การเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยวิธีการขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

Superhydrophobic Surface Preparation by Rapid Expansion Supercritical Carbon Dioxide Solution Method

ปริทัศน์ เหมือนจันทร์ อภิสรา วีระชยาภรณ์ สุชาวดี แสนบุราณ สุรัตน์ อารีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

กระบวนการขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Rapid Expansion of Supercritical Carbon Dioxide Solutions, RESS) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการผลิตอนุภาคแว็กซ์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตรที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเคลือบผิว งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic Surface) ด้วยเทคนิค RESS โดยทำการศึกษาการเคลือบชั้นของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวพลาสติกประเภทอะคริลิค (Poly Methyl Methacrylate, PMMA) ผ่านการพ่นสารละลายเหนือวิกฤตที่สภาวะบรรยากาศ และทำการทดสอบระดับความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวด้วยการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA โดยพบว่าสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงองศามุมสัมผัสหยดน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 80.0° เป็น 150.5° ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันอิ่มตัวก่อนการขยายตัวในช่วงความดัน 120 - 170 bar และช่วงอุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70 - 85°C ต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่พ่นเคลือบบนพื้นผิว PMMA พบว่าอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่พ่นเคลือบบนพื้นผิวมีขนาดอนุภาคในช่วง 3.0 - 6.0 ไมโครเมตร และพบว่าเมื่อความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์จะมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าตัวเลข *Re* และ *Oh* สามารถใช้อธิบายสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการพ่นเคลือบอนุภาคแว็กซ์เพื่อปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้

คำสำคัญ : การขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายเหนือวิกฤต, พื้นผิวไม่ชอบน้ำยิ่งยวด, การเคลือบผิวแบบพ่นละออง

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°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.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

เทคนิค RESS [1,2] เป็นวิธีการที่สามารถผลิตอนุภาคขนาดเล็กในระดับไมครอน ขั้นตอนที่สำคัญของเทคนิคนี้คือสารที่นำมาเตรียมอนุภาคต้องมีความสามารถถูกละลายในตัวทำละลายของไหลเหนือวิกฤตที่ความดันสูง ซึ่งสารละลายจะถูกรบกวนสมดุลการละลายโดยการลดความดันลงอย่างรวดเร็วผ่านท่อขนาดเล็ก ทำให้ความสามารถในการละลายของสารนั้นลดลงเกิดการแยกวัฏภาค (Phase Separation) เป็นอนุภาคขนาดเล็กเคลือบอยู่บนพื้นพื้นผิว

พื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดคือพื้นผิวที่มีมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและหยดน้ำมากกว่า 150.0° โดยสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดนี้อธิบายได้จากปรากฏการณ์ที่พบตามธรรมชาติ คือ ลักษณะของหยดน้ำที่กลิ้งบนผิวใบบัว (Lotus Effect) ซึ่งมีจุดเด่น คือ คุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง (Self-Cleaning) [1] ลดการเกิดคราบน้ำเกาะติดบนพื้นผิว โดยพบว่าปรากฏการณ์ธรรมชาตินี้เกิดขึ้นจากลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ (Roughness) คล้ายหนาม มีช่องว่างในระดับ 5-10 ไมโครเมตร หรือมีผลึกคล้ายลักษณะของรังผึ้งที่เป็นโครง สร้างต่อเนื่องที่เรียกว่าลักษณะสัณฐานวิทยาแบบโมโนแกรม (Monogram) ด้วยลักษณะเฉพาะตามธรรมชาตินี้ จึงได้มีการพัฒนาพื้นผิววัสดุให้มีลักษณะสัณฐานวิทยาเลียนแบบธรรมชาติที่มีความขรุขระและมีความสม่ำเสมอของอนุภาคขนาดเล็กกระจายบนพื้นผิวเพื่อให้พื้นผิววัสดุมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดสำหรับประยุกต์ใช้ในการป้องกันการเปียกชื้นและช่วยกำจัดสิ่งสกปรกบนพื้นผิววัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

