

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจาก
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

STUDY ON SNOW DRY ICE CLEANING PRODUCED BY
CARBON DIOXIDE GAS



T138515



พ.ศ. 2558
พ. 516.17

เลขหมู่..... 138515
เลขทะเบียน..... 8 ต.ล. 2558
รับเดือนปี.....

b.....
j.....

12715207

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-220-129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON SNOW DRY ICE CLEANING PRODUCED BY
CARBON DIOXIDE GAS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMITL-2015-EN-M-220-129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
นักศึกษา	นางสาวพัชร พิริยะวิฑยะ
รหัสนักศึกษา	56601211
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งถูกประยุกต์ใช้สำหรับการทำความสะอาดในระดับอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาความรู้เกี่ยวกับการสร้างเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งต้นแบบสำหรับการทำความสะอาดอนุภาคระดับไมครอนและต้องการความแม่นยำ งานวิจัยนี้จึงศึกษาสภาวะการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนโดยเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ได้แก่ ความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ ความดันการฉีดฟ่น และระยะการฟ่นของกระแสน้ำแข็งแห้ง พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถสร้างขนาดอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ในช่วง 10-40 μm และมีรัศมีการกระจายตัวของกระแสนุภาคน้ำแข็งแห้ง 2-5 mm ซึ่งอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้สามารถทำความสะอาดสิ่งสกปรกจำลองคือหมึกเพอร์มาเนนท์ (Permanent) บนแผ่นอลูมิเนียมได้ ที่ความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า 15 $^{\circ}\text{C}$ และความดันการฉีดฟ่นน้อยกว่า 20 bar เมื่อระยะห่างจากหัวฉีด 2 cm และเมื่อพิจารณาความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการทำความสะอาดโดยเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 40 นอกจากนี้งานวิจัยนี้อธิบายส่วนหนึ่งในกลไกการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์การละลาย การทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วเกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เกิดขึ้นในระหว่างการกระทบกันระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิว ซึ่งสามารถทำลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วที่ติดอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานได้ โดยค่าพารามิเตอร์การละลายสามารถประมาณได้จากอุณหภูมิและโมเมนต์การชนของกระแสนุภาคน้ำแข็งแห้ง จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในการทำความสะอาดมีค่าอยู่ในช่วง 16-17 $\text{MPa}^{0.5}$ ที่สภาวะความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 55 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 และ 10 $^{\circ}\text{C}$ เมื่อระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวนั้นมีค่าใกล้เคียงกับสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วที่ใช้ทำความสะอาดสิ่งสกปรกไม่มีขั้ว ดังนั้นการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งจึงสามารถทำความสะอาดสารอินทรีย์ไม่มีขั้วได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study on Snow Dry Ice Cleaning Produced by Carbon Dioxide Gas
Student	Ms. Phatchara Phiriyawitthaya
Student ID.	56601211
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

ABSTRACT

This research aims to develop know-how alongside a field prototype of dry-ice generator for cleaning of submicron particles which require such a high precision cleaning system. The snow dry ice equipment was designed and built as a portable prototype for industrial scale. The effect of operating conditions on the removal of deposited particles using a snow dry ice machine were studied e.g., pressure and temperature for supplying of carbon dioxide (CO₂), relative humidity (%RH), injection pressure, and the distance from tip of nozzle. From the experimental results, the prototype snow dry ice equipment can produce dry ice particles in the range of 10-40 μm and distribution of the stream within diameter of 2-5 mm. The equipment enables snow dry ice particles to remove blue permanent marking ink on the aluminum surface which is used as contaminated sample. The cleaning of contaminated aluminum surface could be observed by using supplying pressure of CO₂ about 55 bar and temperature for supplying CO₂ less than 15 °C while the injection pressure is lower than 20 bar at given distance from the tip of nozzle 2 cm. And the suitable of %RH for snow dry ice cleaning process is about 40%RH. Moreover, we explained about one of possible mechanism of snow dry ice cleaning by solubility parameter. The removal mechanism of non-polar organic contaminates utilizes liquid CO₂ solvent properties after the dry ice collides with the surface. Solubility parameter of liquid CO₂ was estimated by using temperature and momentum of snow dry ice stream. Solubility parameters of liquid CO₂ for cleaning process are between 16-17 MPa^{0.5} when using pressure for supplying CO₂ 55 bar, temperature for supplying CO₂ 5 and 10°C at given distance from tip of nozzle 2 cm. The estimated solubility parameters of liquid CO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

are in the range of solubility parameters value of non-polar organic solvents. Thus, such the contamination of non-polar organic can be removed by the snow dry ice cleaning.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือดังนี้

ผู้บริหารของบริษัท ซีเกท (ประเทศไทย) จำกัด ที่มอบทุนวิจัยและทีมงานที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะรวมทั้งประสบการณ์ในการทำงาน

ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ รวมถึงความรู้และประสบการณ์ในการดำเนินงาน

คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ รวมไปถึงเจ้าหน้าที่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และคำแนะนำตลอดการทำปริญญาโท

มารดาและสมาชิกทุกคนในครอบครัวผู้ซึ่งเป็นกำลังใจ คอยให้การสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือทุกประการมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

พี่และเพื่อนทุกคนที่ให้อกำลังใจและคอยช่วยเหลือเกื้อกูลเป็นผลให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับมารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พัชร พิริยะวิหะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแข็งแห้ง.....	4
2.2 การทำความสะอาดพื้นผิวในระดับอุตสาหกรรม.....	5
2.3 กลไกการเกิดน้ำแข็งแห้ง.....	7
2.4 กลไกการทำความสะอาดของการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง.....	9
2.5 ประโยชน์ของการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง.....	11
2.7 การจำแนกขนาดของอนุภาค.....	12
2.8 พารามิเตอร์การละลาย.....	13
2.9 พารามิเตอร์การละลายแบบเฮนเซน.....	13
2.10 การคำนวณค่าการละลายโดยวิธีพิจารณากลุ่มองค์ประกอบของ Hoftyzer และ Van Krevelen.....	15
2.11 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์.....	15
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง.....	19
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	19
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	21
3.2.1 การทดลองหาโปรไฟล์ของอุณหภูมิ.....	21
3.2.2 การทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลของ CO ₂ ที่ไหลผ่านหัวฉีด.....	21
3.2.3 การทดลองหาขนาดอนุภาคของน้ำแข็งแห้งผ่าน Fuji Prescale Film	22
3.2.4 การทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียม	23
3.2.5 อิทธิพลของการควบคุมความชื้น	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.1 การศึกษาการทำความสะอาดด้วยเครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งแห้ง.....	25
4.1.1 อิทธิพลของความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ ต่อการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง	25
4.1.2 การทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียม	27
4.1.2.1 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับพื้นผิว ที่ต้องการทำความสะอาด	28
4.1.2.2 อิทธิพลของความดันการฉีดกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง.....	32
4.1.2.3 อิทธิพลของความดันป้อนเข้าของ CO ₂	33
4.1.2.4 อิทธิพลของมุมการฉีดฟั่นละอองน้ำแข็งแห้ง.....	35
4.1.3 อัตราการไหลเชิงมวลของ CO ₂	36
4.1.4 อิทธิพลของการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์	38
4.2 การอธิบายกลไกการละลายสิ่งสกปรกอินทรีย์โดยค่าพารามิเตอร์การละลาย.....	41
4.2.1 โปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งและ โมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง.....	41
4.2.2 ค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO ₂ เหลว.....	43
4.2.3 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การละลาย CO ₂ กับ ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของสิ่งสกปรกสารอินทรีย์	45
4.2.5 อิทธิพลของความดันและอุณหภูมิของกระแสของน้ำแข็งแห้งต่อ ค่าพารามิเตอร์การละลาย.....	46
4.3 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของการทำความสะอาด โดยเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก การวัดขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งโดยใช้โปรแกรม Image J.....	58
ภาคผนวก ข หลักการใช้งานแผ่น Fuji Scale Film.....	60
ภาคผนวก ค ข้อมูลขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง.....	62
ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการทดลองโปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสของน้ำแข็งแห้ง.....	64
ภาคผนวก จ การคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว.....	65
ภาคผนวก ฉ การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์	66
ประวัติผู้เขียน	73

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกขนาดของอนุภาคและเทคนิคการจำแนกอนุภาค	12
2.2 ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลาย	14
2.3 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบโครงสร้างเคมี	15
4.1 ค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO ₂ ในกระบวนการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนที่ระยะห่าง จากปลายหัวฉีด 2 cm เมื่อความดันกระทบชิ้นงาน 24 bar	44
4.2 ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้ที่ 25°C	44
4.3 ค่าพารามิเตอร์การละลายของพาราฟินแว็กซ์	46
4.4 ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นของโครงการ	47
4.5 ค่าใช้จ่ายรายปีของการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	48
4.6 มูลค่าโครงการการทำความสะอาดชิ้นงานโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	49
5.1 ผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยกระบวนการใช้สารเคมี 5
2.2	อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยกระบวนการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ 6
2.3	อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยของไหลเหนือวิกฤต 6
2.4	อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง..... 7
2.5	(ก) แผนภูมิวิภูภาคแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทาลปี-ความดันของ CO ₂ และ (ข) แผนภูมิวิภูภาคอุณหภูมิ-ความดันของ CO ₂ 8
2.6	กลไกการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง..... 10
3.1	แผนภูมิอุปกรณ์ควบคุมการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งแบบพกพา Model KMITL_01..... 19
3.2	อุปกรณ์ควบคุมการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งระดับปฏิบัติการ Model KMITL_01 20
3.3	แผนภาพอุปกรณ์ควบคุมการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งระดับปฏิบัติการ Model KMITL_01..... 20
3.4	แผนภาพการทดลองหาโปรไฟล์ของอุณหภูมิ 21
3.5	แผนภาพการทดลองการขนาดอนุภาคของน้ำแข็งแห้ง..... 22
3.6	แผนภาพการทดลองการทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียม 23
3.7	แผนภาพการทดลองการควบคุมความชื้น..... 23
4.1	ภาพแผ่น Fuji-Prescale Film หลังการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง ที่ระยะห่างการฉีดพ่น 2 cm ความดันการฉีดพ่น 15 bar และมุมการฉีดพ่น 90°..... 25
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันป้อนเข้าของ CO ₂ กับความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO ₂ 26
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันป้อนเข้าของ CO ₂ กับความหนาแน่นป้อนเข้า ของ CO ₂ ที่สภาวะการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งต่างๆ 27
4.4	ข้อกำหนดการศึกษาการทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียม..... 27
4.5	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ความดันการฉีดพ่น 11 bar มุมการฉีดพ่น 90° 28
4.6	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ความดันการฉีดพ่น 15 bar มุมการฉีดพ่น 90° 28
4.7	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ความดันการฉีดพ่น 20 bar มุมการฉีดพ่น 90° 29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ความดันการฉีดพ่น 12 bar มุมการฉีดพ่น 90°	29
4.9	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ความดันการฉีดพ่น 15 bar มุมการฉีดพ่น 90°	30
4.10	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ความดันการฉีดพ่น 15 bar มุมการฉีดพ่น 90°	30
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15°C และมุมการพ่น 90°	31
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากปลายหัวฉีดและการกระจายตัวของกระแสล่องน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยเมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15°C และมุมการพ่น 90°	31
4.13	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ระยะการฉีดพ่น 2 cm และมุมการฉีดพ่น 90°	32
4.14	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ระยะการฉีดพ่น 2 cm และมุมการฉีดพ่น 90°	33
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันการฉีดพ่นกับขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15°C ระยะการพ่น 2 cm และมุมการพ่น 90°	33
4.16	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันการฉีดพ่น 10 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ระยะการฉีดพ่น 2 cm และมุมการฉีดพ่น 90°	34
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันป้อนเข้าของ CO ₂ กับขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 10°C ระยะการพ่น 2 cm และมุมการพ่น 90°	34
4.18	การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันการฉีดพ่น 15 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 55 bar ระยะการฉีดพ่น 2 cm	35
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการฉีดพ่นกับขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 10°C ความดันการป้อนเข้า CO ₂ และระยะการพ่น 2 cm	36
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการฉีดพ่นกับขนาดการกระจายตัวของกระแสล่องน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 10°C ความดันการป้อนเข้า CO ₂ และระยะการพ่น 2 cm ...	36
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันการฉีดพ่นกับอัตราไหลเชิงมวลเฉลี่ยของ CO ₂ ที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ ต่าง เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15°C	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันการฉีดพ่นกับอัตราไหลเชิงมวลเฉลี่ยของ CO ₂ ที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ ต่าง เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 10°C	37
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของซิลิกาเจลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการพ่น ละอองน้ำแข็งแห้ง เมื่อความดันป้อนเข้า CO ₂ 52 bar และอุณหภูมิป้อนเข้า CO ₂ 15 °C	38
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของซิลิกาเจลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการพ่น ละอองน้ำแข็งแห้ง เมื่อความดันการพ่น 20 bar และอุณหภูมิป้อนเข้า CO ₂ 15 °C	39
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของซิลิกาเจลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการพ่น ละอองน้ำแข็งแห้ง เมื่อความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 52 bar และความดันการพ่น 20 bar	40
4.26 ความชื้นสัมพัทธ์ในการทำความสะอาดที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 52 bar และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 15 °C	40
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระแสน้ำแข็งแห้งกับระยะห่างจากปลายหัวฉีด.....	42
4.28 การพ่นละอองน้ำแข็งแห้งบนแผ่น Prescale Film ที่ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ 34 41 และ 48 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ 5-15 °C	43
4.29 ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วและค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO ₂ เหลวจากการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	45
4.30 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความดันของน้ำแข็งแห้งที่กระทบชิ้นงานกับค่าพารามิเตอร์การละลาย	46
4.31 แผนผังกระแสเงินสดของการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง.....	48
4.32 แผนผังกระแสเงินสดสุทธิของการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	49
4.33 การหาจุดคุ้มทุนของการทำความสะอาดชิ้นงานโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง.....	50

สัญลักษณ์

D_d	เส้นผ่านศูนย์กลางของกระแสดอองน้ำแข็งแห้ง	mm
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง	μm
m	การไหลเชิงมวลของ CO_2	g/s
P_{in}	ความดันป้อนเข้าของ CO_2	Bar
P_{inj}	ความดันการฉีดพ่น	bar
T	อุณหภูมิของ CO_2 ที่กระทบกับพื้นผิว	$^{\circ}\text{C}$
T_{in}	อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2	$^{\circ}\text{C}$
T_{ref}	อุณหภูมิของ CO_2 อ้างอิง (273.15)	$^{\circ}\text{C}$
V	ปริมาตรเชิงโมลของ CO_2	cm^3/mole
V_{ref}	ปริมาตรเชิงโมลของ CO_2 อ้างอิง (39.13)	cm^3/mole
x	ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับพื้นผิว	cm
ตัวอักษรกรีก		
δ	ค่าพารามิเตอร์การละลาย	$\text{MPa}^{0.5}$
δ_{dref}	ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนไม่มี ขั้วอ้างอิง (15.6)	$\text{MPa}^{0.5}$
δ_{href}	ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนพันธะ ไฮโดรเจนอ้างอิง (5.8)	$\text{MPa}^{0.5}$
δ_{pref}	ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนมีขั้ว อ้างอิง (5.2)	$\text{MPa}^{0.5}$
ρ	ความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO_2	kg/m^3

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในภาคอุตสาหกรรมความสะอาดของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ต้องสะอาดหรือมีการปนเปื้อนในระดับที่ยอมรับได้ มิเช่นนั้นจะส่งผลถึงการสูญเสียลูกค้าและธุรกิจ กระบวนการทำความสะอาดเพื่อให้เกิดประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมนั้นต้องผ่านมาตรฐานความสะอาดในต้นทุนที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งปัจจัยสำหรับการเลือกวิธีการทำความสะอาดกล่าวได้ดังนี้ (1) ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดตรงตามความต้องการของลูกค้า (2) ผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการผลิตหรือราคาผลิตภัณฑ์ (3) ความปลอดภัยในการดำเนินงาน (4) การยอมรับด้านสิ่งแวดล้อมและ (5) ผลกระทบต่อความเร็วของขั้นตอนการผลิต [1]

การทำความสะอาดพื้นผิวในภาคอุตสาหกรรมมีหลายวิธี เช่น การทำความสะอาดโดยการใช้น้ำสารเคมี (Solvent cleaning) การทำความสะอาดโดยใช้คลื่นเสียง (Ultrasonic cleaning) การทำความสะอาดโดยการพ่นทราย (Sand blasting) เป็นต้น ซึ่งเป็นการทำความสะอาดแบบกะใช้เวลานานในการทำความสะอาด อีกทั้งต้องมีการใช้สารเคมีส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดหลังการทำความสะอาด การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการทำความสะอาด ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการทำความสะอาดในภาคอุตสาหกรรมที่สามารถทำความสะอาดชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่องและเร็ว ไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อทำความสะอาดชิ้นงานอ่อนโยนต่อผลิตภัณฑ์ และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังจัดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับสาร CFC และน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการทำความสะอาด ไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างที่เป็นอันตราย ซึ่งทั้งสารปนเปื้อนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หลังกระบวนการทำความสะอาดสามารถระบายสู่บรรยากาศ [1] แม้ว่าก๊าซ CO_2 จะเป็นก๊าซเรือนกระจก แต่กระบวนการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งไม่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกแต่เป็นการนำก๊าซ CO_2 ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ กระบวนการเผาไหม้ กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดก่อนการปล่อยออกสู่บรรยากาศ การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งใช้ในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนพื้นผิวซึ่งสิ่งสกปรกมีขนาดระดับเล็กกว่าไมครอนและต้องการความแม่นยำ อีกทั้งสามารถทำความสะอาดฟิล์มสิ่งสกปรกสารอินทรีย์ที่มีความหนาไม่มากนัก เช่น อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แม่พิมพ์ เป็นต้น [2-3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง คือกระบวนการที่ CO_2 ในวัฏภาคของเหลวหรือก๊าซ เคลื่อนที่ผ่านรูอริฟิสเกิดการขยายตัวแบบเอนทาลปีคงที่ (Isenthalpic process) โดยอุณหภูมิและความดันที่ลดลงขณะที่ CO_2 เคลื่อนที่ผ่านหัวฉีดทำให้ CO_2 เปลี่ยนวัฏภาคเกิดกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งกระบวนการทำความสะอาดจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อกระแสละอองน้ำแข็งแห้งกระทบกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด โดยการทำทำความสะอาดพื้นผิวสกปรกนั้นอาศัยกลไกหลัก 3 กลไก คือการถ่ายเทโมเมนตัมของอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับสิ่งสกปรก แรงลากของก๊าซ CO_2 นำเอาสิ่งสกปรกออกไป อีกทั้งการเข้าไปละลายสิ่งสกปรกของสารอินทรีย์โดย CO_2 เหลวที่เกิดขึ้นชั่วขณะระหว่างที่อนุภาคน้ำแข็งแห้งกระทบกับพื้นผิว

ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีนี้ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม แต่พบว่ายังคงเป็นเทคโนโลยีใหม่และมาจากต่างประเทศ ดังนั้นการเข้าใจและพัฒนากระบวนการทำความสะอาดจึงมีความสำคัญ เพื่อนำมาศึกษาและประยุกต์เข้ากับกระบวนการทำความสะอาดที่มีอยู่ในปัจจุบันให้เกิดประโยชน์สูงสุดซึ่งจะถือเป็นการพัฒนาเทคโนโลยี อีกทั้งทดแทนการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะของกระแสน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจากอุปกรณ์กำเนิดละอองน้ำแข็งแห้ง
2. ศึกษาสภาวะดำเนินการของอุปกรณ์กำเนิดละอองน้ำแข็งแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาดสิ่งสกปรก
3. อธิบายส่วนหนึ่งในกลไกการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งโดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์การละลาย
4. ศึกษาความคุ้มค่าของการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งบนพื้นฐานของเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งโดยเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง Model KMITL_001
2. ศึกษาลักษณะของกระแผละอองน้ำแข็งแห้งในช่วงความดันการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 10-20 bar ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 48-55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 10-15 °C และระยะการฉีดพ่น 1-6 cm
3. ศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการควบแน่นของน้ำในบรรยากาศ โดยพิจารณาความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 20-60
4. ศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดโดยจำลองสิ่งสกปรกหมึกเพอร์มาเน้นท์บนแผ่นอลูมิเนียม
5. ศึกษากลไกการละลายสิ่งสกปรกอินทรีย์โดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์การละลาย
6. ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยพิจารณาตามหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ และออกแบบการทดลอง
3. ทำการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง
4. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพ่นน้ำแข็งแห้ง
5. สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์อุปกรณ์กำเนิดละอองน้ำแข็งแห้งในระดับปฏิบัติงานสำหรับใช้ในกระบวนการทำความสะอาดเชิงพาณิชย์
2. มีองค์ความรู้เกี่ยวกับสภาวะดำเนินการของอุปกรณ์กำเนิดละอองน้ำแข็งแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาดสิ่งสกปรก
3. สามารถอธิบายกลไกการละลายสิ่งสกปรกอินทรีย์ได้โดยค่าพารามิเตอร์การละลาย
4. มีองค์ความรู้เกี่ยวกับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแข็งแห้ง [4-5]

2.1.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide)

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน ไม่ทำลายโอโซน ที่ความดันและอุณหภูมิปกติ CO_2 จะเสถียรและเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเมื่ออยู่ในวัฏภาคก๊าซ ซึ่งก๊าซ CO_2 จะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่ากล่าวคือมีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ดังนั้นในพื้นที่อับอากาศความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 จึงสามารถเพิ่มขึ้นได้ ซึ่ง CO_2 มีความเป็นพิษเมื่อความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ในอากาศมีค่ามากกว่า 5 %v/v CO_2 ประกอบด้วย 4 วัฏภาค คือ ก๊าซของเหลว ของแข็ง และของไหลเหนือวิกฤต

2.1.2 น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice)

น้ำแข็งแห้ง (Dry ice) คือ CO_2 ในสถานะของแข็ง ไม่มีสี และเป็นตัวที่ทำให้เกิดความเย็น ซึ่งมีอุณหภูมิ -78°C ที่ความดันบรรยากาศและจะเปลี่ยนจากวัฏภาคของแข็งเป็นวัฏภาคก๊าซโดยไม่เกิดการหลอมเหลวเป็นของเหลวน้ำแข็งแห้งได้ถูกนำมาใช้งานในการแช่แข็งอย่างแพร่หลายเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ และสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยการสวมถุงมือฉนวน

ประโยชน์ของน้ำแข็งแห้ง เนื่องจากน้ำแข็งแห้งมีอุณหภูมิต่ำเย็นจัดและไม่เกิดการหลอมเหลว จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิต่ำ ซึ่งแสดงตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ด้านอาหาร ใช้ในการแช่แข็งเนื้อสัตว์ ไอศกรีม เบเกอรี่ ผัก ผลไม้ เพื่อเป็นการคงความสดของอาหารหรือถนอมอาหาร ซึ่งน้ำแข็งแห้งจะรักษาความสดและไม่มีหลอมเหลวเหมือนน้ำแข็งทั่วไป

- ด้านการแพทย์ ใช้ในการรักษาสภาพของศพหรือสัตว์เพื่อให้คงสภาพได้นาน อีกทั้งป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในการขนส่งเวชภัณฑ์ เช่น ยา หรือสารเคมี

- ด้านการทำมาค้าขาย ใช้น้ำแข็งแห้งในการพ่นทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงาน เครื่องจักร แบบหล่อ หรือแม่พิมพ์

- ด้านบันเทิง ใช้ทำหมอกหรือควันในการจัดคอนเสิร์ต ละครเวที หรือการแสดงต่างๆ

ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้จากน้ำแข็งแห้ง การสัมผัสน้ำแข็งแห้งโดยตรงอาจทำให้เกิดการระคายเคืองของผิวหนังจากความเย็นจัด การบรรจุน้ำแข็งแห้งในภาชนะที่ปิดสนิทอาจทำให้เกิดการสะสมของก๊าซ CO_2 ที่ระเหิดจากน้ำแข็งแห้งอาจส่งผลให้เกิดการระเบิดได้ อีกทั้งหากไม่มีการระบายอากาศที่เพียงพอทำให้ความหนาแน่นของก๊าซ CO_2 สูงเมื่อสูดดมเข้าไป CO_2 ไปแทนที่ก๊าซออกซิเจนในร่างกายทำให้เกิดภาวะขาดอากาศหายใจได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การทำความสะอาดพื้นผิวในระดับอุตสาหกรรม [6-9]

การทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานมีหลายวิธี โดยการเลือกกระบวนการในการทำความสะอาด ควรพิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของวัสดุ ชนิดของสิ่งสกปรก ความสามารถในการทำความสะอาด ต้นทุนในการใช้งาน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเหมาะสมในการประยุกต์เข้ากับกระบวนการ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความสะอาด กระบวนการทำความสะอาดต่างๆ มีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป กระบวนการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพจะถูกนำไปใช้และพัฒนาต่อไป ซึ่งตัวอย่างของกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวในภาคอุตสาหกรรมแสดงดังต่อไปนี้

2.2.1 การทำความสะอาดโดยใช้สารเคมี เป็นการทำความสะอาดโดยใช้สารละลาย เป็นการทำความสะอาดแบบกะ โดยทั่วไปจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย แต่เนื่องจากน้ำมีแรงตึงผิวสูง จึงทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงเมื่อนำไปใช้ทำความสะอาดพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงมีการผสมสารเคมีลงไปเพื่อให้แรงตึงผิวของสารละลายต่ำลง ซึ่งการผสมสารเคมีนอกจากจะทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีแล้ว ยังเกิดของเสียที่อาจเป็นพิษทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสียเหล่านี้อีกด้วย

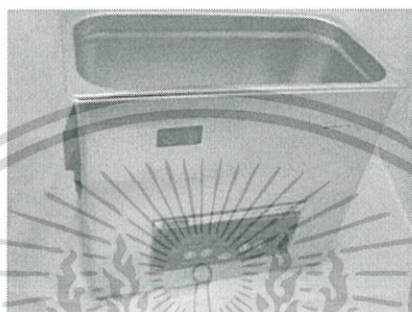


รูปที่ 2.1 อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยกระบวนการใช้สารเคมี [8]

