

การศึกษากระบวนการผลิตละอองลอยของคาร์บอนไดออกไซด์ เย็นยิ่งยวดผ่านกระบวนการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สัน

Study on the Joule-Thomson expansion

for the CO₂ cryogenic aerosol generating process

สิวิชัย เต็งสุวรรณ และ สุรัตน์ อารีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปละอองลอยของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เย็นยิ่งยวด หรือน้ำแข็งแห้ง จะผลิตได้โดยการปล่อยของไหล CO₂ ความดันสูงเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิซออกสู่บรรยากาศจนเกิดการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคของ CO₂ ไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งและก๊าซ โดยเรียกกระบวนการไหลรวมสองวัฏภาคนี้ว่า ละอองลอยของ CO₂ เย็นยิ่งยวด หรือน้ำแข็งแห้ง โดยกระแสที่ผลิตได้จะมีความเร็วสูงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวกลางในการทำ ความสะอาด โดยเฉพาะในการทำ ความสะอาดแบบที่ถาวร งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สันอันถือว่าเป็นกลไกหลักที่มีผลต่อการผลิต และคุณลักษณะของละอองลอยของน้ำแข็งแห้งเป็นอย่างยิ่ง จึงต้องพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์ของจูล-ทอมป์สันของ CO₂ ที่ใช้เป็นสารป้อน โดย CO₂ ที่ใช้เป็นสารป้อนจะมีความดันอยู่ในช่วง 800-850 psi และมีอุณหภูมิในช่วง 20-22 °C และมีการ ใช้เส้นโค้งอินเวอร์ชันของจูล-ทอมป์สัน เป็นหลักในการปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งตามปกติแล้ว ในช่วงสภาวะของ CO₂ ที่ใช้เป็นสารป้อนนั้นจะสามารถผลิตน้ำแข็งแห้งภายในกระแสละอองลอยได้อยู่ในช่วง 38.9-43.4% แต่ถ้าหากมีการปรับปรุงกระบวนการทำให้สามารถเพิ่มปริมาณน้ำแข็งแห้งได้สูงถึง 94.8%

คำสำคัญ: ละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง, ละอองลอยของคาร์บอนไดออกไซด์เย็นยิ่งยวด, การแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สัน, การทำความสะอาดแบบที่ถาวร

Abstract

Typically, the CO₂ cryogenic aerosol or snow dry-ice is generated by flowing high pressure CO₂ through an orifice into the atmosphere. That is cause of the Joule-Thomson (JT) expansion for fluid flow system and that drives the high pressure fluid CO₂ to change into the solid - vapor two phases (as so-called "snow dry-ice"). The snow dry-ice is a high velocity flowing that induces it to have an excellent ability to use as high precision cleaning media. We have found that the operating conditions are in the pressure range of 800 - 850 psi and 20 - 22 °C for temperature. In these conditions range, the supplying CO₂ converted to solid particles in the range of 38.9 - 43.4 %. Moreover, the JT coefficients were evaluated. Then it will lead us to use the JT inversion curve (JTIC) as the tuning parameters to optimize the efficiency of process. The tunings will improve percentages of solid particles in stream line up to 94.8%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Key words: snow dry-ice, CO₂ cryogenic aerosol, Joule-Thomson expansion, precision cleaning



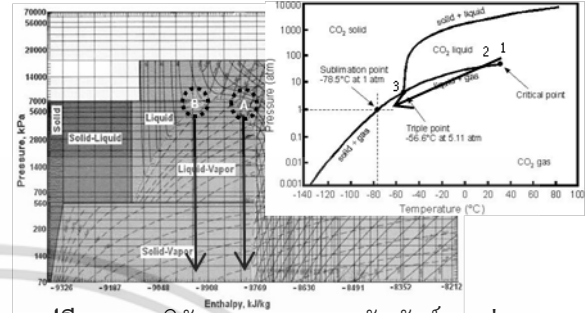
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

