สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งสำหรับการทำความสะอาดแบบเย็นยิ่งยวด

SNOW DRY ICE BLASTING DEVICE FOR CRYOGENIC CLEANING

T104106

สิวัช เต็งสุวรรณ
อัครวิชญ์ เผือกนาโพธิ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104106
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

SNOW DRY ICE BLASTING DEVICE FOR CRYOGENIC CLEANING

SIWACH TENGSUWAN

AKKARAVICH PHUEKNAPO

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2008

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งสำหรับการทำความสะอาดแบบเย็นยิ่งยวด
โดย	นายสิวัช เต็งสุวรรณ
	นายอัครวิชญ์ เผือกนาโพธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.อภินันท์ นัมคณิสรณ์)

.....กรรมการ
(ดร.พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งสำหรับ
การทำความสะอาดแบบเย็นยิ่งยวด
โดย นายสิวัช เต็งสุวรรณ
นายอัครวิชญ์ เผือกนาโพธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษากระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง เพื่อออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งแบบกะ รวมถึงทำการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บเป็น 1,100 1,250 1,400 และ 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิเป็น 30 องศาเซลเซียส เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวที่ดี ควบคู่ไปกับความเหมาะสมทางด้านเศษฐศาสตร์และความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

โดยในการทดลองได้ใช้หลักการเคลื่อนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดันสูงออกสู่บรรยากาศ โดยจะเป็นการเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่จะใช้พ่นทำความสะอาดพื้นผิว และในการทดลองนี้ยังได้ทำการปรับเปลี่ยนความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บในขั้นตอนก่อนที่จะทำการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง และระหว่างทดลองจะบันทึกการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งด้วยการบันทึกภาพเพื่อนำมาศึกษาผลของความดันที่มีผลต่ออนุภาคของน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง เพื่อนำไปใช้พิจารณาถึงค่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่เหมาะสมที่จะใช้ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง รวมทั้งทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งเพื่อทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานชนิดต่างๆ ซึ่งได้แก่ อะลูมิเนียม ทองแดง และ PMMA

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเร็วเริ่มต้น (Initial Velocity) ของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้จะลดลงตามลำดับการเพิ่มความดันที่ใช้ทดลองเป็น 35.9 34.2 34.1 และ 32.8

เมตรต่อวินาที ซึ่งจากค่าความเร็วเริ่มต้นที่คำนวณได้นี้จะส่งผลให้อนุภาคของน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเป็น 1.46 1.29 1.28 และ 1.19 ไมโครเมตร ตามความดันที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มขึ้น และมีจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 2.43×10^{23} 3.71×10^{23} 4.2×10^{23} และ 5.1×10^{23} อนุภาคต่อวินาที ตามความดันที่ใช้ทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้นี้จะมีค่าสัดส่วนช่องว่าง (Void Fraction) เพิ่มขึ้นเป็น 0.948 0.957 0.971 และ 0.982 ตามความดันที่ใช้ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน แต่จะมีค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ที่ลดลงตามความดันที่ใช้ทดลองที่เพิ่มขึ้นเป็น 0.079 0.064 0.044 และ 0.027 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวทำให้ทราบได้ว่าสภาวะของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง คือ ที่ความดัน 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และจากผลการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งเพื่อทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนพื้นผิว อะลูมิเนียม ทองแดง และ PMMA พบว่าการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งจะสามารถขจัดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวออกไปได้คิดเป็นร้อยละ 25 65 และ 75 ตามลำดับชนิดพื้นผิว โดยจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการขจัดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนพื้นผิว PMMA

Report Title	Snow Dry Ice Blasting Device for Cryogenic Cleaning	
By	Mr. Siwach	Tengsuwan
	Mr. Akkaravich	Phueknapo
Advisor	Assist. Prof. Dr. Surat	Areerat
Report for	Bachelor's Degree of Chemical Engineering	
	Department of Chemical Engineering	
	Faculty of Engineering	
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

Abstract

This project is the study in the processes of snow dry ice blasting for designing the device that using in produce the snow dry ice by batch experiment. It is also including the experiment in snow dry ice blasting by using pressure of carbon dioxide inside the vessel which is 1,100 1,250 1,400 and 1,600 pound per square inch and its temperature is 30 degree Celsius. It will make appropriately condition in producing efficiency dry ice that uses in cleaning substrate go together with properly economics and safety in working procedure.

In this experiment is using the principle of flow of carbon dioxide which has high pressure into atmosphere and room temperature. It is flowing through the orifice which has diameter 1 millimeter for producing snow dry ice that use in cleaning the substrate. This experiment is also converting the pressure of carbon dioxide inside the vessel before snow dry ice blasting process and during the experiment, we record the video of this experiment to study the pressure that effect to the particle of dry ice and the efficiency in cleaning by using snow dry ice blasting. It also used for consider about the pressure of carbon dioxide inside the vessel that appropriate for making snow dry ice blasting and including the experiment in snow dry ice blasting for removal calcium carbonate from the substrate such as aluminium copper and PMMA.

From the experiment by using pressure of carbon dioxide inside the vessel which is 1,100 1,250 1,400 and 1,600 pound per square inch found that initial velocity of snow dry ice stream are 35.9 34.2 34.1 and 32.8 meter per second, respectively, which produce the particle of dry ice diameter are 1.46 1.29 1.28 and 1.19 micrometers. Particle of dry ice that sprays out from nozzle is increasing if we increase the pressure inside the vessel and the results are 2.43×10^{23} 3.71×10^{23} 4.2×10^{23} and 5.1×10^{23} particles per second. The stream of snow dry ice had the void fraction 0.948 0.957 0.971 and 0.982, in order of the increasing the pressure. And its bulk density of snow dry ice are 0.079 0.064 0.044 and 0.027 grams per cubic centimeter subsequent increasing the pressure. Realize that the condition for carbon dioxide inside the vessel that appropriate for making snow dry ice is pressure at 1,250 pound per square inch. The result of using dry ice in cleaning the calcium carbonate that sticks on the surface of each substrate found that snow dry ice blasting can remove some particle of calcium carbonate on the substrate 25 to 75 percent but the most efficiency is remove from the substrate of PMMA.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการทำโครงงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.อภินันท์ นัมคณิสรณ์ และ ดร.พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล

ขอขอบคุณ Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองในโครงงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพงศ์ประภาศ ปิยมโนชา คุณเศรษฐการ พรมศิริ คุณปิยพงศ์ บัวโฮม คุณปิยวุฒิ มาศโค้ง และพี่และเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ทำให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดในรายงานนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นายสิวัช เต็งสุวรรณ
นายอัครวิชญ์ เผือกนาโพธิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ค
กิตติกรรมประกาศ..... จ
สารบัญ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ฌ
สารบัญรูป..... ฐ
สัญลักษณ์..... ด
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2
1.3 ขอบเขตของโครงงานวิจัย..... 3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
1.6 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน..... 5
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแข็งแห้ง..... 5
2.1.1 คุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์..... 5
2.1.2 อุณหพลศาสตร์ของคาร์บอนไดออกไซด์..... 7
2.2 การไหลผ่านรูออริฟิส..... 8
2.3 กลไกการทำความสะอาด..... 10
2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำแข็งแห้ง..... 13
2.4.1 ประโยชน์ของน้ำแข็งแห้ง..... 13
2.4.2 ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้จากน้ำแข็ง..... 14

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.3 ขั้นตอนในการผลิตน้ำแข็งแห้งในอุตสาหกรรม 14

2.4.4 ประวัติความเป็นมาของการพ่นน้ำแข็งแห้งเพื่อการทำความสะอาด 15

2.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณ 16

2.5.1 การหาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 16

2.5.2 การหาค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตออกมาได้ 18

2.5.3 การประมาณค่าสัดส่วนช่องว่างในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง 19

2.5.4 การประมาณค่าจำนวนอนุภาคน้ำแข็งแห้ง 20

2.5.5 การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวของการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง. 20

2.5.6 การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวของการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง. 21

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน 23

3.1 ขั้นตอนการศึกษา 23

3.2 วิธีดำเนินงาน 23

3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ 23

3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง 25

3.2.2.1 การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง
และการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 25

3.2.2.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด
ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 29

3.2.2.3 การทดลองทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นตัวอย่าง
ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 30

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 33

4.1 ผลการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้อุปกรณ์ที่ได้ออกแบบ 33

4.2 การศึกษาทิศทางในการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ 34

4.3 การหาอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ขณะพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 36

4.4 การประมาณค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้ง 37

4.5 การประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง
จากค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้ง 40

4.6 การประมาณค่าสัดส่วนช่องว่างและค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้ง 41

4.7 การประมาณจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง 45

4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนต
บนพื้นผิวชนิดต่างๆ ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 46

4.8.1 การพิจารณาสภาวะความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม
ในการผลิตละอองน้ำแข็งเพื่อพ่นทำความสะอาด 46

4.8.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนต
บนพื้นผิวชนิดต่างๆ ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยอาศัยภาพถ่าย 47

4.8.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนต
บนพื้นผิวชนิดต่างๆ ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยอาศัยการชั่งน้ำหนัก 49

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 50

5.1 สรุปผลการทดลอง 50

5.1.1 ผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ 50

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.1.2 ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิว..... 51

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 51

เอกสารอ้างอิง..... 52

ภาคผนวก ก..... 55

ภาคผนวก ข..... 56

ภาคผนวก ค..... 58

ภาคผนวก ง..... 59

ภาคผนวก จ..... 60

ภาคผนวก ฉ..... 61

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าความเร็วเริ่มต้นเฉลี่ยของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ..... 38

ตารางที่ 4.2 ค่าความเร็วเริ่มต้นเฉลี่ยของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ที่ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ..... 41

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ ที่ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ..... 44

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์.....6

รูปที่ 2.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันกับเอนทาลปี ของคาร์บอนไดออกไซด์..... 7

รูปที่ 2.3 การไหลของของไหลผ่านรูออริฟิส.....9

รูปที่ 2.4 กลไกการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงานโดยการทำความสะอาดด้วยน้ำแข็งแห้ง.....12

รูปที่ 2.5 กลไกการขจัดสารอินทรีย์ที่อยู่บนพื้นผิวโดยการทำความสะอาดด้วยน้ำแข็งแห้ง..... 12

รูปที่ 2.6 กราฟสหสัมพันธ์ความหนาแน่นสำหรับของเหลวต่างๆ ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ..... 16

รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
ของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง.....19,40

รูปที่ 3.1 หัวฉีด..... 24

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง.....24

รูปที่ 3.3 แผนภูมิอุปกรณ์ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง.....25,35