2.2.2 การทำความสะอาดโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ เป็นระบบทำความสะอาดอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนใช้โดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasound) เป็นการทำความสะอาดแบบกะ ซึ่งเป็นเสียงที่อยู่ในระดับความถี่ 15-400 KHz ที่ถูกสร้างโดยตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ที่ต้องการทำความสะอาด เครื่องอัลตราโซนิก นั้นมีหลักการทำงานคือส่งคลื่นความถี่สูงลงสู่สารละลายที่ใช้ชะล้าง การส่งคลื่นความถี่สูงลงไปของเหลวส่งผลให้โมเลกุลของเหลวเกิดการบีบอัดและคลายตัวเป็นจังหวะก่อให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ จำนวนมากผุดขึ้น เรียกลักษณะดังกล่าวว่ากระบวนการก่อกองของเหลว (Cavitation) ซึ่งฟองอากาศเล็กๆ ดังกล่าวจึงมีพลังงานแฝงอยู่ ซึ่งสามารถชะล้างคราบหรือสิ่งฝังที่อยู่นบนผิวอุปกรณ์ได้โดยไม่ทำลายชิ้นงาน และเนื่องจากฟองอากาศมีขนาดเล็กและจำนวนมาก จึงสามารถเข้าทำความสะอาดในทุกซอกมุมเล็กๆ ได้

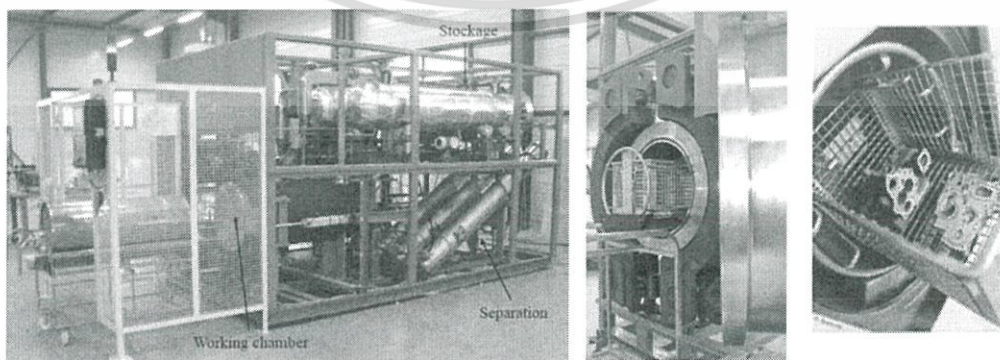
เครื่องที่สามารถผลิตคลื่นความถี่ได้สูงเท่าไร มีผลให้เกิดฟองอากาศดังกล่าวได้มากและพลังงานแฝงมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมืออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งก็จะมีผลให้การทำความสะอาดดีขึ้นด้วย โดยระบบนี้จำเป็นต้องมีสารละลายทำความสะอาดที่เหมาะสม เพราะลำพังการสั่นของของเหลวเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะทำการชะล้างหรือกำจัดคราบสกปรกออกมาจากผิวของชิ้นงานได้ สารที่ใช้ทำความสะอาดปกติแล้วเราใช้น้ำและผสมสารละลายลงไปเพื่อลดแรงตึงผิวของน้ำ ซึ่งการทำความสะอาดโดย Ultrasound ถูกใช้ในการทำความสะอาดผิวชิ้นงานอย่างแพร่หลาย เช่น การล้างเครื่องประดับ แว่นตาหรือคอนแทคเลนส์ อุปกรณ์การแพทย์ เหยือกและนาฬิกา เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีการใช้สารเคมีผสมลงในสารละลายในกระบวนการ



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยกระบวนการใช้คลื่นเสียงอันตรายชาวด

2.2.3 การทำความสะอาดโดยของไหลเหนือวิกฤต เป็นการใช้ของไหลเหนือวิกฤตในการทำความสะอาด โดยของไหลเหนือวิกฤตนี้มีสมบัติคล้ายทั้งของเหลวและก๊าซ กล่าวคือ มีความหนาแน่นคล้ายของเหลวและความหนืดคล้ายก๊าซ ของไหลเหนือวิกฤตที่นิยมใช้คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เนื่องจากมีสมบัติที่จุดวิกฤตต่ำ ไม่มีอันตรายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยหลังจากจบกระบวนการทำความสะอาดแล้วจะไม่ทิ้งของเสียในรูปของเหลวให้ต้องกำจัด อย่างไรก็ตามการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้เป็นการทำความสะอาดแบบกะและหลักการในการทำความสะอาดนี้คือการละลาย หากสิ่งสกปรกเป็นสารจำพวกสารอินทรีย์หรืออนุภาคของโลหะจะไม่สามารถทำความสะอาดได้ อีกทั้งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ความดันสูงในการทำความสะอาดทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงในการดำเนินกระบวนการ

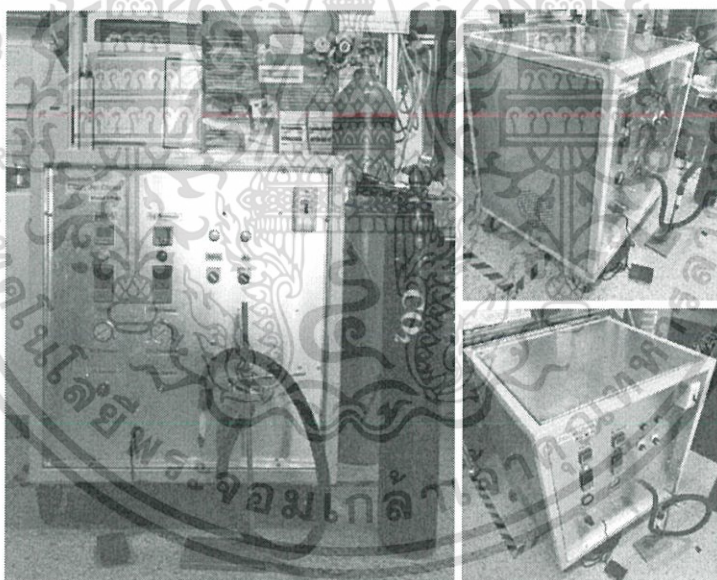


รูปที่ 2.3 อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยของไหลเหนือวิกฤต [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง (Carbon dioxide snow cleaning) เป็นการนำ CO_2 เหลวไหลผ่านหัวฉีดขนาดเล็ก ทำให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็วเกิดเป็นของผสมระหว่างละอองน้ำแข็งแห้งและก๊าซ CO_2 กระบวนการทำความสะอาดด้วยละอองน้ำแข็งแห้งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้กับการทำความสะอาดพื้นผิวที่มีสิ่งสกปรกจำพวกฝุ่นขนาดเล็กกว่าระดับไมครอนรวมถึงชั้นฟิล์มอินทรีย์ที่มีความหนาไม่มากนัก โดยอาศัยหลักการถ่ายเทโมเมนตัมของอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งเป็นกลไกการทำความสะอาด วิธีนี้ถูกพัฒนาและนำมาใช้แทนที่การทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายโดยจะมุ่งเน้นในการทำความสะอาดชิ้นส่วนที่ต้องการความสะอาดในระดับสูง และต้องการความแม่นยำในการทำความสะอาด ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ตัวทำละลายซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงแต่ใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายเป็นสารล้าง การพัฒนาการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้จึงมีความน่าสนใจในการนำมาพัฒนาใช้กับอุตสาหกรรม

กระบวนการทำความสะอาดนี้ ไม่ทำให้เกิดของเสียในรูปของสารละลายของเหลวเหมือนกับกระบวนการทำความสะอาดด้วยสารละลายและ Ultrasonic จึงทำให้ต้นทุนในการดำเนินการน้อยกว่า รวมไปถึงมีความปลอดภัยมากกว่าในด้านของความอันตรายของสารเคมี



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

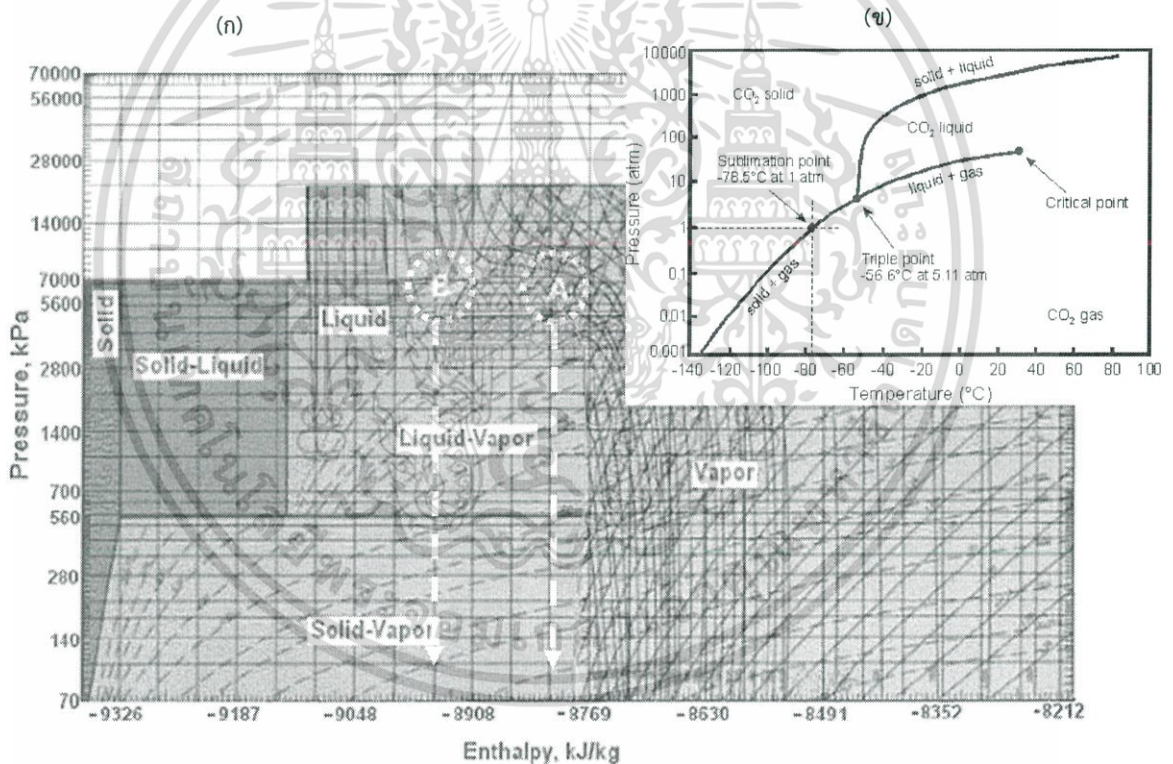
งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานด้วยวิธีการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

2.3 กลไกการเกิดน้ำแข็งแห้ง

น้ำแข็งแห้งเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนวัฏภาคของ CO_2 ที่เกิดจากการขยายตัวแบบเอนทัลปีคงที่ขณะเคลื่อนที่ผ่านรูออร์ฟิสซึ่งสามารถอธิบายการเกิดน้ำแข็งแห้งได้โดยอาศัยหลักทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) และแผนภูมิวัฏภาคของ CO_2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาแผนภูมิวิภาคร่วมกับการแพร่กระจายแบบเอนทัลปีคงที่ที่เกิดขึ้นเมื่อ CO_2 ที่เป็นของไหลเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส พบว่าในขณะที่ความดันของ CO_2 ลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสสถานะของ CO_2 จะเปลี่ยนไป โดยเมื่อพิจารณาจากแผนภูมิรูปที่ 2.5 (ก) จะเห็นว่าจุดบนแผนภูมิจะเริ่มเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งตามเส้นเอนทัลปีคงที่ (Isenthalpic line)

กระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งหมายถึง กระบวนการที่มีการปล่อยให้ CO_2 ที่อยู่ในวิภาคของเหลวหรือก๊าซที่มีความดันสูงเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส (Orifice) และเกิดการการแพร่กระจายแบบเอนทัลปีคงที่ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนวิภาคของ CO_2 ไปอยู่ในวิภาคของแข็งและก๊าซ ดังนั้นกระแส CO_2 ที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดจึงมีทั้งที่อยู่ในวิภาคของแข็งและก๊าซ โดยจะเรียกกระแสการไหลรวมทั้งสองวิภาคนี้ว่า ละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งละอองน้ำแข็งแห้งนี้จะถูกใช้เป็นตัวกลาง (Media) ในการทำความสะอาด โดยละอองน้ำแข็งแห้งน้ำแข็งแห้งที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดที่มีความเร็วสูง เมื่อนำเอาไปใช้ฉีดพ่นพื้นผิวชิ้นงานก็จะสามารถจัดอนุภาคออกจากพื้นผิวได้ [1, 10]



รูปที่ 2.5 (ก) แผนภูมิวิภาคแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปี-ความดันของ CO_2 และ (ข) แผนภูมิวิภาคอุณหภูมิ-ความดันของ CO_2 [10]

หลักการในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยหลักทางอุณหพลศาสตร์และแผนภูมิวิภาคของ CO_2 ในรูปที่ 2.5 (ข) นอกจากนี้รูปที่ 2.5 (ก) เป็นแผนภูมิวิภาคแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเอนทัลปีของ CO_2 ซึ่งสามารถจะใช้อธิบายกระบวนการการผลิตกระแสน้ำแข็งแห้งได้ รวมถึงสามารถแสดงทิศทางการเปลี่ยนวิภาคของ CO_2 ในระหว่างการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสดองน้ำแข็งแห้งซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเอนทัลปีของ CO_2 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนวัฏภาคในขณะที่เกิดดองน้ำแข็งแห้งโดยแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ก๊าซ ของแข็ง ของเหลว และของไหลเหนือวิกฤต การผลิตดองน้ำแข็งแห้งเกิดขึ้นเมื่อ CO_2 ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวหรือก๊าซเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส และในขณะที่ความดันของ CO_2 ลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส สภาพทางอุณหพลศาสตร์ของ CO_2 จะเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อดูจากแผนภูมิจะเห็นว่าจุดบนแผนภูมิจะเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งตามเส้นทางเอนทัลปีคงที่จากแผนภูมิวัฏภาคในรูปที่ 2.5 (ก) ระบุให้ CO_2 ที่จุด A อยู่ในวัฏภาคก๊าซ และที่จุด B อยู่ในวัฏภาคของเหลว ทำให้ต้องมีการพิจารณาถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของ CO_2 เป็น 2 กรณี โดยถ้าพิจารณา CO_2 ที่อยู่ในวัฏภาคของก๊าซ (ก่อนผ่านรูออริฟิส) คือจุดเริ่มต้น A เมื่อความดันของ CO_2 เริ่มลดลงทำให้วัฏภาคก๊าซบางส่วนนั้นเปลี่ยนวัฏภาคไปเป็นของเหลว โดยจะเปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของเหลวมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มร้อยละของวัฏภาคของเหลวภายในสมดุลของวัฏภาคของเหลว-ก๊าซจนกระทั่งความดันของ CO_2 นั้นลดลงจนถึงรอยต่อระหว่างวัฏภาคของเหลว-ก๊าซกับวัฏภาคก๊าซ-ของแข็ง จะเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคอีกครั้งโดยวัฏภาคของเหลวที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระหว่างที่อยู่ในสมดุลของวัฏภาคของเหลว-ก๊าซ เปลี่ยนไปเป็นวัฏภาคของแข็ง และเมื่อนำกฎของคาน (Lever rule) มาคำนวณสัดส่วนการเปลี่ยนวัฏภาคเบื้องต้น พบว่าน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนวัฏภาคมาจากก๊าซ (A) ไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งคิดเป็นร้อยละ 6 ของน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นทั้งหมด แต่พิจารณา CO_2 ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว (ก่อนผ่านรูออริฟิส) จากจุด B และเมื่อความดันลดลงก็จะเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคของ CO_2 เหลวบางส่วนไปอยู่ในวัฏภาคก๊าซทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้น และร้อยละของวัฏภาคก๊าซจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความดันที่ลดลงจนถึงขอบเขตสมดุลของวัฏภาคก๊าซ-ของแข็ง วัฏภาคของเหลวที่เหลืออยู่ทั้งหมดก็จะเปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งโดยร้อยละของการเปลี่ยนเป็นวัฏภาคของแข็งจะอยู่ในช่วงร้อยละ 45 แม้ว่าจะทำการลดความดันลงไปอีกก็จะไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นอีกต่อไป [1]

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าร้อยละของการเกิดน้ำแข็งแห้งจะขึ้นกับสภาวะและวัฏภาคของ CO_2 ที่ใช้เป็นสารป้อนในตอนเริ่มต้นก่อนการปล่อยผ่านรูออริฟิสซึ่งวัฏภาคของ CO_2 ที่ใช้เป็นสารป้อนนั้นจะถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิและความดันของระบบก่อนการปล่อย CO_2 ผ่านรูออริฟิส

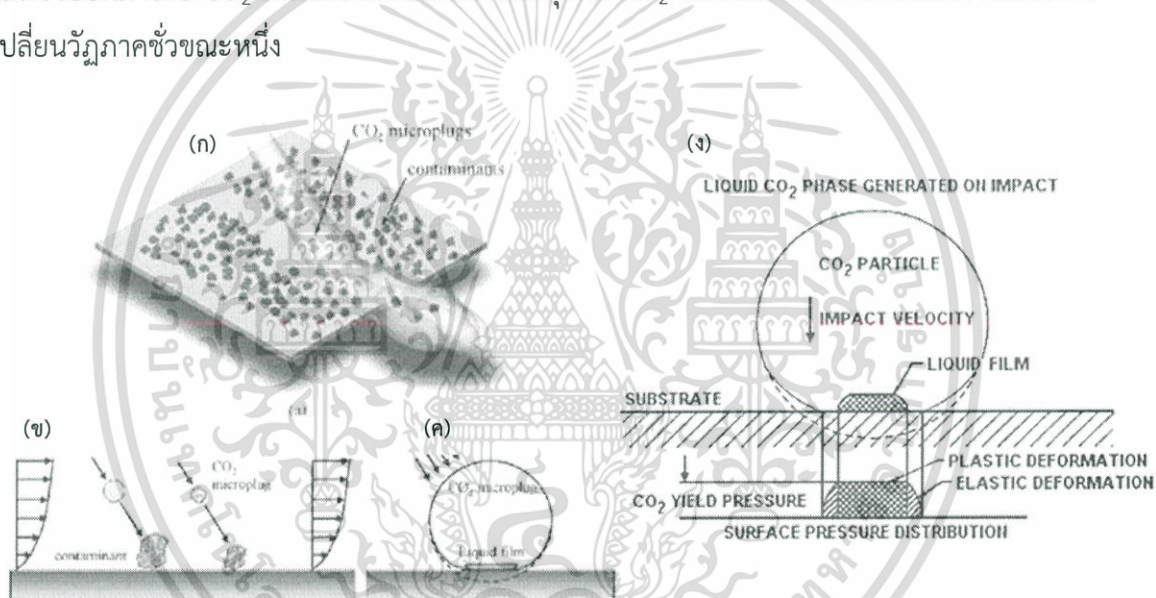
2.4 กลไกการทำความสะอาดของการพ่นดองน้ำแข็งแห้ง

กระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นดองน้ำแข็งแห้งเกิดจากดองน้ำแข็งแห้งเป็นตัวกลางในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงาน ซึ่งกลไกการเกิดดองน้ำแข็งแห้งจะเกิดขึ้นมาจากปรากฏการณ์ที่ CO_2 ในวัฏภาคของเหลวและก๊าซที่มีความดันสูงเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส ออกสู่บรรยากาศและเกิดการขยายตัวตามการทดลองของจูล-ทอมป์สัน (Joule-Thompson expansion) ทำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิและความดันอย่างรวดเร็ว ซึ่งกลไกการทำความสะอาดประกอบด้วย 3 กลไกหลัก คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) การถ่ายโอนโมเมนตัมของอนุภาค CO_2 ที่ก่อให้เกิดแรงเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคกับพื้นผิว
- 2) แรงลาก (Drag force) ของกระแสก๊าซ CO_2
- 3) การเข้าไปละลายสารปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของ CO_2 เหลวที่เกิดขึ้นในระหว่างการกระทบกันระหว่างอนุภาคกับพื้นผิว ซึ่งกระบวนการทำความสะอาดจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่ออนุภาค CO_2 กระทบกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด

กลไกของการขจัดอนุภาคแสดงดังรูปที่ 2.6 การขจัดอนุภาคนั้นจะเป็นผลมาจากการรวมกันระหว่างผลจากแรงลากที่เกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสก๊าซ CO_2 ด้วยความเร็วสูงทำให้เกิดแรงลากขึ้นเหนือพื้นผิวกับผลจากการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างอนุภาคของ CO_2 กับอนุภาคที่เกาะบนพื้นผิว ส่วนกลไกการขจัดสารอินทรีย์ไม่มีขั้วบนพื้นผิวนั้นเกิดขึ้นจากการเข้าไปละลายเอาสารอินทรีย์ไม่มีขั้วออกมาโดย CO_2 เหลวที่เกิดขึ้นระหว่างที่อนุภาค CO_2 ที่เป็นของแข็งชนกับพื้นผิวจนเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคชั่วขณะหนึ่ง



รูปที่ 2.6 กลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

- (ก) ภาพจำลองการทำความสะอาดด้วยการพ่นละออง CO_2 [10]
- (ข) กลไกการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงาน [10]
- (ค และ ง) กลไกการขจัดสารอินทรีย์ที่อยู่บนพื้นผิว[11]

การที่มีอนุภาค CO_2 หรือน้ำแข็งแห้งในละอองน้ำแข็งแห้งส่งผลให้เกิดเป็นกระบวนการใหม่ในการขจัดอนุภาคบนพื้นผิว ซึ่งจากเดิมเป็นการทำความสะอาดโดยใช้ก๊าซเคลื่อนที่ความเร็วสูงขจัดอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากพื้นผิวโดยแรงลาก เมื่อแรงลากที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวก็จะเกิดการขจัดอนุภาคขึ้น และอนุภาคจะถูกพาออกไปจากพื้นผิวตามทิศทางที่ก๊าซเคลื่อนที่ได้ แต่โดยทั่วไปแรงลากจะไม่มีแรงที่ส่งผลเพียงพอต่อการขจัดอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับไมครอน (Micrometer-sized particles) และอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงเอกซาร์เป็นเอกซาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะเป็นใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เล็กกว่าระดับไมครอน (Submicrometer-sized particles) เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ระหว่างอนุภาคที่เกาะอยู่กับพื้นผิวจะมีอิทธิพลมากกว่าแรงลากตึงนั้น การทำความสะอาดสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการทำความสะอาดอนุภาคระดับไมครอน โดยแผนภาพจำลองการเกิดกระบวนการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งแสดงดังรูปที่ 2.6 (ข) จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออนุภาคบนพื้นผิวถูกกระทบด้วยอนุภาคน้ำแข็งแห้งจะก่อให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมขึ้นระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งและอนุภาคที่เกาะบนพื้นผิว ซึ่งการถ่ายเทโมเมนตัมนี้จะส่งผลให้เกิดแรงที่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวได้ อนุภาคที่เกาะบนพื้นผิวถูกขจัดออกไปได้ และหลุดออกจากพื้นผิวไปพร้อมกับกระแสก๊าซความเร็วสูง [1]

ส่วนกลไกในการขจัดสารอินทรีย์ไม่มีชีวิตที่อยู่บนพื้นผิวจะมีกลไกในการขจัดที่แตกต่างไปจากกลไกการขจัดอนุภาคบนพื้นผิว โดยอาศัยการทำละลายด้วยตัวทำละลาย คือ CO_2 ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว ซึ่ง CO_2 เหลวนี้ถือว่าเป็นตัวทำละลายที่ดีเยี่ยมสำหรับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีชีวิต โดย CO_2 ในวัฏภาคของเหลวจะเกิดขึ้นช่วงหนึ่งระหว่างเกิดการกระทบของอนุภาคน้ำแข็งแห้งบนพื้นผิว ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 (ค และ ง) โดยจะเกิด CO_2 เหลวขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ เพราะในระหว่างการกระทบนั้นจะก่อให้เกิดความเครียดที่สูงตรงรอยต่อระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิว โดยความเครียดที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากกว่าค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของอนุภาคน้ำแข็งแห้งและสูงกว่าค่าความดันที่จุดร่วม 3 วัฏภาค (Triple point) ส่งผลให้อนุภาค CO_2 เปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของเหลว และทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายในขณะที่สัมผัสอยู่กับพื้นผิว ส่งผลให้สารอินทรีย์ไม่มีชีวิตที่เกาะอยู่บนพื้นผิวจะถูกทำละลายโดย CO_2 เหลว และจะคงอยู่ในวัฏภาคของเหลวที่อยู่ภายในอนุภาคน้ำแข็งแห้ง จากนั้นเมื่ออนุภาค CO_2 เริ่มที่จะสะท้อนออกจากพื้นผิว ความดัน ณ จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค CO_2 กับพื้นผิวก็จะลดลง และวัฏภาคของเหลวที่อยู่ในอนุภาคของน้ำแข็งแห้งก็จะเปลี่ยนวัฏภาคกลับมาอยู่ในวัฏภาคของแข็งอีกครั้งหนึ่งพร้อมทั้งเป็นการขจัดเอาสารอินทรีย์ไม่มีชีวิตออกไปจากพื้นผิวด้วย [11]

2.5 ประโยชน์ของการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง [12]

การทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาดสิ่งสกปรกขนาดเล็กระดับไมครอนหรือต่ำกว่า อีกทั้งต้องการทำความสะอาดอย่างแม่นยำ เช่น การทำความสะอาดวัสดุหรืออุปกรณ์เกี่ยวกับแสงและสายตา ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การทำความสะอาดด้วยน้ำแข็งแห้งเหนือกว่าวิธีการทำความสะอาดแบบอื่นเนื่องจากระยะเวลาในการทำความสะอาดที่ไม่นาน ประหยัดค่าใช้จ่ายจากการกำจัดของเสียหลังกระบวนการทำความสะอาด พื้นผิววัสดุหรือชิ้นงานไม่ถูกทำลายหรือกัดกร่อน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะไม่ก่อให้เกิดของเสียและมลพิษแต่เป็นการนำก๊าซ CO_2 มาใช้ประโยชน์ก่อนปล่อยสู่

บรรยากาศ นอกจากนี้การทำความสะอาดด้วยการฟอโนสอริงน้ำแข็งแห้งไม่ต้องหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาดโดยสามารถทำการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง

2.7 การจำแนกขนาดของอนุภาค

การทำความสะอาดแบบแมนย้าถูกนำไปใช้ในการทำความสะอาดระดับไมครอนหรือต่ำกว่า ซึ่งการจำแนกขนาดของอนุภาคแสดงดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกขนาดของอนุภาคและเทคนิคการจำแนกอนุภาค [13]