กระบวนการทำความสะอาดโดยใช้ละอองลอยเย็นยิ่งยวด (cryogenic aerosol cleaning) ถือว่าเป็นกระบวนการทำความสะอาดแบบแห้ง (dry cleaning) อย่างหนึ่งที่ใช้ในการจัดตั้งป่นเปื้อนออกจากพื้นผิวโดยอาศัยหลักการถ่ายเทโมเมนตัม (momentum transfer) เป็นหลักในการจัดตั้งป่นเปื้อน ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการที่สามารถจัดอนุภาคสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดซับไมครอน (submicrometer particles; 10-100 nm [3]) ออกจากพื้นผิวได้ [2] ซึ่งถ้าระบุให้ชัดเจนไปถึงกระบวนการทำความสะอาดด้วยละอองลอยของคาร์บอนไดออกไซด์เย็นยิ่งยวด (carbon dioxide cryogenic aerosol) หรือ ละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง (snow dry-ice, snow CO₂) นั้นก็อาจจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวที่มีความต้องการการทำความสะอาดแบบดีถ้วน (precision cleaning) และสามารถที่จะตอบสนองต่อความต้องการของทั้งภาคอุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อมได้เป็นที่น่าพึงพอใจ เนื่องจากกระบวนการทำความสะอาดด้วยละอองลอยของน้ำแข็งแห้งนั้นจะใช้ระยะเวลาในการทำความสะอาดที่สั้น เนื่องจากเมื่อได้จัดตั้งป่นเปื้อนออกไปจากพื้นผิววัสดุแล้วจะไม่ทิ้งสารตกค้างไว้บนชิ้นงานรวมทั้งไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานและปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยในการใช้ CO₂ ในการทำความสะอาดนั้นยังถือเป็นการหลีกเลี่ยงการทำความสะอาดโดยใช้ตัวทำละลายและแม้ว่า CO₂ จะเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก แต่การทำความสะอาดด้วยวิธีนี้ไม่ได้ก่อให้เกิดก๊าซ CO₂ เพิ่มขึ้น แต่กลับเป็นการนำเอาก๊าซ CO₂ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้ให้เกิดประโยชน์ก่อนการปล่อยออกสู่บรรยากาศ [2]

กระบวนการทำความสะอาดโดยอาศัยการพ่นละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง หรือละอองลอยของ CO₂ เย็นยิ่งยวด หมายถึง กระบวนการที่มีการปล่อยให้ CO₂ ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวหรือก๊าซที่มีความดันสูงเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส (orifice) ออกสู่บรรยากาศและเกิดการแพร่กระจายแบบเอนทัลปีคงที่ (isenthalpic expansion) ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคของ CO₂ ไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งและก๊าซ ดังนั้นกระแสของ CO₂ ที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีด (nozzle) จึงมีทั้งวัฏภาคของแข็งและก๊าซ โดยจะเรียกกระแสนี้

ไหลรวมทั้งสองวัฏภาคนี้ว่า ละอองลอยของ CO₂ เย็นยิ่งยวด หรือ ละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง และตามปกติละอองลอยของน้ำแข็งแห้งนี้จะถูกใช้เป็นตัวกลางในการทำความสะอาด [1,2]



รูปที่ 1 แผนภูมิวัฏภาคแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปี - ความดันของ CO₂ [2] และอุณหภูมิ - ความดันของ CO₂ (รูปเล็ก) [2]

