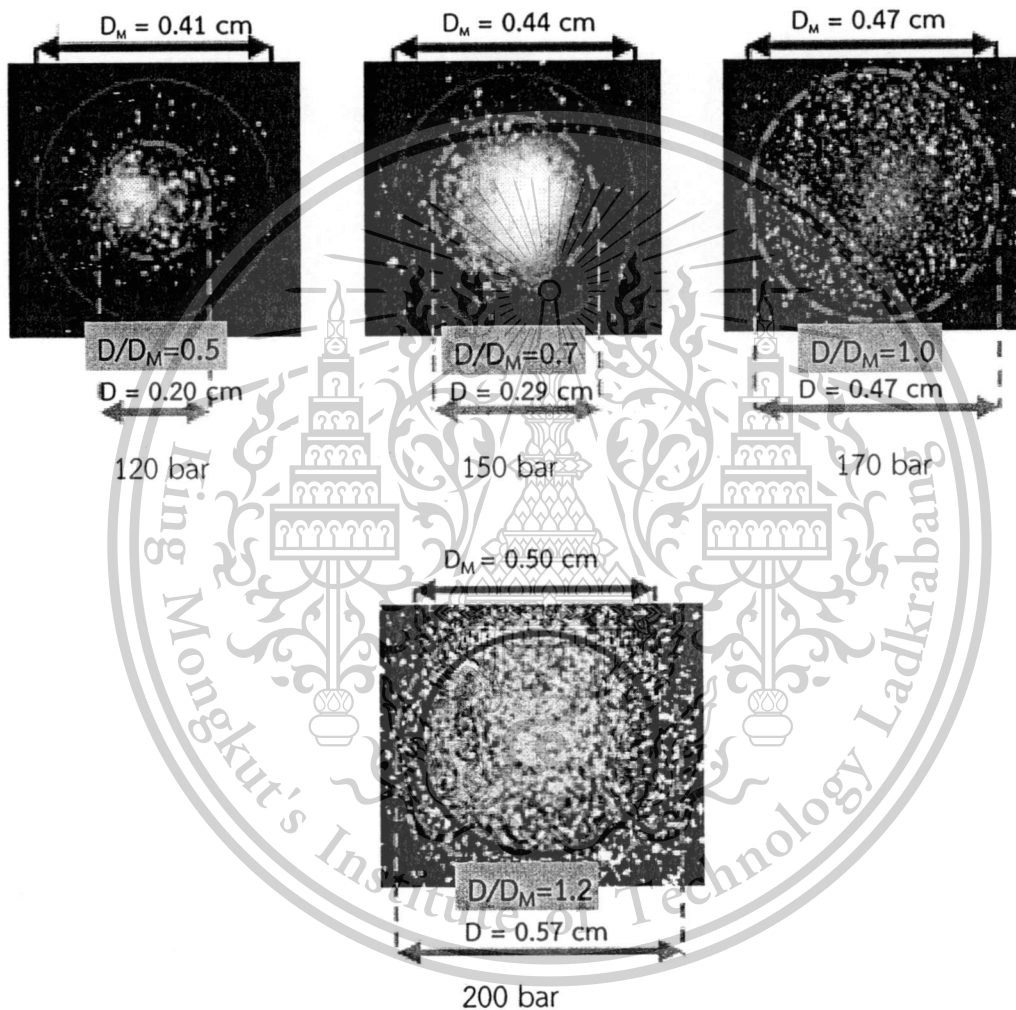
จากการศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัวต่ออัตราส่วนการกระจายตัวของพาราฟินแว็กซ์ผ่านการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายกำลังขยายสูง 120 เท่า โดยกำหนดค่า D คือ เส้นประ และ D_M คือ เส้นทึบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวอัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์จะมีความมากขึ้น โดยที่ความดันก่อนการขยายตัว 120 และ 150 bar อนุภาคพาราฟินแว็กซ์ส่วนใหญ่จะกระจายอยู่ภายในพื้นที่การเคลือบผิวทางทฤษฎีหรือ D_M และมีอัตราส่วนการกระจายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(D/D_M) 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ อัตราส่วนการกระจายตัวที่น้อยกว่า 1 นี้แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่มีลักษณะเป็นแบบ Deposition [36,37] แต่เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวที่ 170 bar อนุภาคพาราฟินแว็กซ์จะมีอัตราส่วนการกระจายตัวเท่ากับ 1.0 ดังนั้นที่ความดัน 170 bar การกระทบของอนุภาคจะอยู่ในภาวะเหนียวทำให้เกิด Induced Splashing [36,37] ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์สูงขึ้น ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวมีความขรุขระน้อยลงและมีพาราฟินแว็กซ์ปกคลุมไม่ทั่วบริเวณหรือไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นมุมสัมผัสหยดน้ำที่ทดสอบได้จึงมีค่าลดลง ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่ออัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.25

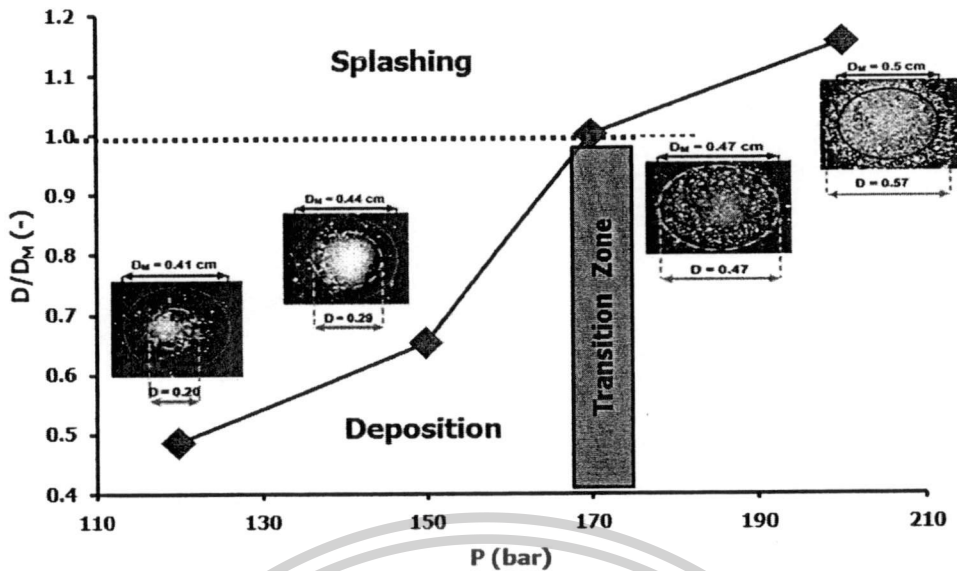


รูปที่ 4.24 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่ระยะพ่น 1 cm อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 150, 170 และ 200 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

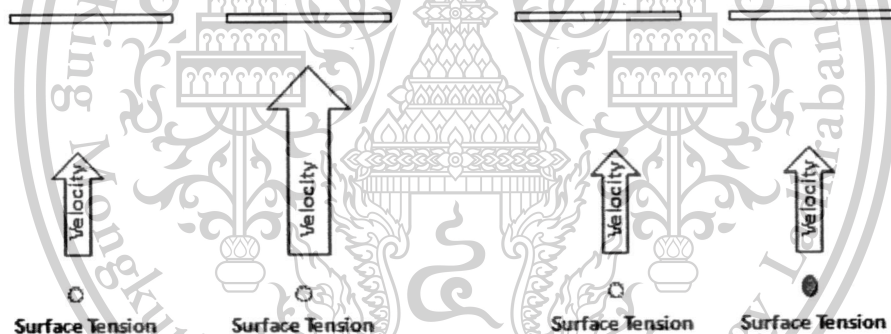
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.25 ผลของความดันก่อนการขยายตัวของอัตราส่วนการกระจายตัวของอนุภาค

การกระเด็นของอนุภาคสามารถอธิบายได้จากกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) อธิบายผ่านค่า Reynolds Number (Re) และ Ohnesorge Number (Oh) ได้ดังนี้ [36,37]



รูปที่ 4.26 การกระทบพื้นผิวกลุ่มอนุภาคเนื่องจากผลของความเร็วและผลของแรงตึงผิว ของกลุ่มอนุภาค