ประเภทของอนุภาค	ขนาดอนุภาค (nm)	เทคนิคการจำแนกอนุภาค
Macro	> 50,000	- ตาเปล่า
Micro	100 – 50,000	- กล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา
Submicrometer	0 – 100	- กล้องจุลทรรศน์แสงแบบส่องกราดสนามระยะใกล้ - กล้องจุลทรรศน์ Surface plasmon
Nano	1–10	- กล้องจุลทรรศน์ Electron and probe
Atomic	0.01 – 1	- กล้องจุลทรรศน์ Electron and probe - Holography - กล้องจุลทรรศน์ Resonance force
Subatomic	< 0.01	- Femtosecond to attosecond spectroscopy - กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)

อนุภาคขนาดเล็กกว่า $10 \mu\text{m}$ ยึดติดกับพื้นผิวด้วยแรงยึดติดที่แข็งแรง ซึ่งแรงยึดติดอาจเกิดพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไอออนิก แรง van der Waals พันธะไฮโดรเจน แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแบบไดโพล-ไดโพลและแรงยึดติดไฟฟ้าสถิต หรือการรวมกันของแรงยึดติดเหล่านี้ [14] ซึ่งทางทฤษฎีแรงยึดเกาะเป็นสัดส่วนกับขนาดอนุภาค โดยขณะที่แรงในการทำความสะอาดเป็น 2-3 เท่าของแรงยึดติดของอนุภาค ในการกำจัดอนุภาคจึงจำเป็นต้องใช้แรงที่สามารถเอาชนะแรงยึดติดระหว่างอนุภาคกับพื้นผิว

2.8 พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter, δ)

พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter, δ) แสดงถึงความแข็งแรงของแรงระหว่างโมเลกุล มีความสัมพันธ์กับพลังงานในการดึงดูดระหว่างโมเลกุล ซึ่งสามารถนำไปอธิบายการละลายเข้าด้วยกันของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ซึ่งตัวถูกละลายสามารถละลายในสารละลายได้ต่อเมื่อมีค่าพารามิเตอร์การละลายเท่ากันหรือใกล้เคียงกันซึ่งค่าพารามิเตอร์แสดงดังสมการ (2.1)

$$\delta(\text{MPa}^{0.5}) = \left(\frac{\text{Heat of vaporization (J/mol)}}{\text{Molar volume (m}^3/\text{mol)}} \right)^{0.5} \quad (2.1)$$

2.9 พารามิเตอร์การละลายแบบเฮนเซน (Hansen solubility parameter, HSP) [15]

เป็นแบบจำลองสามพารามิเตอร์ (Three parameter model) กล่าวคือ ผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยว (Cohesive energy, E) เป็นผลมาจากอันตรกิริยาของส่วนที่ไม่มีขั้ว (Dispersion interaction, E_d) อันตรกิริยาของส่วนที่มีขั้ว (Polar interaction, E_p) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแบบไดโพล-ไดโพลและไดโพล-อินดิวิจิดิโพล และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding, E_h) หรืออันตรกิริยาจำเพาะอื่น เช่น อันตรกิริยากรด-เบสของลูอิส (Lewis acid-base interaction) ดังแสดงในสมการ (2.2)

$$E = E_d + E_p + E_h \quad (2.2)$$

เมื่อหารสมการ (2.2) ตลอดด้วยปริมาตรเชิงโมล (V)

$$\frac{E}{V} = \frac{E_d}{V} + \frac{E_p}{V} + \frac{E_h}{V} \quad (2.3)$$

กำหนดให้รากที่สองของพารามิเตอร์การละลายรวม (Total solubility parameter, δ_T) มีค่าเท่ากับผลบวกของ รากที่สองของพารามิเตอร์แต่ละองค์ประกอบดังแสดงในสมการ (2.4)

$$\delta_T^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ พารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนไม่มีขั้ว (Dispersion component of solubility parameter, δ_d)

$$\delta_d^2 = \frac{E_d}{V} \quad (2.5)$$

พารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนมีขั้ว (Polar component of solubility parameter, δ_p)

$$\delta_p^2 = \frac{E_p}{V} \quad (2.6)$$







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding parameter of solubility parameter, δ_h)

$$\delta_h^2 = \frac{E_h}{V} \quad (2.7)$$

ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลาย [15]

สารละลาย	δ_d (MPa ^{0.5})	δ_p (MPa ^{0.5})	δ_h (MPa ^{0.5})	δ_T (MPa ^{0.5})
เบนซีน (Benzene) 	18.4	0.0	2.0	18.6
คลอโรฟอร์ม (Chloroform) 	17.8	3.1	5.7	19.0
ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) 	16.8	0.0	0.2	16.8
ไซโคลเพนเทน (Cyclopentane) 	16.7	3.8	1.7	17.2
เดคเคน (Decane) 	15.7	0.0	0.0	15.7
เฮปเทน (Heptane) 	15.3	0.0	0.0	15.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การคำนวณค่าการละลายโดยวิธีพิจารณากลุ่มองค์ประกอบของ Hoftzyer และ Van Krevelen [16]

เป็นการทำนายค่าองค์ประกอบของพารามิเตอร์การละลายจากโครงสร้างทางเคมี ซึ่งจากการพิจารณากลุ่มองค์ประกอบของ Hoftzyer และ Van Krevelea สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.8-2.11) เพื่อคำนวณหาค่าองค์ประกอบพารามิเตอร์ของอันตรกิริยาของส่วนที่ไม่มีขั้ว อันตรกิริยาของส่วนที่มีขั้ว และอันตรกิริยาในส่วนของพันธะไฮโดรเจน

$$\delta_d = \sum F_{di} / V \quad (2.8)$$

$$\delta_p = \sqrt{\sum F_{pi}^2} / V \quad (2.9)$$

$$\delta_h = \sqrt{\sum E_{hi} / V} \quad (2.10)$$

$$V = \sum N_i V_i \quad (2.11)$$

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบโครงสร้างเคมี [17]

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
>C<	-70	0	0
-Cl	450	550	400
-OH	210	500	20000

2.11 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ [15]

ค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ สามารถประมาณค่าได้จากสมการ (2.12) ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายเป็นฟังก์ชันกับปริมาตรเชิงโมลและอุณหภูมิ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta^2 = \left[\frac{\delta_{dref}}{\left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{-1.25}} \right]^2 + \left[\frac{\delta_{pref}}{\left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{-0.5}} \right]^2 + \left[\frac{\delta_{href}}{\exp\left(-1.32 \times 10^{-3}(T_{ref} - T) - \ln\left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{0.5}\right)} \right]^2 \quad (2.12)$$

เมื่อ δ_{dref} คือ ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนไม่มีขั้วอ้างอิง (15.6 MPa^{0.5})

δ_{pref} คือ ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนมีขั้วอ้างอิง (5.2 MPa^{0.5})

δ_{href} คือ ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนพันธะไฮโดรเจนอ้างอิง (5.8 MPa^{0.5})

V_{ref} คือ ปริมาตรเชิงโมลอ้างอิง (39.13 cm³/mole)

T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิง (298.15 K)

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Souvik และ Andrea [10] ศึกษาหลักการและกลไกการกำจัดอนุภาคระดับไมครอนและต่ำกว่าไมครอน โดยใช้การพ่น CO₂ เย็นยิ่งยวด ศึกษา CO₂ ที่ความดัน 5,860 kPa และอุณหภูมิของ CO₂ 25 °C ผ่านหัวฉีดเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว พบว่าละอองน้ำแข็งแห้งเกิดจากการขยายตัวของ CO₂ ที่เคลื่อนผ่านหัวฉีด ส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิของ CO₂ ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งต่ำลงต่ำกว่าจุดร่วมสามวัฏภาค ทำให้ CO₂ ที่ถูกพ่นผ่านหัวฉีดออกมาสู่ความดันบรรยากาศเปลี่ยนวัฏภาคเป็นของผสมระเหว่ก๊าซและของแข็ง โดยพ่นไปยังพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด ซึ่งกลไกในการทำความสะอาดนั้นประกอบด้วย 3 กลไกหลัก คือ

- 1) การถ่ายเทโมเมนตัมโดยอนุภาคเย็นยิ่งยวด ที่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาดได้
- 2) แรงลากของกระแส CO₂ ที่ออกมาจากหัวฉีด ทำให้อนุภาคหลุดออกจากพื้นผิว
- 3) การละลายสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวโดย CO₂ เหลวที่เกิดขึ้นระหว่างการทำความสะอาด

นอกจากนี้ได้แสดงการคำนวณหาขนาดของอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ต้องการสำหรับการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิว ในกรณีที่ทราบเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิว โดยพบว่าในการขจัดอนุภาคที่มีขนาด 20 μm บนพื้นผิวนั้นจะต้องใช้อุณหภูมิเย็นยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 μm ในการทำความสะอาด นอกจากนี้ในการขจัดอนุภาคยังต้องใช้โมเมนตัมใน

การเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคบนพื้นผิวโดยค่าความเร็วต้นของอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่ใช้ในการคำนวณ คือ 40 m/s และยังพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าระดับไมครอนจะต้องการอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.5 μm ในการจัดอนุภาคจึงจะมีประสิทธิภาพในการจัดอนุภาคที่ดี

King และ Williams [19] ได้รวบรวมการใช้ประโยชน์จากของไหลเหนือวิกฤติในขั้นตอนการผลิตเคมีคอนดักเตอร์ โดยอธิบายถึงลักษณะทางการภาพของของไหล เช่น ความหนืด ความหนาแน่น ค่าแรงตึงผิว ที่มีส่วนช่วยทำให้สามารถประยุกต์ใช้ของไหลเหนือวิกฤติเป็นตัวกลางในกระบวนการล้างชิ้นส่วนได้ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำความสะอาดด้วยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งถือว่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับกระบวนการทำความสะอาดชิ้นส่วนแบบแห้ง ซึ่งจะมาแทนที่กระบวนการทำความสะอาดแบบเปียกโดยใช้น้ำหรือสารตัวทำลายอินทรีย์เป็นตัวกลางทำความสะอาด และเป็นกระบวนการในการทำความสะอาดที่ทางภาคอุตสาหกรรมได้ใช้อยู่ในปัจจุบัน จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการทำความสะอาดแบบเปียกนี้ยังมีข้อเสียหรือข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานอยู่ในระดับหนึ่ง อาทิเช่น ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการจะก่อให้เกิดของเสียที่ทางภาคอุตสาหกรรมต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดหรือกำจัดของเสียเหล่านั้นที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ในบางขั้นตอนของกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไฝ่ยังไม่สามารถนำเอากระบวนการล้างทำความสะอาดด้วยสารตัวทำลายอินทรีย์ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตได้เนื่องจากเป็นพื้นที่การผลิตที่มีการปฏิบัติงานของพนักงานอยู่ ซึ่งอาจจะเกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้จากการแพร่กระจายของสารตัวทำลายอินทรีย์ในอากาศ

Hills [1] ได้แสดงให้เห็นว่าโดยปกติแล้วสารประกอบอินทรีย์นั้นจะละลายเข้าไปใน CO_2 เหลวได้ง่ายและขจัดออกไปจากพื้นผิวได้ แต่ในกรณีของสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือสารที่มีหมู่ฟังก์ชันพื้นฐานไม่เป็นหมู่ไฮโดรคาร์บอน (Functional non-hydrocarbon based groups) นั้นจะไม่สามารถละลายเข้าไปใน CO_2 เหลวได้ ทำให้ยากต่อการขจัดออกจากพื้นผิว แต่จะถูกขจัดออกไปโดยการ Abrasive หรืออาศัยกระบวนการขจัดออกด้วยการแช่แข็งและตามด้วยการขัด เนื่องจากมีการคาดการณ์ว่าละอองลอยของ CO_2 เย็นยิ่งยวดจะเข้าไปลดอุณหภูมิทำให้สารเหล่านี้แข็งตัว จึงเพียงแต่ต้องการขัดอีกครั้งหนึ่งภายหลังการฟ่นละอองลอยของ CO_2 เย็นยิ่งยวดเพื่อขจัดสารเหล่านี้ออกจากพื้นผิว

Yi-Hung และคณะ [23] ศึกษาการรวมกลุ่มของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่เกิดจาก CO_2 เหลวที่ไหลผ่านหัวฉีดจนทำให้เกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วของ CO_2 จนมีลักษณะเป็นอนุภาคซึ่งเป็นปรากฏการณ์บนพื้นฐานของปรากฏการณ์จูล ทอมสัน (Joule-Thomson) โดยที่ขนาดอนุภาคสามารถวัดค่าได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง โดยผลการทดลองแสดงถึงขนาดอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ถูกฟ่นออกจากหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1 μm โดยในช่วงแรกอนุภาคน้ำแข็งแห้งมีขนาดใหญ่ขึ้นในกระแสรไหลหลังจากนั้นจะมีขนาดเล็กลงเป็นผลมาจากการระเหิด ซึ่งมีการแสดงผลการ

กระจายขนาดอนุภาคในรูปแบบไปโมดอลเมื่อระยะห่างออกจากหัวฉีดเพิ่มมากขึ้น การใส่ท่อฉนวน ความร้อนที่ปลายหัวฉีดทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ขนาดของกลุ่มอนุภาคที่วัดค่าได้ มีขนาดประมาณ 100 μm โดยกระบวนการรวมกลุ่มนั้นเกิดจากกระบวนการสะสมของอนุภาคน้ำแข็งแห้งบนท่อและอนุภาคที่หลุดออกจากผิวท่อถูกพัดให้ไปติดกับผิวท่ออีก (Reentrainment) นอกจากนี้ขนาดของกลุ่มอนุภาคจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มความเร็วการไหล เนื่องจากแรงการหลุดออก (Detachment force) ที่สัมพันธ์กับชั้นผิวทึบถมเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความเร็วการไหลเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการรวมกลุ่มของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

สิวิช และ สุรัตน์ [21] ได้ศึกษาถึงการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สันซึ่งเป็นกลไกหลักที่มีผลต่อการผลิตและคุณลักษณะของละอองลอยของน้ำแข็งแห้ง มีการควบคุมสภาวะป้อนเข้าของ CO_2 ไว้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยจากการทดลองจะพบว่าช่วงความดันป้อนเข้าของ CO_2 ที่เหมาะสมควร จะอยู่ในช่วง 800 - 850 psi และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 อยู่ในช่วง 20-22 $^{\circ}\text{C}$ และได้สัดส่วน ปริมาณ CO_2 ที่เปลี่ยนวิฤภาคไปอยู่ในรูปของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนั้นคิดเป็นร้อยละ 38.9-43.3 ค่าจูล-ทอมป์สัน (μ_{JT}) ของ CO_2 ที่มีความดันและอุณหภูมิเดียวกันกับ CO_2 ในการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.0218-0.0380 K/psi แสดงให้เห็นว่าการปรับกระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ (ให้ค่า μ_{JT} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) ควรที่จะมุ่งเน้นไปที่การลดอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 มากกว่าการเพิ่มความดัน

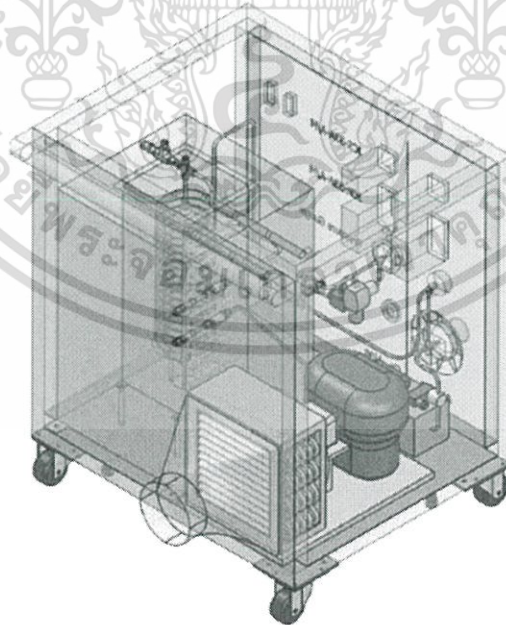
Hills [24] ศึกษาถึงการเกิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) โดยการพ่นกระแส ละอองน้ำแข็งแห้งไปทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนพื้นผิว ซึ่งกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดค่า ESD ที่มากนั้น มาจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิวที่ทำความสะอาด นอกจากนี้ปัจจัย ที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า ESD ประกอบด้วย ความหนาของพื้นผิวทำความสะอาด ค่าการนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและรูปแบบของหัวฉีด

บทที่ 3

การทดลอง

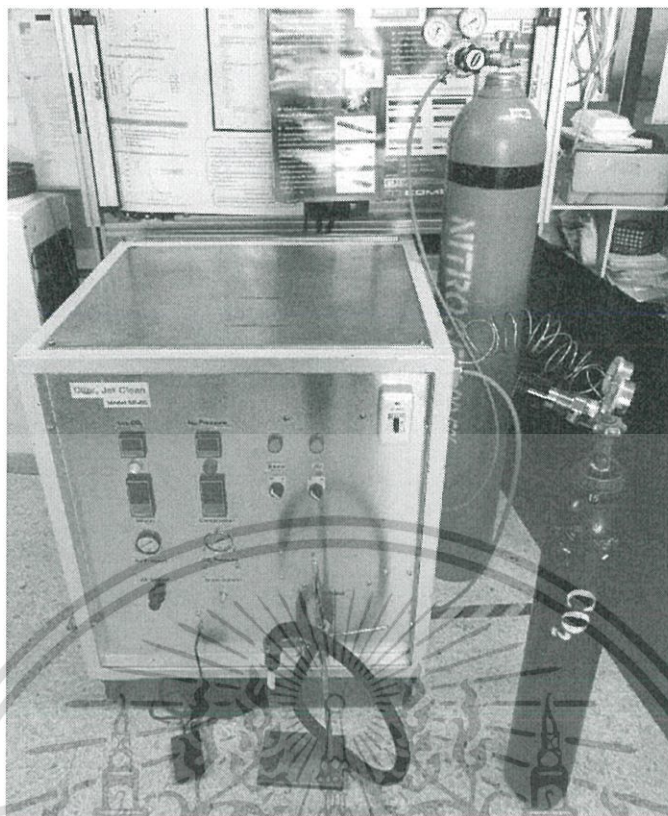
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- 1) ก๊าซ CO₂ ความบริสุทธิ์ 99.95% (CO₂) จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 2) ก๊าซไนโตรเจน 99.5% (N₂) จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 3) เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง Model KMITL_001
- 4) เครื่องดูดอากาศ
- 5) Thermocouple Type K (ช่วงอุณหภูมิ 270 ถึง 370 องศาเซลเซียส)
- 6) Fuji Prescale Film
- 7) Analog Input Module AI210
- 8) ท่ออะคริลิก (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 cm)
- 9) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบเสถียร (Mettler Toledo รุ่น XS32001L)
- 10) ตู้ควบคุมความชื้น
- 11) ซิลิกาเจล

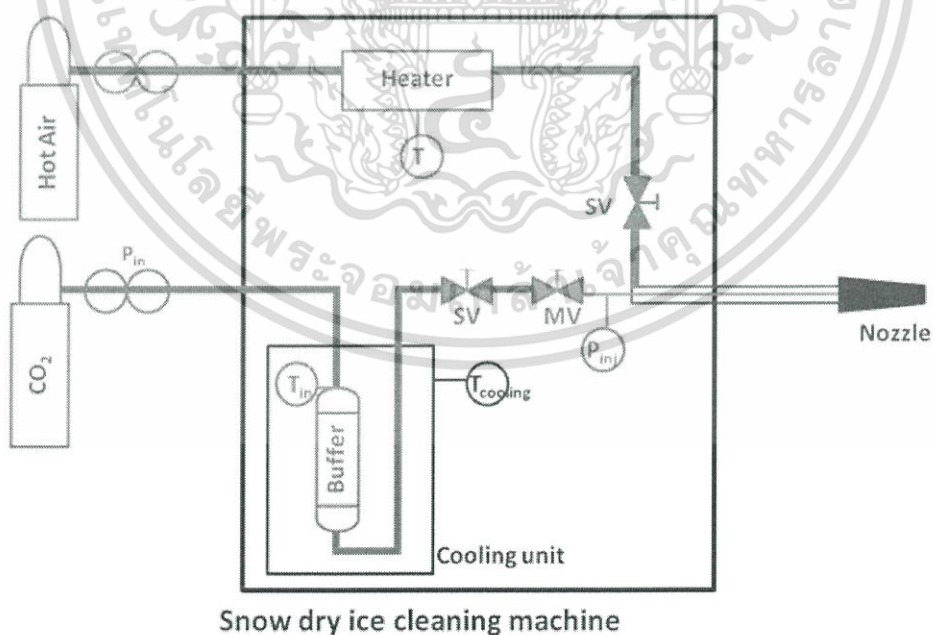


รูปที่ 3.1 แผนภูมิอุปกรณ์ควบคุมการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งแบบพกพา Model KMITL_01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ควบคุมการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งระดับปฏิบัติการ Model KMITL_01

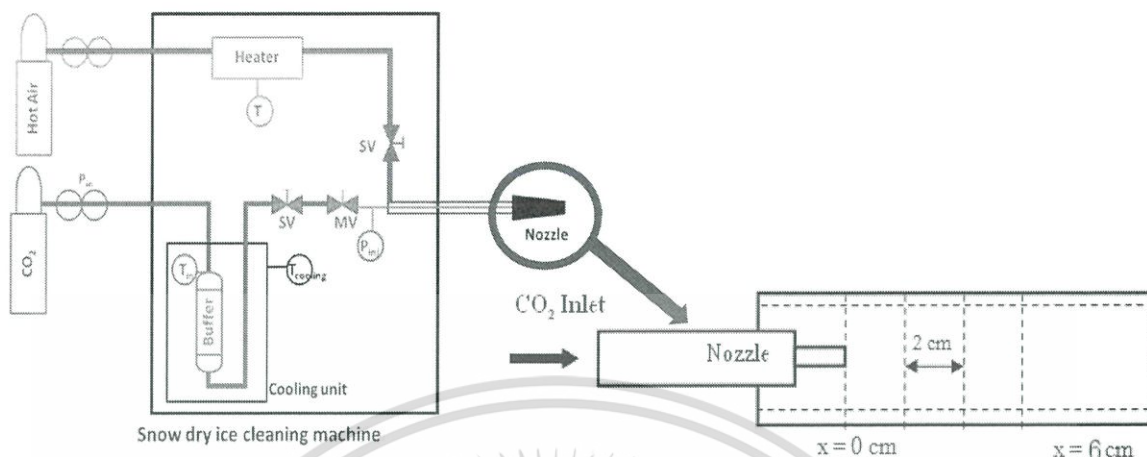


รูปที่ 3.3 แผนภาพอุปกรณ์ควบคุมการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งระดับปฏิบัติการ Model KMITL_01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การทดลองหาโปรไฟล์ของอุณหภูมิ (Temperature Profile)



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทดลองหาโปรไฟล์ของอุณหภูมิ

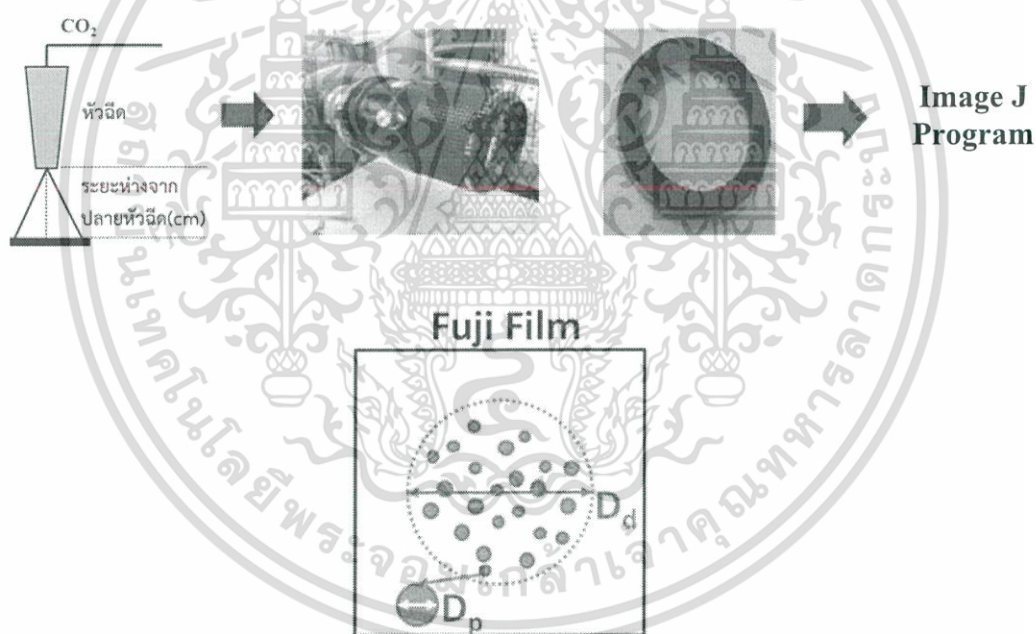
1. เปิดเครื่องทำความเย็น รอจนได้อุณหภูมิตามค่าที่ตั้งไว้
2. เปิดวาล์วถึงบรรจุก๊าซ CO₂ จากนั้นปรับ High Pressure Regulator ให้มีความดันของก๊าซ CO₂ อยู่ในช่วง 31 ถึง 55 bar
3. นำท่ออะคริลิกมาครอบบริเวณหัวฉีดอย่างมิดชิด โดยท่ออะคริลิกจะเจาะรู พร้อมทั้งนำ Thermocouple Type K มาเสียบตามรูที่เจาะไว้ เปิดสวิตซ์หัวพ่นละอองน้ำแข็งแห่งที่ชุดควบคุมการเปิด-ปิด
4. บันทึกค่าอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 2 cm

3.2.2 การทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลของ CO₂ ที่ไหลผ่านหัวฉีด

1. ทำการจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลองโดยเริ่มจากการนำถังบรรจุก๊าซ CO₂ ไปตั้งไว้บนเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกน้ำหนักเริ่มต้น
2. จากนั้นเปิดระบบทำความเย็น รอจนกระทั่งได้อุณหภูมิตามค่าที่ตั้งไว้
3. ตั้งค่าความดันที่ต้องการ จากนั้นเริ่มทดลองโดยกดเปิดสวิตซ์ของเครื่องควบคุมการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห่ง
4. เริ่มฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห่งเป็นเวลา 30 s จากนั้นบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