2. ทฤษฎี

2.1 กลไกการเกิดละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง

หลักในการผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งจะอธิบายได้โดยอาศัยหลักทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic) และแผนภูมิวัฏภาคของ CO₂ (CO₂ phase diagram) โดยจะเป็นการอธิบายถึงทิศทางการเปลี่ยนวัฏภาคของ CO₂ ในระหว่างกระบวนการ และเมื่อพิจารณาแผนภูมิวัฏภาคร่วมกับการแพร่กระจายแบบเอนทัลปีคงที่ที่เกิดขึ้นเมื่อ CO₂ ที่เป็นของไหลเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส จะพบว่าในขณะที่ความดันของ CO₂ ลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสสถานะของ CO₂ จะเปลี่ยนไป โดยเมื่อพิจารณาจากแผนภูมิรูปที่ 1 จะเห็นว่าจุดบนแผนภูมิจะเริ่มเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งตามเส้นเอนทัลปีคงที่ (isenthalpic line) โดยที่อุณหภูมิห้อง CO₂ ในถังบรรจุ (CO₂ cylinder) จะมีความดันประมาณ 800 psi ซึ่ง CO₂ ในถังบรรจุจะมีทั้งวัฏภาคก๊าซและของเหลว ทำให้ต้องพิจารณาทิศทางการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของ CO₂ เป็น 2 กรณี โดยถ้าเริ่มจากจุด A (ก๊าซ) เมื่อความดันของ CO₂ เริ่มลดลงทำให้ CO₂ ที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซบางส่วนนั้นเปลี่ยนวัฏภาคไปเป็นวัฏภาคของแข็ง และจากกฎของคาน (lever rule) จะพบว่า น้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นจะคิดเป็นร้อยละ 6 ของน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นทั้งหมด แต่ส่วน CO₂ ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว (ก่อนผ่านรูออริฟิส) ก็จะเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคเช่นกัน โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเริ่มจากจุด B และเมื่อความดันลดลงก็จะเกิดการเปลี่ยนวิภาคของ CO_2 เหลวบางส่วนไปอยู่ในวิภาคของแข็ง โดยคิดเป็นประมาณร้อยละ 45 ของน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งหากลดความดันลงไปอีกก็จะไม่เป็นการเพิ่มปริมาณของน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นได้อีกต่อไป [2] ซึ่งเราจะเห็นได้ว่าร้อยละของการเกิดน้ำแข็งแห้งในกระบวนการนี้จะขึ้นกับสถานะของ CO_2 ที่ใช้เป็นสารป้อน (CO_2 Feed) ก่อนปล่อยผ่านออริฟิส ซึ่งวิภาคของ CO_2 Feed จะถูกควบคุมโดยอุณหภูมิและความดันของระบบ และยังเกี่ยวกับการแพร่กระจายแบบเอนทัลปีคิงที่อีกด้วย

2.2 การแพร่กระจายแบบจูล - ทอมป์สัน

(Joule-Thomson expansion) [4]



รูปที่ 2 แผนผังการเกิดการแพร่กระจายแบบจูล - ทอมป์สันเมื่อของไหลผ่าน porous plug [4]

ตามปกติแล้วกระบวนการที่ปล่อยให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์จำพวกออริฟิส วาล์ว หรือวาล์วปิดกั้นที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ตามรูปที่ 2 จะเรียกว่า throttling process ซึ่งกระบวนการนี้ของไหลจะเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์อย่างรวดเร็วทำให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น (adiabatic) และไม่มีงานจากภายนอก ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ ซึ่งเมื่อพิจารณาตามกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ที่สถานะคงที่ กระบวนการนี้จะถือเป็นกระบวนการการแพร่กระจายแบบเอนทัลปีคิงที่ หรือ การแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สัน โดยจากรูปที่ 2 ตามปกติแล้วที่จุด P2 จะมีความดันต่ำกว่าจุด P1 อย่างมาก ซึ่งสิ่งที่จะต้องการศึกษาผ่านการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สันก็คืออุณหภูมิขาออกของของไหล (T_2) ซึ่งเปลี่ยนไป อันเป็นผลเนื่องมาจากการลดลงของความดันของของไหลผ่านการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สัน เพื่อให้ทราบถึงอนุพันธ์ของ $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$ และสุดท้ายจะทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ของจูล-ทอมป์สัน (Joule-Thomson coefficient, μ_{JT}) ดังนิยามในสมการที่ 1

$$\mu_{JT} \equiv \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h \quad (1)$$

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าการ plot เส้นคุณลักษณะที่มีค่าเอนทัลปีคิงที่ (isenthalps line) ลงไปบนแผนภูมิ