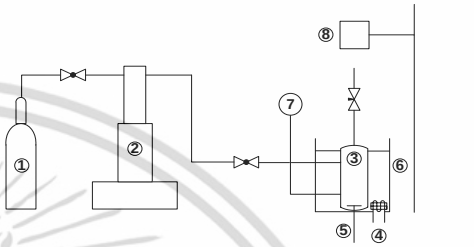
Can Quan และคณะ [1] จึงได้ทำการศึกษาการเคลือบผิวกระดาษที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดด้วยอัลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, ADK) ด้วยเทคนิค RESS ซึ่งสามารถเตรียมกระดาษที่มีมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและหยดน้ำสูงถึง 173° งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและออกแบบกระบวนการเคลือบผิว PMMA ที่แสดงสมบัติความชอบน้ำด้วยการพ่นละอองอนุภาคแว็กซ์ที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวและมีความสามารถในการละลายในของไหลเหนือวิกฤตด้วยเทคนิค RESS โดยใช้คาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย และทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA ที่เพิ่มสูงขึ้นหลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

พาราฟินแว็กซ์ (Octacosane, $C_{28}H_{58}$) จุดหลอมเหลว 59-65 °C จากบริษัท Sigma-Aldrich (Analytical standard grade) แผ่น PMMA แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.95 % (Purity grade) จากบริษัท United Gas

2.2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS



1. ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2. ปั๊มอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D) 3. ภาชนะทนแรงดันสูง (Taiatsu Techno) 4. ขดลวดความร้อน 5. เครื่องปั่นกวน 6. อ่างน้ำมันซิลิโคน 7. เทอร์โมคัพเปิล (Thermocouple) 8. แผ่นทดสอบ

รูปที่ 1 จำลองกระบวนพ่นเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองของกระบวนการพ่นเคลือบผิวด้วยเทคนิค RESS โดยบรรจุพาราฟินแว็กซ์ 2.5 g ในภาชนะทนแรงดันสูงปริมาตร 15 mL (3) ให้ความร้อนแก่ระบบผ่านอ่างน้ำมันซิลิโคนด้วยขดลวดความร้อน (4) ที่อุณหภูมิ 70-85°C ทำการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในภาชนะทนแรงดันสูงด้วยปั๊มอัดแรงดันจนมีความดันในช่วง 120 - 170 bar ปล่อยให้เข้าสู่สมดุลการละลายเป็นเวลา 2 h จากนั้นพ่นสารละลายผสมผ่านท่อขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16” ไปยังแผ่น PMMA (8) ที่ทำมุมตั้งฉากกับหัวฉีด กำหนดระยะห่างระหว่างแผ่น PMMA และปลายหัวฉีดคงที่เท่ากับ 1 cm

2.3 การวิเคราะห์ผล

วิเคราะห์พื้นผิวก่อนและหลังการพ่นเคลือบด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอกำลังขยายสูง 120 เท่า และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ (Goniometer)

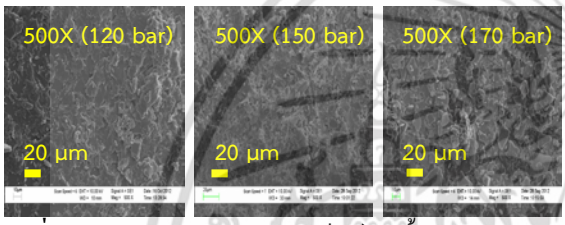
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 การเกิดอนุภาคด้วยกระบวนการ RESS

- **ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์**

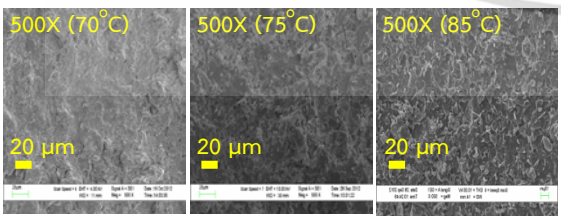
จากการศึกษาผลของความดันที่ใช้สำหรับการละลายพาราฟินแว็กซ์ในตัวทำละลาย SC-CO_2 ที่เรียกว่าความดันอิ่มตัวในภาชนะทนแรงดันสูงหรือความดันก่อนการขยายตัวในกระบวนการ RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C พบว่าเมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัว 120 150 และ 170 bar ตามลำดับ ขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจาก 4.0 เป็น 3.0 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพถ่ายอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C

