

การอธิบายกลไกการทำความสะอาดของการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง โดยพารามิเตอร์การละลาย

An Explanation of Mechanism of Snow Dry Ice Cleaning by Solubility Parameter

พัชร พิริยะวิฑะ สุรัตน์ อารีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้อธิบายหนึ่งในกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์การละลาย เป็นกลไกการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้ว โดยการเข้าไปละลายสารปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เกิดขึ้นในระหว่างการกระทบกันระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิว ซึ่งอุณหภูมิและโมเมนตัมการชนของกระแสน้ำแข็งแห้งส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในการทำความสะอาดมีค่าอยู่ในช่วง 16.3-17.1 MPa^{0.5} ที่สภาวะความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 48 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5°C และที่สภาวะความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 55 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 และ 15°C เมื่อระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวนั้นมีค่าใกล้เคียงกับสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วที่ใช้ทำความสะอาดสิ่งสกปรกไม่มีขั้ว เช่น พาราฟินแว๊กซ์ ไขมัน สารหล่อลื่น เป็นต้น ดังนั้น การพ่นละอองน้ำแข็งแห้งจึงสามารถทำความสะอาดสารอินทรีย์ไม่มีขั้วได้

คำสำคัญ : การทำความสะอาดแบบแห้ง การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง พารามิเตอร์การละลาย

Abstract

This paper explained about one of mechanism of snow dry ice cleaning by solubility parameter. The mechanism for the removal of non-polar organic residues utilizes liquid CO₂ solvent properties while the dry ice are attach the surface. Solubility parameter value of liquid CO₂ were estimated from temperature and momentum of snow dry ice stream. From our study, solubility parameters value of liquid carbon dioxide for cleaning process are between 16.3-17.1 MPa^{0.5} when using pressure for supplying carbon dioxide 48 bar temperature for supplying carbon dioxide 5 °C and pressure for supplying carbon dioxide 55 bar temperature for supplying carbon dioxide 5 10 and 15°C at distance from tip of nozzle 2 cm. Solubility parameters value of liquid carbon dioxide are close to solubility parameters value of non-polar organic solvent, which using for dissolve non-polar organic compound e.g., paraffin wax, oil, lube oil. So, Snow dry ice cleaning can be cleaned non-polar organic residues.

Keywords : Dry cleaning, Snow dry ice cleaning, Solubility parameter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

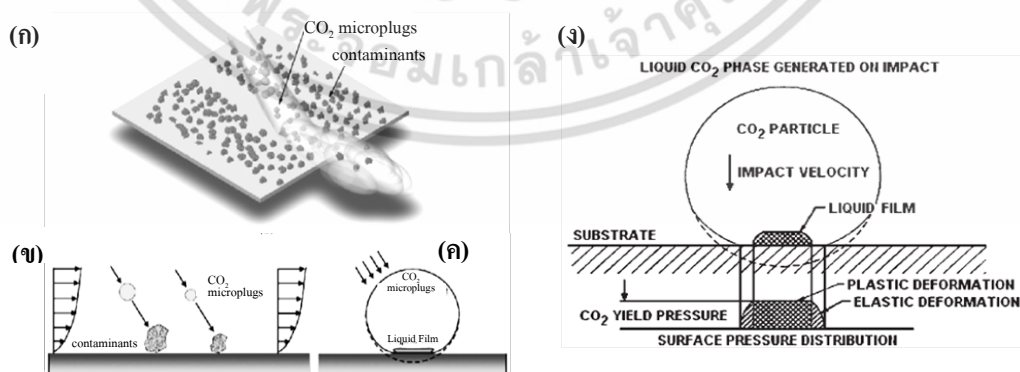
ในภาคอุตสาหกรรมความสะอาดของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ผลิตภัณฑ์ต้องสะอาดหรือมีการปนเปื้อนในระดับที่ยอมรับได้ โดยการทำความสะอาดด้วยการพ่นน้ำแข็งแห้งเป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการทำความสะอาดในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิว เช่น อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ แม่พิมพ์ยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การทำความสะอาดโดยการพ่นน้ำแข็งแห้งสามารถทำความสะอาดชิ้นงานได้เร็ว อ่อนโยนต่อผลิตภัณฑ์ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างที่เป็นอันตราย และคาร์บอนไดออกไซด์สามารถระบายสู่บรรยากาศได้ [1-4]