ความสัมพัทธ์ระหว่างความดันลด (reduced pressure, P_r) กับอุณหภูมิลด (reduced temperature, T_r) ของ CO_2 ซึ่งจากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ภายในเส้นโค้งนั้นเส้น isenthalps นั้นจะมีค่าความชันเป็นบวก ดังนั้นพื้นที่ภายในเส้นโค้งจะมีค่า $\mu > 0$ ซึ่งถ้าหากของไหลมีสถานะเริ่มต้นอยู่ในพื้นที่ภายในเส้นโค้งนี้ เมื่อของไหลเกิดกระบวนการแพร่กระจาย จนทำให้ความดันของของไหลลดลงก็จะทำให้อุณหภูมิของของไหลนั้นลดลงตามไปด้วย แต่ในส่วนพื้นที่ภายนอกเส้นโค้งนั้นจะมีค่าความชันของเส้น isenthalps เป็นลบ ซึ่งภายในพื้นที่นี้ค่า $\mu < 0$ ส่งผลให้ของไหลที่มีสถานะเริ่มต้นในพื้นที่นั้นเมื่อเกิดกระบวนการแพร่กระจายและความดันของของไหลลดลงจะทำให้อุณหภูมิของของไหลนั้นเพิ่มสูงขึ้น โดยในส่วนของเส้นโค้งที่เป็นเส้นที่แบ่งพื้นที่ออกเป็น 2 ส่วนจะเรียกว่า เส้นอินเวอร์ชัน (inversion line) หรือเส้นโค้งจูล-ทอมป์สัน (Joule-Thomson inversion curve, JTIC) ซึ่งถือเป็นเส้น locus อย่างหนึ่งที่ตั้งขึ้นมาจากจุดที่ค่าความชันของเส้น isenthalps นั้นเป็นศูนย์หรือจุดที่ $\mu = 0$ โดยเส้นโค้ง JTIC จะใช้ในการออกแบบและควบคุมปฏิบัติการของกระบวนการแพร่กระจาย ในระบบทำความเย็น การผลิตของไหลต่างๆ ในอุตสาหกรรม รวมถึงใช้ในการศึกษาสมการสถานะเพื่อดูถึงความสามารถในการทำนายของสมการสถานะต่างๆ และเมื่อนำเอาความสามารถในการอธิบายกระบวนการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สันของค่า μ_{JT} จะทำให้ค่า μ_{JT} นั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปของความสัมพัทธ์ระหว่าง P_vT และค่าความจุความร้อน (C_p) ได้โดยเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ของเอนทัลปี

$$h(T, P) = dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP \quad (2)$$

จากความสัมพันธ์ของเอนทัลปีในรูป $dh = Tds - vdp$ และความสัมพันธ์ของแมกซ์เวลล์ (Maxwell relation) จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T &= \left(\frac{T\partial s + v\partial P}{\partial P}\right)_T \\ &= T\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T + v = -T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P + v \end{aligned} \quad (3)$$

และถ้านำสมการที่ 3 แทนในสมการที่ 2 จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีในรูปของ P_vT และ C_p

$$dh = c_p dT + \left[-T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P + v\right] dP \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงวันเวสท์ หรือบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการที่ 4 มาคำนวณการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีเมื่อของไหลได้เข้าสู่กระบวนการแพร่กระจายแบบจุด-ทอมป์สัน ($dh = 0$) จะสามารถจัดรูปสมการที่ 4 ใหม่ให้อยู่ในรูปของค่า μ_{JT} ได้ดังสมการที่ 5

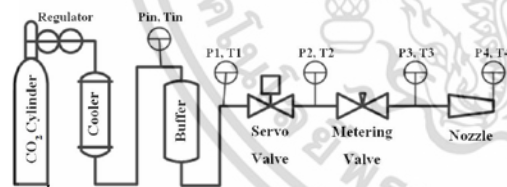
$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h = \frac{\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P - v\right]}{c_p} \quad (5)$$

เมื่อแทนสมการค่าความจุความร้อนของก๊าซจริงและถ้ามีสมการสถานะพร้อมข้อมูล PvT และ C_p ของของไหลก็ทำให้สามารถคำนวณหาค่า μ_{JT} ได้จากสมการที่ (6)

$$\mu_{JT} = \frac{\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P - v\right]}{c_p} \quad (6)$$