รูปที่ 3.4 เครื่องให้ความร้อน..... 25

รูปที่ 3.5 วาล์วหมายเลข 3..... 26

รูปที่ 3.6 ปั๊มอัดความดันสูง..... 26

รูปที่ 3.7 ถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์..... 27

รูปที่ 3.8 กล้องบันทึกภาพ พร้อมเลนส์ถ่ายภาพกำลังขยายสูง..... 28

รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักก๊าซ.....28

รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก 6 ตำแหน่ง..... 29

รูปที่ 3.11 ตู้อบ.....30

รูปที่ 3.12 ฉากที่ใช้ในการจับชิ้นงาน.....31

รูปที่ 3.13 การจัดวางอุปกรณ์ก่อนการทดลองทำความสะอาดพื้นผิว..... 31

รูปที่ 3.14 เทอร์โมคอปเปิล.....32

รูปที่ 3.15 เทอร์โมคอปเปิล.....32

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.16 เพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์..... 32

รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ
ที่มีต่ออุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง 34

รูปที่ 4.2 แผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แสดงทิศทางการเปลี่ยนวัฏภาคของ
คาร์บอนไดออกไซด์ขณะทำการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง..... 35

รูปที่ 4.3 กระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีด..... 36

รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ
ที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์..... 37

รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อ
ความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้..... 39

รูปที่ 4.6 กระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจากการใช้ความดัน
ของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังเก็บต่างๆ..... 42

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Grey Value กับระยะทางตามแนวแกน X..... 42

รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันที่มีผลต่อค่าสัดส่วนช่องว่าง และค่าความหนาแน่นรวม
ของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้..... 44

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในละอองน้ำแข็งแห้ง
ที่ผลิตได้กับความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่ความดันต่างๆ..... 46

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมก่อน (a) และหลัง (b) การทำความสะอาด..... 48

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นทองแดงก่อน (a) และหลัง (b) การทำความสะอาด..... 48

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นอะคริลิกพลาสติกก่อน (a) และหลัง (b) การทำความสะอาด..... 48

รูปที่ 4.13 ร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกขจัดออกไปจากพื้นผิวตัวอย่างชนิดต่างๆ..... 49

สัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิส	ตารางเมตร
CEC	สัมประสิทธิ์แสดงประสิทธิภาพในการทำความสะอาด	
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของละอองน้ำแข็งแห้ง	เซนติเมตร
h	ความยาวของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง	เซนติเมตร
l_V	ค่าปรับแก้เนื่องจากแรงเสียดทาน	
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล	กรัมต่อวินาที
m_{before}	น้ำหนักของพื้นผิวก่อนการทำความสะอาด	กรัม
m_{after}	น้ำหนักของพื้นผิวภายหลังการทำความสะอาด	กรัม
$m_{substrate}$	น้ำหนักของพื้นผิวเปล่า	กรัม
N	จำนวนอนุภาคของน้ำแข็งแห้งภายในละอองน้ำแข็งแห้ง	อนุภาคต่อวินาที
P	ความดัน	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
P_r	ความดันรีดิวซ์	
T_r	อุณหภูมิรีดิวซ์	
v	ความเร็ว	เมตรต่อวินาที
V_{CO_2}	ปริมาตรรวมของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง	ลูกบาศก์เซนติเมตร
V_P	ปริมาตรของอนุภาคน้ำแข็งแห้งหนึ่งอนุภาค	ลูกบาศก์เซนติเมตร
V_B	ปริมาตรรวมของกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง	ลูกบาศก์เซนติเมตร
V_O	ปริมาตรของช่องว่างในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง	ลูกบาศก์เซนติเมตร

สัญลักษณ์กรีก

ε	สัดส่วนช่องว่างของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง	
ρ	ความหนาแน่น	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ρ_C	ความหนาแน่นวิกฤต	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ρ_P	ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ρ_r	ความหนาแน่นรีดิวซ์	

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการทำความสะอาดในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องขจัดสารที่ปนเปื้อนอยู่บนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ก่อนที่จะมีการส่งมอบผลิตภัณฑ์ไปยังลูกค้า โดยในการทำความสะอาดพื้นผิวของผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะถูกพิจารณาอยู่บนปัจจัยพื้นฐานต่างๆ ได้แก่ พลังงานที่ใช้ในการทำความสะอาด ความยากของกระบวนการทำความสะอาด และค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด รวมถึงหากไม่สามารถที่จะทำความสะอาดได้จนถึงเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ก็จะส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต หรือที่แย่กว่านั้นอาจก่อให้เกิดการสูญเสียทางธุรกิจและความไว้วางใจของลูกค้า

สำหรับกระบวนการทำความสะอาดที่จะทำให้เกิดผลกำไรต่อธุรกิจในระดับอุตสาหกรรมนั้นจะต้องสามารถทำความสะอาดได้ตามค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยคุ้มค่าต่อการลงทุน รวมถึงเป็นวิธีการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่ยอมรับได้ โดยแนวทางในการเลือกกระบวนการทำความสะอาดที่จะใช้นั้นจะขึ้นกับตัวแปรหลายตัว อาทิเช่น ประสิทธิผลระหว่างผลิตภัณฑ์กับความต้องการของลูกค้า ผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตหรือราคาขายของผลิตภัณฑ์ ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และผลต่อระยะเวลาในการผลิต

ระบบการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถตอบสนองความต้องการทั้งต่อ ภาคอุตสาหกรรม ลูกค้า และสิ่งแวดล้อม ที่เพิ่มขึ้นได้อย่างน่าพึงพอใจ เนื่องจากการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์นั้นใช้ระยะเวลาในการทำความสะอาดที่สั้น และไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยในการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการทำความสะอาดนั้นยังเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการทำความสะอาดโดยใช้ตัวทำละลาย รวมทั้งการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการทำความสะอาดนั้นเมื่อได้ขจัดสารที่ปนเปื้อนออกไปจากพื้นผิววัสดุแล้ว ก็จะไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายไว้ และถึงแม้ว่าสารปนเปื้อนที่ถูกขจัดออกมาจะเป็นสารที่เป็นอันตราย ก็ยังมีความปลอดภัยเนื่องจากทั้งสารปนเปื้อนและคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะถูกระบายสู่บรรยากาศ

คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ทำลายโอโซน เมื่อแพร่กระจายในอากาศนั้นจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ยกเว้นแต่ อาจจะเกิดการแทนที่ออกซิเจนในการหายใจของมนุษย์ หรืออาจเกิดอาการน้ำแข็งกัด ในกรณีของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว หรือมีการพ่นนละอองน้ำแข็งแห้งถูกผิวหนังโดยตรง แม้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือน

กระจก ทำให้มีการจำกัดปริมาณการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ แต่การทำความสะอาดด้วยวิธีนี้ไม่ได้ก่อให้เกดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้กลับเป็นการนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า กระบวนการผลิตสารเคมี ตลอดจนการหมักเบียร์มาใช้ใหม่แทนการปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรง

กระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง หมายถึง กระบวนการที่มีการปล่อยให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว หรือวัฏภาคก๊าซผ่านรูออริฟิส เพื่อที่จะก่อให้เกิดกระแสที่มีความเร็วสูงของน้ำแข็งแห้ง และกระแสการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยอุณหภูมิและความดันที่ลดลงในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านหัวฉีดทำให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ไปอยู่ในวัฏภาคของแข็ง โดยกระบวนการทำความสะอาดจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อกระแสของน้ำแข็งแห้งกระทบกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด โดยการอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งนี้จะต้องอาศัยพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ และแผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ ในการอธิบายซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1) เพื่อออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง และเครื่องต้นแบบสำหรับใช้ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งในกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิววัสดุ
2) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์กับความเร็วเริ่มต้น (Initial Velocity) และความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของละอองน้ำแข็งแห้งที่สามารถผลิตออกมาได้จากอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้
3) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งในระดับห้องปฏิบัติการ
4) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดด้วยการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง

1.3 ขอบเขตของโครงงานวิจัย

1) ศึกษาการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งแบบกะ
2) ศึกษาผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งในช่วง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บเป็น 30 องศาเซลเซียส
3) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ กับละอองน้ำแข็งแห้งที่พ่นออกมา ซึ่งได้แก่ ค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้ง ขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในละอองน้ำแข็งแห้ง สัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้ง และจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้
4) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งบนพื้นผิวการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

1.4.2 จัดเตรียมอุปกรณ์และออกแบบการทดลอง

1.4.3 ทำการทดลองกระบวนการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งแบบกะ

1.4.4 ศึกษาผลของความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตออกมาได้

1.4.5 ศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดของกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งบนพื้นผิวที่ต่างกัน

1.4.6 สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับอุณหพลศาสตร์ และแผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีขึ้น

1.5.2 มีความรู้ ความเข้าใจในหลักการของกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง รวมถึงเข้าใจในกลไกการทำความสะอาดของกระบวนการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

1.5.3 เรียนรู้วิธีการทำงานและแก้ปัญหาอย่างเป็นขั้นตอน ตลอดจนฝึกทักษะในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

1.6 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย วิธีการดำเนินการ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีอะไรบ้าง รวมถึงสมการที่เกี่ยวข้องกับโครงงานวิจัยทั้งหมด

บทที่ 3 กล่าวถึง ขั้นตอนการศึกษา วิธีการดำเนินงานของโครงงานวิจัย และวิธีการที่ใช้ในการทดลองแต่ละขั้นตอนโดยละเอียด

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการทดลองของโครงงานวิจัยในด้านต่างๆ อาทิเช่น ผลการประมาณค่าความเร็วเริ่มต้นและความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ การพิจารณาถึงค่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่เหมาะสมที่จะใช้ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยอาศัยค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นน้ำแข็งแห้งบนพื้นผิวที่ต่างกัน

บทที่ 5 กล่าวถึง การสรุปผลและข้อเสนอแนะ ซึ่งจะกล่าวถึงบทสรุปของโครงงานวิจัย สิ่งที่ได้รับจากโครงงานวิจัย และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อๆ ไป