จากรูปที่ 4.26 พบว่าผลของความเร็วและแรงตึงผิวของของไหลที่เข้าชนแผ่น PMMA จะส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวและการทัมของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ อธิบายได้ในรูปของ Re ซึ่งเป็นเลขดัชนีที่ใช้บอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล เป็นอัตราส่วนของ Inertia/Viscous แสดงได้ดังสมการที่ 4-28 [36,37]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Oh แสดงอัตราส่วนระหว่าง Viscous/Surface Tension ดังสมการที่ 4-29 [36,37]

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

โดย Re คือ Reynolds Number (-)
 Oh คือ Ohnesorge Number (-)
 ρ_L คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)
 v_L คือ ความหนืดโคเนมาติก (m^2/s)
 D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)
 μ_L คือ ความหนืดไดนามิกส์ของของไหล (Pa.s)
 σ_L คือ แรงตึงผิวของของไหล (N/m)

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

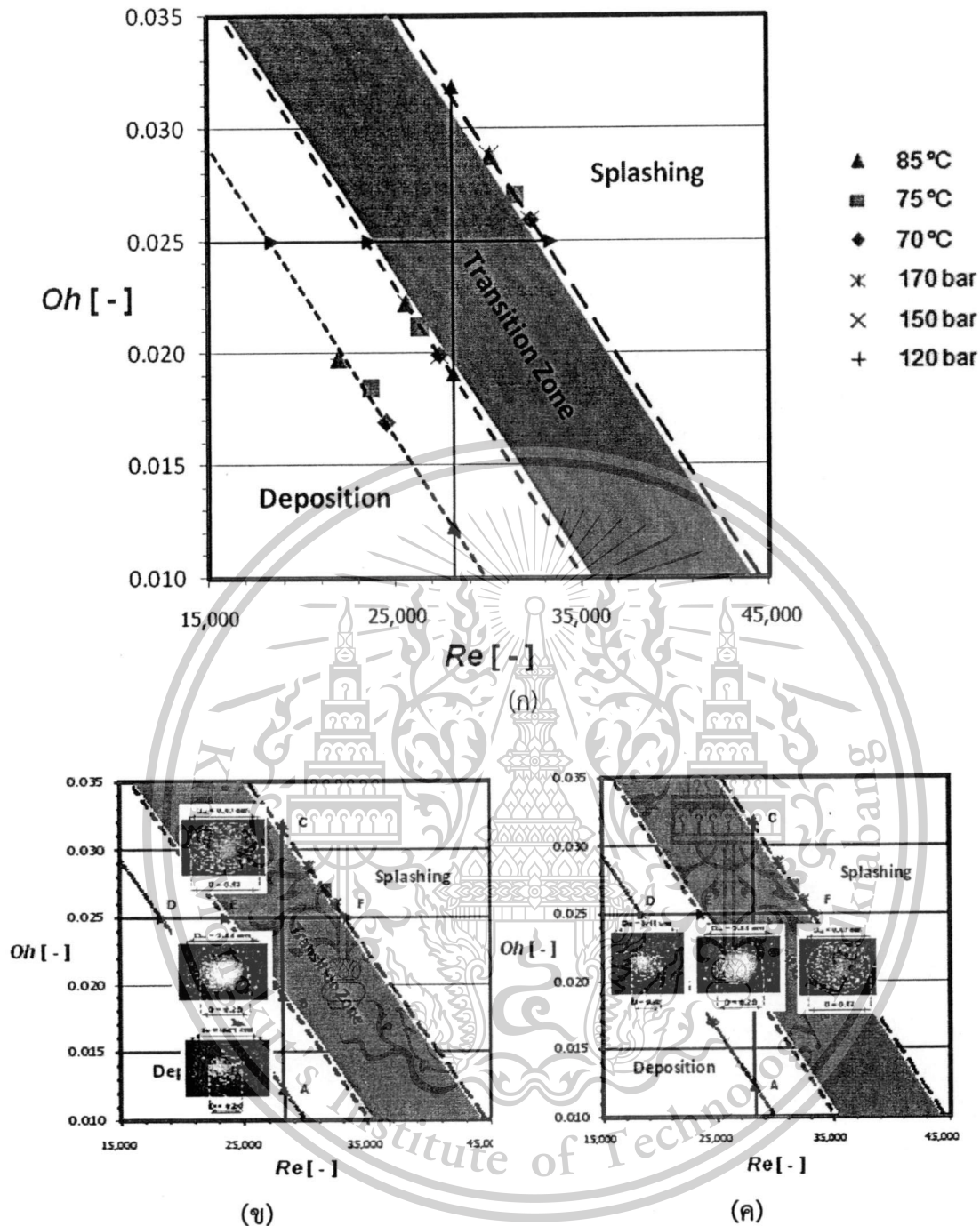
จากรูปที่ 4.27 (ก และ ข) เมื่อพิจารณา ที่ Re หรือความเร็วตกกระทบคงที่ ณ จุด A ที่ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar ซึ่งอยู่ในบริเวณการเกิด Deposition และมีค่าแรงตึงผิวค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวที่ 150 bar ณ จุด B ที่ความเร็วคงที่พบว่าค่าแรงตึงผิวมีค่าลดลงทำให้ค่า Oh มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าสู่ 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 และช่วงที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้จะเรียกว่า 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 ซึ่งที่จุด C นี้เป็นจุดวิกฤต (Critical Point) ของการเปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์การเกิด Deposition และ Splashing ดังนั้นเมื่อพิจารณาเส้นประที่ผ่านจุด C และ F ซึ่งเป็นเส้นความดันคงที่จะสามารถกำหนดเส้นวิกฤตของการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิด Deposition และ Splashing ได้ และช่วงที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้จะเรียกว่า Transition Zone ดังแสดงในรูปที่ 4.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

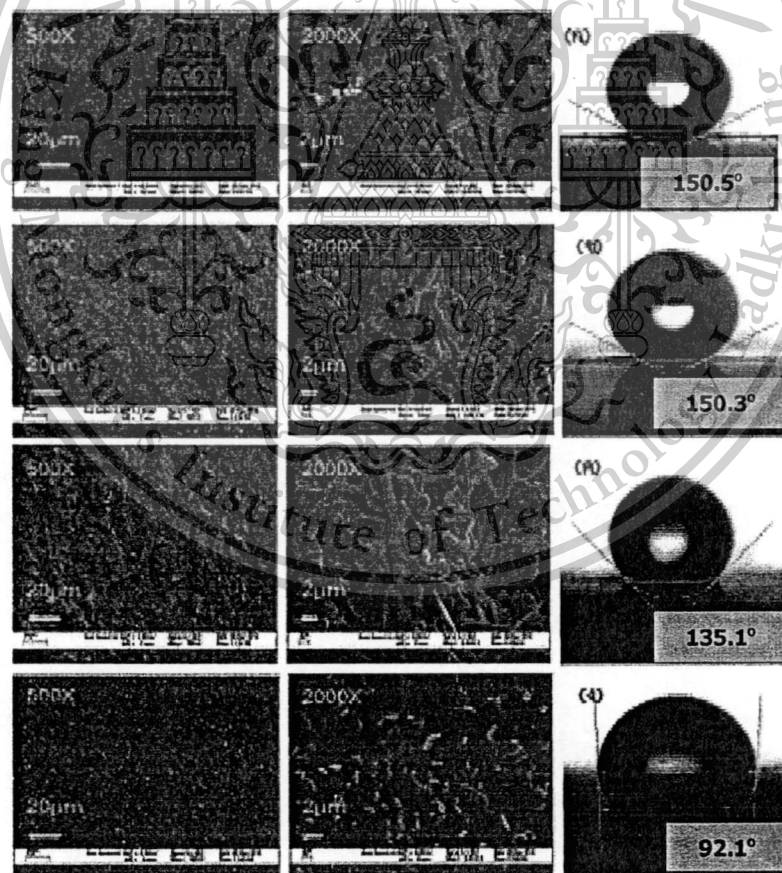
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วย พาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยที่สำคัญ ปัจจัยแรก คือ ค่าการละลายของพาราฟิน แวกซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว โดยเมื่อ อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่ละลายได้มีปริมาณมาก ขึ้นและมีขนาดอนุภาคเล็กลง จึงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่มีความขรุขระมาก ขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ปัจจัยที่สอง คือ ลักษณะการชนและการปะทะของอนุภาค พาราฟินแว็กซ์กับแผ่น PMMA จากการศึกษาพบว่าความดันก่อนการขยายตัวส่งผลต่ออัตราส่วนการ กระจายตัวของอนุภาค เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวอัตราส่วนการกระจายตัวจะมีค่ามากขึ้นส่งผลทำ ให้สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA ลดลงหรือมีมุมสัมผัสของหยดน้ำลดลง