ส่วนสมการสถานะที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สมการ modified Peng-Robinson (MPR) โดยจะเอามาใช้ในการทำนายค่า μ_{JT} และเส้นโค้ง JTIC เนื่องจากเป็นสมการที่ไม่ซับซ้อน และตามงานวิจัยของ B.Haghighi และคณะ (2003) ได้เสนอไว้ว่าสมการ MPR นั้นสามารถใช้ทำนายเส้นโค้ง JTIC ในช่วงที่ CO_2 มีอุณหภูมิต่ำได้ดี และการทำนายเส้นโค้ง JTIC ของ CO_2 จะเริ่มมีการทำนายที่เบี่ยงเบนไปจากผลการทดลองก็ต่อเมื่อ CO_2 มีค่า $Pr > 9$ จึงเหมาะที่จะใช้ MPR ในการทำนายค่า μ_{JT} และเส้นโค้ง JTIC ของกระบวนการผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง [3]

3. การทดลอง



รูปที่ 3 แผนภูมิอุปกรณ์ในการผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งและจุดติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันและอุณหภูมิของ CO_2

การศึกษากระบวนการผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งได้ทำการทดลองโดยอาศัยเครื่องมือที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมรุ่น AFMS-100 Deflex Power SNO™ โดยเครื่องมือมีแผนภาพอุปกรณ์ดังรูปที่ 3 ในขั้นแรกจะศึกษาถึงการปฏิบัติงานของเครื่องผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง โดยจะศึกษาผ่านข้อมูลในการเปลี่ยนแปลงสถานะของ CO_2 เมื่อเคลื่อนที่ออกจากถังบรรจุเข้าสู่เครื่องผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งจนกระทั่งถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดซึ่งทำมาจากท่อพอลิเมอร์ขนาดเล็ก (micro polymeric tube; เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OD 1/16 in) จนเกิดเป็นละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง โดยสภาวะในการทดลองจะถูกรักษาผ่านสภาวะของ Supplying CO_2 โดยจะใช้อุณหภูมิของ Supplying CO_2 ในช่วง 18-27 °C และความดันในช่วง 750 - 870 psi โดยในระหว่างทดลองจะเก็บข้อมูลของอุณหภูมิและความดันของ CO_2 ภายในระบบ ณ จุดต่างๆ ตามรูปที่ 3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาถึงการเปลี่ยนสภาวะของ CO_2

4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

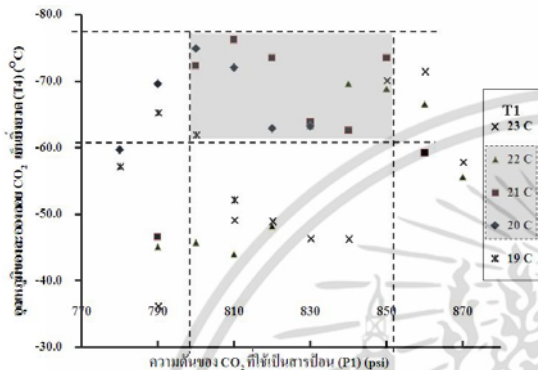
จากผลการทดลองผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งโดยใช้เครื่องรุ่น AFMS-100 ได้พบว่าความดันของ CO_2 ที่เคลื่อนที่ผ่านระบบผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งจะเกิดช่วงความดันลด 2 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงระหว่าง P2 กับ P3 จะมีความดันลดอยู่ในช่วง 5-20 psi ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ และอีกช่วงหนึ่งระหว่างจุด P3 กับที่ปลายหัวฉีดซึ่งในช่วงนี้มีความดันลดที่สูงมาก (800-850 psi) เนื่องจากการปล่อยให้ CO_2 ที่มีความดันสูงเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิซและเข้าสู่ท่อขนาดพอลิเมอร์ขนาดเล็กก่อนออกสู่ความดันบรรยากาศ จึงส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ CO_2 ที่เคลื่อนที่ผ่านออริฟิซและที่นั่นเปลี่ยนไปมากด้วย โดยเฉพาะในช่วงระหว่างจุด T3 กับ T4 ซึ่งเป็นผลมาจากความดันของ CO_2 ที่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถูกปล่อยให้ผ่านหัวฉีดออกมาสู่บรรยากาศและเกิดการแพร่กระจายแบบจุด-ทอมป์สัน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนวิถึภาคของ CO_2 บางส่วนไปอยู่ในวิถึภาคของแข็งเป็นเหตุทำให้เครื่องนี้สามารถที่จะผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งได้