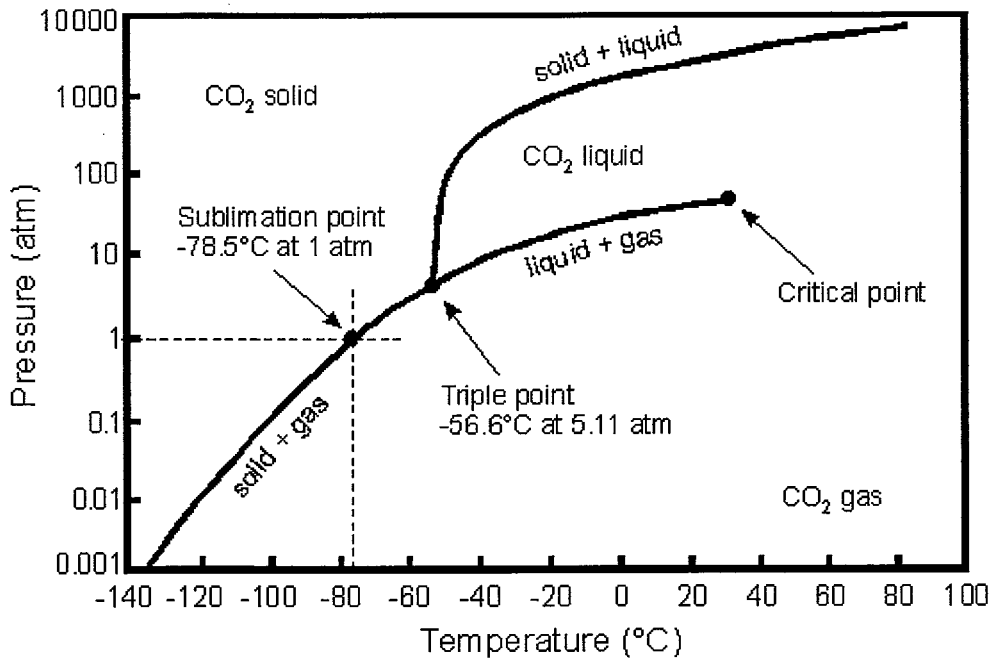
บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแข็งแห้ง [1]

น้ำแข็งแห้ง คือ คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคของแข็งที่ความดันบรรยากาศ โดยจะมีอุณหภูมิ -78.5 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า และที่ความดันบรรยากาศหากมีอุณหภูมิสูงกว่า -78.5 องศาเซลเซียส น้ำแข็งแห้งจะเกิดการระเหิดแทนการหลอมเหลว ซึ่งหมายความว่าน้ำแข็งแห้งจะเปลี่ยนวัฏภาคจากวัฏภาคของแข็งเป็นวัฏภาคก๊าซโดยตรง และไม่มีการเปลี่ยนเป็นวัฏภาคของเหลวก่อน น้ำแข็งแห้งไม่มีอันตรายโดยตรงต่อร่างกาย แต่หากมีการสัมผัสผิวของน้ำแข็งแห้งโดยตรงนั้นจะเป็นอันตรายมากจึงไม่ควรสัมผัสด้วยมือเปล่าโดยไม่สวมถุงมือ

2.1.1 คุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์

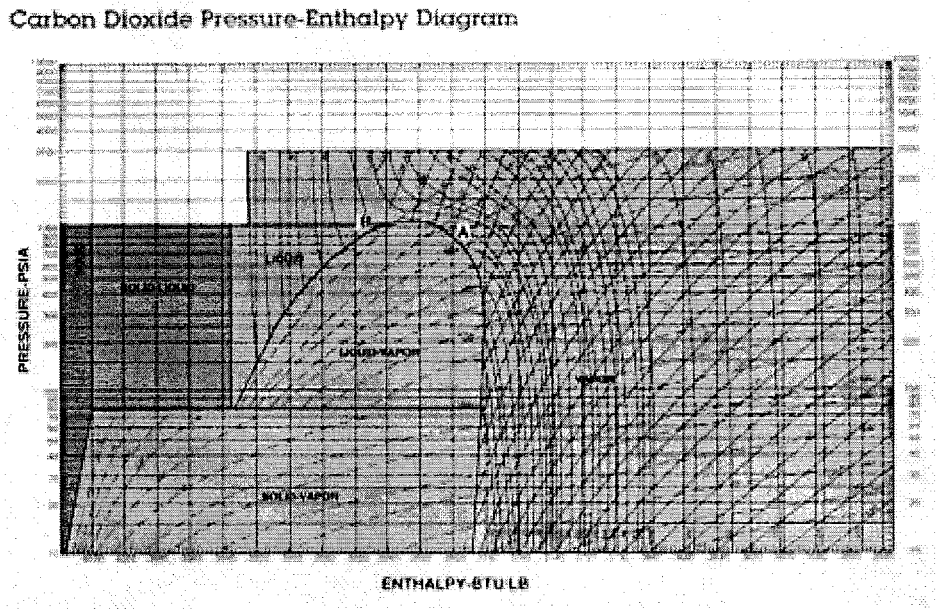
คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน ไม่ทำลายโอโซน และที่ความดันและอุณหภูมิปกติคาร์บอนไดออกไซด์จะเสถียรเมื่ออยู่ในวัฏภาคก๊าซ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นประมาณ 1.5 เท่าของอากาศ คาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะเปลี่ยนจากวัฏภาคก๊าซเป็นวัฏภาคของแข็งภายใต้ความดันสูง และอุณหภูมิต่ำ โดยจะเปลี่ยนเป็นวัฏภาคของแข็งที่อุณหภูมิ -78.5 องศาเซลเซียส ปกติแล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเสถียรและเฉื่อยต่อปฏิกิริยา และมีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถเพิ่มขึ้นได้ในพื้นที่อับอากาศ โดยเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมีค่าเกินกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มมีความเป็นพิษ ดังนั้นในพื้นที่ที่มีการใช้น้ำแข็งแห้งจะต้องมีระบบระบายอากาศที่ดีพอ



Pressure-Temperature phase diagram for CO_2.

รูปที่ 2.1 แผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ [2]

จากแผนภูมิวัฏภาคในรูปที่ 2.1 และคุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์จะพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบด้วย 4 วัฏภาคด้วยกัน คือ ก๊าซ ของเหลว ของแข็ง และของไหลเหนือวิกฤต โดยจากแผนภูมิวัฏภาคจุดที่เราสนใจก็คือเส้นแบ่งขอบเขตระหว่างวัฏภาคของแข็งและก๊าซ ซึ่งตามความหมายทางกายภาพก็คือคาร์บอนไดออกไซด์สามารถที่จะเปลี่ยนกลับไปมาในระหว่างวัฏภาคของแข็งและก๊าซ แต่ที่ความดันและอุณหภูมิห้องปกติคาร์บอนไดออกไซด์จะเสถียรเมื่ออยู่ในวัฏภาคก๊าซ ดังนั้นในท้ายที่สุดของการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซ และเมื่อถึงจุดนี้สารปนเปื้อนที่ถูกขจัดออกจากพื้นผิวก็จะถูกแยกออกจากกระแสคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นตัวทำละลายที่ดีเยี่ยมสำหรับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว และคุณสมบัติในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะเพิ่มขึ้นตามความดันและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันกับเอนทาลปี ของคาร์บอนไดออกไซด์ [2]

2.1.2 อุณหพลศาสตร์ของคาร์บอนไดออกไซด์ [2]

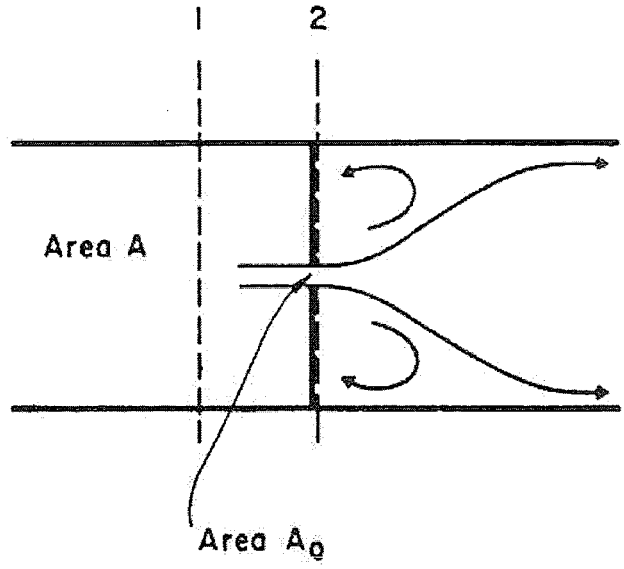
จากรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนวัฏภาคในขณะที่เกิดละอองน้ำแข็งแห้ง โดยในแผนภูมิได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนเช่นเดียวกับแผนภูมิวัฏภาค ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นวัฏภาคของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และของไหลเหนือวิกฤต ซึ่งเมื่อพิจารณาแผนภูมินี้ร่วมกับแผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์การขยายตัวแบบเอนทาลปีคงที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ขณะเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสได้ ดังนั้นในขณะที่ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส สภาพทางอุณหพลศาสตร์ของคาร์บอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อดูจากแผนภูมิก็จะเห็นว่าจุดบนแผนภูมิจะเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งตามเส้นทางของเอนทาลปี

โดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้องคาร์บอนไดออกไซด์ที่บรรจุในถังจะมีความดันโดยประมาณ 830 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายในถังนั้นจะมีทั้งที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซและของเหลว ด้วยกันทั้งคู่ตามสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ จากแผนภูมิความดัน-เอนทาลปี จะพบว่าตำแหน่งของสมดุลของระบบนี้จะอยู่บนเส้นความดัน 830 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งเส้นความดันนี้จะลากผ่านทั้งในส่วนของสมดุลของเหลวและก๊าซ โดยค่าเอนทาลปีสำหรับวัฏภาคของเหลวและก๊าซจะอยู่ภายในขอบเขตของวัฏภาคของเหลว และก๊าซ โดยจากรูปที่ 2.3 ได้ระบุให้จุด A แทนวัฏภาคก๊าซ และจุด B แทนวัฏภาคของเหลว

โดยเมื่อมีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังผ่านรูออริฟิสออกสู่บรรยากาศ จะทำให้ส่วนที่เคยอยู่ในวัฏภาคก๊าซนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่โดยจะเริ่มจากจุด A และเมื่อความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มลดลงทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคไปอยู่ในวัฏภาคของเหลว โดยจะเปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของเหลวมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มร้อยละของวัฏภาคของเหลวภายในสมดุลของวัฏภาคของเหลว - ก๊าซ โดยเมื่อความดันลดลงจนถึงรอยต่อระหว่างวัฏภาคของเหลว - ก๊าซ และวัฏภาคก๊าซ – ของแข็ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งหนึ่ง โดยวัฏภาคของเหลวที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระหว่างที่อยู่ในสมดุลของวัฏภาคของเหลว – ก๊าซ จะเปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของแข็ง ซึ่งเมื่อได้นำกฎคาน (lever rule) มาคำนวณร้อยละของการเปลี่ยนวัฏภาคเบื้องต้นพบว่าน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนวัฏภาคมาจากวัฏภาคก๊าซไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งคิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นทั้งหมด และส่วนที่ไม่ได้เปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของเหลวก็จะยังคงอยู่ในวัฏภาคก๊าซดังเดิม สำหรับส่วนที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว (ก่อนผ่านรูออริฟิส) นั้นจะเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 2.3 จะพบว่าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ในแผนภูมิโดยจะเริ่มจากจุด B และเมื่อความดันลดลงก็จะเกิดการเปลี่ยนจากวัฏภาคของเหลวไปอยู่ในวัฏภาคก๊าซทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้น และร้อยละของวัฏภาคก๊าซจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความดันที่ลดลงจนถึงขอบเขตสมดุลของวัฏภาคก๊าซ – ของแข็ง วัฏภาคของเหลวที่เหลืออยู่ทั้งหมดก็จะเปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งโดยร้อยละของการเปลี่ยนเป็นวัฏภาคของแข็งจะอยู่ในช่วงร้อยละ 45 ถึง 50 ซึ่งจากปรากฏการณ์นี้แม้ว่าจะทำการลดความดันลงไปอีกอย่างต่อเนื่องก็จะไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นอีกต่อไป เนื่องจากร้อยละของการเกิดน้ำแข็งแห้งจะขึ้นกับสมดุลระหว่างวัฏภาคของเหลวและก๊าซภายในถังคาร์บอนไดออกไซด์ในตอนเริ่มต้นก่อนการปล่อยผ่านรูออริฟิส ซึ่งสมดุลของวัฏภาคทั้งสองจะถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิและความดันของระบบอีกทีหนึ่ง