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

พาราฟินแว็กซ์โดยแว็กซ์และมุมสัมผัสของหยดน้ำที่พ่นด้วยมุมต่างๆ (ก) 90° (ข) 120° (ค) 135 และ (ง) 150°

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาผลของมุมการพ่นระหว่างหัวฉีดและแผ่น PMMA ต่อลักษณะฐานฐานวิทยาและมุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่น PMMA หลังการเคลือบด้วยพาราฟินแว็กซ์ ที่การพ่นด้วยมุมตกกระทบ 90, 120, 135 และ 150° พบว่าที่มุมการพ่น 90 และ 120° ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเพียงเล็กน้อย โดยยังมีลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคที่มีการทับถมตัวในลักษณะแบบส้อม 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

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° เป็น 135.4°

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 และการเติมซอร์บิโตนเป็นสารก่อผลึกส่งผลให้พาราฟินแว็กซ์มีขนาดอนุภาคเล็กลง

5.4 การศึกษาจลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

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

- ความดันที่ปลายหัวฉีดมีค่าประมาณ 40-60 bar
- ความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีดมีค่าประมาณ $300-500\ \text{kg/m}^3$
- ความเร็วเชิงเส้นที่ปลายหัวฉีดมีค่าประมาณ 200 m/s
- ความเร็วตกกระทบบนพื้นผิว PMMA มีค่าประมาณ 800-900 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.5 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

ผลจากการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์ พบว่าเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่มด้วยสารละลายผสมระหว่างพาราฟินแว็กซ์และโทลูอีนสามารถเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA จาก 80.0° เป็น 111.0° และสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS พบว่าสามารถสร้างพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำ 150.5° ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C ความดันก่อนการขยายตัว 150 bar

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำผลการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ไปปรับปรุงและเป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิววัสดุหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ PMMA เป็นองค์ประกอบ เช่น กระจกนาฬิกา เป็นต้น หรือประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิวกระดาษเพื่อป้องกันความชื้นได้

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษากระบวนการเคลือบผิว PMMA ด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ควรมีการปรับปรุงการยึดติดของพาราฟินแว็กซ์กับพื้นผิว PMMA โดยทำการศึกษาการนำสารเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลและองค์ประกอบที่มีพันธะไม่อิ่มตัวมาผสมรวมในระบบ
2. ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำเอาสารเคลือบผิวและแผ่นทดสอบชนิดอื่น เพื่อความหลากหลายในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [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. Rodríguez-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.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
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [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] Wikipedia. **Gas Flow Through De Laval Nozzle**. [online]. Available:http://en.wikipedia.org/wiki/De_Laval_nozzle. 2013.
- [16] McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Physics. **Mach Number of Compressible Flow**. [online]. Available: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/compressible+flow>. 2012.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] **Semi Refined White Paraffin Wax**. [Online]. Available: http://boss-wax.com/Semi_Refined_Paraffin_Wax.php. 2012.
- [20] J. Crank. **The Mathematics of Diffusion**. 2nd ed. London : Oxford University Press, Inc. 1975.
- [21] 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.
- [22] 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
- [23] P. Hirunsit, Z. Huang, T. Srinophakun, M. Charoenchaitrakool and S. Kawi, "Particle Formation of Ibuprofen-Supercritical CO₂ System from Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) : A Mathematical Model." **Powder Technology**, vol. 154, 2005. pp. 83-94.
- [24] 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.
- [25] R. B. Gupta and J. Shim. **Solubility in Supercritical Carbon Dioxide**. 1st ed. New York : Taylor & Francis Group, Inc. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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 CO₂." **Korean J. Chem. Eng.** vol. 21, 2004. pp. 1,245-1,249.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] B. Jodoin, "Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation." **J. of Thermal Spray Technology**. vol. 11, 2012. pp. 496-507.
- [33] W. L. McCabe, J. C. Smith and Peter Harriott. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7th ed. New York : McGraw-Hill, Inc. 2005.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก

การประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

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'});

% end sub solve for Z
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```
%% 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
```

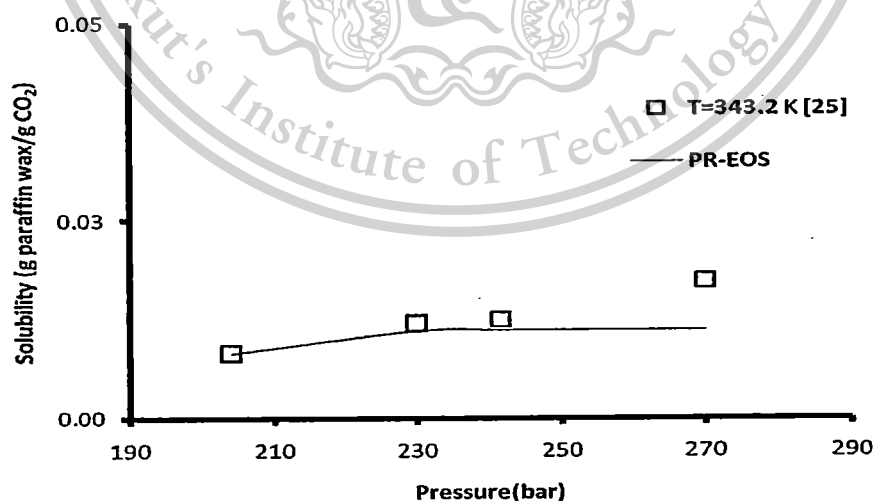
```
%% estimation of Psub
```

```
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 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ใน

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 70°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

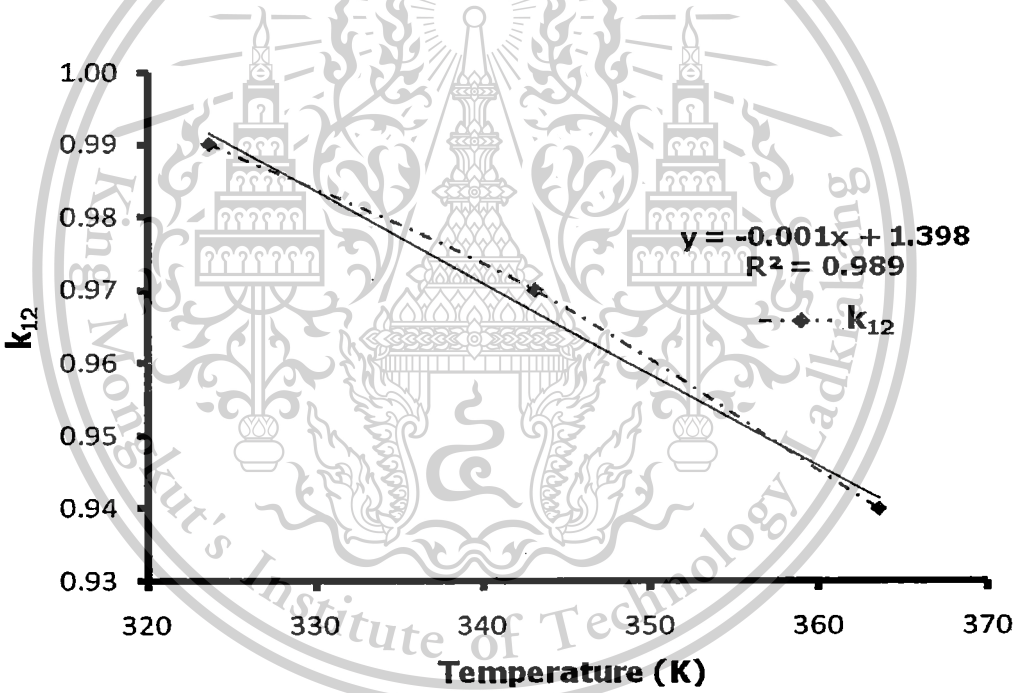
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิคงที่ 70°C
ตัวอย่างข้อมูลการละลายแสดงได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
ที่อุณหภูมิ 70°C