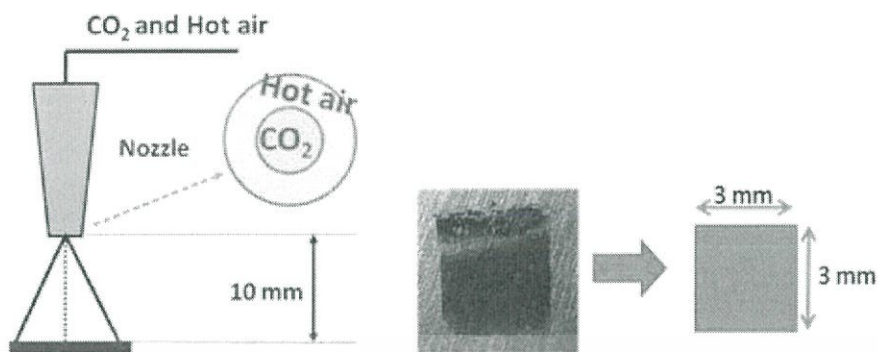
3.2.3 การทดลองหาขนาดอนุภาคของน้ำแข็งแห้งผ่าน Fuji Prescale Film

1. นำแผ่น Fuji Prescale Film ติดตั้งบนแท่นที่เตรียมไว้ โดยขณะทำการติดตั้งแผ่น จะต้องจัดวางลงบนแท่นอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับผิวหน้าของแผ่น Fuji Prescale Film
2. เริ่มทำการทดลอง โดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งลงบนแผ่น Fuji Prescale Film ที่เตรียมไว้ ซึ่งค่าความดันที่ใช้ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งช่วง 34-48 bar โดยจะพ่นละอองน้ำแข็งแห้งติดต่อกันเป็นเวลา 3-30 s หลังจากนั้นเก็บแผ่น Fuji Prescale Film ที่พ่นแล้วเก็บใส่ถุงเพื่อป้องกันความชื้น
3. นำแผ่น Fuji Prescale Film ที่ฉีดแล้วมาส่องด้วยกล้อง Optical Microscope เพื่อวัดขนาดอนุภาคของละอองน้ำแข็งแห้งที่ฉีดออกมาที่ความดันแต่ละค่าพร้อมกับเก็บบันทึกภาพของอนุภาคที่ได้จากกล้อง
4. นำรูปที่เก็บบันทึกมาวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคโดยใช้โปรแกรม Image J จากนั้นจึงสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทดลองการหาขนาดอนุภาคของน้ำแข็งแห้ง

3.2.4 การทำความสะอาดเพอร์มาเน้นท์บนแผ่นอลูมิเนียม



รูปที่ 3.6 แผนภาพการทดลองการทำความสะอาดเพอร์มาเน้นท์ บนแผ่นอลูมิเนียม

1. เตรียมจำลองสิ่งสกปรก ทาหมึกเพอร์มาเน้นท์บนแผ่นอลูมิเนียม ขนาด 3x3 หรือ 5x5 mm
2. เปิดเครื่องทำความเย็น รอจนได้อุณหภูมิตามค่าที่ตั้งไว้
3. เปิดวาล์วถึงบรรจุก๊าซ CO₂ จากนั้นปรับวาล์วปรับความดันให้มีความดันของก๊าซ CO₂ ตามที่กำหนด
4. วางชิ้นตัวอย่างสกปรกห่างจากปลายหัวฉีด 1-4 cm
5. เริ่มทำการทดลอง โดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งลงบนตัวอย่างสิ่งสกปรกเป็นระยะเวลา 5 s
6. นำตัวอย่างที่ผ่านการทำความสะอาดมาวิเคราะห์ผลการทำงานทำความสะอาด

3.2.5 อิทธิพลของการควบคุมความชื้น



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทดลองการควบคุมความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เตรียมสภาวะความชื้นที่ต้องการ โดยการป้อน N_2 เข้าไปในตู้ควบคุมความชื้นตามความชื้นที่กำหนด
2. เตรียมเครื่องพ่นน้ำแข็งแห้งตามสภาวะที่กำหนด
3. ชั่งซิลิกาเจล 8 g และนำไปไว้ในตู้ควบคุมความชื้นในสภาวะที่กำหนด
4. พ่นละอองน้ำแข็งแห้งไปยังซิลิกาเจล เป็นระยะเวลา 1 min
5. นำซิลิกาเจลมาชั่งน้ำหนักหลังการพ่น
6. บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

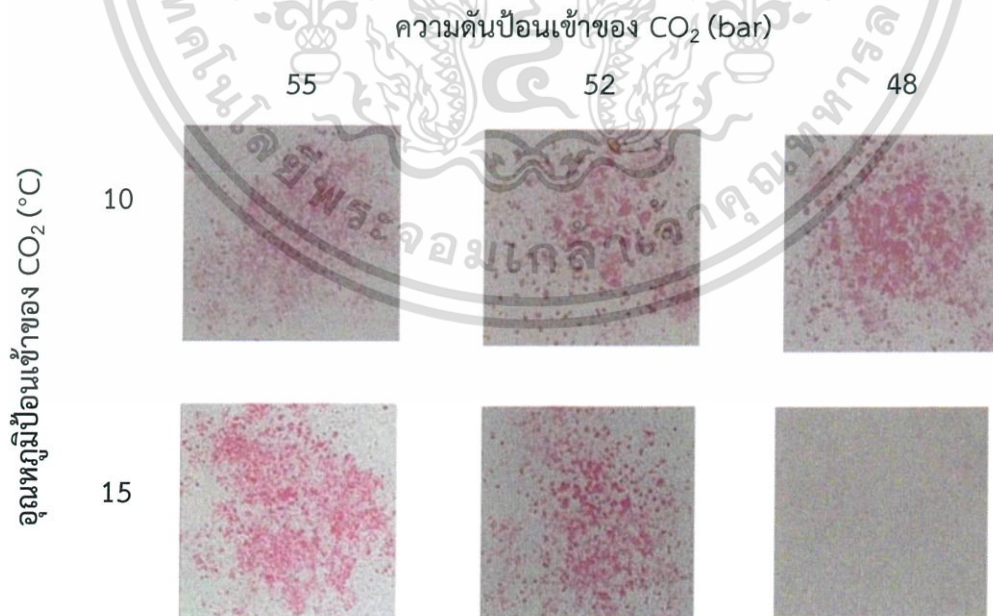
งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง อธิบายกลไกการละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ของ CO₂ เหลว อีกทั้งการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของการใช้เครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

4.1 การศึกษาการทำความสะอาดด้วยเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

งานวิจัยนี้ในส่วนนี้ศึกษาลักษณะของกระแผลละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ พร้อมทั้งจำลองเพอร์มาเน้นท์บนแผ่นอลูมิเนียมเป็นสิ่งปนเปื้อนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา เพื่อพิจารณาสถานะที่เหมาะสมในการทำความสะอาด ซึ่งการศึกษากการทำความสะอาดศึกษาโดยใช้เครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง Model KMITL_001

4.1.1 อิทธิพลของความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ ต่อการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง

พิจารณาการฟ่นกระแผลละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 48-55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 10-15 °C ที่ระยะห่างการฉีดพ่น 2 cm ความดันการฉีดพ่น 15 bar และมุมการฉีดพ่น 90° แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพแผ่น Fuji Prescale Film หลังการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ที่ระยะห่างการฉีดพ่น 2 cm

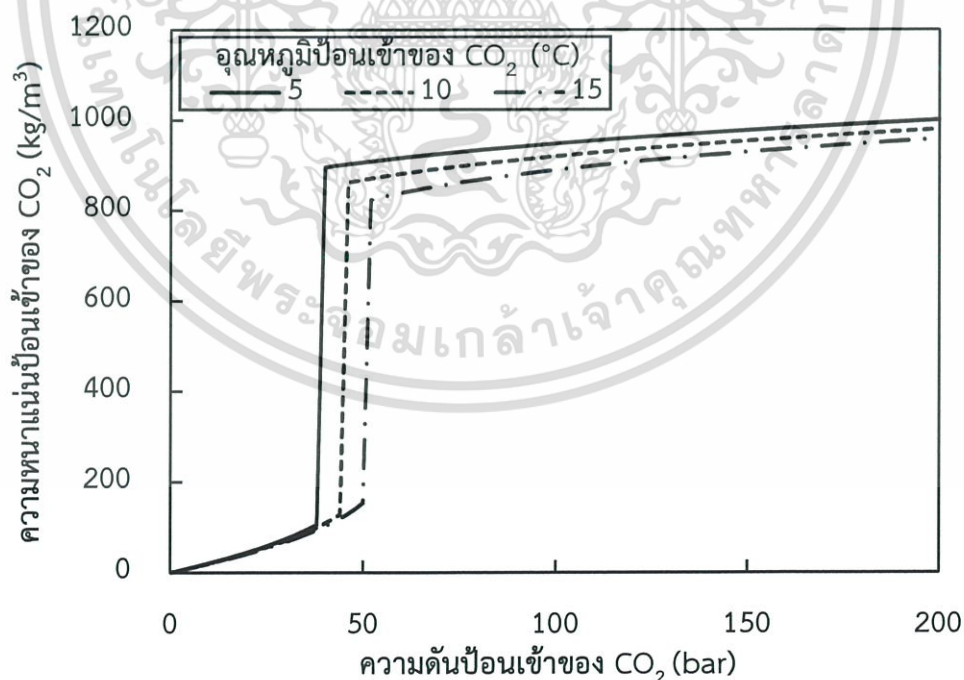
ความดันการฉีดพ่น 15 bar และมุมการฉีดพ่น 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสังเกตจากแผ่น Fuji Prescale Film พบว่าการใช้อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 48 52 และ 55 bar และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 และ 55 bar เป็นสถานะที่สามารถผลิตอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ ในขณะที่สภาวะอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 48 bar ไม่สามารถผลิตอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ เนื่องจากความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO_2 มีค่าน้อยกว่าคือมีความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO_2 140 kg/m^3 (CO_2 วัฏภาคก๊าซ) น้อยมากเทียบกับความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO_2 มากกว่า 830 kg/m^3 (CO_2 วัฏภาคของเหลว) ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 48 52 และ 55 bar และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 และ 55 bar ดังนั้นจากสถานะที่ไม่สามารถผลิตน้ำแข็งแห้งได้วัฏภาคของ CO_2 ก่อนการฉีดพ่นยังไม่เป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงเพียงพอที่จะทำให้สามารถเกิดอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ ซึ่งความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO_2 แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

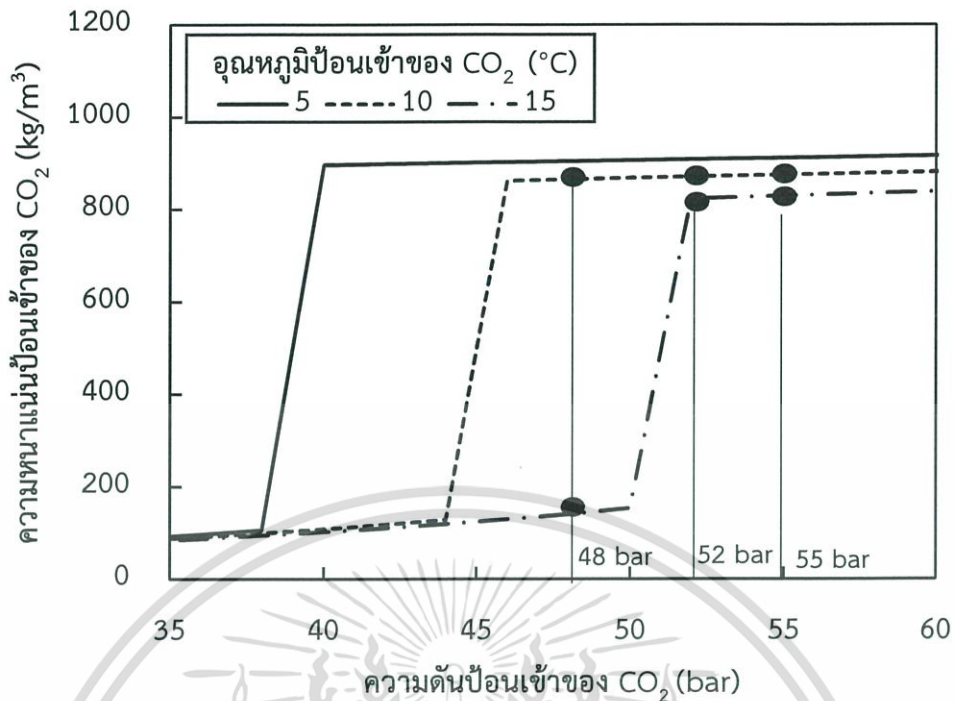
การเลือกสภาวะการทำความสะอาดจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 ที่มีค่าความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO_2 สูงจึงสามารถผลิตอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้

งานวิจัยนี้จึงศึกษาการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนที่สภาวะ อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 48 52 และ 55 bar และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 และ 55 bar



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันป้อนเข้าของ CO_2 กับความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

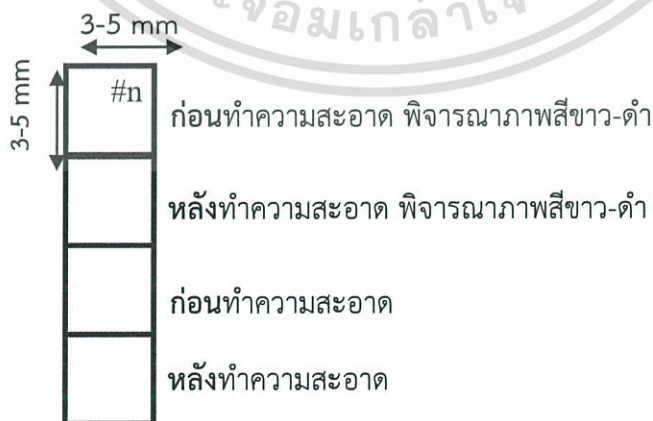


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันป้อนเข้าของ CO₂ กับความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO₂ ที่สถานะการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งต่างๆ

4.1.2 การทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเน้นท์บนแผ่นอลูมิเนียม

การศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำความสะอาดโดยพิจารณาสภาวะที่สามารถทำความสะอาดได้คือสามารถทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเน้นท์บนแผ่นอลูมิเนียมมากกว่าร้อยละ 30 จาก 2 ใน 3 ครั้งของการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ร้อยละของการทำความสะอาดด้วยโปรแกรม Image J

กำหนดให้รูปภาพของการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อ n คือ จำนวนครั้งที่ทำความสะอาด

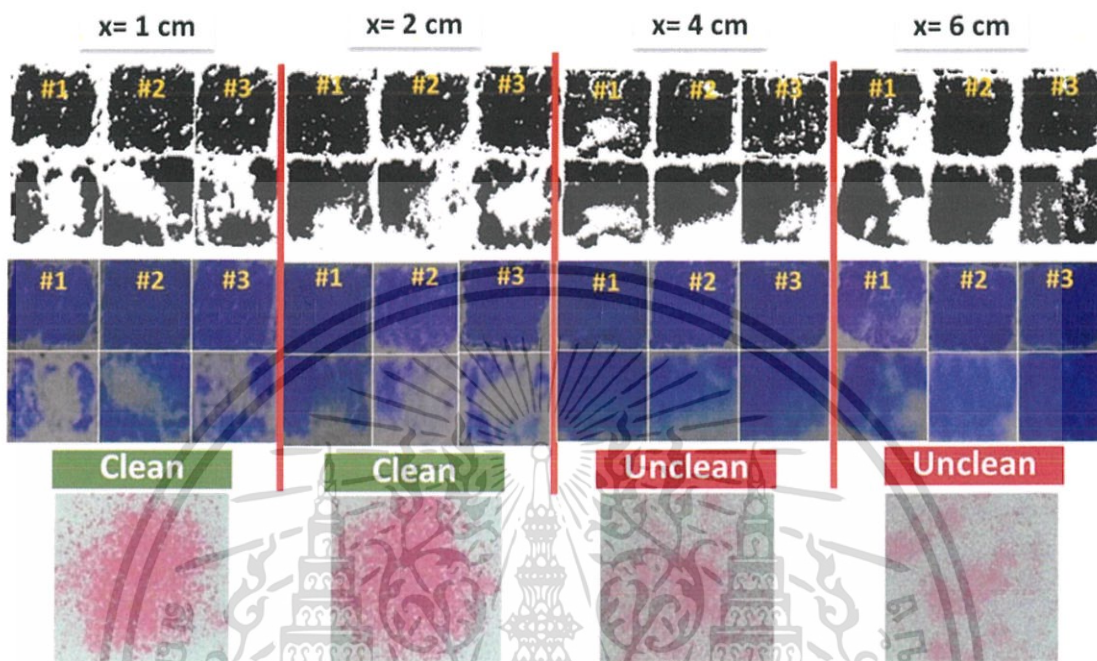


รูปที่ 4.4 ข้อกำหนดการศึกษาการทำความสะอาดเพอร์มาเน้นท์บนแผ่นอลูมิเนียม

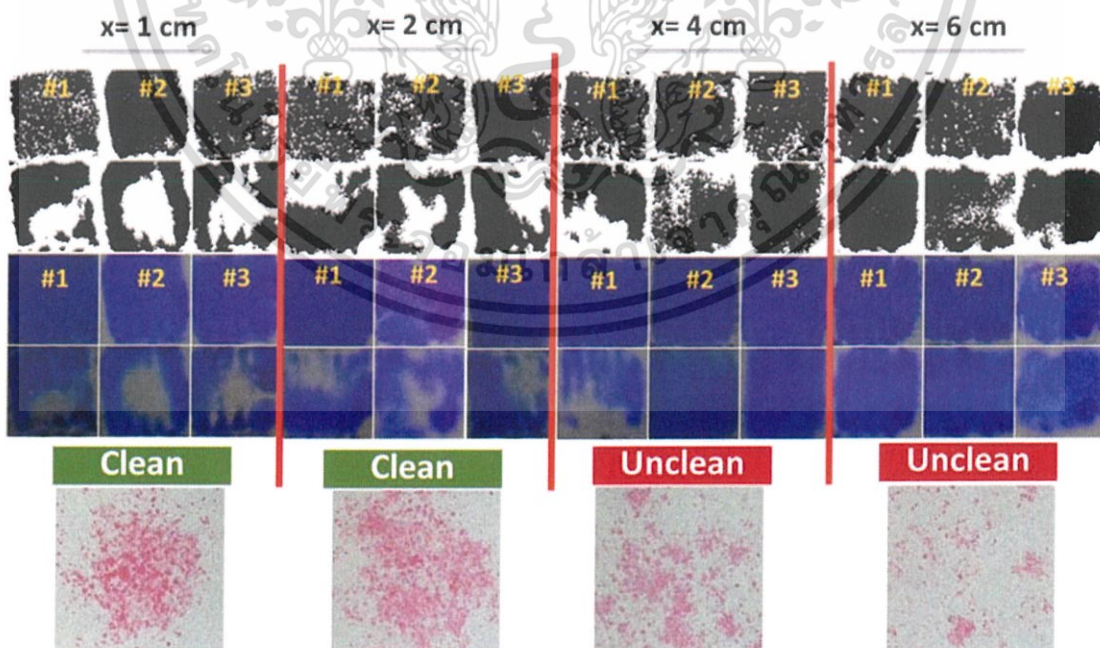
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด

พิจารณาการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52-55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันการฉีดพ่น 11-20 bar มุมการฉีดพ่น 90° ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 1 2 4 และ 6 cm แสดงดังรูปที่ 4.5-4.10

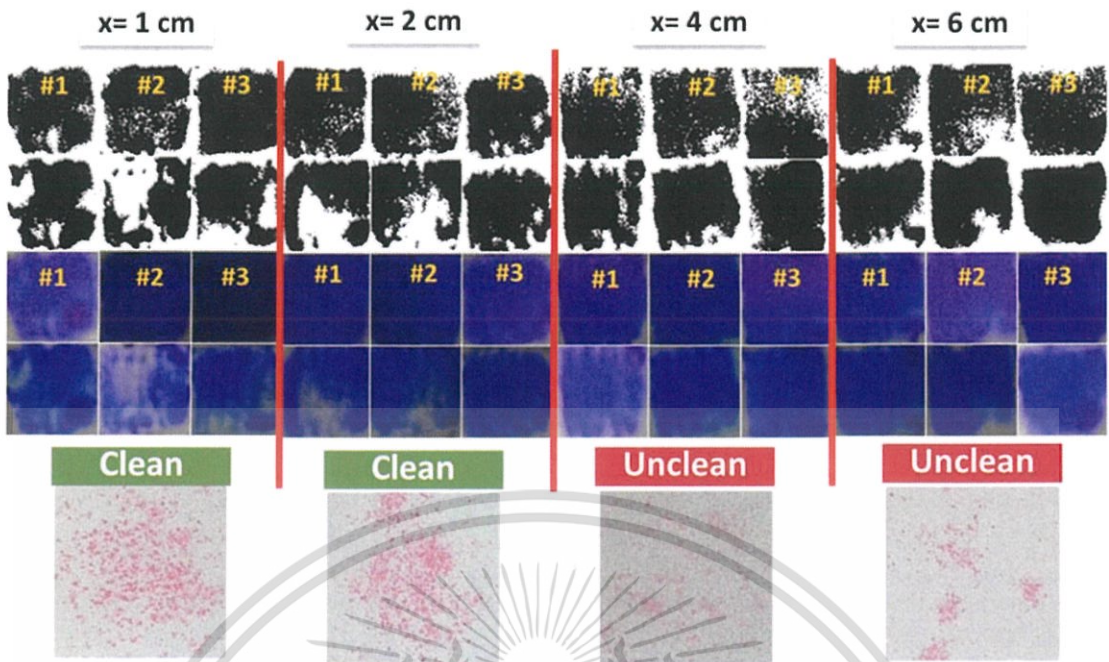


รูปที่ 4.5 การทำความสะอาดเพอร์มาเนน့်บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันการฉีดพ่น 11 bar มุมการฉีดพ่น 90°

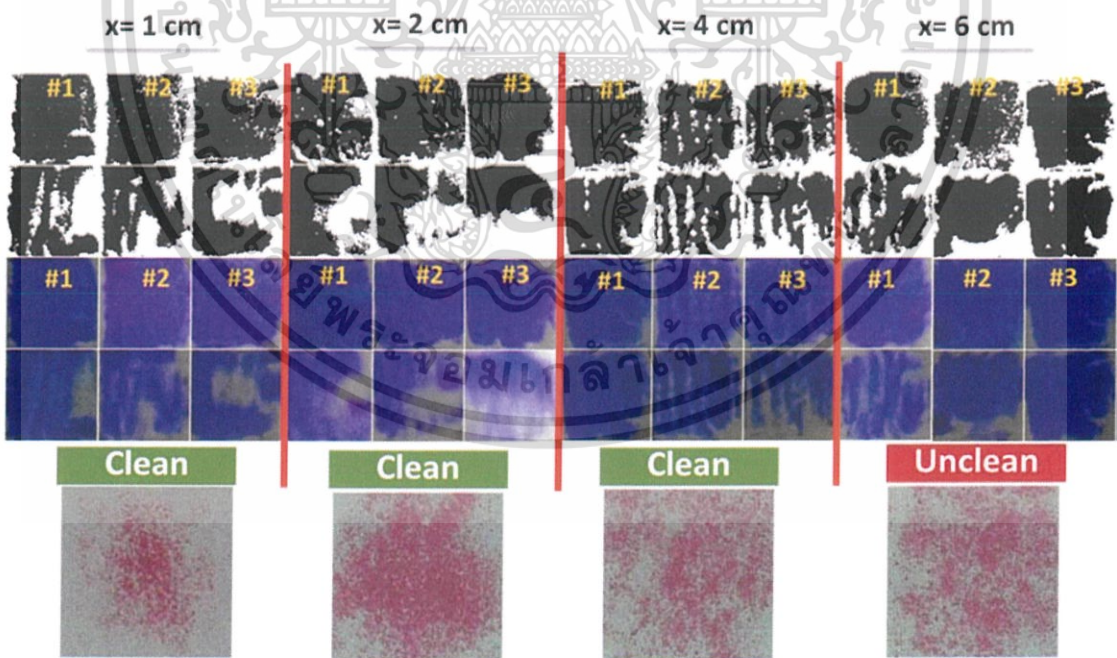


รูปที่ 4.6 การทำความสะอาดเพอร์มาเนน့်บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2

55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันการฉีดพ่น 15 bar มุมการฉีดพ่น 90° เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันทางวิชาการ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

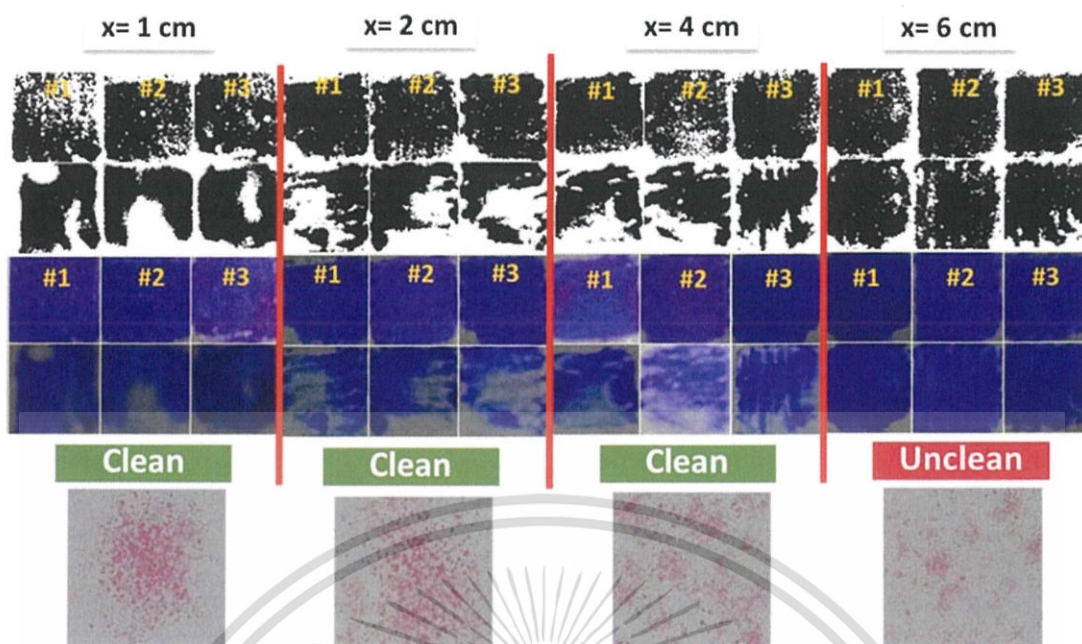


รูปที่ 4.7 การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันการฉีดพ่น 20 bar มุมการฉีดพ่น 90°