2.2 การไหลผ่านรูออริฟิส [3]

การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และความดันลด (Pressure drop) ขณะที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านแผ่นออริฟิสซึ่งประกอบด้วยช่องขนาดเล็กที่จุดศูนย์กลางของแผ่นทำหน้าที่ขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของกระแสการไหลของของไหล จากรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงให้เห็นรูปแบบการไหลผ่านรูออริฟิสของของไหล



รูปที่ 2.3 การไหลของของไหลผ่านรูออริฟิส [3]

จากรูปแบบการไหลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อของไหลเคลื่อนที่ออกมาจากรูออริฟิสจะมีลักษณะการไหลแบบเจ็ท และหลังจากนั้นกระแสการไหลของของไหลจะเกิดการขยายตัวจนเต็มพื้นที่หน้าตัดโดยเมื่อกระแสการไหลเกิดการขยายตัวจะไม่สามารถที่จะหาพื้นที่หน้าตัดที่ตายตัวได้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดจะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อที่ต่ออยู่กับแผ่นออริฟิส ดังนั้นจึงกำหนดให้พื้นที่หน้าตัด A_2 มีขนาดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิสขาออก ดังนั้นในการคำนวณสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) จะกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดทั้งสองข้างของรูออริฟิสมีค่าเท่ากัน หรือ $A_2 = A_0$ โดยตั้งสมมติฐานว่าความเร็วตลอดพื้นที่หน้าตัดคงที่ ($\alpha = \beta = 1$) และของไหลนั้นไม่สามารถอัดตัวได้

$$AV_1 = A_0V_2 \qquad (2.1)$$

การคำนวณความดันลดจะต้องคำนวณโดยอาศัยสมการโมเมนตัมหรือสมการพลังงาน แต่เนื่องจากการไหลผ่านรูออริฟิสเป็นการไหลที่ซับซ้อนและเป็นการยากที่จะคำนวณโดยใช้สมการโมเมนตัม ดังนั้นในที่นี้จะใช้สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation) ซึ่งเป็นสมการพลังงานที่ใช้ในการคำนวณ โดยจะตั้งสมมติฐานว่าเป็นของไหลเคลื่อนที่ในแนวราบ และไม่มีงาน (Shaft Work) เกิดขึ้นระหว่างที่ของไหลเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการเบอร์นูลีจะมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{1}{2}V_2^2 = \frac{1}{2}V_1^2 + \frac{P_1 - P_2}{\rho} - l_V \qquad (2.2)$$

โดย V_1 คือ ความเร็วเริ่มต้นของของไหลก่อนผ่านรูออริฟิส

V_2 คือ ความเร็วของของไหลหลังผ่านรูออริฟิส

P_1 คือ ความดันก่อนผ่านกรูออริฟิส

P_2 คือ ความดันหลังผ่านรูออริฟิส

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

l_V คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากแรงเสียดทาน

2.3 กลไกการทำความสะอาด [2]

จากหลักอุณหพลศาสตร์ของคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสจะก่อให้เกิดน้ำแข็งแห้ง หรือละอองน้ำแข็งแห้งขึ้น เมื่อได้ทดลองให้คาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านหัวฉีดแบบทรงกรวย ผลที่ได้คือเกิดละอองน้ำแข็งแห้งความเร็วสูงออกมาจากปลายหัวฉีด และเมื่อนำไปพ่นทำความสะอาดพื้นผิวพบว่าสามารถที่จะขจัดได้ทั้งอนุภาคและสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่บนพื้นผิว

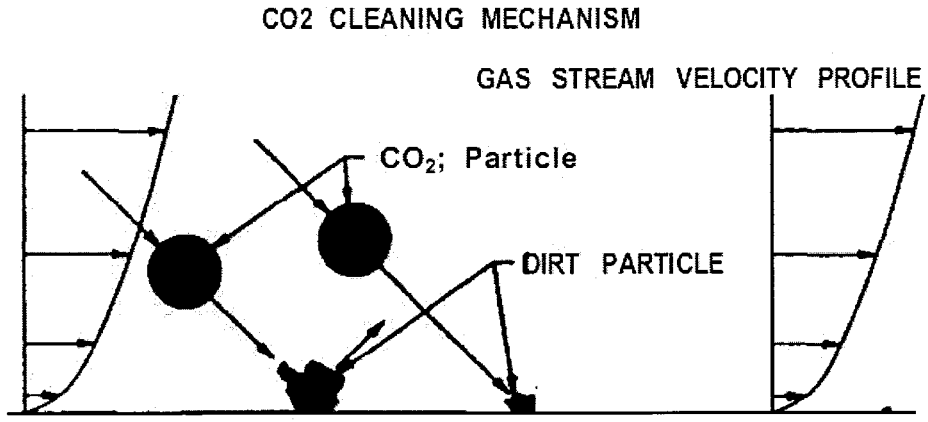
กลไกการขจัดสารอินทรีย์และอนุภาคออกจากพื้นผิวโดยการใช้ละอองน้ำแข็งแห้งนั้นประกอบไปด้วยกลไกการทำความสะอาด 2 กลไกด้วยกัน คือกลไกการขจัดอนุภาค และกลไกการขจัดสารอินทรีย์ที่อยู่บนพื้นผิว

โดยกลไกของการขจัดอนุภาคนั้นจะเกิดจากแรงที่เกิดขึ้นมาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของก๊าซด้วยความเร็วสูง และการถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างอนุภาคของน้ำแข็งแห้งกับอนุภาคที่เกาะบนพื้นผิว ส่วนกลไกการขจัดสารอินทรีย์บนพื้นผิวนั้นเกิดขึ้นจากการละลายโดยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เกิดขึ้นระหว่างที่ละอองน้ำแข็งแห้งกระแทกกับพื้นผิวจนเกิดการเปลี่ยนวัฏภาค

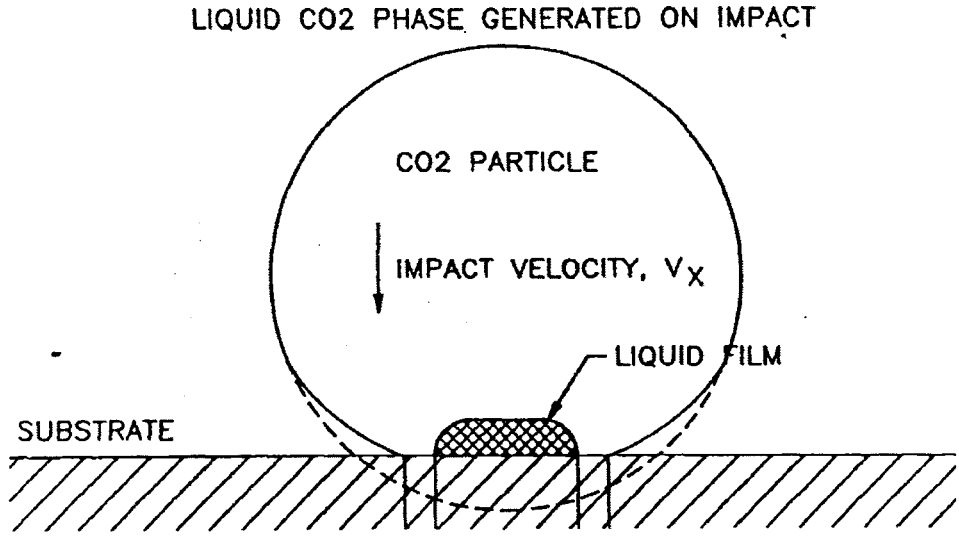
โดยทั่วไปแล้วก๊าซที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสามารถขจัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกจากพื้นผิวได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของก๊าซจะก่อให้เกิดแรงลาก (drag force) ขึ้นเหนือพื้นผิวของอนุภาค โดยขนาดของแรงลากนี้จะแปรผันตรงกับพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซกับพื้นที่ผิวของอนุภาค เมื่อแรงลากที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคบนพื้นผิวกับพื้นผิวก็จะเกิดการขจัดอนุภาคขึ้น และอนุภาคจะถูกพาออกไปจากพื้นผิวตามทิศทางที่ก๊าซเคลื่อนที่ โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคบน

พื้นผิวกับพื้นผิวนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นแรงชนิดต่างๆ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) แรงเนื่องจากการกลั่นตัวในแคพิลลารี (Capillary Condensation) แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole Attraction) ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นนี้จะแตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิว แรงลากจะสามารถขจัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกจากพื้นผิวได้ แต่เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวลดลง จนกระทั่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวกับพื้นผิวจะมีอิทธิพลมากกว่าแรงลาก ก็จะส่งผลให้ก๊าซไม่สามารถที่จะขจัดอนุภาคออกไปจากพื้นผิวได้ ซึ่งโดยทั่วไปแรงลากจะมีผลกับการขจัดอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับไมครอน และอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงที่ใหญ่กว่าระดับไมครอนเท่านั้น