ความดัน (bar)	ค่าการละลายจาก การทดลอง [25] (g wax/g CO2)	ค่าการละลายประมาณค่าด้วยสมการ สถานะของ Peng-Robinson (g wax/g CO2)	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 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์ปรับแก้แอนตรกิริยาคู่

ภาคผนวก ข

กระบวนการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

ในการศึกษากระบวนการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยเทคนิค RESS สามารถอธิบายผ่านตัวแปรที่สำคัญ คือ อัตราส่วนการละลายอิมัตวียังยวด ขนาดวิกฤตของนิวเคลียส ความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต โดยสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

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

โดย S คือ อัตราส่วนการละลายอิมัตวียังยวด (-)
 $y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})$ 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

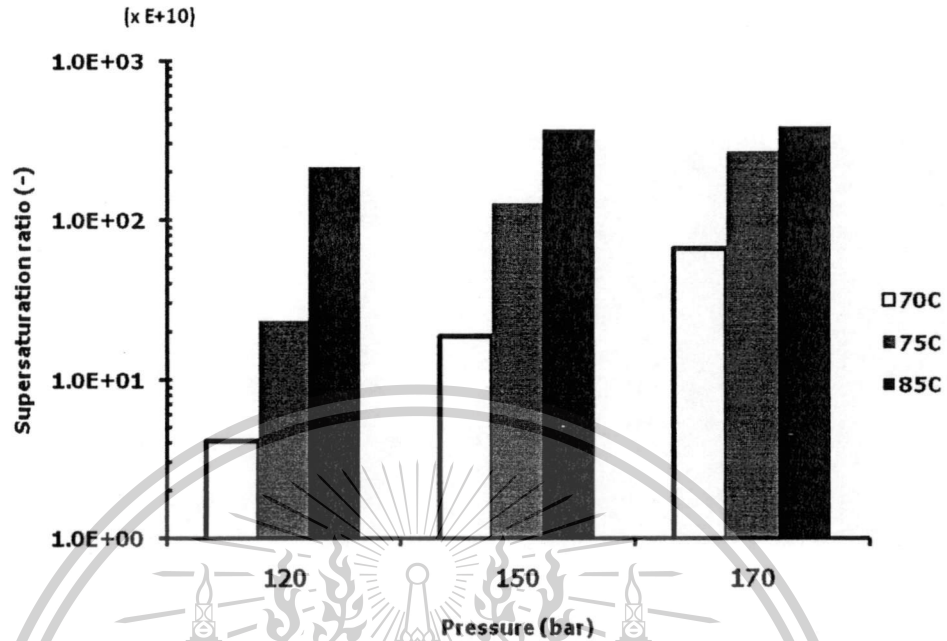
$$S = \frac{0.01(85^\circ\text{C}, 150\text{bar})g_{wax} / g_{co_2}}{2.88 \times 10^{-15}(25^\circ\text{C}, 1\text{bar})g_{wax} / g_{co_2}} = 3.70 \times 10^{12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตัวอย่างผลการประมาณค่าแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับอัตราส่วนการละลายยิ่งยวด

ตัวอย่างการประมาณคาร์คมีวิกฤตของนิวเคลียสและปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤตที่อุณหภูมิ 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/cm³)
 σ คือ แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (N/m)
 v_2^s คือ ปริมาตรเชิงโมลของตัวถูกละลาย (cm³/mol)
 k คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน
 T_{pe} คือ อุณหภูมิก่อนการขยายตัว (K)
 N_2 คือ ปริมาณความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (cm⁻³)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

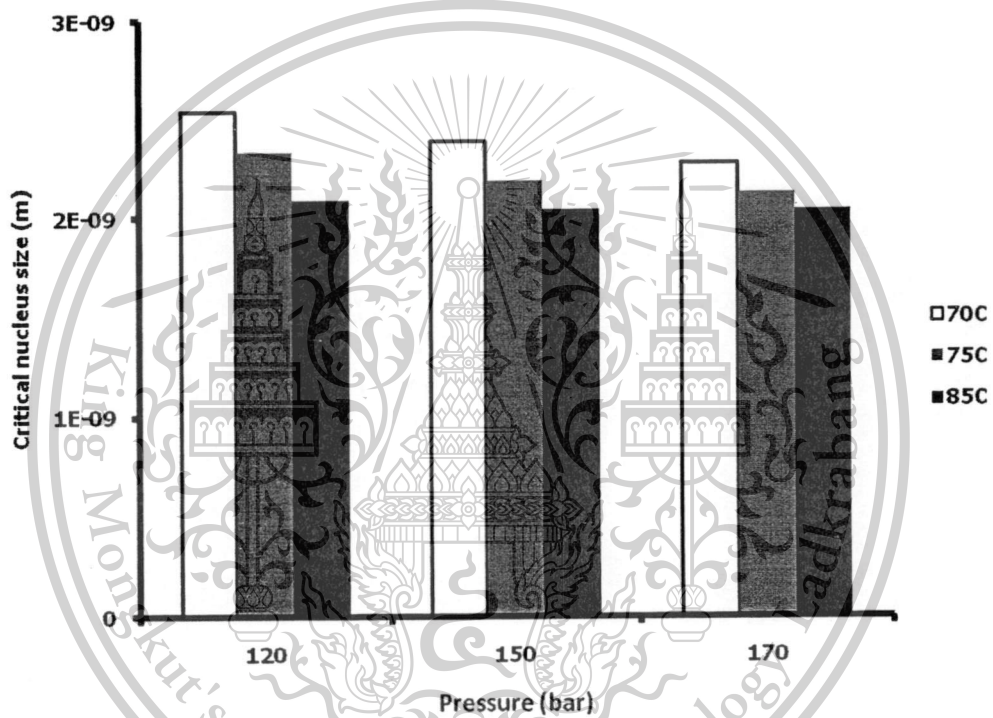
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