- **ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์**

การศึกษาผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70 75 และ 85°C ตามลำดับ ต่อขนาดของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ RESS ที่ความดันอิ่มตัวคงที่ 150 bar จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนการขยายตัวขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์มีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 3 โดยลดลงจาก 6.0 เป็น 4.0 ไมโครเมตร



รูปที่ 3 ภาพถ่ายอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิวของ PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองด้วยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 150 bar

- **อภิปรายผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อการเกิดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์**

การเกิดอนุภาคด้วยกระบวนการ RESS [1,2] สามารถอธิบายได้จากค่าตัวแปรอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation Ratio, S) ซึ่งค่าอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดเปรียบเสมือนแรงขับเคลื่อนของการเกิดนิวเคลียสในการเกิดอนุภาค อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายในอุดมคติอธิบายได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$S = \frac{y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})}{y^{*}(T, P)} \quad (1)$$

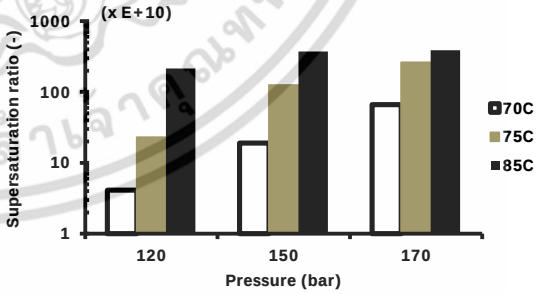
โดย

S คือ อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวด

$y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})$ คือ สัดส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะก่อนการขยายตัว

$y^{*}(T, P)$ คือ สัดส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะหลังการขยายตัว

จากสมการที่ 1 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันอิ่มตัวและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวของระบบทำให้พาราฟินแว็กซ์สามารถละลายในตัวทำละลาย SC-CO_2 ได้มากขึ้นจึงส่งผลให้อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดมีค่าสูงขึ้นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวกับอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดแสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยในการศึกษานี้ประมาณค่าการละลายโดยใช้สมการสภาวะของ Peng-Robinson [4]



รูปที่ 4 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันอิ่มตัวก่อนการขยายตัวต่ออัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวด

จากการศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์สามารถอธิบายได้จาก เมื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวอัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดมีค่าเพิ่มมากขึ้น อัตราการเกิดนิวเคลียสจะมีค่าเร็วขึ้น เมื่ออัตราการเกิดนิวเคลียสเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

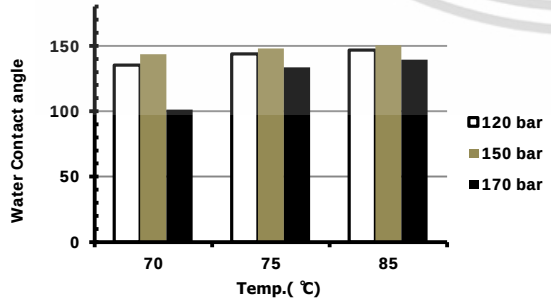
ทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลง อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นความหนืดของสารละลายผสมจะมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสเพิ่มขึ้น ดังนั้นขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์จึงมีขนาดเล็กลง จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวที่ 170 bar จะเกิดกลุ่มของอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นบางส่วน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดแรงเชื่อมระหว่างอนุภาค (Binding Force) [3] เกิดขึ้น

3.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

- **ผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว**

การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่ความดันก่อนการขยายตัว 120 -170 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70-85°C แสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

รูปที่ 5 ภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA ที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคพาราฟินแว็กซ์