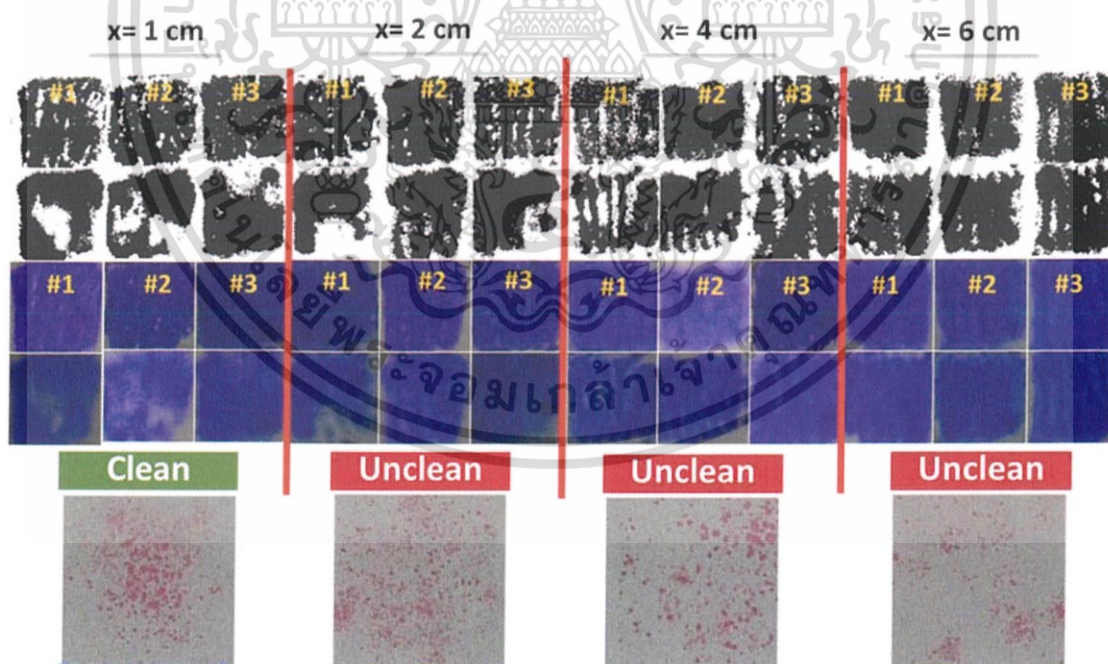


รูปที่ 4.8 การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์ บนแผ่นอลูมิเนียม ที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันการฉีดพ่น 12 bar มุมการฉีดพ่น 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



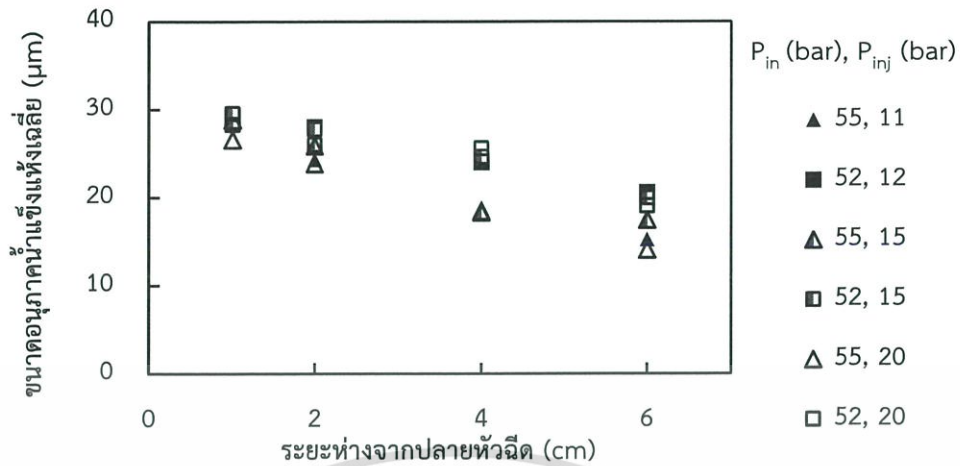
รูปที่ 4.9 การทำความสะอาดเพอร์มาเนนซ์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันการฉีดพ่น 15 bar มุมการฉีดพ่น 90°



รูปที่ 4.10 การทำความสะอาดเพอร์มาเนนซ์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันการฉีดพ่น 20 bar มุมการฉีดพ่น 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

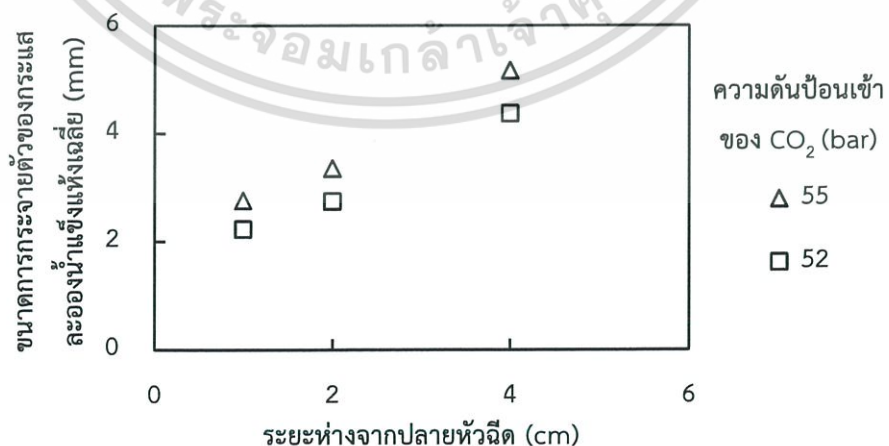
เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคของน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15°C และมุมการพ่น 90°

จากการศึกษาพบว่า การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งสามารถทำความสะอาดหมักเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมได้ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 55 bar ความดันการฉีดพ่น 11 15 และ 20 bar ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 1 และ 2 cm และที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 55 bar ความดันการฉีดพ่น 11 และ 15 bar ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 1 2 และ 4 cm เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้พบว่ามีขนาดอนุภาคน้ำแข็งแห้งใหญ่กว่า 20 μm แต่เมื่อพิจารณาความดันป้อนเข้าของ CO_2 55 bar ความดันการฉีดพ่น 20 bar ไม่สามารถทำความสะอาดได้จะอธิบายในหัวข้ออิทธิพลของความดันการฉีดพ่นต่อไป นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้จะมีขนาดเล็กลงตามระยะห่างจากปลายหัวฉีด

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อระยะห่างจากปลายหัวฉีดเพิ่มขึ้นการกระจายตัวของอนุภาคน้ำแข็งแห้งสูงขึ้นจาก 2 ถึง 5 mm



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากปลายหัวฉีดและการกระจายตัวของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยเมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15°C และมุมการพ่น 90°

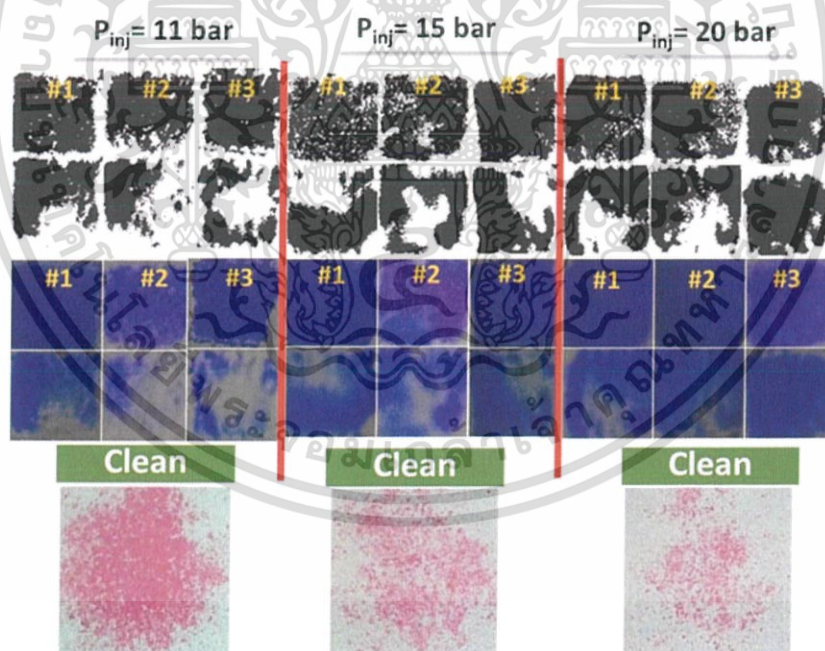
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 อิทธิพลของความดันการฉีดกระแสของน้ำแข็งแห้ง

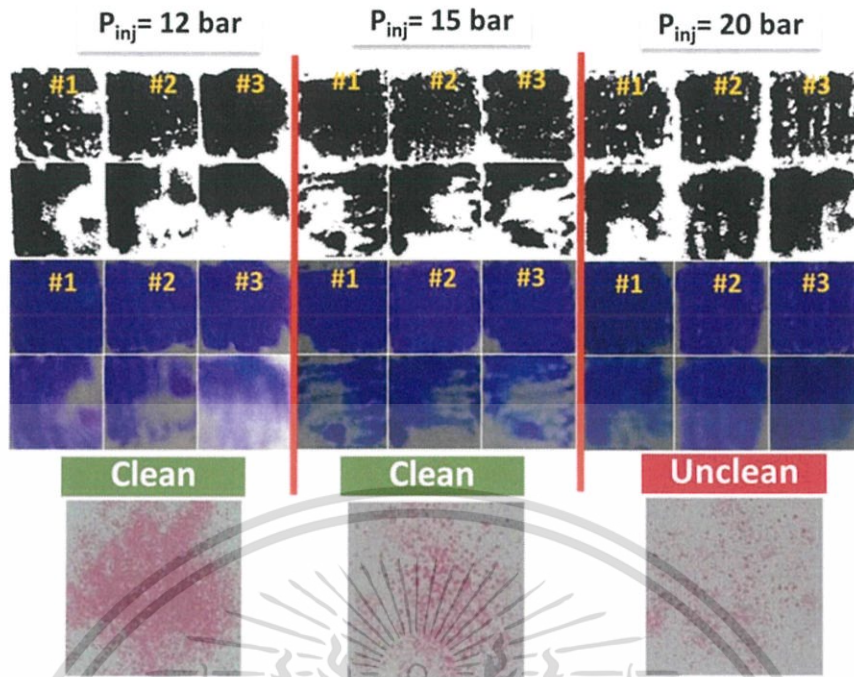
พิจารณาการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52-55 bar ความดันการฉีดพ่น 11-20 bar มุมการฉีดพ่น 90° ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm แสดงดังรูปที่ 4.13-4.14

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความดันการฉีดพ่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้งส่งผลให้ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ปรากฏบนแผ่น Fuji Prescale Film ลดลงเนื่องจากที่ความดันการฉีดพ่นสูงทำให้ปริมาณน้ำแข็งแห้งที่ออกจากหัวฉีดมาก เมื่อน้ำแข็งแห้งกลุ่มแรกที่กระทบกับพื้นผิวชิ้นงานระเหิดไม่ทันจึงทำให้น้ำแข็งแห้งกลุ่มหลังจึงไม่สามารถกระทบกับพื้นผิวชิ้นงานได้โดยตรง อีกทั้งเกิดน้ำแข็งแห้งปกคลุมพื้นผิวทำให้ไม่สามารถทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่อยู่บนพื้นผิวได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 การพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันป้อนเข้า 52 bar ความดันการฉีดพ่น 20 bar ไม่สามารถทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมได้

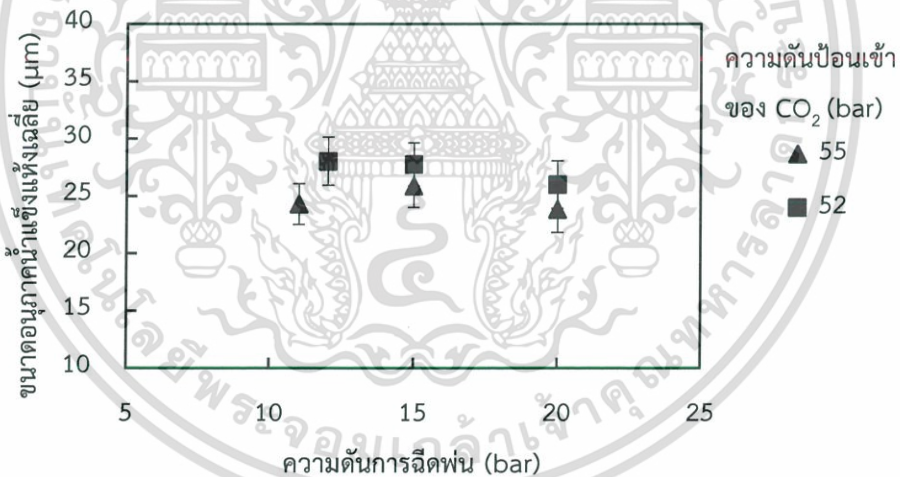
เมื่อพิจารณาผลของความดันการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห้งต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าความดันการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห้งไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยที่ผลิตได้ โดยขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 27 μm



รูปที่ 4.13 การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ระยะการฉีดพ่น 2 cm และมุมการฉีดพ่น 90°



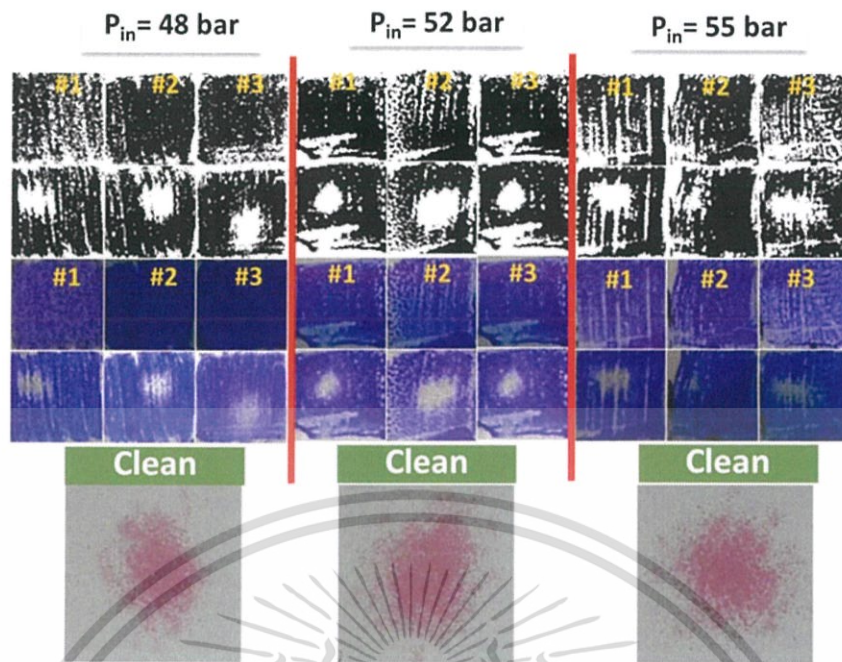
รูปที่ 4.14 การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ระยะการฉีดพ่น 2 cm และมุมการฉีดพ่น 90°



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันการฉีดพ่นกับขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15°C ระยะการพ่น 2 cm และมุมการพ่น 90°

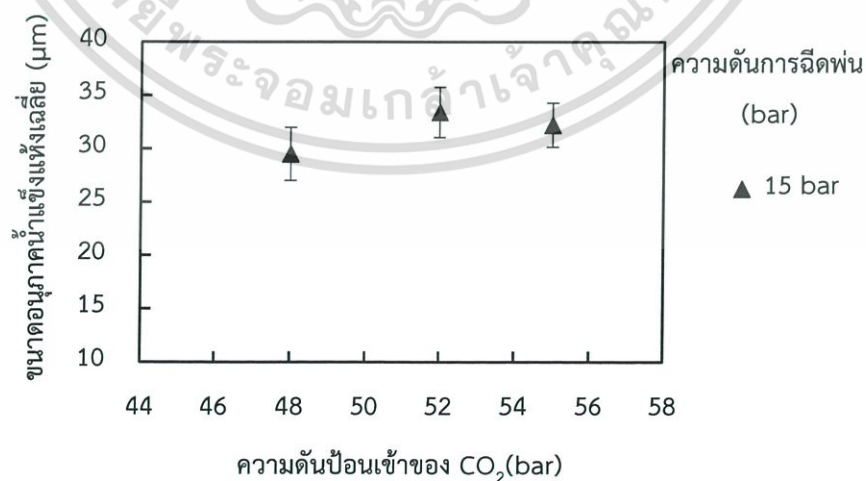
4.1.2.3 อิทธิพลของความดันป้อนเข้าของ CO_2

พิจารณารายการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 48-55 bar ความดันการฉีดพ่น 10 bar มุมการฉีดพ่น 90° ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์บนแผ่นโพลีอิมิเนียมที่ความดันการฉีดพ่น 10 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C ระยะการฉีดพ่น 2 cm และมุมการฉีดพ่น 90°

จากการศึกษาพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 48-55 bar ความดันการฉีดพ่น 10 bar มุมการฉีดพ่น 90° ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm เมื่อเพิ่มความดันป้อนเข้าของ CO_2 ประสิทธิภาพการทำความสะอาดจากกระแสน้ำแข็งแห้งไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเนนท์บนแผ่นโพลีอิมิเนียมได้เนื่องจากความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO_2 มีค่าประมาณ 830 kg/m^3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูป 4.3 และ CO_2 ก่อนการฉีดพ่นมีวัฏภาคเป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงเพียงพอในการผลิตน้ำแข็งแห้ง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันป้อนเข้าของ CO_2 กับขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย

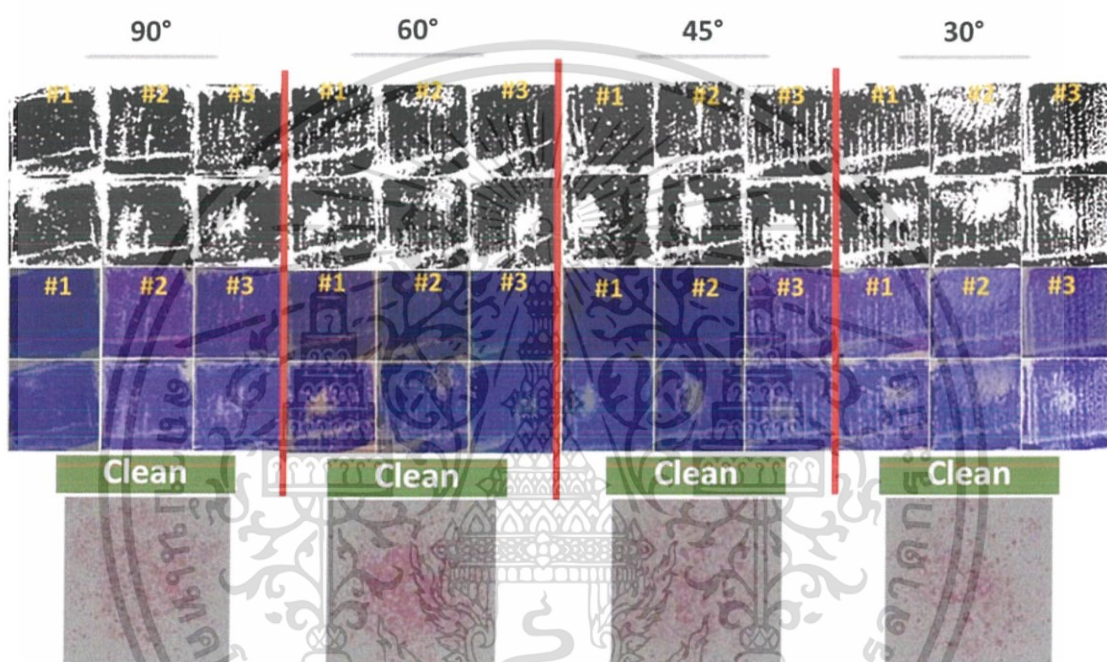
เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10°C ระยะการพ่น 2 cm และมุมการพ่น 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลของความดันป้อนเข้าของ CO_2 ต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าความดันป้อนเข้าของ CO_2 ไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยที่ผลิตได้ โดยขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้มีค่าประมาณ $32 \mu\text{m}$

4.1.2.4 อิทธิพลของมุมการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

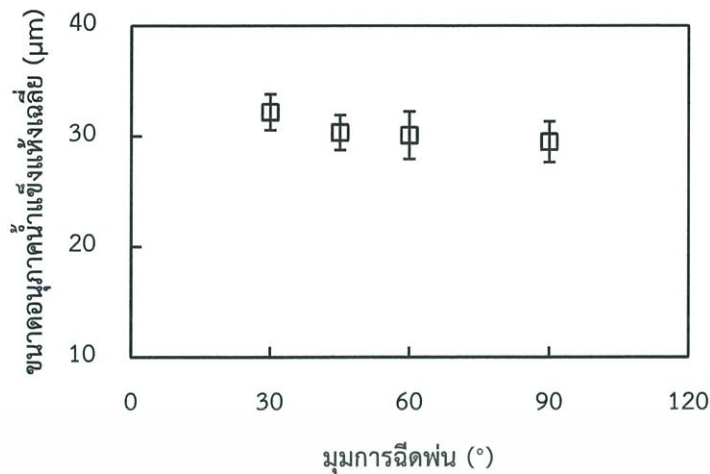
พิจารณาการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10°C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 55 bar ความดันการฉีดพ่น 15 bar มุมการฉีดพ่น 30° - 90° ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm แสดงดังรูปที่ 4.18



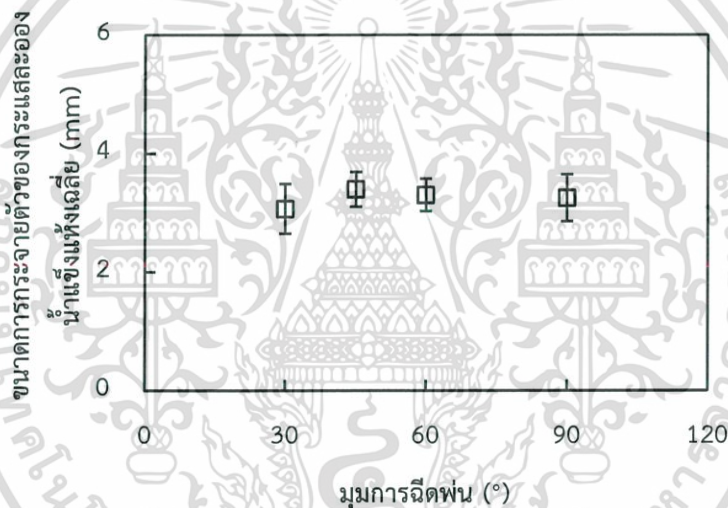
รูปที่ 4.18 การทำความสะอาดเพอร์มาเนนท์ บนแผ่นอลูมิเนียม ที่ความดันการฉีดพ่น 15 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15°C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 55 bar ระยะการฉีดพ่น 2 cm

จากการศึกษาพบว่ามุมการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห้งส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด จากผลการทดลองในรูปที่ 4.18 การพ่นละอองน้ำแข็งแห้งด้วยมุม 90° ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดยังไม่ดีเมื่อเทียบกับการทำความสะอาดที่มุม 30° 45° และ 60° สังเกตจากหมึกเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียม ที่ 90° จางลงเนื่องจากการทำความสะอาดน้อยกว่าการยิงด้วยมุม 30° 45° และ 60° เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งและการกระจายตัวของกระแผลของน้ำแข็งแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.19-4.20 พบว่ามุมการฉีดพ่นนั้นไม่ส่งผลขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งและการกระจายตัวของกระแผลของน้ำแข็งแห้ง ซึ่งขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยประมาณ $30 \mu\text{m}$ และขนาดการกระจายตัวของกระแผลของน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยประมาณ 3 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการฉีดพ่นกับขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 10°C ความดันการป้อนเข้า CO₂ 55 bar และระยะการพ่น 2 cm



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการฉีดพ่นกับขนาดการกระจายตัวของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยเมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 10°C และความดันการป้อนเข้า CO₂ 55 bar

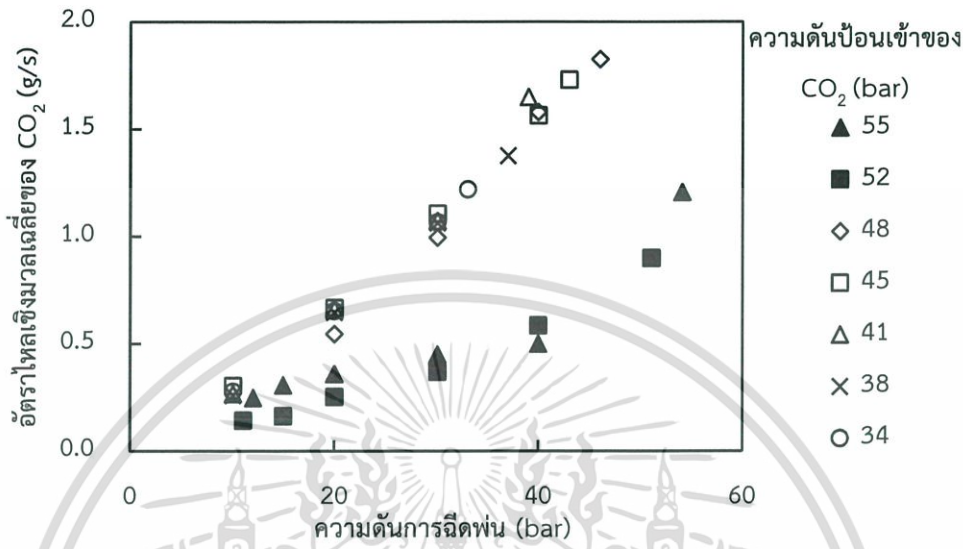
4.1.3 อัตราการไหลเชิงมวลของ CO₂

ศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลของ CO₂ ที่ไหลผ่านรูออริฟิสโดยใช้อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ ที่ 10 และ 15°C ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 34-55 bar ความดันการฉีดพ่น 10-55 bar แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22