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

ผลการประมาณค่าแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

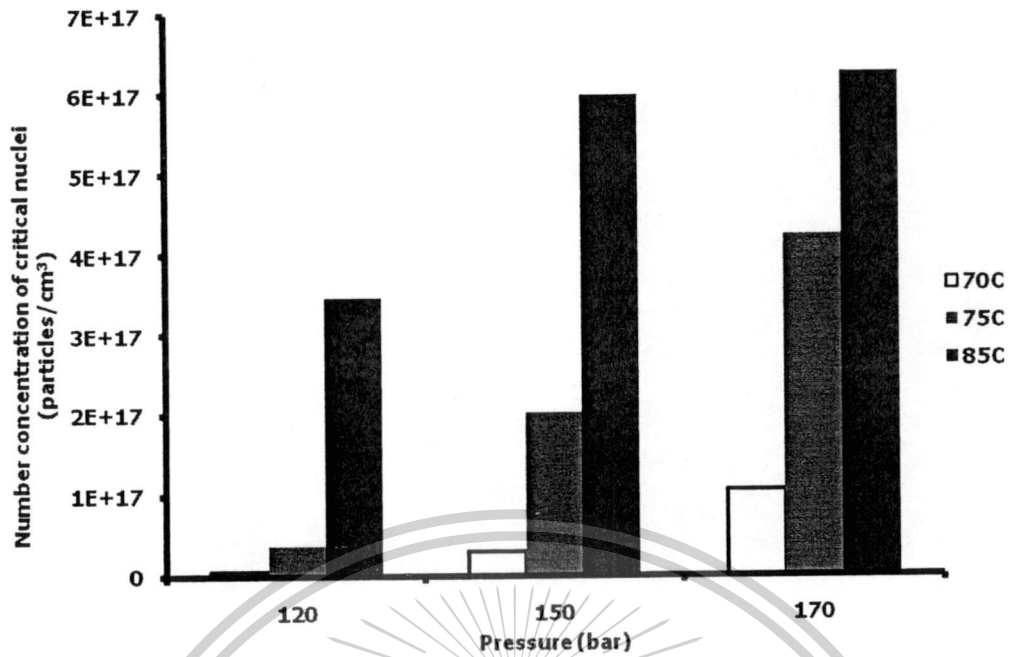


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับขนาดวิกฤตของนิวเคลียส

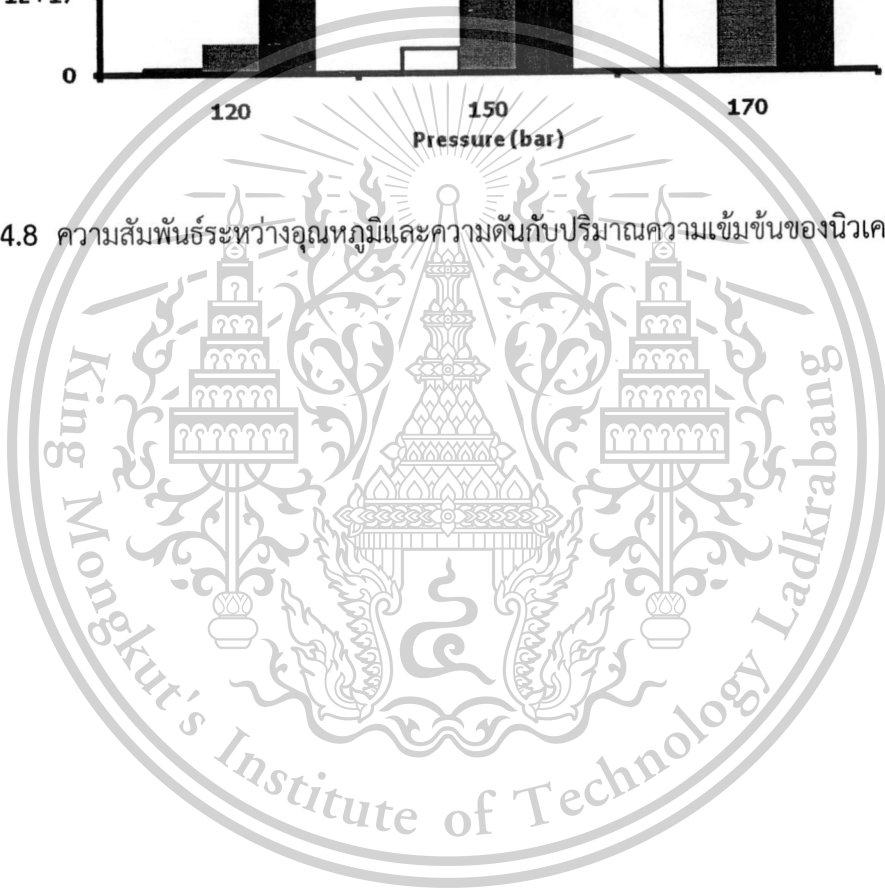
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับปริมาณความเข้มข้นของนิวเคลียสวิกฤต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 (m^3/mol)
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (ml.bar/mol.K)
	P_c	คือ ความดันวิกฤต (bar)
	T_c	คือ อุณหภูมิวิกฤต (K)
	ω	คือ อะเซนทริกแฟกเตอร์

ค่าคงที่ต่างๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์มีดังนี้

$$\begin{aligned} R &= 83.1451 \text{ ml.bar/mol.K} \\ P_c &= 72.808 \text{ atm} = 73.772706 \text{ bar} \\ T_c &= 30.9782^\circ\text{C} = 304.1282 \text{ K} \\ \omega &= 0.22394 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แทนค่าคงที่ต่างๆ ลงในสมการที่ (ค-2) (ค-3) และ (ค-4) จะได้ค่าคงที่ของคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการสถานะ 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/m³ แทนค่าลงในสมการที่ (ค-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$P = \frac{83.1451 \frac{\text{ml} \cdot \text{bar}}{\text{mol} \cdot \text{K}} (313.15)}{3,608.7790 \frac{\text{ml}}{\text{mol}} - 26.6670 \frac{\text{ml}}{\text{mol}}} \frac{\left(3,911,241.4 \frac{\text{ml}^2}{\text{mol}^2} \right) (0.9793)}{\left(3,608.7790 \frac{\text{ml}}{\text{mol}} \right)^2 - 2 \left(26.6670 \frac{\text{ml}}{\text{mol}} \right) \left(3,608.7790 \frac{\text{ml}}{\text{mol}} \right) - \left(26.6670 \frac{\text{ml}}{\text{mol}} \right)}$$

$$P = 6.9718$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 ³)
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
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 ³)
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลอ้างอิงถึงเอกสารที่ปรากฏในการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ตัวอย่างผลการคำนวณกราฟความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์
ที่อุณหภูมิ 40°C

ที่อุณหภูมิ 40°C มีค่า $\alpha = 0.9793$

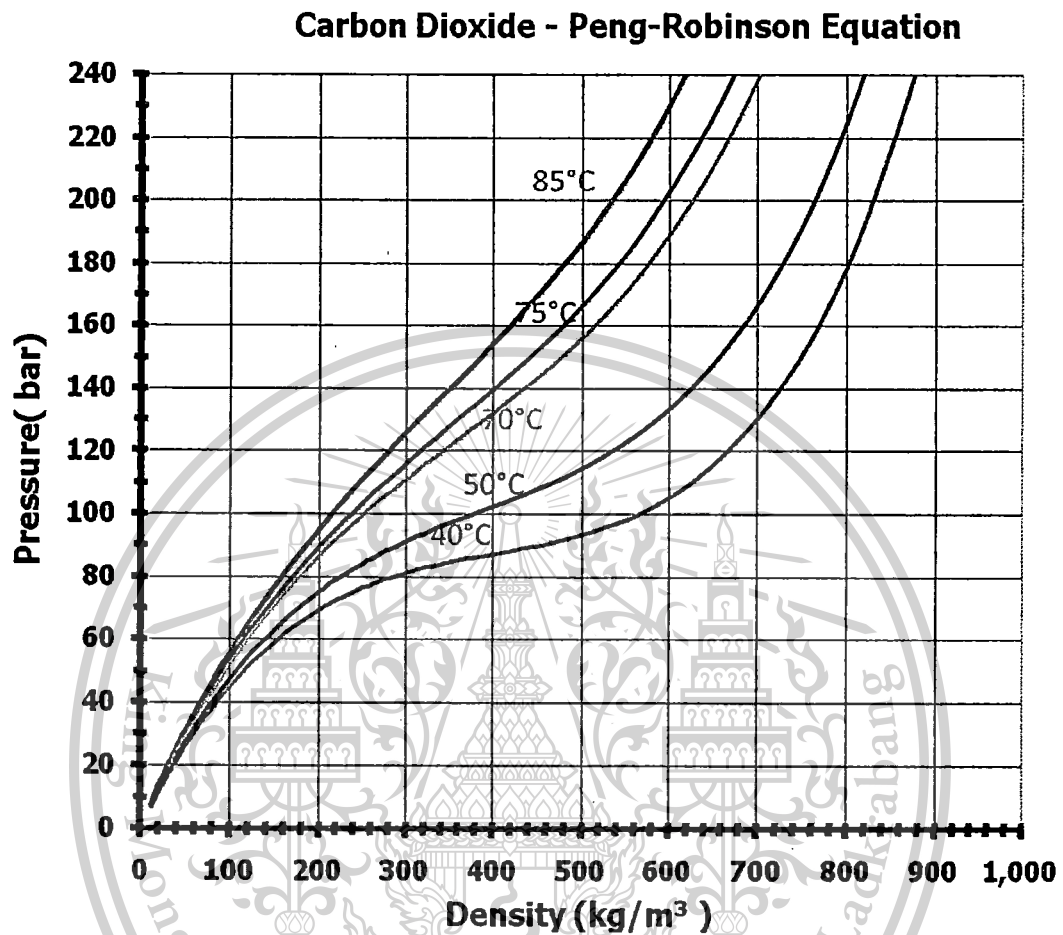
Temperature (°C)	Pressure (bar)	Molar Vol. (ml/mol)	Specific Vol. (ml/g)	Density (kg/m ³)
40	70.2333	211.2456	4.8000	208.3333
40	70.9170	206.8447	4.7000	212.7660
40	71.6070	202.4437	4.6000	217.3913
40	72.3028	198.0428	4.5000	222.2222
40	73.0039	193.6418	4.4000	227.2727
40	73.7098	189.2409	4.3000	232.5581
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้เพื่อการค้าโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์กับความดันและอุณหภูมิแสดง
ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ง