รูปที่ 6 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ

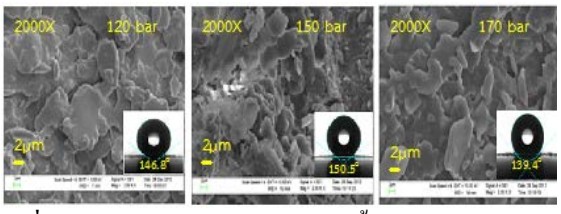
จากการศึกษาพบว่ากระบวนการเคลือบผิว PMMA โดยเทคนิค RESS สามารถปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นโดยวัดได้จากองศามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจาก 80.0° เป็น 101.3°-150.5° จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าที่สภาวะความดันอิ่มตัวก่อนการขยายตัว 150 bar และที่อุณหภูมิ 85°C สามารถเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำสูงถึง 150.5° และมีลักษณะหยดน้ำคล้ายทรงกลม

- **อภิปรายผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว**

จากรูปที่ 6 ผลของความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว PMMA พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนการขยายตัวมุมสัมผัสหยดน้ำกับพื้นผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สามารถอธิบายได้จากค่าการละลายของพาราฟินแว็กซ์ใน SC-CO_2 ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่เคลือบบนพื้นผิวมีปริมาณมากขึ้น รวมทั้งทำให้ขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์เล็กลงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.1 ส่งผลให้พื้นผิว PMMA มีโอกาสในการเกิดระดับของความขรุขระเพิ่มสูงขึ้นมุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังการเคลือบผิวจึงมีค่าสูงขึ้น

อย่างไรก็ดีจากการศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำดังรูปที่ 6 พบว่าระดับความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ 1 เมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 120 เป็น 150 bar ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังได้อธิบายพฤติกรรมการละลายของสารที่ได้กล่าวมาแล้ว และช่วงที่ 2 เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 150 เป็น 170 bar ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีแนวโน้มลดลง อธิบายได้จากที่ความดันก่อนการขยายตัว 170 bar อนุภาคพาราฟินแว็กซ์มีระดับความรุนแรงในการเข้ากระทบแผ่น PMMA สูง ส่งผลต่อการกระจายตัวของพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิว PMMA เพิ่มสูงขึ้นทำให้พื้นผิวมีความขรุขระลดน้อยลง มุมสัมผัสของหยดน้ำจึงมีค่าลดลง ดังแสดงได้ในรูปที่ 7 สามารถอภิปรายผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อการกระจายตัว ลักษณะสัณฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์บนพื้นผิว PMMA ได้ดังนี้

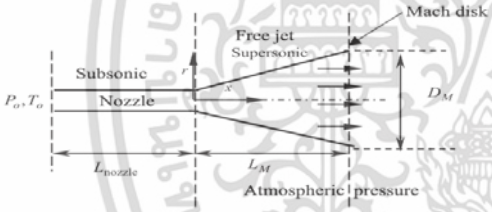
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงลักษณะพื้นผิวและลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว PMMA หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS ที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 85°C

- **ผลของความดันต่อการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์**

การศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์โดยทำการศึกษาจากสัดส่วนการกระจายตัวเฉลี่ยของพาราฟินแว็กซ์ในเทอมของ D/D_M ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของพาราฟินแว็กซ์จากการทดลอง (D) เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวทางทฤษฎี (D_M) ที่ขึ้นกับผลของความดันก่อนการขยายตัว ซึ่งสามารถประมาณค่าจากสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ [4]



รูปที่ 8 แบบจำลองปรากฏการณ์ของการพ่นเคลือบด้วยเทคนิค RESS [4]

$$L_M = 0.67 D_{Nozzle} \sqrt{\frac{P_0}{P_{post-ex}}} \quad (2)$$

$$D_M = 0.5625 L_M \quad (3)$$

L_M คือ ระยะพ่นระหว่างปลายหัวฉีดและแผ่นทดสอบ

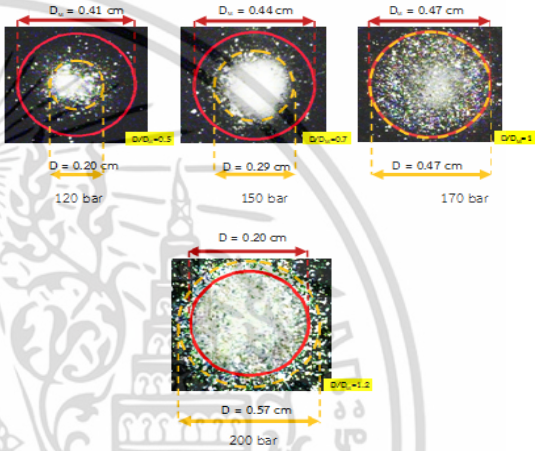
D_{Nozzle} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