การทำความสะอาดโดยการพ่นน้ำแข็งแห้งนั้นประกอบด้วย 3 กลไก คือ 1. การถ่ายเทโมเมนตัมในลักษณะของการชนกระแทกของอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับสิ่งสกปรกบนพื้นผิวชิ้นงาน 2. แรงลากของกระแสคาร์บอนไดออกไซด์ และ 3. การเข้าไปละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

กลไกหลักในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนพื้นผิวคือการถ่ายเทโมเมนตัมเนื่องจากการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งไปยังสิ่งสกปรกวัฏภาคของแข็งบนชิ้นงานดังรูปที่ 1(ก) และขั้นตอนถัดมาคือการเข้าไปละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วโดยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยทั่วไปมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วตกค้างหรือถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานดังนั้นขั้นตอนนี้จึงมีความสำคัญ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะเกิดขึ้นช่วงหนึ่งใน

ระหว่างการเกิดการกระแทกของอนุภาคน้ำแข็งแห้งบนพื้นผิว เนื่องจากในระหว่างการชนก่อให้เกิดความเครียดที่สูงตรงรอยต่อระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิว ความเครียดที่เกิดขึ้นนี้มีค่ามากกว่าค่าความเค้นจุดครากของอนุภาคน้ำแข็งแห้งและสูงกว่าค่าความดันที่จุดรวม 3 วัฏภาค ส่งผลให้อนุภาคคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของเหลวและทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสารอินทรีย์ไม่มีขั้ว จากนั้นเมื่ออนุภาคคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มที่จะสะท้อนออกจากพื้นผิว ความดัน ณ จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคคาร์บอนไดออกไซด์กับพื้นผิวก็จะลดลง และวัฏภาคของเหลวที่อยู่ในอนุภาคของน้ำแข็งแห้งก็จะเปลี่ยนวัฏภาคกลับมาอยู่ในวัฏภาคของแข็งอีกครั้งหนึ่ง พร้อมทั้งเป็นการขจัดเอาสารอินทรีย์ไม่มีขั้วออกไปจากพื้นผิวด้วย [5] ดังแสดงในรูปที่ 1 (ง)

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการอธิบายกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ในส่วนกลไกการละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวโดยพารามิเตอร์การละลาย และเนื่องจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของสิ่งปนเปื้อนและค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวขณะทำความสะอาดเป็นสิ่งจำเป็น แต่ข้อมูลค่าพารามิเตอร์การละลายยังไม่แพร่หลายและมีข้อจำกัด งานวิจัยนี้จึงศึกษาข้อมูลดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกสภาวะการทำความสะอาด อีกทั้งเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด



รูปที่ 1 (ก) ภาพจำลองการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองคาร์บอนไดออกไซด์ [3]

(ข) กลไกการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงาน [3]

(ค และ ง) กลไกการขจัดสารอินทรีย์ที่อยู่บนพื้นผิว [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พารามิเตอร์การละลาย

พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter, δ) แสดงถึงความแข็งแรงของแรงระหว่างโมเลกุล มีความสัมพันธ์กับพลังงานในการดึงดูระหว่างโมเลกุล สามารถนำไปอธิบายการละลายเข้าด้วยกันของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ซึ่งตัวถูกละลายสามารถละลายในสารละลายได้ ต่อเมื่อมีค่าพารามิเตอร์การละลายเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ค่าพารามิเตอร์แสดงดังสมการ (1) ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับแรงพันธะที่ยึดเหนี่ยวและลักษณะโครงสร้างทางเคมี

$$\delta(\text{MPa}^{0.5}) = \left(\frac{\text{ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/mol)}}{\text{ปริมาตรต่อโมล (m}^3/\text{mol)}} \right)^{0.5} \quad (1)$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของสาร มีหลายวิธีแสดงดังต่อไปนี้

2.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายแบบเฮนเซน (Hansen solubility parameter) [6]

เป็นแบบจำลองสามพารามิเตอร์กล่าวคือ พิจารณาถึงความแข็งแรงระหว่างโมเลกุลในส่วนที่ไม่มีขั้ว ส่วนที่มีขั้ว และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายดังแสดงในสมการ (2)

$$\delta_T^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \quad (2)$$

เมื่อ δ_d , δ_p และ δ_h คือพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนไม่มีขั้ว ส่วนที่มีขั้ว และพันธะไฮโดรเจน ตามลำดับ

2.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายโดยวิธีพิจารณากลุ่มองค์ประกอบของ Hoftyzer และ Van Krevelen [7]