จลนศาสตร์การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ในการพ่นอนุภาคพาราฟินแร็กซ์ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่เนื่องจาก การละลายพาราฟินแร็กซ์ขึ้นไปในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าน้อยมาก จึงสมมติให้ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่พ่นออกมา คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการไหลของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เป็นการไหลแบบอัดตัวได้ มีสมการที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้

1. การคำนวณความดันที่ปลายหัวฉีดแสดงดังสมการที่ 4-21

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

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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อุณหภูมิของไหลเริ่มต้นในภาวะท่นความดันสูงหรืออุณหภูมิก่อนการขยายตัว (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 ความดันของไหลเริ่มต้นในภาวะท่นความดันสูง
 หรือความดันก่อนการขยายตัว (bar)
 k คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)
 ρ_0 คือ ค่าความหนาแน่นของไหลเริ่มต้นในภาวะท่นความดันสูง (kg/m³)

4. การคำนวณความเร็วเสียงแสดงดังสมการที่ 4-25

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

โดย c คือ ความเร็วเสียง (m/s)
 P คือ ความดันของไหล (bar)
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของไหล (kg/m³)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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_{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 พังก์ชันของอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊ส (-)

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

$$k_2 = -0.122450 + 0.281300k$$

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

และ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ออกจากหัวฉีดจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วเสียงดังสมการที่ 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 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 (-)
 ρ_L คือ ความหนาแน่น (kg/m³)
 $v_{\perp}$ คือ ความหนืดโคเนมาติก (m²/s)
 D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)
 μ_L คือ ความหนืดไดนามิกส์ของของไหล (Pa.s)
 σ_L คือ แรงตึงผิวของของไหล (N/m)

ตัวอย่างการคำนวณ
ข้อมูลเบื้องต้น

- เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (D) = 0.00158 m
 - ที่สภาวะอุณหภูมิ 70°C และความดัน 120 bar
- $C_p = 2.7379$ kJ/kg.K และ $C_v = 0.9181$ kJ/kg.K
 $\rho = 343$ kg/m³

แทนค่า C_p และ C_v ในสมการอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊ส

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $k = 2.9822$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

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

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

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

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
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

ความสัมพันธ์ของ Ohnesorge Number โดยที่สภาวะอุณหภูมิ 35.16°C และความดัน 42.58 bar มีขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ (D_p) เท่ากับ 5.6 μm

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

$$Re = 24,546$$

และ

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

$$Oh = 0.0169$$

ตารางที่ ง.1 ผลการประมาณค่าความเร็วที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

T_0 (°C)	P_0 (bar)	ρ_0 (kg/m ³)	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
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ง.2 ผลการประมาณค่าความหนาแน่นที่ปลายหัวฉีดของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

T_e (°C)	P_e (bar)	ρ_e (kg/m ³)	μ_e (Pa.s)X10 ⁶	C_p (kJ/kg.K)	C_v (kJ/kg.K)	k	σ (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 (μm)	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
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก จ

การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

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

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

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

ที่สภาวะเริ่มต้นในภาชนะทนความดันที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°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°C ความดันก่อนการขยายตัว (P_0) 120, 170 และ 200 bar

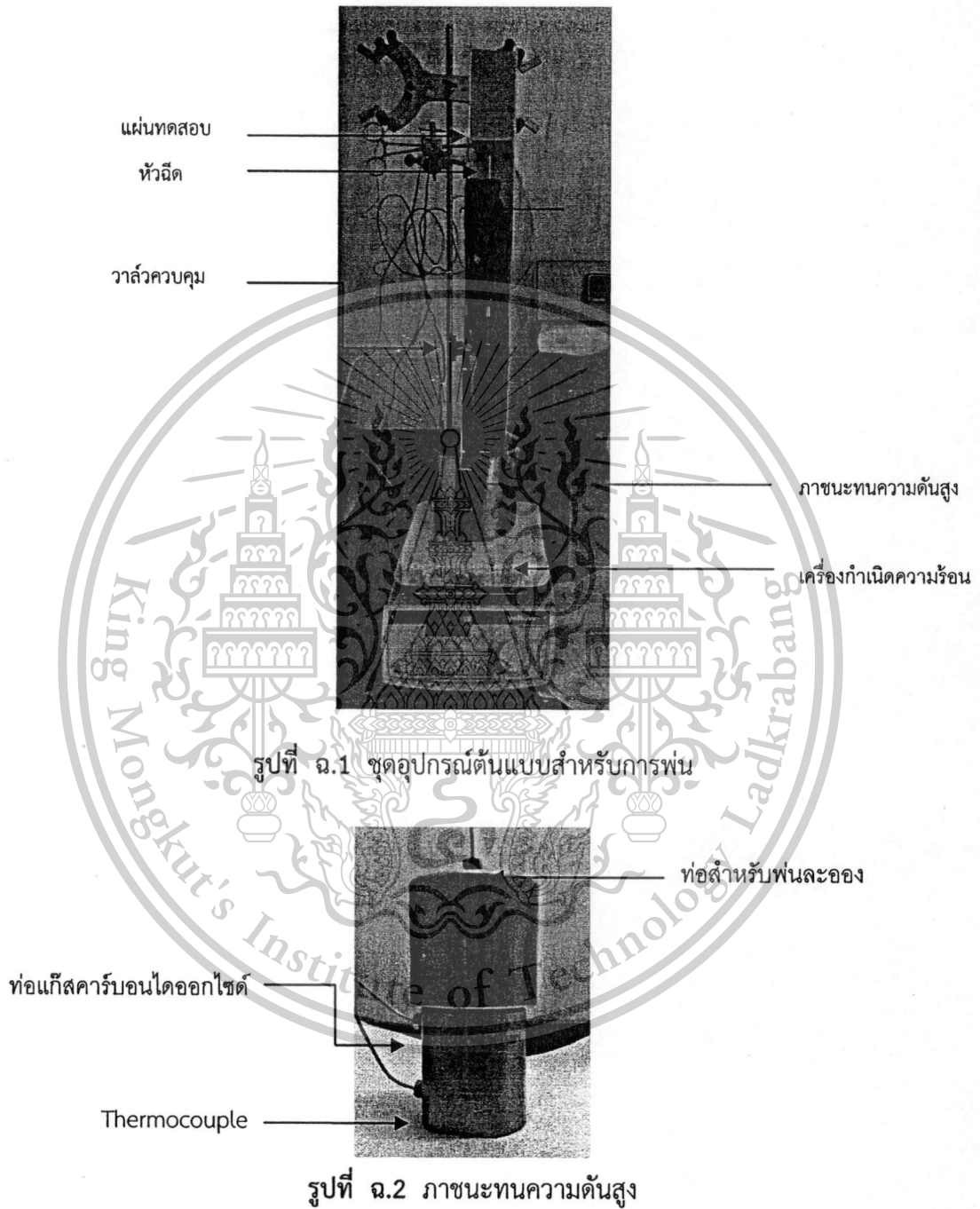
T_0 ($^\circ\text{C}$)	P_0 (bar)	P_e (bar)	D_{Nozzle} (cm)	L_M (cm)	D_M (cm)
85	120	48	0.158	0.73	0.41
85	150	54	0.158	0.77	0.44
85	170	62	0.158	0.83	0.47
85	200	74	0.158	0.91	0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ฉ
ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการพ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Assist. Prof. Dr. Surat Areerat
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 1011 00278 307
3. หน่วยงาน สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทรศัพท์ 02-329-8360-3 ต่อ 144 โทรสาร 02-3298360-3 กด 4
E-mail: kasurat@kmitl.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปีที่สำเร็จการศึกษา	ชื่อสถานศึกษา
วท.บ. สาขาเคมีอุตสาหกรรม (เกียรตินิยมอันดับ 2)	2533	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วศ.ม. สาขาวิศวกรรมเคมี	2538	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
D.Eng (Chemical Engineering)	2545	Kyoto University, Japan

5. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ
สถานภาพ
ในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัย

สาขาวิชาที่เชี่ยวชาญ

- Microcellular foam technology
- Polymer processing, Rubber technology
- Utilization of supercritical CO₂ for polymer processing
- Thermodynamic models for polymer/CO₂ mixtures
- Micro fluidics technology
- Alternative CO₂ cleaning technology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