การที่มีอนุภาคของน้ำแข็งแห้งเพิ่มเข้าไปในกระแสการไหลของก๊าซ ส่งผลให้เกิดเป็นกระบวนการใหม่ในการขจัดอนุภาคบนพื้นผิว ซึ่งแผนภาพการเกิดกระบวนการนี้ได้แสดงดังรูปที่ 2.4 จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออนุภาคบนพื้นผิวถูกกระแทกด้วยอนุภาคของน้ำแข็งแห้ง จะก่อให้เกิดการถ่ายโอนโมเมนตัมขึ้นระหว่างอนุภาคของน้ำแข็งแห้ง และอนุภาคที่เกาะบนพื้นผิว ซึ่งการถ่ายโอนโมเมนตัมนี้ส่งผลให้เกิดแรงที่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกาะบนพื้นผิวกับพื้นผิวได้ ทำให้อนุภาคที่เกาะบนพื้นผิวถูกขจัดออกไปได้ และหลุดออกจากพื้นผิวไปพร้อมกับกระแสก๊าซความเร็วสูง ซึ่งประสิทธิภาพในการขจัดอนุภาคจะไม่ลดลงสำหรับการขจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กเหมือนกับในกรณีของการขจัดอนุภาคอันเนื่องมาจากผลของแรงลาก ดังนั้นการขจัดอนุภาคที่เกาะบนพื้นผิวเนื่องจากการถ่ายโอนโมเมนตัมจะเกิดขึ้นได้ตราบเท่าที่ขนาดอนุภาคของน้ำแข็งแห้งนั้นมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับขนาดของอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิว



รูปที่ 2.4 กลไกการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงานโดยการทำความสะอาดด้วยน้ำแข็งแห้ง [2]



รูปที่ 2.5 กลไกการขจัดสารอินทรีย์ที่อยู่บนพื้นผิวโดยการทำความสะอาดด้วยน้ำแข็งแห้ง [2]

กลไกในการขจัดสารอินทรีย์ที่อยู่บนพื้นผิวนั้นจะมีกลไกในการขจัดที่แตกต่างไปจากกลไกการขจัดอนุภาคบนพื้นผิว เนื่องจากเกิดการขจัดโดยอาศัยการทำละลายโดยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่

ในวัฏภาคของเหลว เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลวเป็นตัวทำละลายที่ดีเยี่ยมสำหรับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบที่ไม่มีขั้ว โดยคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลวจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการกระแทกของอนุภาคน้ำแข็งแห้งบนพื้นผิว ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 โดยจะเกิดคาร์บอนไดออกไซด์เหลวขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ เนื่องมาจากในระหว่างการกระแทกนั้นจะก่อให้เกิดความเครียดที่สูงตรงรอยต่อระหว่างอนุภาคของน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิว ซึ่งความเครียดที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากกว่าค่าความเค้นจุดคราก (yield stress) ของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง และสูงกว่าค่าความดันที่จุดร่วม 3 วัฏภาค (triple point) ส่งผลให้อนุภาคน้ำแข็งแห้งเปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของเหลว และทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายในขณะที่สัมผัสกับพื้นผิว สารอินทรีย์ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวจะถูกละลายโดยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว และจะคงอยู่ภายในวัฏภาคของเหลวที่อยู่ภายในอนุภาคของน้ำแข็งแห้ง จากนั้นเมื่ออนุภาคน้ำแข็งแห้งเริ่มที่จะสะท้อนออกจากพื้นผิวความดันที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิวก็จะลดลง และวัฏภาคของเหลวที่อยู่ในอนุภาคของน้ำแข็งแห้งก็จะเปลี่ยนวัฏภาคกลับมาอยู่ในวัฏภาคของแข็งอีกครั้งหนึ่ง และนำสารอินทรีย์ออกไปจากพื้นผิวด้วย

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำแข็งแห้ง [1]

2.4.1 ประโยชน์ของน้ำแข็งแห้ง

จากคุณสมบัติของน้ำแข็งแห้งที่มีอุณหภูมิเย็นจัดถึง -78.5 องศาเซลเซียส และไม่เกิดการหลอมเหลวจึงทำให้มีการนำน้ำแข็งมาใช้ประโยชน์หลายๆ ด้าน โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิต่ำ เช่น

ในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็นการถนอมอาหารในขั้นตอนการผลิตและการขนส่งตัวอย่าง เช่น ใช้ในการแช่เข็งปลา หรือเนื้อสัตว์อื่นๆ ใช้ในการแช่แข็งไอศกรีม นม เบเกอรี่ ไส้กรอก ใช้ในการแช่แข็งผักและผลไม้ เพื่อให้มีความสดเป็นระยะเวลานานๆ หรือเพื่อยืดอายุสินค้า นอกจากนี้ยังใช้เพื่อการเก็บอาหารสำหรับเสิร์ฟบนเครื่องบินอีกด้วย ซึ่งน้ำแข็งแห้งจะรักษาความสดได้ดี และไม่มีการหลอมเหลวเป็นน้ำที่เปียกแฉะเหมือนน้ำแข็งทั่วไปด้วย

ด้านการแพทย์ ใช้ในการรักษาสภาพของซากสัตว์ หรือศพของมนุษย์จากเหตุการณ์คลื่นยักษ์ภาคใต้ เพื่อช่วยให้ศพคงสภาพได้นานที่สุด หรือเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ใช้ในการขนส่งเวชภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยา หรือสารเคมีบางชนิด

ใช้ในอุตสาหกรรมด้านการทำความสะอาดเครื่องจักร แบบหล่อ หรือแม่พิมพ์

ใช้ในการบดเย็นวัสดุเคราะห์ที่แตกยาก เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำมากๆจะทำให้วัสดุเกิดการแข็งและกรอบมากขึ้น ทำให้บดได้ง่ายขึ้น เหมาะสำหรับการจัดวัสดุสังเคราะห์

ใช้ในการทำหมอก ควัน ในคอนเสิร์ตการถ่ายทำภาพยนตร์หรือการแสดงต่าง ๆ

ใช้ในการทำฝนเทียมในขั้นตอนเลี้ยงให้อ้วน และขั้นตอนโจมตีเมฆอุ่นด้วยสารเคมีสูตรเย็นจัดที่อุณหภูมิ -79 องศาเซลเซียส จะทำให้อุณภูมิของมวลอากาศใต้ฐานเมฆลดลง และความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น จะยิ่งทำให้ฐานเมฆลดระดับลง ปริมาณเมฆฝนก็จะหนาแน่นขึ้น

2.4.2 ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้จากน้ำแข็ง [4]

1. จากการสัมผัส: หากจับต้องน้ำแข็งแห้งด้วยมือเปล่าหรือสัมผัสกับผิวหนังโดยตรงก็จะทำให้ผิว หนังไหม้ได้จากความเย็นจัด (frost bite) ได้น้ำแข็งถือว่าเป็นวัตถุอันตรายชนิดหนึ่ง

2. จากการะเบิด: ซึ่งเกิดจากการบรรจุน้ำแข็งแห้งในภาชนะปิดสนิทไม่มีช่องระบายอาจทำให้เกิด การสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระเหิดออกมา เมื่อถึงระดับหนึ่งจะเกิดแรงดันและระเบิดในที่สุด ดังนั้นในการขนส่งน้ำแข็งแห้งปริมาณมากๆ จะต้องเก็บในภาชนะบรรจุน้ำแข็งโดยเฉพาะที่มีช่องระบายอากาศ นอกจากจะเป็นการป้องกันการระเบิดแล้วยังช่วยลดอัตราการระเหิดของน้ำแข็งได้

3. การเก็บน้ำแข็งแห้งปริมาณมากๆในห้องแคบๆ หรือห้องเพดานต่ำที่การระบายอากาศไม่ดีพอ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระเหิดออกมาแทนที่ออกซิเจนที่ทำให้ขาดอากาศหายใจได้ ดังนั้นห้องที่ใช้หรือเก็บรักษาน้ำแข็งแห้งหรือห้องคอนเสิร์ตที่ต้องใช้น้ำ แข็งแห้งในปริมาณมากๆ จึงควรที่จะจัดให้มีการระบายอากาศอย่างเพียงพอ โดยปกติก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะหนักว่าอากาศจึงมักจะลอยอยู่ในระดับต่ำ ดังนั้นการระบายอากาศที่ดีจึงควรมีการระบายอากาศทางด้านล่าง

*** อากาศปกติ จะประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจน 78 % ก๊าซออกซิเจน 21 % และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.035 % ถ้าในอากาศมีประมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 5 % จะทำให้เกิดพิษได้

2.4.3 ขั้นตอนในการผลิตน้ำแข็งแห้งในอุตสาหกรรม [5]

1) คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกทำให้เปลี่ยนวัฏภาคเป็นของเหลวโดยการอัดความดันและลดอุณหภูมิซึ่งจะเปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของเหลวที่ความดันประมาณ 870 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะถูกส่งผ่านท่อเข้าสู่ภาชนะกักเก็บที่มีการรักษาระดับความดัน และอุณหภูมิเพื่อรักษาวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนที่ถูกส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตในส่วนต่อๆ ไป

2) คาร์บอนไดออกไซด์เหลวถูกปล่อยออกมาอีกครั้งผ่านระบบท่อเข้าสู่เครื่องอัดน้ำแข็งแห้ง ซึ่งเครื่องอัดนี้ประกอบด้วยหัวอัดขนาดใหญ่อยู่ด้านบน ซึ่งสามารถอัดผลิตภัณฑ์ที่ป้อนเข้ามาด้วยแรงอัดที่สูงมาก เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เหลวกระทบกับหัวอัดของเครื่องอัดน้ำแข็งแห้งก็เปลี่ยนวัฏภาคกลายเป็นของแข็งในทันทีที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของแข็งที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะคล้ายกับหิมะ
3) หลังจากนั้นน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งเข้าสู่ตอนบนของเครื่องอัดน้ำแข็งแห้ง และถูกอัดขึ้นและลงด้วยความดันประมาณ 60 ตัน เพื่อส่งผ่านน้ำแข็งแห้งส่วนนี้เข้าสู่แม่พิมพ์น้ำแข็งแห้ง กระบวนการนี้ใช้เวลาประมาณ 5 นาที โดยน้ำแข็งแห้งออกมาจากแม่พิมพ์น้ำแข็งแห้งในลักษณะของก้อนน้ำแข็งแห้งขนาดใหญ่ และจะถูกส่งไปตัดด้วยลมเป็นชิ้นเล็กๆ ตามขนาดที่ต้องการ

2.4.4 ประวัติความเป็นมาของการพ่นน้ำแข็งแห้งเพื่อการทำความสะอาด [5]

การทำความสะอาดด้วยการพ่นน้ำแข็งแห้งนี้ได้มีการคิดค้นขึ้นในเดือนสิงหาคม ปี 1977 ในอุตสาหกรรมการบิน โดยบริษัท Lockleed โดยนาย Calvin Fong เป็นผู้ที่ถือครองสิทธิบัตร การพ่นด้วยวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก และสามารถระเหิดได้นี้ ต่อมาในปี 1987 ก็ได้มีการพัฒนากระบวนการนี้เพื่อหวังผลทางการค้า โดยสมรรถนะของเครื่องมือในขณะนั้นการพ่นน้ำแข็งแห้งนี้ต้องใช้ความดันในการพ่นประมาณ 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เนื่องจากเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา ทำให้มีการปรับปรุงกระบวนการพ่นน้ำแข็งแห้งจนสามารถลดความดันที่ใช้ในการพ่นลงเหลือประมาณ 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการพ่นน้ำแข็งแห้งมีความเหมาะสมในการทำความสะอาดมากขึ้น