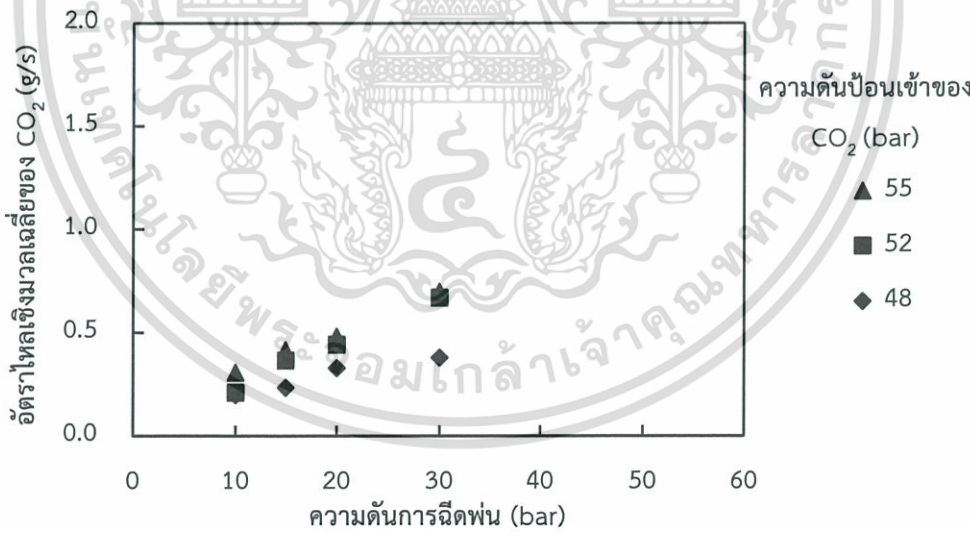
จากรูปที่ 4.21 พบว่าลักษณะของกระแสน้ำแข็งแห้งที่พ่นออกมาจากรูออริฟิสแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่กระแสดละอองน้ำแข็งแห้งประกอบด้วยวิถีภาคก๊าซเพียงอย่างเดียวแสดงดังสัญลักษณ์โปร่งแสง และส่วนที่สองกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งประกอบด้วยวิถีภาคก๊าซและของแข็ง แสดงดังสัญลักษณ์ทึบแสง จากการทดลองพบว่ากระแสดละอองน้ำแข็งแห้งที่ปรากฏแต่วิถีภาคก๊าซอัตราไหลเชิงมวลเฉลี่ยของ CO₂ จะมีค่าสูงกว่ากระแสดละอองน้ำแข็งที่ปรากฏทั้งวิถีภาคก๊าซและของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการทดลองข้างต้นสภาวะที่สามารถทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเน้นท์บนแผ่นอลูมิเนียมได้ คืออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 10 และ 15°C ความดันป้อนเข้าของ CO₂ ตั้งแต่ 48 bar และความดันการฉีดพ่นต่ำกว่า 20 bar พบว่าอัตราไหลเชิงมวลเฉลี่ยของสภาวะที่สามารถทำความสะอาดได้มีค่าประมาณ 0.3 g/s



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันการฉีดพ่นกับอัตราไหลเชิงมวลเฉลี่ยของ CO₂ ที่ความดันป้อนเข้าของ CO₂ ต่างๆ เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 15°C



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันการฉีดพ่นกับอัตราไหลเชิงมวลเฉลี่ยของ CO₂ ที่ความดันป้อนเข้าของ CO₂ ต่างๆ เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 10°C

4.1.4 อิทธิพลของการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

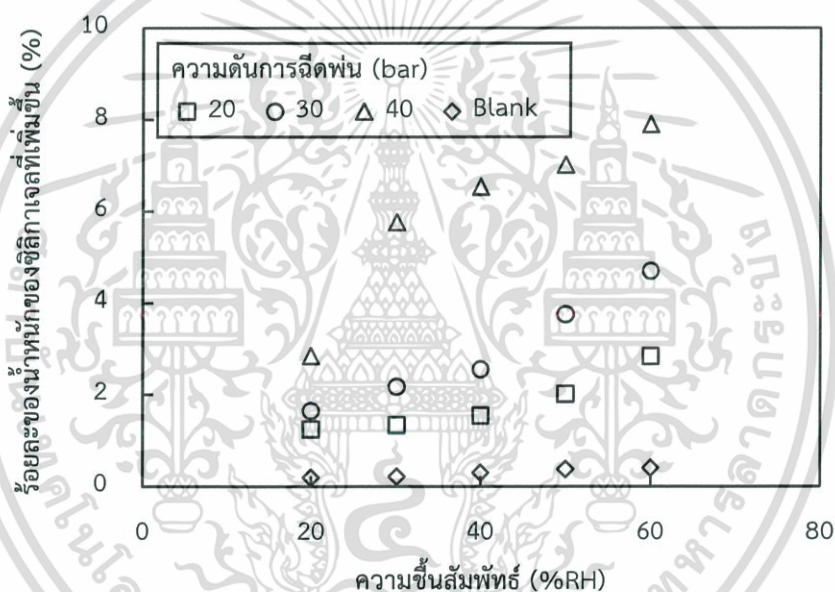
ศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ (%RH) 20 – 60 ความดันการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 20-40 bar ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 41-55 bar และอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนเข้าของ CO_2 ที่ 10°C และ 15°C เพื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการทำ ความสะอาด

4.1.4.1 ผลของความดันการพ่นของกระแสะและองน้ำแข็งแห้ง

ศึกษาความดันการพ่นของกระแสะและองน้ำแข็งแห้ง 20 30 และ 40 bar เมื่อความดัน และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 เท่ากับ 52 bar และ 15°C ตามลำดับ โดยระยะเวลาการพ่นละอง น้ำแข็งแห้ง 1 min พบว่าการเพิ่มความดันการพ่นของกระแสะและองน้ำแข็งแห้งส่งผลให้ซิลิกาเจลมี ปริมาณน้ำที่ดูดซึมเพิ่มมากขึ้นกล่าวคือเกิดการ Recondensation เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ ในการฉีดพ่น พบว่าเมื่อความสัมพันธ์สูงขึ้น ส่งผลให้ซิลิกาเจลมีปริมาณน้ำที่ดูดซึมมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ดังนั้นการใช้ความดันการฉีดพ่นละองน้ำแข็งแห้งที่ต่ำมีความเหมาะสมในการ ทำความสะอาด เนื่องจากผลของการ Recondensation ต่ำกว่า



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของซิลิกาเจลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการพ่นละอง น้ำแข็งแห้ง เมื่อความดันการฉีดพ่น 20-40 bar ความดันป้อนเข้า CO_2 52 bar และ อุณหภูมิป้อนเข้า CO_2 15°C

4.1.4.2 ผลของความดันป้อนเข้าของ CO_2

ศึกษาผลของความดันป้อนเข้าของ CO_2 41 48 52 และ 55 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15°C และความดันการฉีดพ่น 20 bar โดยระยะเวลาการฉีดพ่น 1 min จากการทดลองสามารถ แบ่งผลการศึกษาได้ 2 ส่วน คือ ความดันป้อนเข้าของ CO_2 41 และ 48 bar ซึ่งกระแสะและอง น้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ปรากฏเพียงวัฏภาคก๊าซและความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 และ 55 bar ซึ่ง กระแสะและองน้ำแข็งแห้งปรากฏวัฏภาคของแข็งและก๊าซ พบว่าการพ่นกระแสะและองน้ำแข็งแห้งที่ ปรากฏวัฏภาคของแข็งและก๊าซ (52 และ 55 bar) ส่งผลให้ซิลิกาเจลมีปริมาณน้ำที่ดูดซึมมากกว่าการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ่นกระแสดองน้ำแข็งแห้งที่ปรากฏเพียงวัฏภาคก๊าซ (41 และ 48 bar) อีกทั้งในการพ่นกระแสดองน้ำแข็งแห้งที่ปรากฏวัฏภาคของแข็งและก๊าซ ความดันการพ่นของกระแสดองน้ำแข็งแห้งส่งผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่ดูดซึมในซิลิกาเจลแสดงดังสัญลักษณ์สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.24

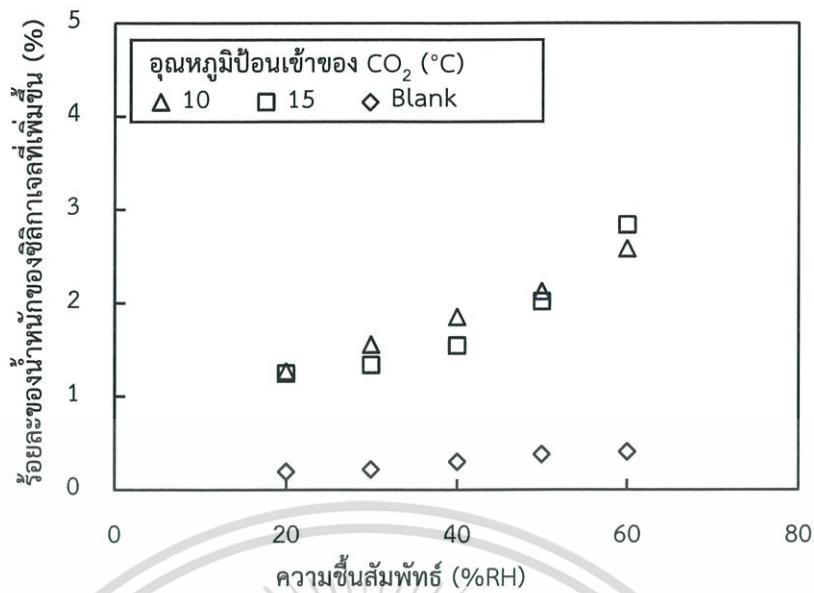


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของซิลิกาเจลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง เมื่อความดันป้อนเข้าของ CO₂ 41-55 bar ความดันการพ่น 20 bar และอุณหภูมิป้อนเข้า CO₂ 15 °C

4.1.4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂

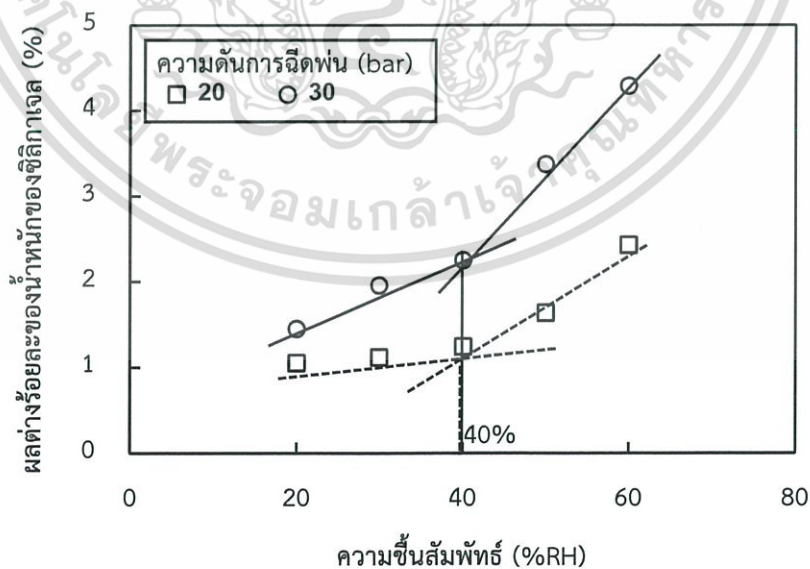
ศึกษาผลของอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 10 และ 15 °C เมื่อความดันป้อนเข้าของ CO₂ 52 bar และความดันการพ่น 20 bar โดยระยะเวลาการพ่น 1 min พบว่าในสภาวะข้างต้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ จาก 15 °C เป็น 10 °C ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซึมได้น้อยมาก กล่าวคืออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการ Recondensation น้อยมากดังแสดงในรูปที่ 4.25

นอกจากนี้การหาสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการทำความสะอาดนั้นควรพิจารณาความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ต่ำเกินไป เนื่องจากสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำส่งผลต่อค่า Electrostatic Discharge (ESD) หรือไฟฟ้าสถิตสูงซึ่งมีผลต่อชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์และการทำความสะอาดที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงก็ส่งผลต่อการเกิด Recondensation มีสิ่งปนเปื้อนเกิดขึ้นหลังการทำความสะอาด ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของซีลีกาเจลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการฟ้นละองน้ำแข็งแห้ง เมื่ออุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10-15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 bar และความดันการฟ้น 20 bar

ผลต่างของรอยละน้ำหนักของซีลีกาเจลที่เพิ่มขึ้นเมื่อฉีดฟ้นละองน้ำแข็งแห้งเทียบกับน้ำหนักซีลีกาเจลที่เพิ่มขึ้นโดยไม่มีการฉีดฟ้นละองน้ำแข็งแห้งที่สภาวะการทำความสะอาดที่ความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 52 bar และ 15 °C ตามลำดับ และความดันการฟ้นของกระแสน้ำแข็งแห้ง 20 และ 30 bar ดังแสดงในรูป 4.26



ปที่ 4.26 ความชื้นสัมพัทธ์ในการทำความสะอาดที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 52 bar และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาผลต่างของร้อยละน้ำหนักของซิลิกาเจล 2 ช่วง ช่วงแรกผลต่างร้อยละน้ำหนักของซิลิกาเจลจะเพิ่มขึ้นน้อยตามความชื้นสัมพัทธ์ เมื่อเทียบกับในช่วงที่สองซึ่งผลต่างร้อยละน้ำหนักของซิลิกาเจลเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งจุดตัดนั้นแสดงถึงความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคือ 40%RH กล่าวคือการ Recondensation ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อพ่นกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 40%RH แต่ต้องใช้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นในการควบคุมความชื้น อีกทั้งส่งผลกระทบต่อค่า ESD และอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และหากพ่นกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 40%RH จะเป็นช่วงที่มีโอกาสเกิดการ Recondensation สูงและทำให้เกิดมีสิ่งปนเปื้อนขึ้นหลังการทำความสะอาด

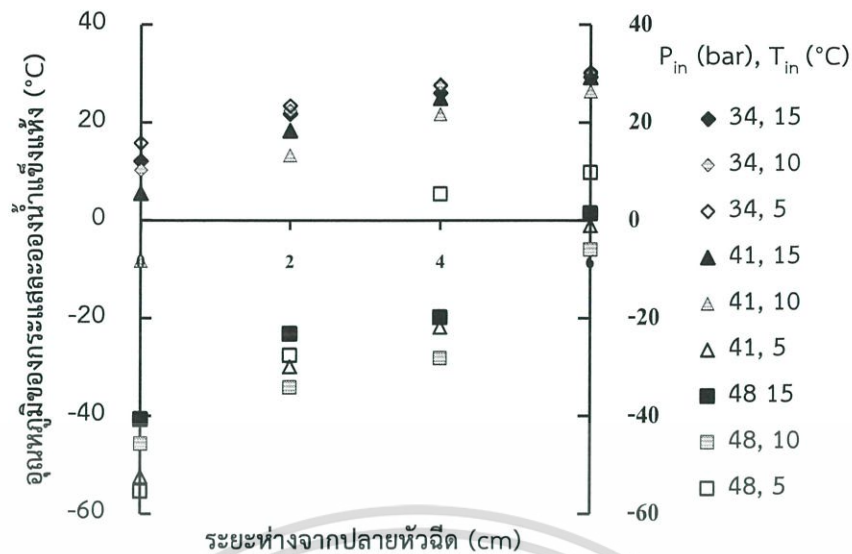
4.2 การอธิบายกลไกการละลายสิ่งสกปรกอินทรีย์โดยค่าพารามิเตอร์การละลาย

งานวิจัยในส่วนนี้ศึกษาเกี่ยวกับการอธิบายกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ในส่วนกลไกการละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของ CO_2 เหลวโดยพารามิเตอร์การละลาย และเนื่องจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของสิ่งปนเปื้อนและค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO_2 เหลวขณะทำความสะอาดเป็นสิ่งจำเป็น แต่ข้อมูลค่าพารามิเตอร์การละลายยังไม่แพร่หลายและมีข้อจำกัด งานวิจัยนี้จึงศึกษาข้อมูลดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกสภาวะการทำความสะอาด อีกทั้งเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO_2 ในสภาวะการทำความสะอาด สามารถประมาณค่าได้จากสมการ (2.12) ซึ่งต้องทราบอุณหภูมิและปริมาตรเชิงโมลของ CO_2 โดยปริมาตรเชิงโมลสามารถหาได้จากสมการสภาวะเมื่อทราบโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

4.2.1 โพรไฟล์อุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งและโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

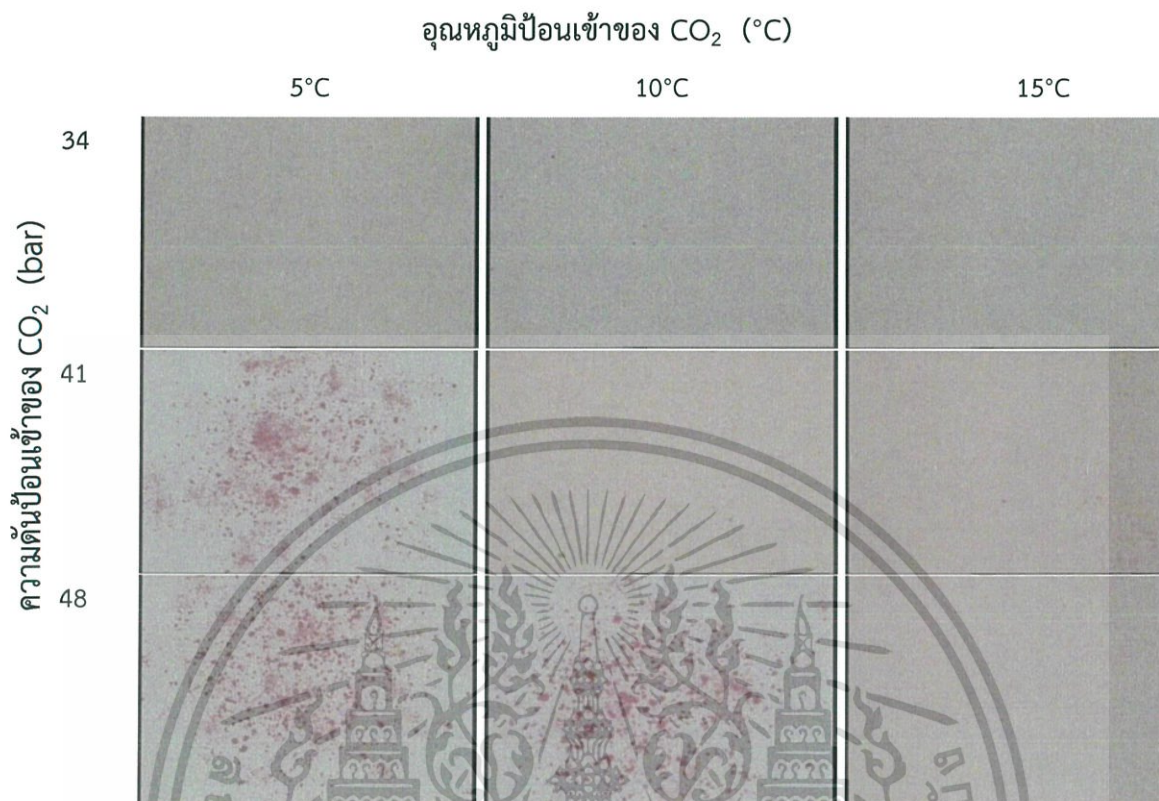
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งกับระยะห่างจากปลายหัวฉีดกับความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 แสดงดังรูปที่ 4.27 ซึ่งอุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งที่สามารถผลิตอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ ควรมีอุณหภูมิต่ำหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิของ CO_2 ที่จุดรวมสาม (Triple point, $-56.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระแสของน้ำแข็งแห้งกับระยะห่างจากปลายหัวฉีด เมื่อความดันป้อนเข้าของ CO_2 อยู่ในช่วง 34-48 bar และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 อยู่ในช่วง 5-15 °C

การทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ในกลไกการเข้าไปละลายสารปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีชีวิตของ CO_2 เหลวที่เกิดขึ้นในระหว่างการกระทบกันระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิว ซึ่งกระบวนการทำความสะอาดจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่ออนุภาค CO_2 กระทบกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด

งานวิจัยนี้ศึกษาการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้แผ่น Fuji Prescale Film เพื่อพิจารณาหาสถานะการทำความสะอาดที่เกิดอนุภาคน้ำแข็งแห้งในกระแสของน้ำแข็งแห้ง โดยพิจารณาจากสีของแผ่น Fuji Prescale Film ระดับ Super Low ที่ระยะการฟ่น 2 cm พบว่าที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 34 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 5, 10 และ 15°C ความดันป้อนเข้าของ CO_2 41 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 10 และ 15°C และ ความดันป้อนเข้าของ CO_2 48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 15°C แผ่น Fuji Prescale Film ไม่ปรากฏสีขึ้น เนื่องจากสภาวะดังกล่าวกระแสของน้ำแข็งแห้งที่ฟ่นออกจากเครื่องฟ่นน้ำแข็งแห้งปรากฏแต่วิถีภาคก๊าซ CO_2 ไม่ปรากฏอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ในขณะที่ความดันป้อนเข้าของ CO_2 41 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 5°C และ ความดันป้อนเข้าของ CO_2 48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO_2 5 และ 10°C ปรากฏสีชมพูเข้ม ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะดังกล่าวกระแสของน้ำแข็งแห้งที่ฟ่นออกจากเครื่องฟ่นน้ำแข็งแห้ง ปรากฏทั้งวิถีภาคก๊าซ CO_2 และอนุภาคน้ำแข็งแห้งซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การปนละอองน้ำแข็งแห้งบนแผ่น Prescale Film ที่ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 34 41 และ 48 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5-15 °C

ดังนั้นสภาวะการทำความสะอาดโดยการละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขี้้ว สามารถดำเนินการได้ที่ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 41 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 °C และ ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 และ 10°C

จากการทดลองพ่นกระแสดลของน้ำแข็งแห้งไปยังแผ่น Fuji Prescale Film ซึ่งแผ่น Fuji Prescale Film ที่ใช้ในการทดลองเป็นแผ่น Fuji Prescale Film ระดับ Super Low ซึ่งจะปรากฏสีชมพูขึ้นเมื่ออนุภาคน้ำแข็งแห้งพุ่งชนแผ่น Fuji Prescale Film ที่ช่วงความดัน 5-24 bar ซึ่งจากการทดลองพบว่า ในสภาวะที่พ่นกระแสดลของน้ำแข็งแห้งและปรากฏสีบนแผ่น Prescale Film สีที่ปรากฏเป็นสีชมพูเข้มที่ระดับสูงสุด หรือความดันของกระแสดลของน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 24 bar

4.2.2 ค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ เหลว

พิจารณาผลของอุณหภูมิของกระแสดลของน้ำแข็งแห้งและผลของความดันที่กระทบชิ้นงาน มาคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ ได้จากสมการ (2.12) จากการทดลอง พบว่า ที่สภาวะความดันป้อนเข้าของ CO₂ 41 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 °C และ ความดันป้อนเข้าของ CO₂ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปเซบระโยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 และ 10°C สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ ในกระบวนการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm เมื่อความดันกระทบบนชิ้นงาน 24 bar

ความดันป้อนเข้าของ CO ₂ (bar)	อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO ₂ (°C)	อุณหภูมิที่กระทบบนชิ้นงาน (°C)	ปริมาตรเชิงโมล (cm ³ /mol)	ค่าพารามิเตอร์การละลาย (MPa ^{0.5})
48	5	-30	40.78	16.82
48	10	-28	41.11	16.66
41	5	-23	42.00	16.27

4.2.3 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การละลาย CO₂ กับค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์

สารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วสามารถละลายสารอินทรีย์ไม่มีขั้วได้ตามหลัก Like Dissolves Like คือ ตัวถูกละลายที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว แต่จะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และตัวถูกละลายที่ไม่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่จะไม่ละลายในตัวทำละลายที่มีขั้วซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้ว แสดงดังตารางที่ 4.2

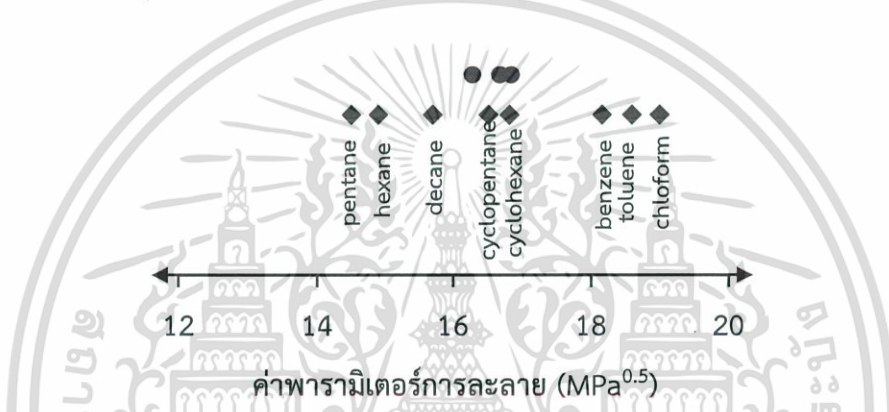
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วที่ 25°C [6]

สารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้ว	ค่าพารามิเตอร์การละลาย (MPa ^{0.5})
Pentane	14.50
Hexane	14.90
Decane	15.70
Cyclopentane	16.50
Cyclohexane	16.80
Benzene	18.60
Toluene	18.16
Chloroform	19.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้ (ตารางที่ 4.2) โดยสามารถใช้ในการทำความเข้าใจป็นอินทรีย์ไม่มีขี้ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์การละลายอยู่ในช่วง 14-19 MPa^{0.5} กับค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ (ตารางที่ 4.1) ที่สภาวะความดันป้อนเข้าของ CO₂ 41 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 °C และ ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 และ 10°C เมื่อระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์การละลายอยู่ในช่วง 16-17 MPa^{0.5} พบว่า ค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ มีค่าอยู่ในช่วงของค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้ ดังนั้นการทำความเข้าใจการละลายโดยการพ่นน้ำแข็งแห้งจึงสามารถทำความเข้าใจป็นอินทรีย์ไม่มีขี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.29

◆ สารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้ ● การพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง



รูปที่ 4.29 ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขี้และค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ เปรียบเทียบกับการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

4.2.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของสิ่งสกปรกสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ซึ่งสามารถหาค่าพารามิเตอร์การละลายได้โดยใช้วิธีพิจารณากลุ่มองค์ประกอบของ Hoftzyer และ Van Krevelen ซึ่งเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายจากสูตรโครงสร้างเคมี ดังจากสมการ (2.8-2.11)