หัวข้องานวิจัย	สถานะภาพ
1. การใช้ประโยชน์จากเศษฉนวนใยแก้วสำหรับการผลิตฉนวนกันความร้อน ชนิดพอลิเมอร์คอมโพสิตโฟม	หัวหน้าโครงการ
2. การลดของเสียจากงานฉีดยูรีเทนโฟมสำหรับอุตสาหกรรมผลิตพวงมาลัยรถยนต์	หัวหน้าโครงการ
3. การพัฒนาสารเคลือบจากพอลิเมอร์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมดอกไม้แห้ง	นักวิจัยร่วม
4. การประยุกต์ใช้ Supercritical คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการทำแห้งแบบระเหิดเพื่อการอบแห้งกึ่งคุณภาพสูง	หัวหน้าโครงการ
5. การปรับปรุงเสถียรภาพของอนุภาคอัลคาไลไนต์แขวนลอยสำหรับแร่ธาตุเสริมของพืช	หัวหน้าโครงการ
6. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องวัดแรงตึงผิว	หัวหน้าโครงการ
7. การปรับปรุงสมบัติป้องกันไอโซนของยางธรรมชาติโดย ใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์	หัวหน้าโครงการ
8. การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครสำหรับการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ	หัวหน้าโครงการ
9. เครื่องทดสอบสมดุลไอ-ของเหลว สำหรับการออกแบบถังบรรจุแก๊สไฮโซลีนรถยนต์	หัวหน้าโครงการ
10. การศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตสารเคลือบผิวพอลิเมอร์	หัวหน้าโครงการ
11. การพัฒนาสารเติมแต่งไฮบริดสำหรับป้องกันการเสื่อมสภาพจากน้ำมันเปลือก เมล็ดมะม่วงหิมพานต์และปิโตรเลียมแวกซ์	หัวหน้าโครงการ
12. การเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมผสมเส้นใยปอ (โครงการพัฒนาเทคโนโลยีพัฒนาการขึ้นรูปคอมโพสิต สำหรับชิ้นส่วนยานยนต์)	นักวิจัยร่วม
13. โครงการร่วมพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตแผ่นฟิล์มบางโพลีเมอร์โปร่งแสงชนิด Ethylene Vinyl Acetate(EVA) สำหรับห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์	หัวหน้าโครงการ
14. การพัฒนาสารลดแรงตึงผิวสำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล	หัวหน้าโครงการ
15. การศึกษาการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	หัวหน้าโครงการ
16. การผลิตพอลิเอทิลีนโฟมคอมปาวด์ Wire & Cable	หัวหน้าโครงการ
17. โครงการผลิตเครื่องวัดแรงตึงผิวชนิด Pendant drop	หัวหน้าโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลงานวิชาการ

INTERNATIONAL PUBLICATIONS

1. S. Areerat, Y. Hayata, R. Katsumoto, T. Kegaswa, H.Egami and M. Ohshima "Solubility of Carbon Dioxide in Polyethylene/ Titanium Dioxide Composite under High Pressure and Temperature", *J.Appl.Polym.Sci.*, **86**, 282 (2002).
2. S. Areerat, T. Nagata and M. Ohshima "Measurement and Prediction of LDPE/CO₂ Solution Viscosity," *Polym.Eng.Sci.*, **42**, 2234 (2002).
3. S. Areerat, E. Funami, Y. Hayata, D. Nakagawa and M. Ohshima, "Measurement and Prediction of Diffusion coefficients of supercritical CO₂ in Molten Polymers", *Polym.Eng.Sci.*, **44**, 1915 (2004).
4. Kanthamas Thaworn and Surat Areerat, "Effects of the Organic Peroxides on the Curing Behavior of EVA-Based Encapsulant for Solar Cell Modules", *J.Appl.Polym.Sci.*, (accepted)
5. Piyapong Buahom and Surat Areerat, "The Estimation of Cell Density in Isotropic Microcellular Polymeric Foams using the Critical Bubble Lattice," *J.Cel.Plast.*, **47** (2), 133-152 (2011).

INTERNATIONAL CONFERENCES

1. S. Tengsuwan, P. Buahom, P. Lipisuntorn, and S. Areerat, "The Effect of Varying Supply Conditions on the Characteristics of a Carbon Dioxide Aerosol Jet Stream for Surface Cleaning," Proc. of the 4th International Data Storage Technology Conference, DST-CON 2011, Bangkok, 9-10 January 2012
2. S. Tengsuwan and S. Areerat, "Study on the Joule-Thomson expansion for the optimization in snow dry-ice generating systems," Proceedings of the 17th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE2010, Bangkok, 2010.
3. N. Chuaphon, P. Buahom, W. Tanthapanichakoon and S. Areerat, "Effects of parameters of batch foaming process on polypropylene foam morphology," Proceedings of the 17th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE2010, Bangkok, 2010.
4. P. Buahom and S. Areerat, "Characterization of foam cell density with principle of critical bubble lattice," Proceedings of the 26th Annual Meeting of Polymer Processing Society, PPS-26, Banff, Canada, 4-8 July 2010.
5. N. Prakymoramas, S. Areerat, W. Rungseesantivanon, T. Saito, I. Satoh, B. Hararak and D. Thanomjit, "Effect of glass fiber reinforcement on service temperature of polyurethane

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนบุคคลสำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกประการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- composites," Proceedings of the 2nd Thammasat University International Conference on Chemical, Environmental and Energy Engineering, TUCHEEE 2009, Bangkok, 2009
6. P. Piyamanocha, S. Pormsiri, **S. Areerat** and M. Ohshima "Molecular Weight Reduction of Natural Rubber by Using Supercritical Carbon Dioxide" Proceedings of Polymer Processing Society Annual Meeting 24th, PPS-24, Italy, (2008).
 7. **Surat Areerat**, Kentaro Taki and Mashahiro Oshima. "Study of a chemical peptizer impregnation into natural rubber using supercritical carbondioxide," Asian Workshop on Polymer Processing 2008, AWPP-2008, August 26-29, Tokyo, Japan, 2008.
 8. P. Maskong, P. Buahom, P. Piyamanocha, W. Rungseesantivanon and **S. Areerat**, "Effect of fiber surface treatment on mechanical properties of jute reinforced PU composite foams" Proc. of the 20th Japan Society of Polymer Processing Annual Meeting, JSPP 2008, Tokyo, Japan, (2008).
 9. N. Kerd tonglang, P. Piyamanocha and **S. Areerat**, "Measurement and Prediction of Surface Tension of Molten Polymer Blends" Proc. of the 2nd International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers, ICAPP2007, Bangkok, (2007).
 10. T. Thaworn and **S. Areerat**, "Crosslinking Characteristic of EVA – based Encapsulant for Photovoltaic Modules" Proc. of Asian Workshop on Polymer Processing 2006, AWPP 2006, Bangkok, (2006).
 11. P. Preyaratanachote, P. Thaipitak, A. Klubnuam and **S. Areerat**, "Application of the Van der Waals Equation of State to the Separation of Paraffin Wax from Lube Base Oil Refinery" Proc. of the 13th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE2006, Singapore, (2006).
 12. S. Watchaleeporn , P. Tithipol, R. Siripan and **S. Areerat**, "Study of Dyeing Polymers Using Supercritical Carbon dioxide" Proc. of the 13th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE2006, Singapore, (2006).
 13. W. Maneerat, **S. Areerat** and A. Namkanisorn, "Enhancement of Electrical Conductivity of Natural Rubber by Addition of Carbon Black," Proc. of the 12th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE2005, Hanoi,Vietnam, (2005).
 14. P. Piyamanocha, A. Namkanisorn and **S. Areerat**, "Prediction of Polyurethane Foam Product using a Parabolic Concentration Profile," Proc. of the 12th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE2005, Hanoi,Vietnam, (2005).
 15. C. Perin, **S. Areerat**, W. Tanthapanichakoon and T. Charinpanitkul "Batch Process for Preparing Microcellular PVC Foam Using Supercritical Carbon dioxide" Proc. of the 11th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE 2004, Bangkok, (2004).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

16. S. Areerat, N. Jittapanyapong, P. Supphasrirongjaroen, M. Mungmart and A. Namkanisorn, "Study of Processing Parameters and Development of Simulation Model of Polyurethane Foam in Reaction Injection Molding" Proc. of the 11th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE 2004, Bangkok, (2004).
17. S. Areerat, K. Nitta and M. Ohshima, "Solubility and Diffusivity of Supercritical Carbon Dioxide (sc-CO₂) in Molten PP/EPDM blends," Proc. of Polymer Processing Society Annual Meeting 19th, PPS-19, Australia, (2003).
18. S. Areerat, K. Taki and M. Ohshima "Effects of CO₂ on Polymer Properties -Experiment and Prediction-" Proc. of Polymer Processing Society Asia/Australia Regional Meeting, Taiwan, (2002).
19. S. Areerat, T. Nagata and M. Ohshima "Measuring and Modeling of Viscosity Depression Induced by CO₂ Dissolution" Proc. of Polymer Processing Society Annual Meeting 18th, PPS-18, Portugal, 342, (2002).