2.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

2.5.1 การหาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

สามารถหาได้จาก สหสัมพันธ์ความหนาแน่นสำหรับของเหลว [6]

จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรีดิวซ์ ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิรีดิวซ์ และความดันรีดิวซ์ จากนิยาม

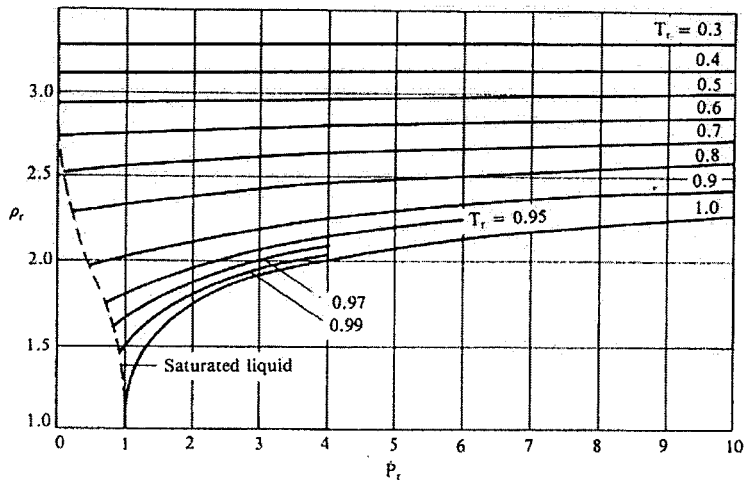
$$\rho_r \equiv \frac{\rho}{\rho_c} \qquad (2.3)$$

เมื่อ ρ_c คือ ความหนาแน่นที่จุดวิกฤติ

T_r คือ อุณหภูมิรีดิวซ์

P_r คือ ความดันรีดิวซ์

โดย มีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.6 กราฟสหสัมพันธ์ความหนาแน่นสำหรับของเหลวต่างๆ ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ [6]

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากความสัมพันธ์นี้ทำให้เราสามารถนำไปหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ (Volumetric Flow Rate) ที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งแห้งออกมาได้ โดยหาจากสมการ

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho} \qquad (2.4)$$

เมื่อ V คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อวินาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

เมื่อเราสามารถหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ได้แล้ว ก็จะทำให้สามารถประมาณหาความเร็วเริ่มต้น (Initial Velocity Estimation) ของละอองน้ำแข็งแห้งที่ออกจากปลายหัวฉีดได้จากสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} \qquad (2.5)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของละอองน้ำแข็งแห้ง (เมตรต่อวินาที)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิส (ตารางเมตร)

104106

2.5.2 การหาค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตออกมาได้ (Bulk Density)

จะสามารถหาความหนาแน่นรวม ได้จากสมการ

$$\rho_B = \frac{\dot{m}t}{V_B} \qquad (2.6)$$

เมื่อ ρ_B คือ ความหนาแน่นรวม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำแข็งแห้ง (กรัมต่อวินาที)

V_B คือ ปริมาตรรวมของน้ำแข็งแห้งที่พ่นออกมา (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

t คือ คาบเวลาที่ใช้ในการบันทึกภาพของละอองน้ำแข็งแห้งมีค่าคงที่เท่ากับ $\frac{1}{30}$ วินาที

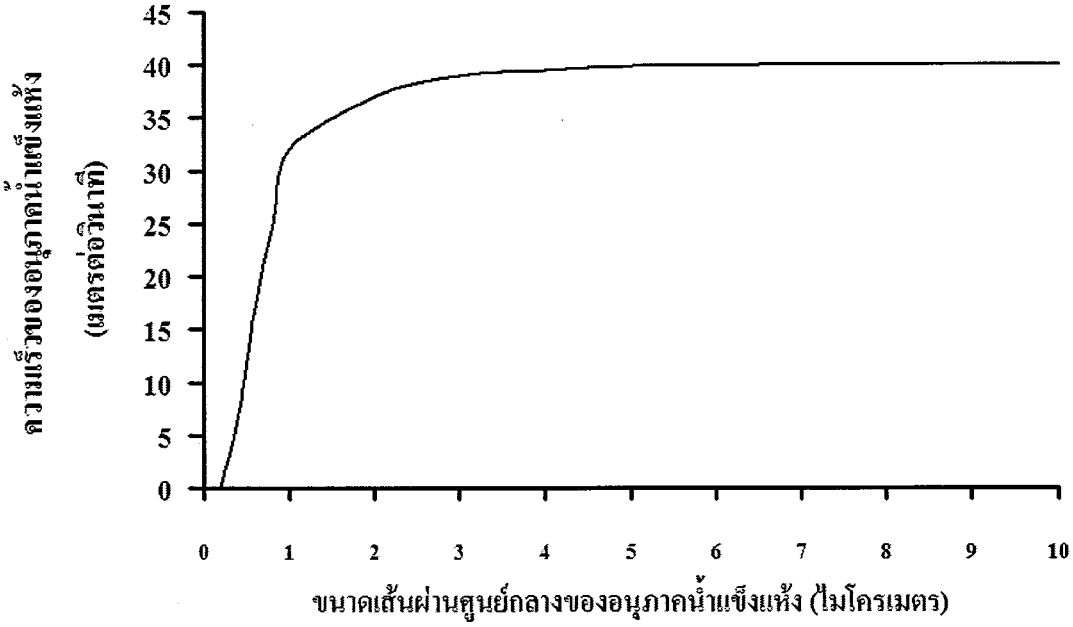
โดย $$V_B = \frac{\pi D^2 h}{4} \qquad (2.7)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง (เซนติเมตร)

h คือ ความยาวของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง (เซนติเมตร)

2.5.3 การประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของละอองน้ำแข็งแห้ง (Void Fraction Estimation) [7]

จากงานวิจัยของ Souvik Banerjee และ Andrea Campbell ได้เสนอวิธีการประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งจากความเร็วของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งที่เคลื่อนที่ออกมาจากหัวฉีดซึ่งสามารถประมาณได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง [7]

2.5.4 การประมาณค่าสัดส่วนช่องว่างในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง (Void Fraction Estimation) [8]

ค่าสัดส่วนช่องว่าง (ε) สามารถหาได้จากสมการ

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{CO_2}}{V_B} \qquad (2.8)$$

เมื่อ ε คือ ค่าสัดส่วนช่องว่างในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง

V_{CO_2} คือ ปริมาตรรวมทั้งหมดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

V_B คือ ปริมาตรรวมของกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

โดย
$$V_{CO_2} = \frac{\dot{m}t}{\rho_p} \qquad (2.9)$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำแข็งแห้ง (กรัมต่อวินาที)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของน้ำแข็งแห้งมีค่าประมาณ 1.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

t คือ คาบเวลาที่ใช้ในการบันทึกภาพของละอองน้ำแข็งแห้งมีค่าคงที่เท่ากับ $\frac{1}{30}$ วินาที

2.5.5 การประมาณค่าจำนวนอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (Dry ice Particulate Estimation)

จำนวนอนุภาคของน้ำแข็งแห้ง (N) สามารถหาได้จากสมการ

$$N = \frac{V_B}{V_0 + V_P} \qquad (2.10)$$

และ
$$\varepsilon = \frac{V_0}{V_0 + V_P} \qquad (2.11)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.8) จะได้

$$V_0 = \frac{V_P \varepsilon}{1 - \varepsilon} \qquad (2.12)$$

และ
$$V_P = \frac{4\pi r^3}{3} \qquad (2.13)$$

เมื่อ r คือ ขนาดรัศมีของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (เซนติเมตร)

เมื่อแทนสมการที่ (2.12) ลงในสมการที่ (2.10) จะได้

$$N(V_T, V_P, \varepsilon) = \frac{V_B}{\left[\frac{V_P \varepsilon}{1-\varepsilon}\right] + V_P} \qquad (2.14)$$

เมื่อ N คือ จำนวนอนุภาคของน้ำแข็งแห้งทั้งหมดภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง

ε คือ ค่าสัดส่วนช่องว่างในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง

V_P คือ ปริมาตรของอนุภาคน้ำแข็งแห้งหนึ่งอนุภาค (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

V_B คือ ปริมาตรรวมของกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

V_0 คือ ปริมาตรของช่องว่างในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.5.6 การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวของการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง (Cleaning Efficiency Coefficient; CEC)

$$\%CEC = \frac{m_{before} - m_{after}}{m_{before} - m_{substrate}} \times 100 \qquad (2.15)$$

เมื่อ $\%CEC$ คือ สัมประสิทธิ์แสดงประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวของการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง

m_{before} คือ น้ำหนักของพื้นผิวที่ใช้เป็นตัวอย่างในการทำความสะอาดที่มีการเคลือบด้วยอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต (กรัม)

m_{after} คือ น้ำหนักของพื้นผิวที่ใช้เป็นตัวอย่างภายหลังจากการทำความสะอาดด้วยการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง (กรัม)

$m_{substrate}$ คือ น้ำหนักของพื้นผิวที่ใช้เป็นตัวอย่างก่อนการเคลือบผิวด้วยอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต (กรัม)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Souvik Banerjee และ Andrea Campbell [7] ได้ทำการศึกษาหลักการ และกลไกของกระบวนการขจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรและขนาดเล็กกว่า ออกจากพื้นผิวโดยการใช้กระบวนการในการทำความสะอาดด้วยแอโรซอลคาร์บอนไดออกไซด์เย็นยิ่งยวด โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดัน 5,860 กิโลพาสคัล และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พ่นผ่านหัวฉีดเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว พบว่าละอองน้ำแข็งแห้งนั้นจะเกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ผ่านหัวฉีด ซึ่งจะทำให้ความดันและอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างรวดเร็ว และลดลงต่ำกว่าจุดร่วมสามวัฏภาค ซึ่งทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ผ่านหัวฉีดออกมายังบรรยากาศมีลักษณะเป็นของผสมระหว่างวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคก๊าซ โดยจะถูกพ่นเป็นกระแสพุ่งตรงจากหัวฉีดสู่พื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด และได้อธิบายถึงกลไกในการทำความสะอาดพื้นผิวเมื่อใช้การพ่นละอองน้ำแข็งแห้งเป็นกระบวนการในการทำความสะอาด โดยพบว่ากลไกในการทำความสะอาดพื้นผิวนั้นประกอบด้วย 3 กลไก คือ

1) การถ่ายโอนโมเมนตัมโดยอนุภาคเย็นยิ่งยวด ที่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด

2) แรงลาก (Drag force) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจากหัวฉีดซึ่งทำให้อนุภาคที่ต้องการทำความสะอาดหลุดออกจากพื้นผิว

3) การละลายสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวโดยคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างการทำความสะอาดพื้นผิว

นอกจากนี้ Souvik Banerjee และ Andrea Campbell ยังได้อธิบายผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวกับแรงลากที่เกิดขึ้นในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ และได้แสดงการคำนวณหาขนาดของอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ต้องการสำหรับการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิว ในกรณีที่ทราบเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิว โดยพบว่าในการขจัดอนุภาคที่มีขนาด 20 ไมโครเมตรบนพื้นผิวนั้นจะต้องใช้อนุภาคเย็นยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 ไมโครเมตรในการทำความสะอาด เนื่องจากต้องใช้โมเมนตัมในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคบนพื้นผิวโดยค่าความเร็วต้นของอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่ใช้ในการคำนวณ คือ 40 เมตรต่อวินาที และยังพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าระดับไมโครเมตรจะต้องการอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่มีขนาดมากกว่า 0.5 ไมโครเมตรในการขจัด จึงจะมีประสิทธิภาพในการขจัดที่ดี ดังนั้นขนาดของแอโรซอลที่ใช้ในการทำความสะอาดที่ใหญ่ขึ้นเหมาะสำหรับการขจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าระดับไมโครเมตรจึงจะมีประสิทธิภาพในการขจัดอนุภาคที่มากขึ้นตามทฤษฎีที่ได้นำเสนอไว้

Sheng-Chung Yang และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาการหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการทำความสะอาดโดยใช้ละอองคาร์บอนไดออกไซด์ความเร็วสูงทำความสะอาดเซ็นเซอร์ (CMOS) โดยการใช้ Taguchi Method โดยได้มีตัวแปรควบคุม 4 ตัวแปรด้วยกัน ซึ่งในการทดลองโดยใช้ตัวแปรแต่ละตัวจะทำการทดลองเปลี่ยนค่าที่ใช้ในการทดลอง 3 ระดับด้วยกัน และใช้ L9 (3^4) orthogonal array ในการหาค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยตัวแปรทั่วไปที่ส่งผลต่อกระบวนการทำความสะอาดด้วยกระบวนการนี้ประกอบด้วยตัวแปร 4 ตัวแปรดังนี้

1) มุมที่ใช้ในการทำความสะอาดระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด
2) ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด
3) ขนาดของรูออริฟิส
4) ความถี่ของสัญญาณพัลส์

ซึ่งในงานทดลองนี้ไม่สนใจค่าความเร็วของละอองน้ำแข็งแห้งขณะผ่านหัวฉีด แต่ได้กำหนดตัวแปรเพิ่มอีกหนึ่งตัวคือมีการใช้สัญญาณพัลส์ (Pulse Signal) เข้ามาเป็นตัวแปรควบคุมอีกตัวแปรหนึ่ง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า มุมที่ใช้ในการทำความสะอาดระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวจะไม่มีนัยสำคัญกับประสิทธิภาพในการทำความสะอาด เนื่องจากมีค่าความเชื่อมั่นที่ต่ำ ส่วนตัวแปรควบคุมที่เหลือทั้ง 3 ตัวนั้นจะมีนัยสำคัญกับประสิทธิภาพในการทำความสะอาด ซึ่งประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการทำความสะอาดที่มุมที่ใช้ในการทำความสะอาด 15 องศา ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด 40 มิลลิเมตร ขนาดของรูออริฟิส 0.3 มิลลิเมตร ความถี่ของสัญญาณพัลส์ 50 มิลลิวินาที

Christopher Toscano และคณะ [10] ได้ทำการศึกษากลไกในการทำความสะอาดพื้นผิวในกระบวนการทำความสะอาดด้วยอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่สภาวะในการทำความสะอาดต่างๆ โดยทำความสะอาดอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันไปบนพื้นผิว ซึ่งพบว่ากลไกในการชนกันระหว่างอนุภาคประกอบไปด้วยกลไกการชนแบบม้วน (Rolling) และกลไกการชนแบบเลื่อน (Sliding) และความเร็ววิกฤตของการขจัดอนุภาคบนพื้นผิวด้วยกลไกการชนแบบม้วนนั้นจะมีค่าน้อยกว่าความเร็ววิกฤตของการขจัดอนุภาคบนพื้นผิวด้วยกลไกการชนแบบเลื่อน นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่สามารถกำจัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่บนพื้นผิวได้ง่าย แต่สำหรับการใช้อนุภาคเย็นยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่นี้ไม่สามารถขจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าบนพื้นผิวได้

บทที่ 3
ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1.1 รวบรวม และศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

3.1.2 ออกแบบอุปกรณ์และวิธีในการทดลอง

3.1.3 ทำการทดลอง

3.1.4 สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน

3.2 วิธีดำเนินงาน

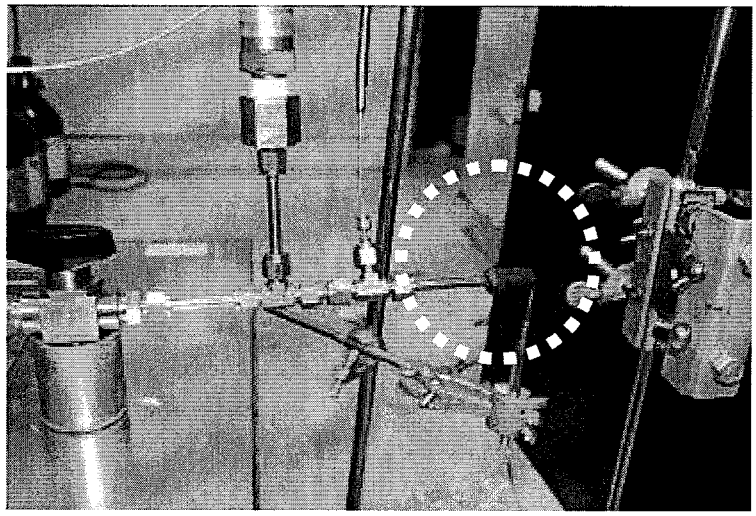
3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์

1) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความบริสุทธิ์ 99.95% (CO_2)
2) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate; $CaCO_3$)
   - FMT-98
   - Slurry form
   - Particle Size (Distribution < 2 μm) $98.0 \pm 2\%$
   - Solid Content (Oven 145°C 2 Hours) $75.0 \pm 1\%$
3) อะซิโตน (Acetone)
4) แผ่นอะลูมิเนียม (Aluminium)
5) แผ่นทองแดง (Copper)
6) แผ่นพลาสติกอะคริลิก (Poly(methyl methacrylate); PMMA)
7) ถังบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
8) ปั๊มอัดความดันสูง
9) ถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ขนาด 300 มิลลิลิตร
10) หัวฉีดที่มีรูออริฟิสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร
11) เครื่องให้ความร้อน
12) ตู้อบ
13) เทอร์โมคอปเปิล
14) เพรสเชอร์ทรานสดิวเซอร์
15) เครื่องชั่งน้ำหนักก๊าซ