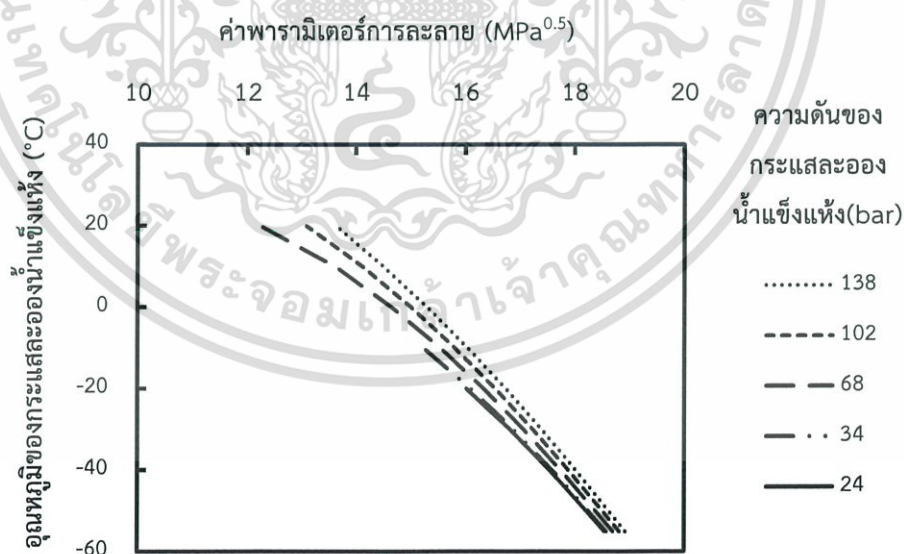
พาราฟินแว็กซ์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมี C_nH_{2n+2} โดยทั่วไปมีจำนวนคาร์บอนในห่วงโซ่โมเลกุล 19-36 อะตอม เมื่อพิจารณาพาราฟินแว็กซ์ที่มีค่า n เท่ากับ 24 พบว่ามีค่าพารามิเตอร์การละลาย แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์การละลายของพาราฟินแว็กซ์

หมู่โครงสร้าง	จำนวน	$\sum F_{di}$ (MJ/m ³).mol ⁻¹	$\sqrt{\sum F_{pi}^2}$ (MJ/m ³).mol ⁻¹	$\delta_h = \sqrt{\sum E_{hi}}$ J.mol ⁻¹	$\sum N_i V_i$ cm ³ .mol ⁻¹
-CH ₃	2	840	0	0	63.4
-CH ₂ -	22	5,940	0	0	365.2
C ₂₄ H ₅₀		6,780	0	0	428.6
			δ	15.82	MPa ^{0.5}

4.2.5 อิทธิพลของความดันและอุณหภูมิของกระแสน้ำแข็งแข็งต่องานละลาย

พิจารณาความดันของน้ำแข็งแข็งที่กระทบชิ้นงานเมื่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ สูงขึ้นที่อุณหภูมิของกระแสน้ำแข็งแข็งคงที่ และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของกระแสน้ำแข็งแข็งที่กระทบชิ้นงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์การละลายมีค่าลดลง ที่ความดันของน้ำแข็งแข็งที่กระทบชิ้นงานคงที่แสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความดันของน้ำแข็งแข็งที่กระทบชิ้นงานกับค่าพารามิเตอร์การละลาย

4.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของการทำความสะอาดโดยเครื่องพ่น ละอองน้ำแข็งแห้ง

การศึกษาในส่วนนี้ เป็นการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์เชิงวิศวกรรม เพื่อใช้ประเมินต้นทุน
ในการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานซึ่งเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งในโครงการนี้ใช้ระยะเวลาในการ
ทำความสะอาดชิ้นงานละ 6 s ต่อชิ้นงาน หรือมีพื้นที่ในการทำความสะอาด 75 mm^2 ต่อชิ้นงาน

4.3.1 รายละเอียดโครงการ

อายุโครงการ	10	year
จำนวนวันทำการ	300	day/year
จำนวนชั่วโมงในการทำความสะอาด	10	hour/day
อัตราผลตอบแทนสูงสุดที่ตอบสนองความพึงพอใจร้อยละ	10	

4.3.2 แผนผังกระแสเงินสดและแผนผังกระแสเงินสดสุทธิ

4.3.2.1 แผนผังกระแสเงินสดและแผนผังกระแสเงินสดสุทธิ

ก. ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น (Capitalized Cost)

การศึกษาการทำความสะอาดชิ้นงานโดยเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งเครื่องพ่นละออง
น้ำแข็งแห้งที่นำมาใช้วิเคราะห์ คือเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง Model KMITL_01 ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น
ของโครงการแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นของโครงการ

รายการ	มูลค่า (baht)
ชุดเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	800,000
ค่าติดตั้ง	80,000
ชุดเครื่องทำความเย็น (อะไหล่สำรอง)	25,000
ค่าโซลินอยด์วาล์ว (อะไหล่สำรอง)	20,000
รวม	925,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ค่าใช้จ่ายรายปี (Annual Operating Cost)

ในการศึกษาค่าใช้จ่ายรายปีเป็นค่าการดำเนินการในการทำความสะอาดชิ้นงาน เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าก๊าซ ค่าแรงงาน ค่าการปรับปรุงกระบวนการ เป็นต้น ซึ่งค่าใช้จ่ายรายปีของการทำความสะอาดชิ้นงานแสดงดังตารางที่ 4.5 รายละเอียดการคำนวณค่าใช้จ่ายรายปีแสดงดังภาคผนวก ฉ

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายรายปีของการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง

รายการ	มูลค่า (baht/year)
ค่าไฟ (3.83 baht/unit)	12,837
ค่าแรงงาน	360,000
ค่าการตรวจเช็คและปรับปรุงกระบวนการ	80,000
ค่า CO ₂ (5 baht/kg)	64,800
รวม	517,637

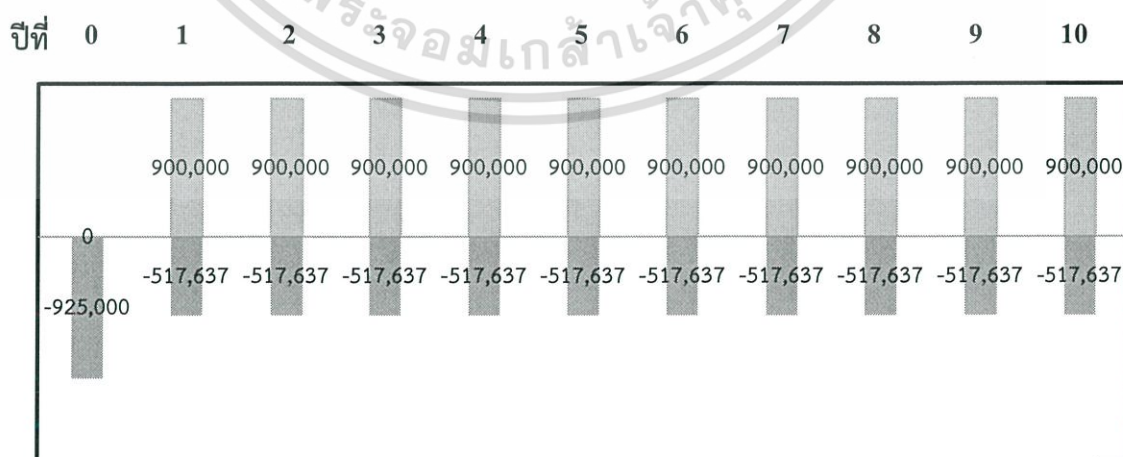
หมายเหตุ ค่าไฟพิจารณาประเภทกิจการขนาดใหญ่ อัตราค่าไฟฟ้าใหม่นี้เริ่มใช้ตั้งแต่ค่าไฟฟ้าประจำเดือนมิถุนายน 2555 เป็นต้นไป

4.3.2.2 กระแสเงินสดเข้าหรือรายรับ

พิจารณารายรับโดยกำหนดให้ค่าใช้จ่ายในการล้างชิ้นงานราคา 0.5 baht ต่อพื้นที่ 75 mm² ซึ่งในโครงการนี้ใน 1 ปี มีพื้นที่ในการทำความสะอาดเท่ากับ 1.35×10^8 mm² คิดเป็นรายรับ 900,000 baht/year

4.3.2.3 แผนผังกระแสเงินสดของการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง

จากข้อมูลกระแสเงินสดเข้า และกระแสเงินสดออก สามารถนำมาเขียนแผนผังกระแสเงินสดของการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง ได้ดังรูปที่ 4.31

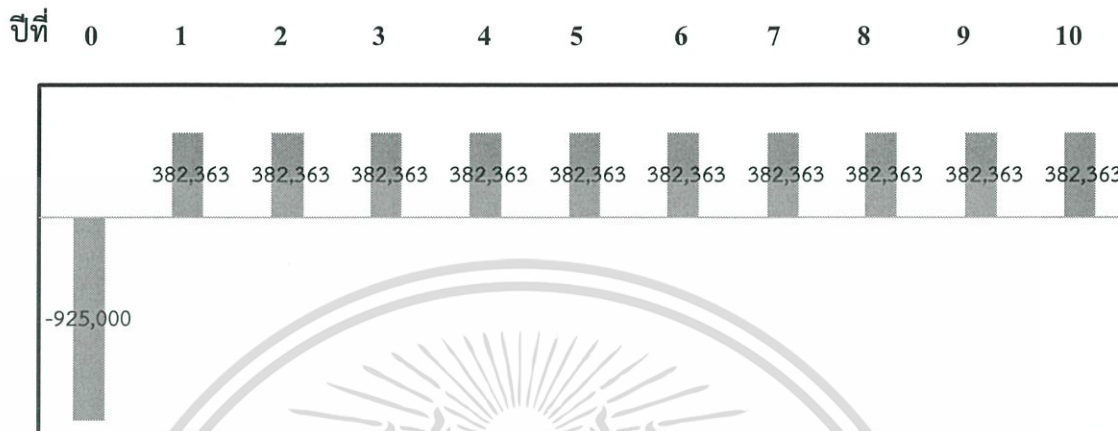


รูปที่ 4.31 แผนผังกระแสเงินสดของการทำความสะอาดโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.4 แผนผังกระแสเงินสดสุทธิของการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

จากข้อมูลกระแสเงินสดเข้าและกระแสเงินสดออก สามารถนำมาเขียนแผนผังกระแสเงินสดสุทธิของการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งได้ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แผนผังกระแสเงินสดสุทธิของการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

4.3.3 การวิเคราะห์มูลค่าโครงการ

การคำนวณเพื่อหามูลค่าโครงการแสดงดังภาคผนวก ฉ ซึ่งผลการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันมูลค่าอนาคต และมูลค่ารายปีแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 มูลค่าโครงการการทำความสะอาดขึ้นงานโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

มูลค่าปัจจุบันในปีที่ 0 (baht)	1,424,430
มูลค่าอนาคตในปีที่ 10 (baht)	3,694,544
มูลค่ารายปี (baht/year)	83,792

4.3.4 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทน (Rate of Return Analysis, ROR)

จากข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิสามารถนำมาหาค่าอัตราผลตอบแทนโดยได้ ซึ่งรายละเอียดการประมาณค่าแสดงดังภาคผนวก ฉ ซึ่งอัตราผลตอบแทนโครงการมีค่าเท่ากับ 40%

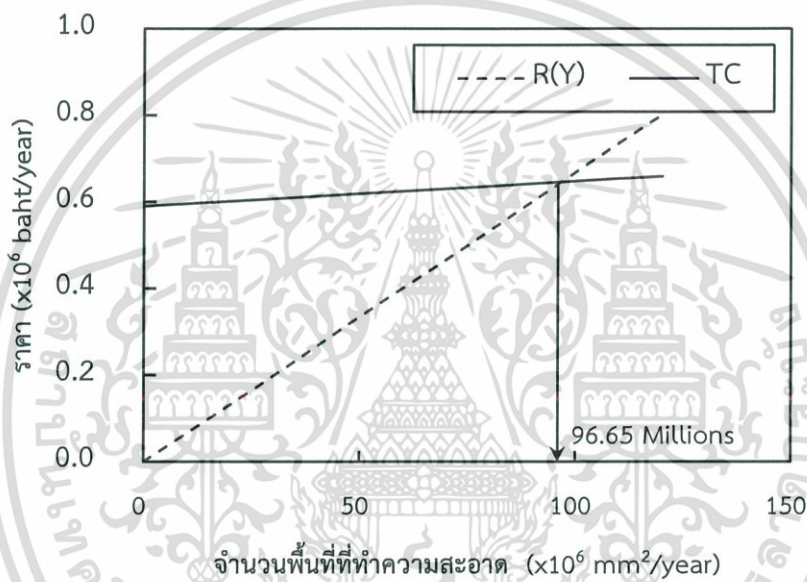
4.3.5 การวิเคราะห์ผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (Benefit/Cost Analysis, B/C)

เป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนของผลประโยชน์สุทธิต่อต้นทุนของโครงการโครงการนั้นนำลงทุนคือโครงการที่มีผลประโยชน์มากกว่าเงินลงทุน ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนได้

ดังแสดงในภาคผนวก ฉ พบว่าผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนของการทำความสะอาดพื้นผิวชั้นงานโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง เท่ากับ 1.35 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 กล่าวคือเป็นโครงการที่เหมาะสมในการลงทุน

4.3.6 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Breakeven Analysis)

การวิเคราะห์ที่ใช้ประเมินค่าของจำนวนของชั้นงานที่ทำความสะอาดได้ต่อปี ซึ่งจะทำให้ผลการดำเนินงานของกิจกรรมนั้นเท่ากับศูนย์คือไม่เกิดผลกำไรหรือขาดทุน เนื่องจากมีรายได้เท่ากับค่าใช้จ่ายพอดี ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิเคราะห์คือสามารถวางแผนการดำเนินงานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งการคำนวณตามภาคผนวก ฉ พบว่าการทำความสะอาดพื้นผิวชั้นงานโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง มีจุดคุ้มทุนเท่ากับ $9.66 \times 10^7 \text{ mm}^2/\text{year}$ แสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 การหาจุดคุ้มทุนของการทำความสะอาดชั้นงานโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

4.3.7 การวิเคราะห์ระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period Analysis)

เป็นการวิเคราะห์การประมาณเวลาที่ได้รับผลรวมของกำไรหรือผลตอบแทนการลงทุน ซึ่งหลังจากเวลาคืนทุนการลงทุนจะได้ผลกำไรจากการดำเนินงาน โดยโครงการที่ดีต้องมีระยะเวลาในการคืนทุนที่เร็ว ซึ่งการคำนวณนั้นแสดงดังภาคผนวก ฉ พบว่าระยะเวลาในการคืนทุนของโครงการ เท่ากับ 2 years 5 months

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง อธิบายกลไกการเข้าไปละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ของ CO₂ เหลวที่เกิดขึ้นในช่วงสั้นๆระหว่างที่อุณหภูมิอากาศน้ำแข็งแห้งกระทบกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด อีกทั้งการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของการใช้เครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาจากเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง Model KMITL_001

5.1.1 ผลของการศึกษาการทำความสะอาดด้วยเครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

อุณหภูมิและความดันป้อนเข้าของ CO₂ ก่อนการฉีดฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ส่งผลต่อความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO₂ ซึ่งการเลือกสภาวะการทำความสะอาดจำเป็นต้องพิจารณาค่าความหนาแน่นป้อนเข้าของ CO₂ สูงประมาณ 800 kg/m³ จึงสามารถผลิตอุณหภูมิอากาศน้ำแข็งแห้งได้ กล่าวคือที่สภาวะอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 10 °C ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 48 52 และ 55 bar และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 52 และ 55 bar

การทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งสามารถทำความสะอาดสิ่งสกปรกจำลองหรือหมึกเพอร์มาเนนท์บนแผ่นอลูมิเนียมได้ โดยพิจารณาอิทธิพลของระยะการฉีดฟ่น ความดันการฟ่น ความดันป้อนเข้าของ CO₂ และมุมการฉีดฟ่น

- อิทธิพลของระยะการฉีดฟ่น พบว่าขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งลดลงจาก 30-10 μm และขนาดการกระจายตัวของกระแผลละอองน้ำแข็งแห้งเพิ่มจาก 2-5 mm ตามระยะการฉีดฟ่นที่เพิ่มขึ้น สามารถทำความสะอาดหมึกเพอร์มาเนนท์ได้เมื่ออนุภาคน้ำแข็งแห้งที่กระทบพื้นผิวมีขนาดใหญ่กว่า 20 μm กล่าวคือที่อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 15 °C ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 52-55 bar ความดันการฉีดฟ่น 11-20 bar ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 1 และ 2 cm

- อิทธิพลของความดันการฉีดฟ่นของกระแผลละอองน้ำแข็งแห้ง พบว่าการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันการฉีดฟ่นต่ำ (10-15 bar) มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงกว่าความดันการฉีดฟ่นสูง (สูงกว่า 15 bar) เนื่องจากที่ความดันการฉีดฟ่นสูงทำให้ปริมาณน้ำแข็งแห้งที่ออกจากหัวฉีดมาก เมื่อน้ำแข็งแห้งกลุ่มแรกกระทบกับพื้นผิวชิ้นงานระเหิดไม่ทันจึงทำให้น้ำแข็งแห้งกลุ่มหลังไม่สามารถกระทบกับพื้นผิวชิ้นงานได้โดยตรงเกิดน้ำแข็งแห้งปกคลุมพื้นผิวทำให้ไม่สามารถทำ

ความสะอาดสิ่งสกปรกที่อยู่บนพื้นผิวได้ อีกทั้งความดันการฉีดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคน้ำแข็งแห้งน้อยมาก

- อิทธิพลของความดันป้อนเข้าของ CO₂ พบว่าความดันการป้อนเข้าของ CO₂ ส่งผลน้อยมากต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ นอกจากนี้ความดันการป้อนเข้า CO₂ ส่งผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพของการทำความสะอาดสิ่งสกปรกในสถานะที่เกิดอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

- อิทธิพลของมุมการฉีดพ่น พบว่ามุมการฉีดพ่นไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้น และพบว่าการใช้มุมการฉีดพ่น 30-60 องศา มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่ดีกว่า 90 องศา

จากการศึกษาพบว่าอัตราไหลเชิงมวลเฉลี่ยของ CO₂ ที่สามารถทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนพื้นผิวได้มีค่าประมาณ 0.3 g/s และความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการทำทำความสะอาดคือ 40%RH

5.1.2 อธิบายกลไกการละลายสิ่งสกปรกอินทรีย์โดยค่าพารามิเตอร์การละลายแข็งแห้ง

การอธิบายกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งในส่วนของ การเข้าไปละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของ CO₂ เหลวซึ่งเกิดขึ้นขณะที่อนุภาคน้ำแข็งแห้งไปชนกับสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วบนพื้นผิวสามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาค่าพารามิเตอร์การละลาย ซึ่งอุณหภูมิและโมเมนต์การชนของกระแสน้ำแข็งแห้งส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ เหลวในการทำทำความสะอาดมีค่าอยู่ในช่วง 16-17 MPa^{0.5} ที่สถานะความดันป้อนเข้าของ CO₂ 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 และ 10°C และความดันป้อนเข้าของ CO₂ 52 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 °C เมื่อระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวนั้นมีค่าใกล้เคียงกับสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วที่ใช้ทำความสะอาดสิ่งสกปรกไม่มีขั้ว เช่น พาราฟินแว็ก ไขมัน สารหล่อลื่น เป็นต้น ดังนั้นการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งสามารถทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วได้

5.1.3 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของการทำความสะอาดโดยเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

พิจารณาโครงการการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง อายุโครงการ 10 ปี พบว่าผลการประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

วิธีการวิเคราะห์	เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	หน่วย
มูลค่าปัจจุบันในปีที่ 0	1,424,430	baht
มูลค่าอนาคตในปีที่ 10	3,694,544	baht
มูลค่ารายปี	83,792	baht/year
อัตราผลตอบแทน	40	%
ผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน	1.35	-
จุดคุ้มทุน	9.66×10^7	mm^2/year
ระยะเวลาคืนทุน	2 years 5 months	

จากผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ตามตารางที่ 5.1 การทำความสะอาดพื้นผิวโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งเป็นโครงการที่ไม่ขาดทุน โดยมีค่าใช้จ่ายในการทำทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงาน $0.00057 \text{ baht/mm}^2$ หรือ 0.057 baht/cm^2

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดของวัสดุที่มีลักษณะซับซ้อน และมีสิ่งปรกที่หลากหลายเพื่อประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดได้หลายประเภท

5.2.2 ศึกษาถึงอิทธิพลของค่าไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งเนื่องจากชิ้นงานที่ทำความสะอาดบางประเภทต้องคำนึงถึงค่า ESD ที่อาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย

5.2.3 ศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยการพิจารณาการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์มีขั้ว โดยการใช้น้ำละลายร่วม (Co-solvent) เพื่อการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์การละลายให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ของสารสิ่งสกปรก

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] Y. Liu et al., “Agglomeration Process of Dry Ice Particles Produced by Expanding Liquid Carbon Dioxide”, Advanced Powder Technology 21, pp 652-657, 2012.
- [3] R. Sherman, J. Grob and W. Whitlock, “Dry Surface Cleaning Using CO₂ Snow”, Journal of Vacuum Science & Technology., B 9, pp. 1970-1977, 1991.
- [4] FUJIFILM Global. “Prescale Measurement Film.” [Online]. Available : <http://www.fujifilm.com/products/prescale/prescalefilm/>. 2010.
- [5] บริษัท ไทยดรายไชน์ จำกัด, “น้ำแข็งแห้ง”, [Online]. Available: <http://www.thaidryice.com>.
- [6] R.W. Welker, R. Nagarajan and C.E. Newberg, “Contamination and ESD Control in High Technology Manufacturing”, Wiley-IEEE Press, 2006.
- [7] K.A. Reinhardt and W. Kern., “Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology”, 2nd Edition, William Andrew Publishing, 2008.
- [8] Direct Industry, [Online]. Available: <http://www.directindustry.com>.
- [9] Unitech Annemasse, “eCO₂ sc”, [Online]. Available: <http://www.unitechannemasse.com/co2/co2-machine.html>.
- [10] S. Banerjee and 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.
- [11] 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.
- [12] Applied Surface Technologies, “Carbon Dioxide Snow Cleaning”, [Online]. Available: <http://www.co2clean.com>.

- [13] R. Kohli and K.L. Mittal. *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Fundamentals and Applied Aspects*. New York: William Andrew. 2008.
- [14] C. Toscano and G. Ahmadi. "Particle Removal Mechanisms in Cryogenic Surface Cleaning" *The Journal of Adhesion*, vol. 79, pp. 175-201, 2003.
- [15] C.M. Hasen, "Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook", CRC Press, London, 2nd ed., 2007.
- [16] 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.
- [17] 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 Modelling*, 2012.
- [18] S.C. Yang and Y.C. Lin, "Removal of SU-8 Photoresist Using Buckling-Driven Delamination Assisted with a Carbon Dioxide Snow Jet for Microfluidics Fabrication", *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17, pp. 2447, 2007.
- [19] J.W. King and L.L. Williams, "Utilization of Critical Fluids in Processing Semiconductors and Their Related Materials", *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 7, pp. 413-424, 2003.
- [20] H. Fu and M.A. Matthews, "Comparison between Supercritical Carbon Dioxide Extraction and Aqueous Surfactant Washing of an Oily Machining Waste", *Journal of Hazardous Materials* 67(2), pp. 197-213, 1999.
- [21] สิวซ์ เต็งสุวรรณ และ สุรัตน์ อารีรัตน์. "การศึกษากระบวนการผลิตละอองลอยของคาร์บอนไดออกไซด์เย็นยิ่งยวดผ่านกระบวนการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สัน," *วิศวกรรมลาดกระบัง* 28 (3), 2553.
- [22] R. Span and W. Wagner, "A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa", *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, pp. 1509-1596, 1996.