D_M คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวอย่างอิสระ

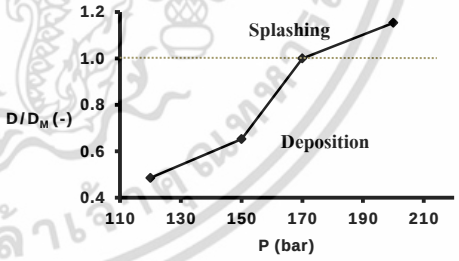
P_0 คือ ความดันในเครื่องภาชนะทนความดันหรือความดันก่อนการขยายตัว

$P_{post-ex}$ คือ ความดันในบริเวณพื้นที่ของการพ่นหรือบริเวณเกิดการขยายตัวอย่างอิสระ

การศึกษาผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อสัดส่วนการกระจายตัวเฉลี่ยแสดงได้ดังรูปที่ 9 พบว่า เมื่อความดันก่อนการขยายตัวเพิ่มขึ้น สัดส่วนการกระจายตัวเฉลี่ยมีค่ามากขึ้นที่ความดัน 120 และที่ 150 bar มีสัดส่วนการขยายตัวเฉลี่ย (D/D_M) เท่ากับ 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่มีลักษณะเป็นแบบทับถมปกติ (Deposition) [5] และที่ 170 bar สัดส่วนการกระจายตัวเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.0 ซึ่งเป็นบริเวณที่เริ่มมีการกระเด็นของอนุภาคเกิดขึ้น (Splashing) [5] ทำให้เกิดลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่มีความขรุขระน้อยและมีพาราฟินแว็กซ์ปกคลุมได้ไม่ทั่วบริเวณที่เคลือบผิว ส่งผลให้มุมสัมผัสหยดน้ำที่ทดสอบได้จึงมีค่าลดลง โดยผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อสัดส่วนการกระจายตัวเฉลี่ยแสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่ระยะพ่น 1 cm อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 85°C



รูปที่ 10 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อสัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

จากการอภิปรายสมบัติที่ส่งผลต่อการกระทบของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์บนแผ่น PMMA เพื่อทำนายโอกาสในการกระจายตัวของอนุภาค พบว่าความเร็วและแรงตึงผิวของอนุภาคที่เข้าชนแผ่น PMMA จะส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวและการทับถมของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์โดยอธิบายได้ในรูปของค่า Renolds Number (Re) ที่บ่งชี้สภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหลเป็นสัดส่วนของ Inertia/Viscous ดังแสดงในสมการที่ 4 [5]

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

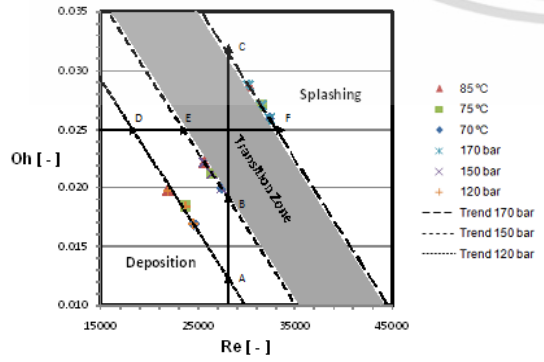
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า Ohnesorge Number (Oh) แสดงสัดส่วนระหว่าง Viscous/Surface Tension ดังสมการที่ 5

$$Oh = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma_L D_d}} \quad (5)$$

Re คือ Renolds Number
Oh คือ Ohnesorge Number
ρ_L คือ ความหนาแน่น
$\nu_\perp$ คือ ความหนืดไคเนมาติก
D_d คือ ขนาดเส้นผ่าศูนกลางของอนุภาค
μ_L คือ ความหนืดไดนามิกของของไหล
σ_L คือ แรงตึงผิวของของไหล