จากการทดลองใช้ความดันของ Supplying CO_2 ในช่วงความดัน (P1) 780 - 870 psi และอุณหภูมิ (T1) อยู่ในช่วง 18-27 °C จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิของ CO_2 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเครื่องผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งสามารถที่จะยืนยันได้ว่าละอองสีขาวที่เกิดขึ้นบริเวณปลายหัวฉีดในรูปที่ 4 เป็นกระแสของละอองลอยของน้ำแข็งแห้งจริง โดยสามารถยืนยันได้จากทิศทางการเปลี่ยนแปลงวิถึภาคของ CO_2 บนแผนภูมิวิถึภาคเอนทาลปี - ความดันของ CO_2 ในรูปที่ 1 โดยในรูปที่ 4 ใช้ความดันของ Supplying CO_2 (P1) เป็น 850 psi อุณหภูมิ (T1) 21 °C ถ้านำค่าความดัน (P1) และอุณหภูมิ (T1) ของ Supplying CO_2 ไป plot บนแผนภูมิในรูปที่ 1 จะเริ่มจากจุดที่ 1 และเมื่อปล่อยให้ CO_2 เคลื่อนที่ที่จะพบว่า CO_2 ก่อนที่จะผ่านรูออริฟิซนั้นจะมีความดันประมาณ (P3) 835 psi อุณหภูมิ (T3) 22 °C (จุดที่ 2) และเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน

ออริฟิสและท่อขนาดเล็กออกมาที่ปลายหัวฉีดที่ความดันบรรยากาศจะมีอุณหภูมิ (T4) ประมาณ -73.5 °C (จุดที่ 3)



รูปที่ 4 กระแสของละอองลอยของน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้จากเครื่องรุ่น AFMS-100



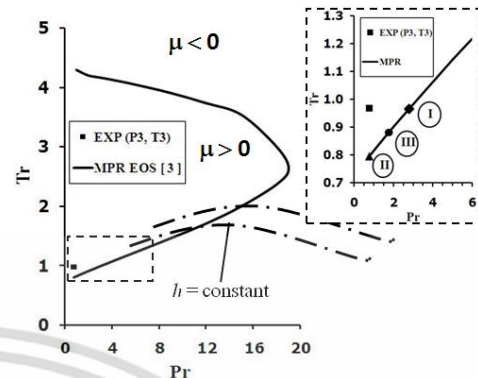
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P1) ของ Supplying CO₂ กับอุณหภูมิของละอองลอยของน้ำแข็งแห้งที่ปลายหัวฉีด (T4)

ตารางที่ 1 ข้อมูลความดัน (P1) และอุณหภูมิ (T1) ของ Supplying CO₂ ที่เหมาะต่อการผลิต Snow CO₂

ความดันของ Supplying CO ₂ (P1) (psi)	อุณหภูมิของ Supplying CO ₂ (T1) ที่เหมาะต่อการผลิต Snow CO ₂ (°C)
780 – 800	19 - 20
800 – 830	20 - 21
830 – 850	21 - 22
850 – 870	21 - 23

จากผลการทดลองพบว่าหากมีการเปลี่ยนความดัน (P1) และอุณหภูมิ (T1) ของ Supplying CO₂ จะส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิของละอองลอยของน้ำแข็งแห้งที่พ่นออกมา บริเวณปลายหัวฉีด (T4) ซึ่งแสดงถึงปริมาณของน้ำแข็งแห้งในละอองลอยได้อย่างหยาบ โดยถ้าอุณหภูมิ ณ จุด T4 มีค่าต่ำมากก็จะบ่งชี้ถึงปริมาณของน้ำแข็งแห้งในละอองลอยที่มากด้วย โดยจะพบว่าช่วงของอุณหภูมิของ CO₂ (T1) ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งโดยใช้เครื่อง AFMS-100 จะอยู่ช่วง 19-23 °C เมื่อใช้ความดันในช่วง 780-870 psi แต่จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าถ้าใช้ความดันของ Supplying CO₂ (P1) ในช่วงที่ต่างกัน ก็จะต้องใช้อุณหภูมิของ Supplying CO₂ (T1) ในช่วงที่ต่างกัน ซึ่งช่วงความดัน (P1) และอุณหภูมิ (T1) ของ