วารสารวิชาการระดับประเทศ

1. สิวซ์ เต็งสุวรรณ และ สุรัตน์ อารีรัตน์, "การศึกษากระบวนการผลิตของลอยคาร์บอนไดออกไซด์เย็นยิ่งยวดผ่านกระบวนการแพร่กระจายแบบจุล-ทอมป์สัน," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2553, หน้า 55-60.
2. โชคชัย บุญช่วย และ สุรัตน์ อารีรัตน์, "การแตกสลายเชิงเคมีของยางธรรมชาติภายใต้สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27, ฉบับที่ 3, กันยายน 2553, หน้า 43-48.
3. ณัฐพงศ์ เชื้อพล, ปิยพงศ์ บัวโฮม, รัฐพล ตั้งนพคุณ, วุฒิพงษ์ รังสีสันติวานนท์, และ สุรัตน์ อารีรัตน์ "การศึกษาผลของ MA-g-PP ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของโพลิเมอร์ฟิล์มเสริมแรงเส้นใยสับปะรด," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2553, หน้า 49-54.
4. ปิยวุฒิ มาศไค้ และ สุรัตน์ อารีรัตน์, "การศึกษากระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2552, หน้า 43-48.
5. เศรษฐการ พรหมศิริ และ สุรัตน์ อารีรัตน์, "การตกผลึกร่วมแก้วซ์/คาร์บอนอลในน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ปรับสภาพ," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 26, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2552, หน้า 37-42.
6. ปิยวุฒิ มาศไค้, ปิยพงศ์ บัวโฮม, พงศ์ประภาส ปิยมโนชา, วุฒิพงษ์ รังสีสันติวานนท์ และ สุรัตน์ อารีรัตน์, "การเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโพลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยปอ," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, กันยายน 2551 หน้า 42-47.
7. Thanomkwan Thaworn and Surat Areerat. "Kinetic Reaction Analysis by Model-Free Method for EVA-Based Encapsulant for Photovoltaic Modules," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2551, หน้า 42-46.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

8. เศรษฐการ พรหมศิริ, กาเหว่า เทพนอก, และ สุรัตน์ อาริรัตน์. “การปรับปรุงสมบัติป้องกันไอโซนของยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 24, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2550.
9. นิกเร เกิดทองกลาง, พงศ์ประภาส ปิยมโนชา, ณัฐพล อุดมชัยพานิช, และ สุรัตน์ อาริรัตน์. “การประมาณค่าแรงดึงผิวของ พอลิเมอร์ผสม”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 24, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2550, หน้า 1-6.
10. วชิรพร แสงวัชรพันธุ์, จุติพล พัฒนาศิน, ศิริพันธ์ เรืองมณีชัชวาล, และ สุรัตน์ อาริรัตน์. “การศึกษาการย้อมสีพอลิเมอร์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 23, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2549, หน้า 48-53.
11. พงศ์ประภาส ปิยมโนชา และ สุรัตน์ อาริรัตน์. “การทำนายการขยายตัวของฟองก๊าซในพอลิยูรีเทนโฟม”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 3, กันยายน 2548, หน้า 1-6.

การประชุมวิชาการระดับประเทศ

1. พงศ์ประภาส ปิยมโนชา และ สุรัตน์ อาริรัตน์ “การทำนายการขยายตัวของฟองก๊าซในพอลิยูรีเทนโฟม”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 3, กันยายน 2548 หน้า 1-6.
2. วชิรพร แสงวัชรพันธุ์, จุติพล พัฒนาศิน, ศิริพันธ์ เรืองมณีชัชวาล และ สุรัตน์ อาริรัตน์ “การศึกษาการย้อมสีพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 23, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2549 หน้า 48-53.
3. นิกเร เกิดทองกลาง พงศ์ประภาส ปิยมโนชา ณัฐพล อุดมชัยพานิช และ สุรัตน์ อาริรัตน์ “การประมาณค่าแรงดึงผิวของพอลิเมอร์ผสม”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 24, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2550, หน้า 1-6.
4. เศรษฐการ พรหมศิริ, กาเหว่า เทพนอก และ สุรัตน์ อาริรัตน์ “การปรับปรุงสมบัติป้องกันไอโซนของยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 24, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2550.
5. วชิรพร แสงวัชรพันธุ์, กมลรัตน์ สุนทรลาภ, ฉัตรทิพย์ พรหมหมวก, เมธา บัวรักสกุล, และ สุรัตน์ อาริรัตน์, “การเตรียมไมโครเซลล์ลาร์โฟมจากพอลิเมอร์ผสมโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14, ธันวาคม 2547.
6. ถนอมขวัญ ถาวร, พรศิริ เสริมदारารัตน์, เวทีนี โล่ห์สืวานนท์, อภินันท์ นัมมณีสรณ์ และ สุรัตน์ อาริรัตน์, “การศึกษากลไกของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสารเคลือบผิวพอลิเมอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14, ธันวาคม 2547.
7. ชาญณรงค์ ยิ้มแก้ว และ สุรัตน์ อาริรัตน์, “การพัฒนาพลาสติกฟิล์ม ชนิดเอทิลีนไวนิลอะซิเตด ป้องกันไฟฟ้าสถิตและป้องกันการเกิดฝ้า สำหรับงานด้านการเกษตรกรรม”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, ตุลาคม 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

8. ลัดดาวรรณ ดัชนี และ สุรัตน์ อารีรัตน์, “การใช้ประโยชน์จากเศษฉนวนใยแก้ว สำหรับการผลิตฉนวนกันความร้อนชนิด พอลิเมอร์คอมโพสิตโฟม” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, ตุลาคม 2548.
9. ประพนธ์ ปรียารัตนโชติ ปิติภัทร ไทพิทักษ์ อรรถจันท์ กลับน่วม และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การประยุกต์ใช้สมการสถานะแวนเดอร์วาลส์เพื่อแยกพาราฟินแวกซ์ออกจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่น” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16, ตุลาคม 2549.
10. นิกร เกิดทองหลาง ชาญณรงค์ ยัมแก้ว และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การศึกษาผลของยางธรรมชาติต่อค่าแรงดึงผิวของฟิล์มพลาสติกผสม” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, ตุลาคม 2550.
11. เศรษฐการ พรหมศิริ ขามแก้ว พจนิโยธิน ศรัณยา คงโคตร และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สในยางธรรมชาติ” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, ตุลาคม 2550.
12. อรทัย ไปรยอรุณ วัชรินทร์ แสงวัชรพันธุ์ และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, ตุลาคม 2550.
13. กัญจมาศ ถาวร และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์โดย MDR สำหรับสารเคลือบผิวเซลล์แสงอาทิตย์” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, ตุลาคม 2550.
14. ปฐมาภรณ์ ทรัพย์เจริญ นิตา หล่ออุดมพันธ์ นิพนธ์ ตระกูลพิทักษ์ และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การศึกษาคุณลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลผสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้” การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ไทย ครั้งที่ 4, เมษายน 2551.
15. ชาศริต เอนกพร รัสรินทร์ ฐิติโชติอริยกุล และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การศึกษาเพื่อออกแบบถังน้ำมันบรรจุแก๊สโซฮอล์” การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ไทย ครั้งที่ 4, เมษายน 2551.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.