เป็นการทำนายค่าพารามิเตอร์การละลายขององค์ประกอบจากโครงสร้างทางเคมี แสดงในสมการที่ (3)

$$\delta_d = \sum F_{di} / V \quad (3-1)$$

$$\delta_p = \sqrt{\sum F_{pi}^2} / V \quad (3-2)$$

$$\delta_h = \sqrt{\sum E_{hi} / V} \quad (3-3)$$

$$V = \sum N_i V_i$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรเชิงโมล F_d , F_p และ E_h คือ พลังงานยึดเหนี่ยวเป็นผลมาจากอันตรกิริยาของส่วนที่ไม่มีขั้ว ส่วนที่มีขั้ว และพันธะไฮโดรเจน

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่า F_d , F_p และ E_h ขององค์ประกอบโครงสร้างเคมี [8]

หมู่โครงสร้าง	F_{di} (MJ/m ³).mol ⁻¹	F_{pi} (MJ/m ³).mol ⁻¹	E_{hi} J.mol ⁻¹
-CH ₃	420	0	0
-CH ₂ -	270	0	0
>C-	80	0	0
=C<	70	0	0
-Cl	450	550	400
-OH	210	500	20000

2.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ [6]

ค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถประมาณค่าได้จากสมการ (4) พบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายเป็นฟังก์ชันกับปริมาตรเชิงโมลและอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์

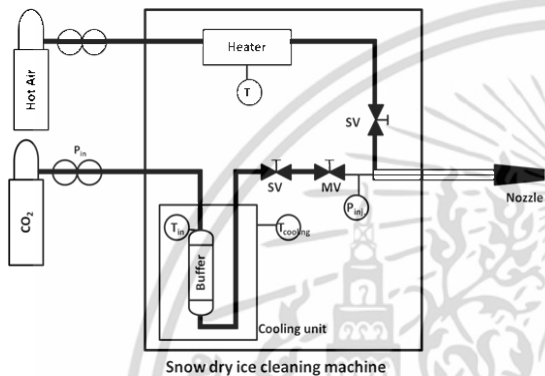
$$\delta^2 = \left[\frac{\delta_{dref}}{\left(\frac{V_{ref}}{V} \right)^{-1.25}} \right]^2 + \left[\frac{\delta_{pref}}{\left(\frac{V_{ref}}{V} \right)^{-0.5}} \right]^2 + \left[\frac{\delta_{href}}{\exp\left(-1.32 \times 10^{-3} (T_{ref} - T) - \ln\left(\frac{V_{ref}}{V} \right)^{0.5} \right)} \right]^2 \quad (4)$$

เมื่อ δ_{dref} , δ_{pref} และ δ_{href} คือค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนไม่มีขั้วอ้างอิง (15.6 MPa^{0.5}) ส่วนมีขั้วอ้างอิง (5.2 MPa^{0.5}) และส่วนพันธะไฮโดรเจนอ้างอิง (5.8 MPa^{0.5}) ตามลำดับ V_{ref} คือปริมาตรเชิงโมลอ้างอิง (39.13 cm³/mole) T_{ref} คืออุณหภูมิอ้างอิง (298.15 K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดลอง

ในการศึกษาใช้เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห่งรุ่น KMITL Model 01 ซึ่งแผนภูมิของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห่งแสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95 จากบริษัท United Industrial Gas งานวิจัยนี้ศึกษาหาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห่ง และศึกษาโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห่ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2 แผนภูมิเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห่ง

3.1 ศึกษาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห่ง ใช้เทอโมคัปเปิลชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห่งที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 0 2 4 และ 6 cm ที่ความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์คือ 35-48 bar และ 5-15 °C ตามลำดับ

3.2 ศึกษาโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห่ง โดยพิจารณาจากแผ่น Fuji Prescale Film สามารถบอกถึงโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห่งได้จากสีที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มหลังจากอนุภาคน้ำแข็งแห่งพุ่งชน สีเข้มมากหมายถึงโมเมนต์การชนที่สูง และถ้าแผ่นฟิล์มไม่ปรากฏสีหมายถึงไม่เกิดอนุภาคน้ำแข็งแห่งในกระแสน้ำแข็งแห่ง ซึ่ง Fuji Prescale Film ที่ใช้ในการทดลองเป็นฟิล์มระดับ Super low สามารถวัดค่าโมเมนต์การชนในช่วง 5-24 bar ทำการทดลองโดยนำ Fuji Prescale Film ใส่บนแท่นยึดและทำการพ่นน้ำแข็งแห่งลงท่ามุม 90 องศา กับแผ่น Fuji Prescale Film ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่น Fuji Preacale Film 2 cm ความชื้นสัมพัทธ์ขณะทำการทดลองร้อยละ 50 ถึง 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการทดลองและการอภิปราย

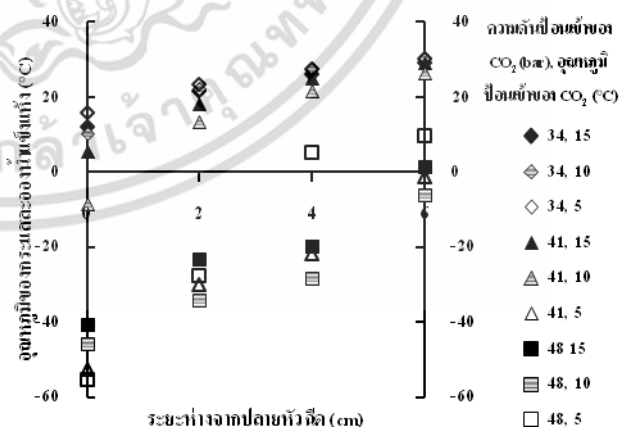
งานวิจัยนี้เป็นการอธิบายกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห่ง ในส่วนกลไกการละลายสารปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขี้บนชิ้นงาน โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในขณะทำความสะอาดเปรียบเทียบกับการทำความสะอาดโดยใช้สารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้

4.1 ค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์

การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะการทำความสะอาดสามารถประมาณค่าได้จากสมการ (4) ซึ่งต้องทราบอุณหภูมิและปริมาตรเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปริมาตรเชิงโมลสามารถหาได้จากสมการสถานะเมื่อทราบโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห่ง

ก) โปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห่งกับระยะห่างจากปลายหัวฉีดกับความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห่งที่สามารถผลิตอนุภาคน้ำแข็งแห่งได้ ควรมีอุณหภูมิต่ำหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิจุดรวมสาม (Triple point, -56.6 °C)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห่ง (°C) กับระยะห่างจากปลายหัวฉีด (cm)

ข) โมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ศึกษาสภาวะการทำความสะอาดเมื่อความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 41 48 และ 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 และ 15 °C พบว่าที่ความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 °C และความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 55 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 และ 15 °C ปรากฏสีชมพูเข้มบนแผ่นฟิล์มซึ่งมีความเข้มสูงสุด แสดงถึงค่าโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งประมาณ 24 bar

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 °C และความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 55 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 และ 15 °C พบว่ามีค่าพารามิเตอร์การละลายในช่วง 16.7-17.1 MPa^{0.5} แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Williams L.L. et al. (2004) [9] ที่ค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 16-18 MPa^{0.5} ในสภาวะเดียวกัน

ตารางที่ 2 δ ของคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อความดันที่คาร์บอนไดออกไซด์กระทบชิ้นงานประมาณ 24 bar

ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ (bar)	อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ (°C)	ปริมาตรเชิงโมล (cm ³ /mol)	δ (MPa ^{0.5})
55	5	40.8	16.8
55	10	41.1	16.7
55	15	40.2	17.1
48	5	42.0	16.3

4.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การละลายคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์

สารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้้วสามารถละลายสารอินทรีย์ไม่มีขี้้วได้ตามหลัก like dissolves like คือ ตัวถูกละลายที่มีขี้้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขี้้ว แต่จะไม่ละลายในตัว

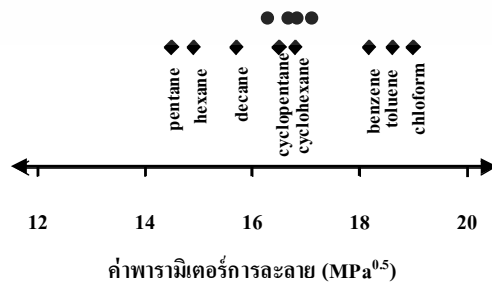
ทำละลายที่ไม่มีขี้้ว และตัวถูกละลายที่ไม่มีขี้้วจะละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้้ว แต่จะไม่ละลายในตัวทำละลายที่มีขี้้ว ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้้วพิจารณาจากพารามิเตอร์การละลายแบบเฮนเซนในหัวข้อที่ 2.1 แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้้วที่ 25°C [6]

สารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้้ว	ค่าพารามิเตอร์การละลาย (MPa ^{0.5})
pentane	14.5
hexane	14.9
decane	15.7
cyclopentane	16.5
cyclohexane	16.8
benzene	18.6
toluene	18.2
chloroform	19.0

พิจารณาเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์จากตารางที่ 2 และค่าพารามิเตอร์การละลายของสารอินทรีย์ไม่มีขี้้วจากตารางที่ 3 พบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วงของค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้้วแสดงดังรูปที่ 4 ดังนั้นการทำความสะอาดโดยการพ่นน้ำแข็งแห้งจึงสามารถทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขี้้วได้

◆ สารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้้ว ● การพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง



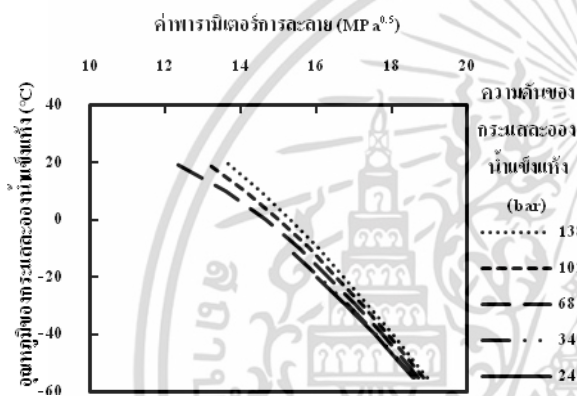
รูปที่ 4 δ ของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้้วและ δ ของคาร์บอนไดออกไซด์เหลือจากการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเป็นประโยชน์ให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อิทธิพลของความดันและอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งต่อค่าพารามิเตอร์การละลาย

อุณหภูมิและความดันของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์การละลาย เมื่อความดันของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งลดลง ค่าพารามิเตอร์การละลายจะลดลงที่อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์หรือตัวทำละลายลดลง ในทำนองเดียวกันการที่อุณหภูมิก่อนของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งเพิ่มขึ้นที่ความดันคงที่ ค่าพารามิเตอร์การละลายจึงมีค่าลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความดันของน้ำแข็งแห้งที่กระทบขึ้นกับค่าพารามิเตอร์การละลาย

5. สรุปผลการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์การละลายสามารถอธิบายกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ในส่วนของการเข้าไปละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เนื่องจากค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีค่าพารามิเตอร์การละลายเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วที่สามารถใช้ในการละลายสารอินทรีย์ไม่มีขั้ว ซึ่งการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์บนพื้นผิวหยาบค่าพารามิเตอร์การละลายของสิ่งสกปรกสามารถปรับค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ให้เท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์การละลายของสิ่งสกปรกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำความสะอาด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Liu et al., "Agglomeration process of dry ice particles produced by expanding liquid carbon dioxide", *Advanced Powder Technology* 21, pp 652-657, 2012.
- [2] R. Sherman, "Developments in surface contamination and cleaning: fundamentals and applied aspects", William Andrew Inc., NJ, USA, 2008, pp.987-1011.
- [3] S. Banerjee, A. Campbell, "Principles and mechanisms of sub-micrometer particle removal by CO2 cryogenic technique", *Journal of Adhesion Science and Technology* 19 (9), pp. 739-751, 2005.
- [4] R. Sherman, P. Adams, "Carbon Dioxide Snow Cleaning - The Next Generation of Clean", in *Proceeding of Clean Tech*, p.271, New Jersey: Witter Publishing, Flemington, 1995.
- [5] R. Sherman. "Carbon Dioxide Snow Cleaning", *Developments in surface contamination and cleaning: fundamentals and applied aspects*, pp.987-1011, New Jersey: William Andrew Inc. 2008.
- [6] C. M. Hasen, "Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook", CRC Press, London, 2nd ed., 2007.
- [7] D. W. Van Krevelen et al., "Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions", Elsevier, Amsterdam, 4th ed. 2009.
- [8] M. Khayet and V. Fernández, "Estimation of the solubility parameters of model plant surfaces and agrochemicals: a valuable tool for understanding plant surface interactions", *Theoretical Biology and Medical Modeling*, 2012.
- [9] L. L. Williams et al., *Calculation of Hansen solubility parameter values for a range of pressure and temperature conditions, including the supercritical fluid region*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้