Supplying CO₂ ที่เหมาะต่อการผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งควรจะอยู่ในช่วงพื้นที่แรงเงา (processing window) ในรูปที่ 5

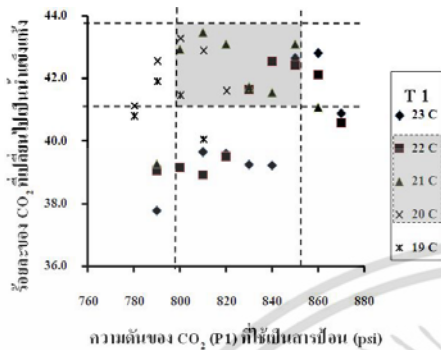


รูปที่ 6 Joule-Thompson inversion curve (JTIC)

จากที่ได้กล่าวมาถึงเรื่องความดันและอุณหภูมิของ Supplying CO₂ ที่ใช้ผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง จะเห็นว่าการเลือกสภาวะของ Supplying CO₂ ถือว่าเป็นประเด็นที่สำคัญ ประกอบกับการผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งเป็นกระบวนการที่มีการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สันเป็นกลไกหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ จึงได้นำเอาค่า μ_{JT} และเส้นโค้ง JTIC มาใช้เป็นหลักในการพิจารณาถึงค่าความดันและอุณหภูมิของ Supplying CO₂ จากรูปที่ 6 เมื่อมีการนำเอาค่าความดันและอุณหภูมิของ CO₂ (EXP) ที่จะเข้าสู่การแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สันบริเวณออริฟิสมา plot จะเห็นว่า CO₂ ที่จุด (EXP) เป็นของไหลที่มีค่า $\mu > 0$ ซึ่งตรงกับปริมาณโดยอาศัยสมการที่ (6) โดยค่า μ_{JT} ของ CO₂ ที่มีช่วงความดันและอุณหภูมิในช่วง processing window จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0218-0.0380 K/psi ทำให้ทิศทางการเปลี่ยนไปของความดันและอุณหภูมิของ CO₂ เมื่อผ่านออริฟิสออกสู่บรรยากาศจากการทดลองเป็นไปตามผลทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังสามารถใช้เส้นโค้ง JTIC มาปรับปรุงกระบวนการผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยผ่านการปรับเปลี่ยนความดันและอุณหภูมิของ Supplying CO₂ โดยจะใช้การปรับปรุง (tuning) จนกระทั่งค่า μ_{JT} ของ CO₂ (EXP) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (บนเส้นโค้ง JTIC) ซึ่งสามารถกระทำได้ 3 วิธี คือ (I) การเพิ่มความดันของ Supplying CO₂ จนมีค่าเข้าใกล้ 3000 psi อุณหภูมิคงเดิม (20-22 °C) (II) การลดอุณหภูมิของ Supplying CO₂ จนมีค่าใกล้ -32 °C ความดันคงเดิม (800-850 psi) (III) การลดอุณหภูมิและเพิ่มความดันของ Supplying CO₂ ไปพร้อมกัน แต่ควรที่จะเน้นที่การลด

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิมากกว่าการเพิ่มความดัน เพราะการเพิ่มความดันจะต้องพิจารณาถึงความสามารถของระบบท่อและข้อต่อของเครื่องมือที่ใช้ด้วย รวมถึงความเหมาะสมเมื่อมีการนำเอาไปใช้ทำความสะอาดชิ้นส่วนที่มีความทนทานต่อแรงดันที่ต่ำ



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P1) ของ Supplying CO₂ กับปริมาณของ CO₂ ที่เปลี่ยนวัฏภาคไปอยู่ในรูปของน้ำแข็งแห้งเมื่อ CO₂ เคลื่อนที่ผ่านหัวฉีดออกมาสู่บรรยากาศ

ตารางที่ 2 ข้อมูลสถานะของ Supplying CO₂ และปริมาณของ CO₂ ที่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปน้ำแข็งแห้ง