จากการประมาณค่า Re และ Oh ในการทดลองสามารถอธิบายผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อการจัดเรียงตัวของชั้นอนุภาค จากรูปที่ 11 ได้ว่าที่ Re คงที่ ณ จุด A ที่ความดัน 120 bar ซึ่งอยู่ในบริเวณการสะสมแบบปกติ โดยมีค่าความเร็วและค่าแรงตึงผิวอยู่ค่าหนึ่ง เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเท่ากับ 150 bar ณ จุด B โดยมีค่าความเร็วคงที่ ค่าแรงตึงผิวเริ่มเปลี่ยนแปลงในทางลดลง และเริ่มเข้าสู่ Transition zone ซึ่ง ณ จุด B ยังคงอยู่ในบริเวณการสะสมแบบปกติ แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจนทำให้ค่าแรงตึงผิวลดลงมากพอที่จะทำให้ค่า Oh มากกว่า Transition zone ณ จุด C ที่ 170 bar การกระจายตัวของอนุภาคมีค่ามากจนอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่พ่นออกไปบนพื้นผิวเกิดการกระเด็น จากรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาที่ค่า Oh คงที่ การเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวมีผลทำให้ความเร็วของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่พ่นออกมามีค่าสูงขึ้น ที่ความดัน 120 และ 150 bar ณ จุด D และ E พบว่าค่า Re ยังคงอยู่ในช่วงการสะสม (Deposition) จึงทำให้เกิดการสะสมและทับถมกันของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ในช่วงความดันนี้ แต่เมื่อความดันมีค่าสูงขึ้นทำให้ค่า Re มากกว่า Transition zone ณ จุด C ที่ 170 bar การฉีดพ่นจะอยู่ในช่วงการกระเด็น ทำให้อนุภาคมีกระจายตัวและเกิดการกระเด็นสูง



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re และ Oh ต่อลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคบนพื้นผิว PMMA

4. สรุปผลการทดลอง

กระบวนการเคลือบผิว PMMA ด้วยพาราฟินแว็กซ์โดยเทคนิค RESS สามารถสร้างอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่มีขนาด 3.0-6.0 ไมโครเมตร และสามารถเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ โดยสามารถเตรียมพื้นผิวที่มีมุมสัมผัสของหยดน้ำ 150.5° ที่ความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัว 150 bar และ 85°C ตามลำดับ และจากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติความไม่ชอบของพื้นผิว PMMA มี สองปัจจัยที่สำคัญ คือ อัตราส่วนการละลายอิ่มตัวยิ่งยวดที่สูงขึ้นที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ และลักษณะการตกกระทบของของไหลกับพื้นผิว PMMA โดยอธิบายได้จากค่า Re และ Oh ที่ส่งผลต่อความเร็วและแรงตึงผิวของของไหลในการตกกระทบ ซึ่งพบว่าที่ความดันก่อนการขยายตัวมากกว่า 170 bar จะเกิดการกระเด็นของอนุภาค ส่งผลให้สัณฐานวิทยาของพื้นผิว PMMA มีความหนาแน่นของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ปกคลุมน้อย จึงมีมุมสัมผัสหยดน้ำที่มีแนวโน้มลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุน โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ประเภทโครงการวิจัยด้านนวัตกรรมและอัตลักษณ์เด่น ปี พ.ศ. 2555

6. เอกสารอ้างอิง

[1] C. Quan, O. Werner, L. Wågberg, 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, pp. 117–124, Nov., 2008.

[2] S.D. Yeo and E. Kiran, “Formation of polymer particles with supercritical fluids: A review,” J. of Supercritical Fluids, Vol.34, pp.287–308, Oct., 2004.

[3] E. L. Paul, H. H. Tung, and M. Midler, “Organic crystallization processes,” Powder Technology, vol.150, pp. 133–143, Nov., 2004.

[4] P. Hirunsit, Z. Huang, T. Srinophakun, M. Charoenchaitrakool, and S. Kawi, “Particle formation of ibuprofen–supercritical CO_2 system from rapid expansion of supercritical solutions (RESS): A mathematical model,” Powder Technology,vol. 154 , pp. 83 – 94, May, 2005.

[5] 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,pp. 5699–5715, Aug., 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้