- [23] Y. Liu et al., “Size Measurement of Dry Ice Particles Produced from Liquid Carbon Dioxide”, *Journal of Aerosol Science* 48, pp. 1-9, 2012.
- [24] M. M. Hills, “Mechanism of surface charging during CO₂ jet spray cleaning”, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 13, pp. 412-420, 1915.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

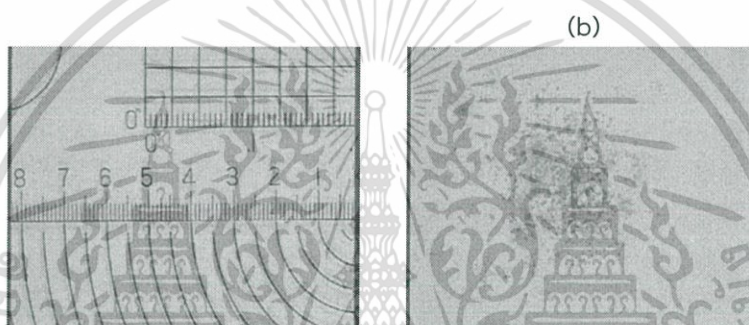
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวัดขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งโดยใช้โปรแกรม Image J

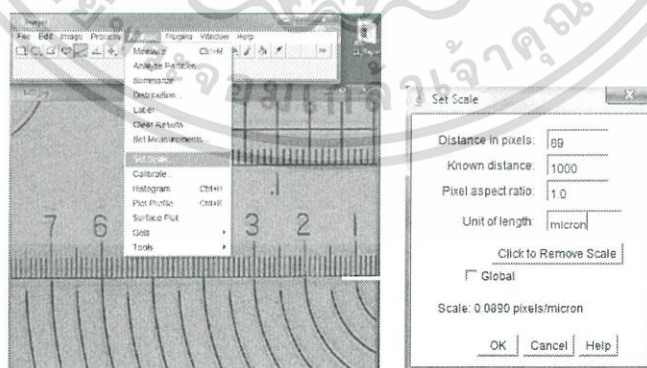
โปรแกรม Image J เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดขนาดของวัตถุจากภาพ โดยจากการศึกษาได้ใช้โปรแกรม Image J ในการวัดขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง และการกระจายตัวของกระแผลของน้ำแข็งแห้งบนแผ่น Fuji Prescale Film หลังจากการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งมีขั้นตอนในการวัดขนาดดังนี้

1. ถ่ายรูป Scale อังอิง และแผ่น Fuji Prescale film ด้วยกล้องไมโครสโคป แสดงดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 (a) Scale อังอิง (b) แผ่น Fuji Prescale Film ที่ได้จากการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

2. เปิดโปรแกรม Image J เปิดรูป Scale เพื่อทำการตั้ง Scale โดยการลาก Scale ให้เท่ากับ Scale อังอิงที่ทราบค่า โดยกด Set Scale ในแถบ Analyze โดยใส่เลขที่กำหนดค่าให้กับความยาวของเส้นที่ลากไว้มีค่า 1000 ในหน่วย μm แล้วกดตกลง แสดงดังรูปที่ ก-2

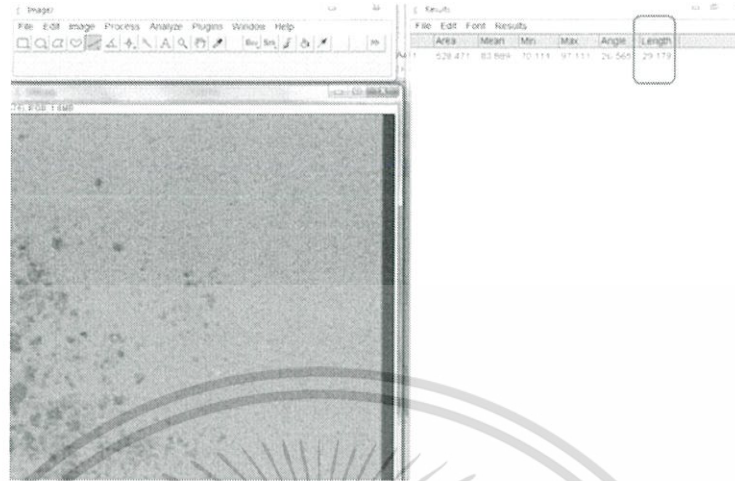


รูปที่ ก-2 การตั้งค่า Set Scale

3. เริ่มต้นการวัดขนาดของอนุภาคหรือการกระจายตัวของกระแผลของน้ำแข็งแห้ง โดยการเปิดรูปภาพ Fuji Prescale Film ที่ได้จากการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ลากเส้นตรงจากขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านหนึ่งไปยังขอบอีกด้านหนึ่งของจุดสีแดงบนแผ่นฟิล์มหลังจากนั้นกด Ctrl+M โปรแกรมก็จะแสดงผลของการวัดขนาด แสดงดังรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 การวัดค่าขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

4. ทำซ้ำวัดค่าขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง 30-50 ค่าต่อ 1 สภาวะการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

หลักการใช้งานแผ่น Fuji Scale Film

แผ่น Fuji Prescale Film เป็นฟิล์มวัดแรงดัน ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของฟิล์มพอลิเอสเทอร์ สามารถวัดขนาดอนุภาคและ impact stress ได้ประกอบด้วย 6 ประเภท ดังแสดงในตาราง ข-1 ซึ่งในการศึกษาได้ใช้แผ่น Fuji Prescale Film ระดับ Super Low

ตารางที่ ข-1 ประเภทของแผ่น Fuji Prescale Film

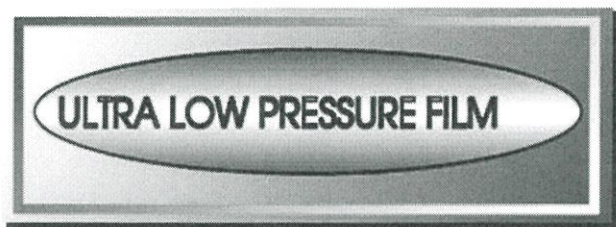
ประเภทของ Film	ช่วงของความดัน (psi)
Ultra Low	28 – 85
Super Low	70 – 350
Low	350 – 1,400
Medium	1,400 – 7,100
High	7,100 – 18,500
Super High	18,500 – 43,200



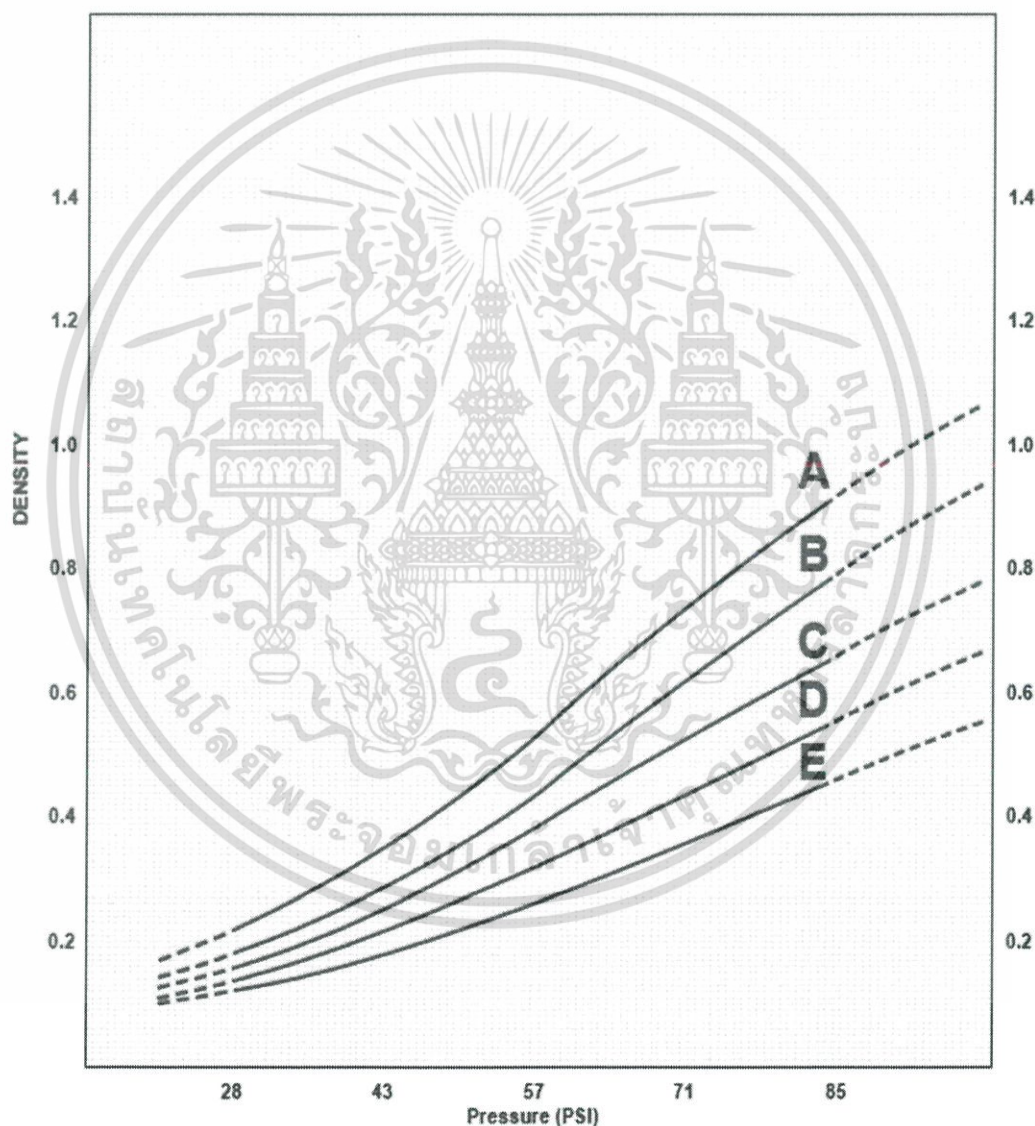
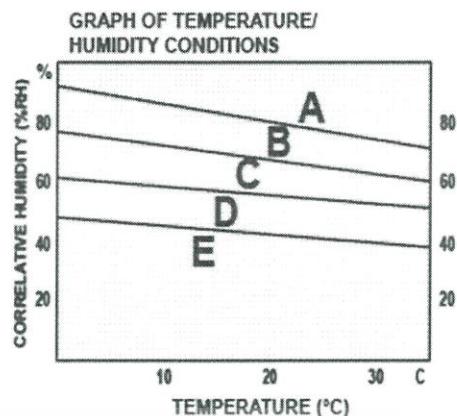
PRESCALE
Color Correlation Chart

รูปที่ ข-1 แถบวัดสีของแผ่น Fuji Prescale Film

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



momentary exposure



รูปที่ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของ Fuji Prescale Film และความดันของแรงกดบนแผ่นฟิล์ม

ซึ่งความดันที่ต้องการวัดจะแสดงออกมาในลักษณะความเข้มของสี ถ้าหากสีเข้มมากแสดงว่าบริเวณนั้นมีความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ข้อมูลขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ข้อมูลผลการทดลองการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งแสดงดังตารางที่ ค-1
ซึ่งวัดขนาดอนุภาคโดยโปรแกรม Image J

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลของขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ซึ่งมุมการฉีดพ่นกระแสะละอองน้ำแข็งแห้ง 90°

อุณหภูมิ ป้อนเข้าของ CO ₂ (°C)	ความดัน ป้อนเข้าของ CO ₂ (bar)	ระยะการพ่น (cm)	ความดันการฉีด พ่น (bar)	ขนาดอนุภาค น้ำแข็งแห้งเฉลี่ย (µm)
15	52	1	12	28.57
			15	29.54
			20	28.30
		2	12	28.04
			15	27.76
			20	26.00
	55	4	12	24.03
			15	24.62
			20	25.59
		6	12	20.58
			15	19.98
			20	19.05
	55	1	11	28.75
			15	28.82
			20	26.57
		2	11	24.31
			15	25.89
			20	23.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลของขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ซึ่งมุมการฉีดพ่นกระแสะองน้ำแข็งแห้ง 90°

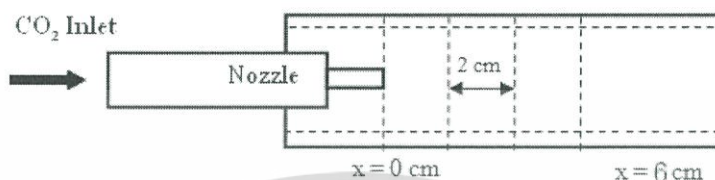
อุณหภูมิ ป้อนเข้าของ CO ₂ (°C)	ความดัน ป้อนเข้าของ CO ₂ (bar)	ระยะการพ่น (cm)	ความดันการฉีด พ่น (bar)	ขนาดอนุภาค น้ำแข็งแห้งเฉลี่ย (µm)
15	55	4	11	18.81
			15	18.33
			20	18.45
		6	11	15.21
			15	17.46
			20	14.07
10	48	2	10	28.66
			15	29.49
	52		10	29.02
			15	33.39
	55		10	30.92
			15	32.21

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลของขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่มีมุมการฉีดพ่นต่าง

อุณหภูมิ ป้อนเข้าของ CO ₂ (°C)	ความดัน ป้อนเข้าของ CO ₂ (bar)	ระยะการ พ่น (cm)	ความดัน การฉีดพ่น (bar)	มุมการฉีด พ่น (°)	ขนาดอนุภาค น้ำแข็งแห้งเฉลี่ย (µm)
10	52	2	15	90	29.49
				60	30.08
				45	30.34
				30	32.18

ภาคผนวก ง

**ข้อมูลผลการทดลองโปรไฟล์อุณหภูมิของ
กระแสละอองน้ำแข็งแห้ง**



รูปที่ ง-1 แผนภาพการทดลองหาโปรไฟล์ของอุณหภูมิ

ตารางที่ ง-1 ข้อมูลโปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง

ความดัน ป้อนเข้าของ CO ₂ (bar)	อุณหภูมิ ป้อนเข้าของ CO ₂ (°C)	ระยะการพ่น (cm)			
		0	2	4	6
34	5	15.8	23.4	27.6	30.1
34	10	10.3	22.5	27.9	30.5
34	15	12.1	21.8	26.0	29.4
41	5	-52.4	-29.9	-21.8	-1.0
41	10	-8.3	13.4	21.7	26.4
41	15	5.5	18.3	25.0	29.3
48	5	-55.4	-27.6	5.4	9.8
48	10	-45.6	-34.1	-28.2	-5.9
48	15	-40.7	-23.2	-19.8	1.4

ภาคผนวก จ
การคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของ
คาร์บอนไดออกไซด์เหลว

สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ เหลวได้จากสมการ 2.12

$$\delta^2 = \left[\frac{\delta_{dref}}{\left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{-1.25}} \right]^2 + \left[\frac{\delta_{pref}}{\left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{-0.5}} \right]^2 + \left[\frac{\delta_{href}}{\exp\left(-1.32 \times 10^{-3}(T_{ref} - T) - \ln\left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{0.5}\right)} \right]^2 \quad (2.12)$$

เมื่อ δ_{dref} คือ ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนไม่มีขั้วอ้างอิง (15.6 MPa^{0.5})

δ_{pref} คือ ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนมีขั้วอ้างอิง (5.2 MPa^{0.5})

δ_{href} คือ ค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนพันธะไฮโดรเจนอ้างอิง (5.8 MPa^{0.5})

V_{ref} คือ ปริมาตรเชิงโมลอ้างอิง (39.13 cm³/mole)

T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิง (298.15 K)

จากการทดลองค่าความดันกระแทกชั้นงาน 24 bar และทราบอุณหภูมิที่กระแทกชั้นงาน สามารถนำมาหาค่าปริมาตรเชิงโมลได้ R. Span and W. Wagner [22] เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่กระแทกชั้นงานและความดันที่กระแทกชั้นงานมาประมาณค่าพารามิเตอร์การละลาย แสดงดังตารางที่ 4.1

ตัวอย่าง ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 48 bar และอุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 °C

$$\delta^2 = \left[\frac{15.6}{\left(\frac{39.13}{40.78}\right)^{-1.25}} \right]^2 + \left[\frac{5.2}{\left(\frac{39.13}{40.78}\right)^{-0.5}} \right]^2 + \left[\frac{5.8}{\exp\left(-1.32 \times 10^{-3}(298.15 - 278.15) - \ln\left(\frac{39.13}{40.78}\right)^{0.5}\right)} \right]^2$$

$$\delta^2 = 16.82 \text{ MPa}^{0.5}$$

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์การละลายของ CO₂ เหลวที่ความดันป้อนเข้าของ CO₂ 48 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของ CO₂ 5 °C ระยะการพ่น 2 cm เท่ากับ 16.82 MPa^{0.5}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ฉ.1 การประมาณค่าใช้จ่ายรายปี

1) ค่าไฟฟ้า

พิจารณาจากระบบทำความเย็นเป็นหลัก กำลังไฟฟ้า 1.25 hp ซึ่งคิดเป็นค่าไฟฟ้า 11.19 unit/day และเมื่อพิจารณาค่าไฟฟ้า 3.83 baht/unit พบว่าค่าไฟฟ้าในกระบวนการทำความสะอาดเท่ากับ 12,837 baht/year

2) ค่าแรงงาน

โครงการนี้พิจารณาการทำความสะอาดโดยเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 10 hours แบ่งเป็นการทำงาน 2 กะ ดังนั้นคนงาน 2 คน ค่าใช้จ่ายเดือนละ 15,000 baht/person ดังนั้นค่าแรงงานเท่ากับ 360,000 baht/year

3) ค่าการตรวจเช็คและปรับปรุงกระบวนการ

ค่าการตรวจเช็คและปรับปรุงกระบวนการ พิจารณาเป็นร้อยละ 10 ของราคาชุดเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ดังนั้นค่าการตรวจเช็คและปรับปรุงกระบวนการ เท่ากับ 80,000 baht/year

4) ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

พิจารณาค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ราคา 5 baht/kg (พิจารณาเมื่อสั่งซื้อในนามของโรงงาน) และการพ่นทำความสะอาดโดยน้ำแข็งแห้งมีอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 1 g/s ดังนั้นค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 64,800 baht/year

ฉ.2 วิธีการคำนวณมูลค่าปัจจุบัน (Present worth Analysis, PW)

ใช้ข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิและ ค่า P/F factor หามูลค่าปัจจุบันในปีที่ 0 ที่ MARR เท่ากับ 10 % ซึ่งแสดงดังตารางที่ ฉ-1

ตารางที่ ฉ-1 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันของโครงการ

ปีที่ (n)	P/F,10%, n	การทำความสะอาดพื้นผิวโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	
		กระแสเงินสดสุทธิ(baht)	มูลค่าปัจจุบัน(baht)
0	1	-925,000	-925,000
1	0.9091	382,363	347,606
2	0.8264	382,363	315,985
3	0.7513	382,363	287,269
4	0.6830	382,363	261,154
5	0.6209	382,363	237,409
6	0.5645	382,363	215,844
7	0.5132	382,363	196,229
8	0.4665	382,363	178,372
9	0.4241	382,363	162,160
10	0.3855	382,363	147,401
มูลค่าปัจจุบันรวม			1,424,430

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.3 การคำนวณมูลค่าในอนาคต (Future worth Analysis, FW)

ใช้ข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิและ ค่า F/P factor หามูลค่าในอนาคตในปีที่ 10 ที่ MARR เท่ากับ 10 % ซึ่งแสดงในตารางที่ ฉ-2

$$FW = PW (\text{ปีที่ } 0) \times (F/P, 10\%, 10)$$

โดย FW คือ มูลค่าในอนาคตในปีที่ 10 (baht)

PW คือ มูลค่าในปัจจุบันในปีที่ 0 (baht)

(F/P, 10%, 10) คือ แฟกเตอร์การคำนวณหามูลค่าในอนาคตในปีที่ 10 โดยใช้ข้อมูลมูลค่าปัจจุบันในปีที่ 0 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.5937

ตารางที่ ฉ-2 การคำนวณมูลค่าในอนาคตของโครงการ

โครงการ	มูลค่าในปัจจุบัน ในปีที่ 0	(F/P, 10%, 10)	มูลค่าในอนาคต ในปีที่ 10
การทำความสะอาดพื้นผิว โดยการพ่นละออง น้ำแข็งแห้ง	1,424,430	2.5937	3,694,544

ฉ.4 การคำนวณมูลค่ารายปี (Annual worth Analysis, AW)

มูลค่ารายปี(AW) = - ค่าต้นทุนรายปี (CR) + ค่าดำเนินการรายปี (A of AOC)

1) การคำนวณหาค่าต้นทุนรายปี

ต้นทุน (P) เท่ากับ 925,000 baht

มูลค่าซาก (S) เท่ากับ 40,000 baht (5% ของราคาชุดเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง)

$$\begin{aligned} \text{ค่าต้นทุนรายปี} &= -P(A/P, i, n) + S(A/F, i, n) \\ &= -925,000(A/P, 10\%, 10) + 40,000(A/F, 10\%, 10) \\ &= -148,034 \text{ baht/year} \end{aligned}$$

2) การคำนวณค่าดำเนินการรายปี

$$\begin{aligned} \text{ค่าดำเนินการรายปี} &= \text{มูลค่าปัจจุบันในปีที่ } 0 \times (A/P, 10\%, 10) \\ &= 1,424,430 \times 0.1628 \\ &= 231,826 \text{ baht/year} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น มูลค่ารายปี} &= -148,034 + 231,826 \\ &= 83,792 \text{ baht/year} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.5 การคำนวณอัตราผลตอบแทน (Rate of Return Analysis, ROR)

ใช้ข้อมูลจากกระแสเงินสดสุทธิ

$$0 = -PW_D + PW_R$$

โดย PW_D (Disbursements) คือ มูลค่าปัจจุบันของรายจ่าย (baht)

PW_R (Receipts) คือ มูลค่าปัจจุบันของรายรับ (baht)

ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ ฉ-3

ตารางที่ ฉ-3 คำนวณหาค่าอัตราผลตอบแทนของโครงการ

i value , %	PW_D (baht)	เครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งแห้ง	
		PW_R (baht)	PW ที่ i (baht)
0	925,000	3,823,631	2,898,631
10	925,000	2,349,456	1,424,456
20	925,000	1,603,047	678,047
30	925,000	1,182,087	257,087
40	925,000	923,554	-1,446
50	925,000	751,407	-173,593

ประมาณค่าอัตราผลตอบแทนที่มูลค่าปัจจุบันเท่ากับ 0 ด้วยการประมาณค่าระหว่างอัตราผลตอบแทนที่ 30% -40%

อัตราผลตอบแทน	$-P_W D + P_W R$
30	257,087
X	0
40	-1,446

ดังนั้น อัตราผลตอบแทนของโครงการเท่ากับ 39.92% หรือประมาณ 40%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.6 การวิเคราะห์ผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (Benefit/Cost Analysis, B/C)

การคำนวณหาค่าผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนแสดงดังตารางที่ ฉ-4

ตารางที่ ฉ-4 คำนวณหาผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน

	ปีที่	เครื่องฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	
		PW ₀ ของผลกำไร (baht)	PW ₀ ของเงินลงทุน (baht)
Investment	0	-	925,000
Cost	1	818,190	470,584
	2	743,760	427,775
	3	676,170	388,901
	4	614,700	353,546
	5	558,810	321,401
	6	508,050	292,206
	7	461,880	265,651
	8	419,850	241,478
	9	381,690	219,530
	10	346,950	199,549
รวม		5,530,050	4,105,620
ผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน			1.35

ฉ.7 การคำนวณจุดคุ้มทุน (Breakeven Analysis)

การคำนวณจุดคุ้มทุนของโครงการ สามารถคำนวณได้ดังนี้

1) การคำนวณหาสมการเส้นตรงต้นทุนรวม

กำหนดให้ Q คือ พื้นที่ที่ทำความสะอาดต่อปี

ค่าต้นทุนคงที่ (Fixed Cost; F)

ต้นทุนคงที่ (F) = ราคาต้นทุน + ค่าตรวจเช็คและปรับปรุงกระบวนการ

ราคาต้นทุน = 975,000(A/P, 10%, 10)

= 150,544 baht/year

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ค่าตรวจเช็คและปรับปรุงกระบวนการ} &= 80,000 \text{ baht/year} \\ \text{ค่าแรงงาน} &= 360,000 \text{ baht/year} \\ \text{ต้นทุนคงที่ (F)} &= 150,544 + 80,000 + 360,000 \\ &= 590,544 \text{ baht/year} \end{aligned}$$

2) การคำนวณค่าต้นทุนแปรผัน (Variable Cost; V)

ค่าการดำเนินการรายปีไม่รวมค่าตรวจเช็คและปรับปรุงกระบวนการและค่าแรงงาน

$$\begin{aligned} \text{ค่าการดำเนินการรายปี} &= 77,637 \text{ baht/year} \\ \text{ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย (v) baht/mm}^2 &= \text{ค่าดำเนินการรายปี/พื้นที่} \\ &= 77,637/1.35 \times 10^8 \\ &= 0.00057 \text{ baht/mm}^2 \\ \text{ดังนั้น สมการเส้นตรงต้นทุนรวม} &= 590,544 + 0.00057Q \end{aligned}$$

การคำนวณหาสมการเส้นตรงรายได้

$$\begin{aligned} \text{มูลค่าซาก} &= 40,000(A/F, 10\%, 10) \\ &= 40,000(0.06275) \\ &= 2,510 \text{ baht/year} \\ \text{มูลค่าประจำปีของรายรับทั้งหมด} &= \text{มูลค่าประจำปีของรายรับ} + \text{มูลค่าประจำปีของซาก} \\ &= 900,000 + 2,510 \\ &= 902,510 \text{ baht/year} \\ \text{รายได้ต่อหน่วย (r) baht/mm}^2 &= \text{รายได้ต่อปี/ปริมาณพื้นที่ที่ทำความสะอาดได้ต่อปี} \\ &= 902,510/1.35 \times 10^8 \\ &= 0.0067 \text{ baht/mm}^2 \\ \text{ดังนั้น สมการเส้นตรงรายได้ (R) คือ} &R = 0.0067Q \end{aligned}$$

แก้สมการ เพื่อหาค่า จำนวนชิ้นงานที่ทำความสะอาดต่อปี

หาจุดคุ้มทุน (Q_{BE}) โดยนำสมการของรายได้ เท่ากับสมการของต้นทุนรวม

$$\begin{aligned} R &= TC \\ 0.0067Q_{BE} &= 590,544 + 0.00057Q_{BE} \\ Q_{BE} &= 96,649,300 \text{ mm}^2/\text{year} \end{aligned}$$

ฉ.8 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของโครงการแสดงดังตารางที่ ฉ-5

ตารางที่ ฉ-5 การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของโครงการ

ปีที่	เครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งแห้ง	
	กระแสเงินสดสุทธิ (PW), (baht)	ผลรวมกระแสเงินสดสุทธิ (PW) ,(baht)
0	-925,000	-925,000
1	382,363	-542,637
2	382,363	-160,274
3	382,363	222,089
4	382,363	604,452
5	382,363	986,815
6	382,363	1,369,179
7	382,363	1,751,542
8	382,363	2,133,905
9	382,363	2,516,268
10	382,363	2,898,631

หาระยะเวลาในการคืนทุน โดยวิธี Interpolation พบว่า $n_p = 2 \text{ years } 5 \text{ months}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล พัทชร พิริยะวิทย์

วัน เดือน ปีเกิด 6 สิงหาคม พ.ศ. 2533

E-Mail PhatcharaPhiriya@gmail.com

ประวัติการศึกษา

- 2558 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2552 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนรัตนราษฎร์บำรุง จังหวัดราชบุรี

ประวัติการทำงาน

- 2557 - นักวิจัยในเรื่อง “CO₂ Cleaning Process” ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่าง บริษัท ซีเกท (ประเทศไทย) จำกัด กับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- นักศึกษาแลกเปลี่ยนในโครงการ “Cooperative Laboratory Study (Colabs)” กับ Research Center of Supercritical Fluid Technology ที่มหาวิทยาลัย Tohoku ประเทศญี่ปุ่น ระหว่างเดือนเมษายน – สิงหาคม 2557
- รางวัลการนำเสนองานยอดเยี่ยมเรื่อง “Phase Conditions of Polyamic Acid Solution Preparing in Binary Solvents” ในการประชุมวิชาการ The 4th TIChE International Conference 2014 ที่จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย
- 2555 - เข้าร่วมประกวดโครงการ “Innovative Seeds Champion” จัดโดย บริษัท ไทยยูเนี่ยน โฟรเซ่น โปรดักส์ จำกัด (มหาชน) ในหัวข้อ “Reduction of CO₂ Consumption in Freezing Process”
- เข้าร่วมการเรียนแบบสหกิจศึกษา กับ บริษัท สยาม ควอลิตี้ อินดัสทรีส์ ระหว่างเดือน มิถุนายน – กันยายน 2555
- นักศึกษาฝึกงานในแผนกลูกอม ของบริษัท แคตเบอร์รี่ อาตัมส์ (ประเทศไทย) ระหว่างเดือนมีนาคม – เมษายน 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2554 - นักศึกษาฝึกงานในตำแหน่ง Petroleum Technologist ที่บริษัท Pan Orient Energy (Thailand) ระหว่างเดือนเมษายน-พฤษภาคม 2554
- เข้าร่วมโครงการ “Petroleum Summer School” ครั้งที่ 7 จัดโดยกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติระหว่างเดือนมีนาคม-พฤษภาคม 2554
- 2552 - ประธานสาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ระหว่างปี 2552-2555



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้