กรณีศึกษา	สถานะ Supplying CO ₂		μ_{rr} (K/psi)	ร้อยละปริมาณของ CO ₂ ที่เปลี่ยนเป็นน้ำแข็งแห้ง
	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (psi)		
EXP	21.0	825	3.0×10^{-2}	42.4
I	21.0	3,000	5.2×10^{-5}	76.5
II	-31.1	825	1.6×10^{-6}	94.8
III	-4.5	1,900	2.6×10^{-6}	85.4

เมื่อนำเอาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความดัน และอุณหภูมิของ CO₂ ที่เคลื่อนผ่านอุปกรณ์ มาเปลี่ยนเป็นค่าเอนทาลปี จะทำให้ทราบปริมาณของ CO₂ ที่เปลี่ยนวัฏภาคไปเป็นน้ำแข็งแห้งภายในกระแสดังกล่าว (อัตราส่วนระหว่างก๊าซ CO₂ กับน้ำแข็งแห้ง) ซึ่งปริมาณของ CO₂ ที่เปลี่ยนวัฏภาคไปอยู่ในรูปของน้ำแข็งแห้งที่อยู่ภายในกระแสดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 โดยถ้าใช้ความดันและอุณหภูมิของ Supplying CO₂ ในช่วง processing window จะได้รับร้อยละของปริมาณของ CO₂ ที่เปลี่ยนวัฏภาคไปอยู่ในรูปของอนุภาคน้ำแข็งแห้งในช่วง 38.9 - 43.3 โดยปริมาณของการเปลี่ยนวัฏภาคนี้จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำสะอาดโดยตรง เพราะปริมาณของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในละอองลอยนั้นยังมีจำนวนที่สูงขึ้น ก็จะทำให้โอกาสในการชนกันระหว่างอนุภาค

น้ำแข็งแห้งกับอนุภาคสิ่งปนเปื้อนสูงขึ้นตาม และจากที่ได้กล่าวถึงการ tuning เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบ จะเห็นได้ถึงปริมาณของ CO₂ ที่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่สูงขึ้นเมื่อมีการ tuning ระบบ ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 2

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพ่นละอองลอยของน้ำแข็งแห้งโดยใช้เครื่องรุ่น AFMS-100 พบว่าสามารถที่จะผลิตละอองลอยของน้ำแข็งแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพจริงแต่ต้องมีการควบคุมสถานะของ Supplying CO₂ ไว้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยจากการทดลองจะพบว่าช่วงความดันของ Supplying CO₂ ที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วง 800 - 850 psi และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20 - 22 °C และถ้าใช้ความดันและอุณหภูมิของ Supplying CO₂ ในช่วงดังกล่าวจะได้ร้อยละปริมาณของ CO₂ ที่เปลี่ยนวัฏภาคไปอยู่ในรูปของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนั้นคิดเป็นร้อยละ 38.9 - 43.3

เมื่อพิจารณาถึงค่า μ_{rr} ของ CO₂ ที่มีความดันและอุณหภูมิลดลงเท่ากับ CO₂ ที่จุด (EXP) จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0218-0.0380 K/psi ซึ่งถ้าต้องการ tuning กระบวนการให้ค่า μ_{rr} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ควรที่จะมุ่งเน้นไปที่การลดอุณหภูมิของ Supplying CO₂ มากกว่าการเพิ่มความดัน ซึ่งการ tuning จะสามารถเพิ่มร้อยละของ CO₂ ที่เปลี่ยนวัฏภาคไปเป็นน้ำแข็งแห้งได้ถึงร้อยละ 94.8

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันเทิงข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) และบริษัท ฮิตาชิโกลบอลสตอเรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Banerjee, and A. Campbell, Journal of Adhesion Science and Technology. vol.19, no.9, 2005, pp739-751.
- [2] R. Sherman, Developments in surface contamination and cleaning : fundamentals and applied aspects, William Andrew Inc., NJ, USA, 2008, pp.987-1011.
- [3] B. Haghghi, M. R. Laee, and N. S. Matin, Cryogenics, vol.43, 2003, pp 393-398.
- [4] M. D. Koretsky, Engineering and Chemical Thermodynamics, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นแก่ประโยชน์ของการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้