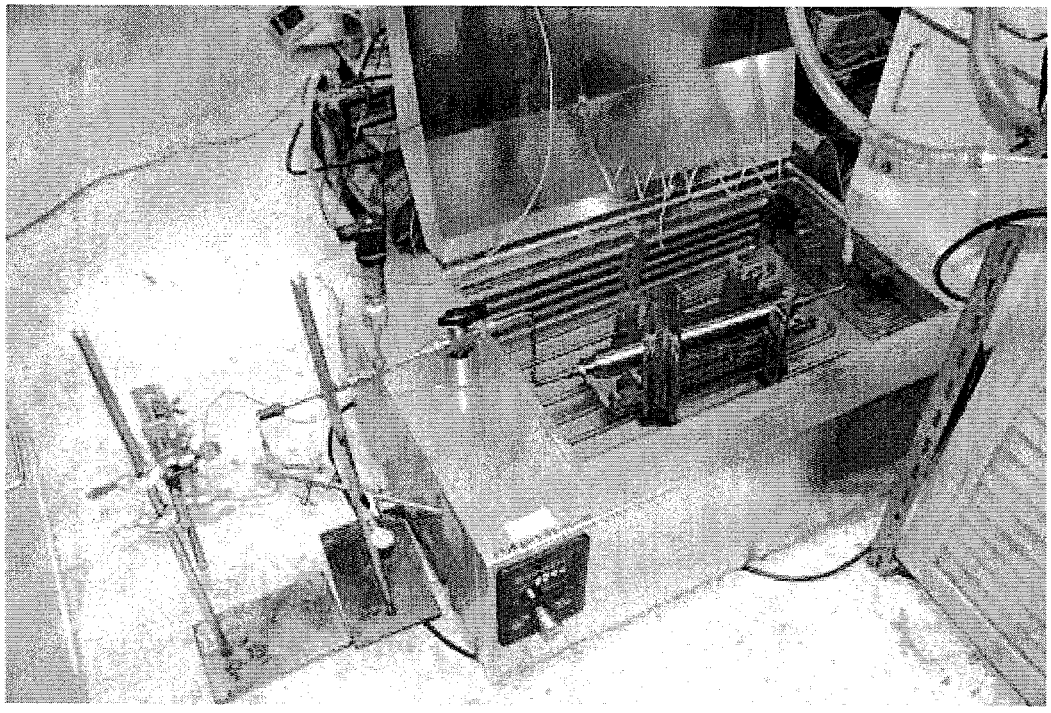
16) เครื่องชั่งน้ำหนัก 6 ตำแหน่ง

17) กล้องบันทึกภาพ พร้อมเลนส์ถ่ายภาพกำลังขยายสูง

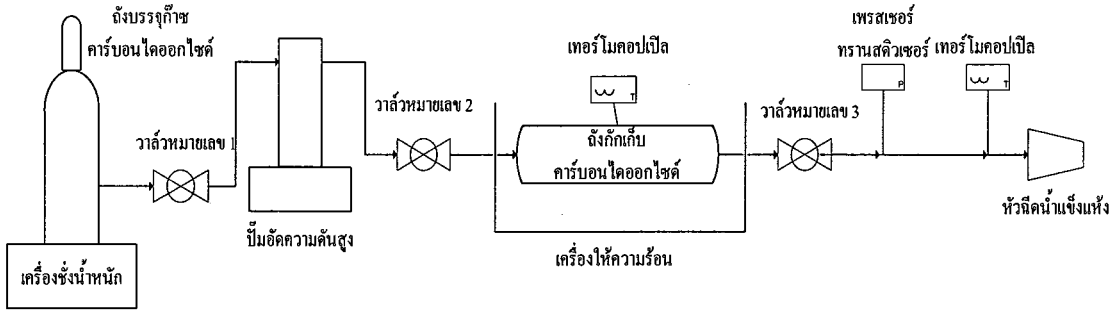
18) ฉากที่ใช้ในการจับชิ้นงาน



รูปที่ 3.1 หัวฉีด



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

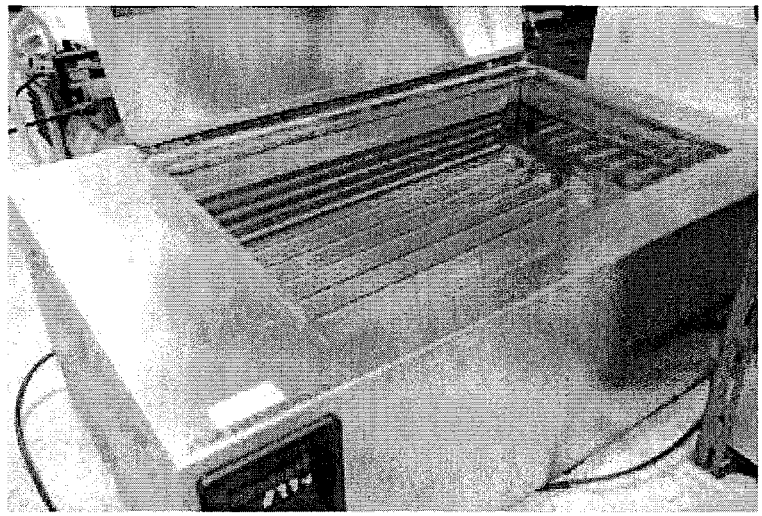


รูปที่ 3.3 แผนภูมิอุปกรณ์ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

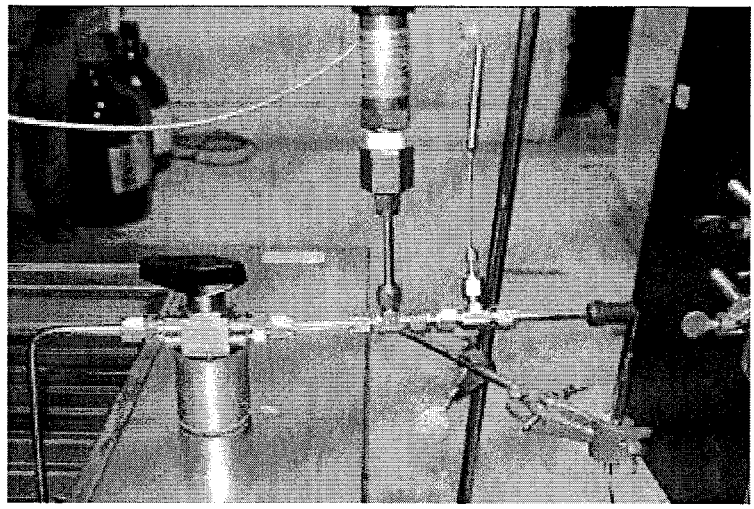
3.2.2.1 การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง และการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

1) เปิดเครื่องให้ความร้อน โดยตั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส



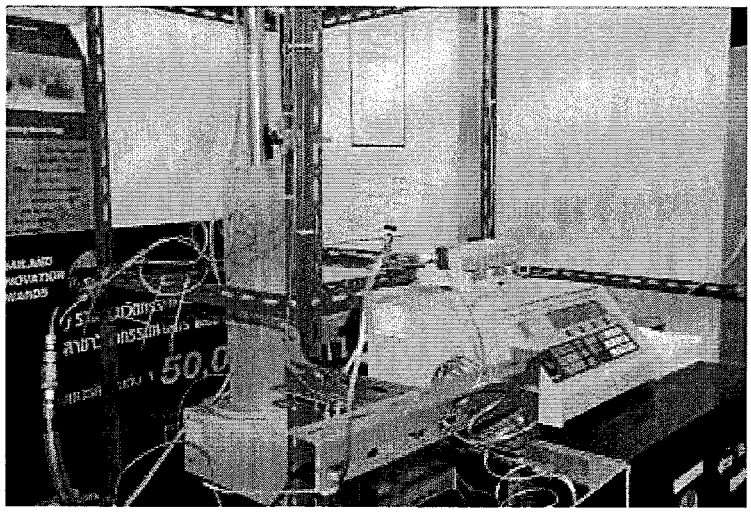
รูปที่ 3.4 เครื่องให้ความร้อน

2) เปิดปั๊มอัดความดัน ปิดวาล์วหมายเลข 3 ให้สนิทและเปิดวาล์วหมายเลข 1 และ 2 เพื่อปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จนความดันภายในระบบคงที่ จากนั้นปิดวาล์วหมายเลข 2 แล้วเปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อไล่อากาศออกจากถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จนกระทั่งก๊าซที่พ่นออกมาจากถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้หมดแล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข 3



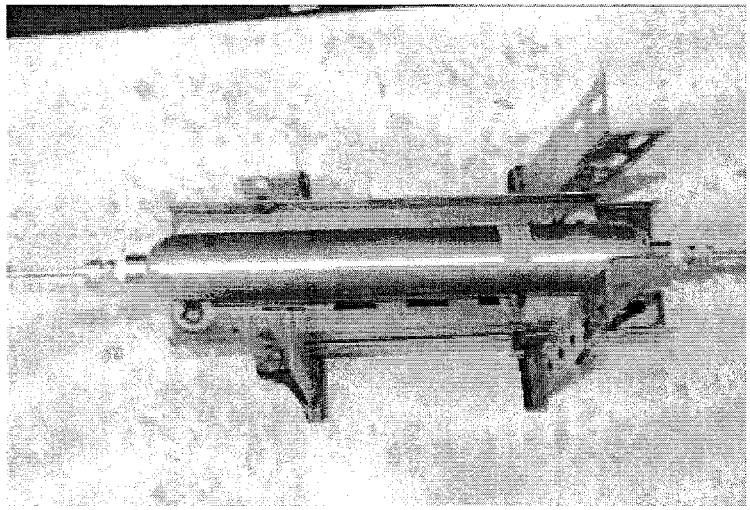
รูปที่ 3.5 วาล์วหมายเลข 3

3) เปิดปั๊มอัดความดันเพื่อเริ่มอัดความดันให้ได้สูงตามที่ต้องการ



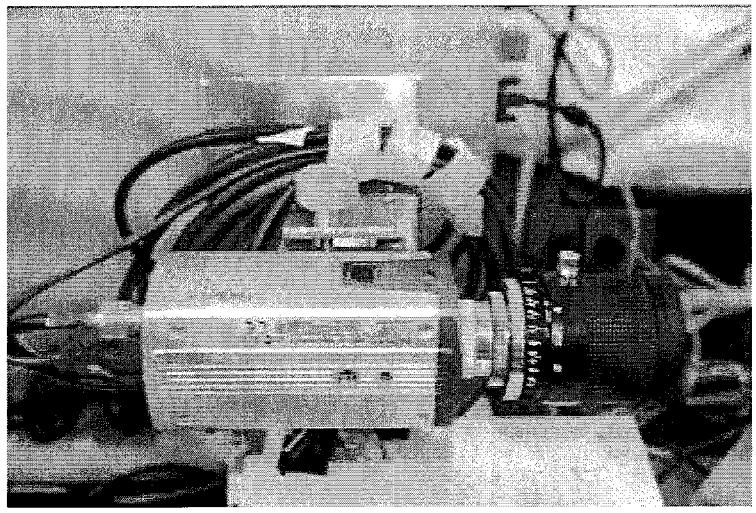
รูปที่ 3.6 ปั๊มอัดความดันสูง

4) เมื่อเริ่มอัดความดันทำการปิดวาล์วหมายเลข 2 และเปิดวาล์วหมายเลข 1 เพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่ปั๊มอัดความดัน
5) ปิดวาล์วหมายเลข 1 จากนั้นจึงใช้ปั๊มเพื่อเพิ่มความดันตามที่เราต้องการในแต่ละการทดลอง
6) เมื่อได้ความดันมากกว่าในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว จึงเปิดวาล์วหมายเลข 2 เพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่ถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์



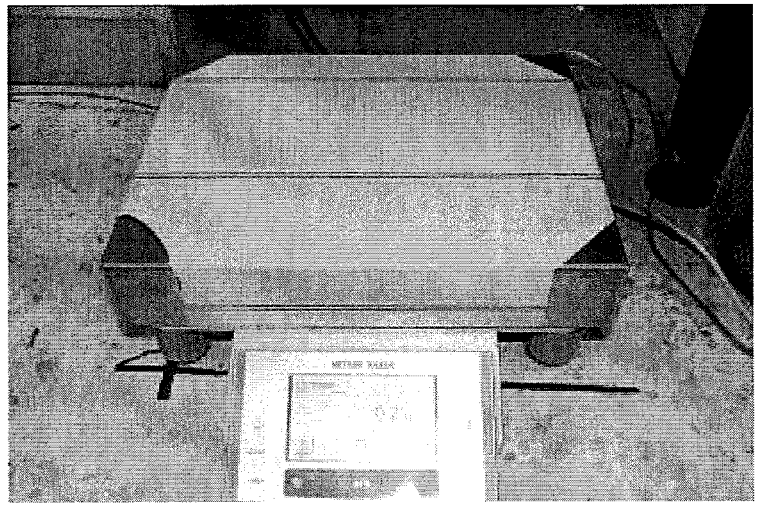
รูปที่ 3.7 ถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

7) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3 ถึงข้อ 5 จนได้ความดันในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์สูงตามที่ต้องการในแต่ละการทดลอง
8) ทำการตั้งค่าการควบคุมของปั๊มอัดความดัน เพื่อปรับความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ให้คงที่ตลอดการทดลอง เพื่อใช้ค่าความดันนี้ไปคำนวณหาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์
9) ตั้งเครื่องทิ้งไว้พร้อมทั้งทำการวัดอุณหภูมิจนอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์มีอุณหภูมิตามที่ต้องการในแต่ละการทดลอง เพื่อใช้ค่าอุณหภูมินี้ไปคำนวณหาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์
10) เมื่ออุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตามที่ต้องการ แล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข 2 ให้สนิท
11) เปิดวาล์วหมายเลข 3 พร้อมทั้งบันทึกภาพของน้ำแข็งแห้งที่ผลิตออกมาได้ด้วยกล้องบันทึกภาพพร้อมเลนส์กำลังขยายสูง จนสิ้นสุดการพ่นน้ำแข็งแห้งแล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อนำภาพที่บันทึกได้ไปใช้หาระยะเวลาที่ใช้ในการพ่นน้ำแข็งแห้ง อัตราการไหลเชิงมวล และปริมาตรรวมของน้ำแข็งแห้งที่ออกมาจากเครื่องพ่นน้ำแข็งแห้ง



รูปที่ 3.8 กล้องบันทึกภาพ พร้อมเลนส์ถ่ายภาพกำลังขยายสูง

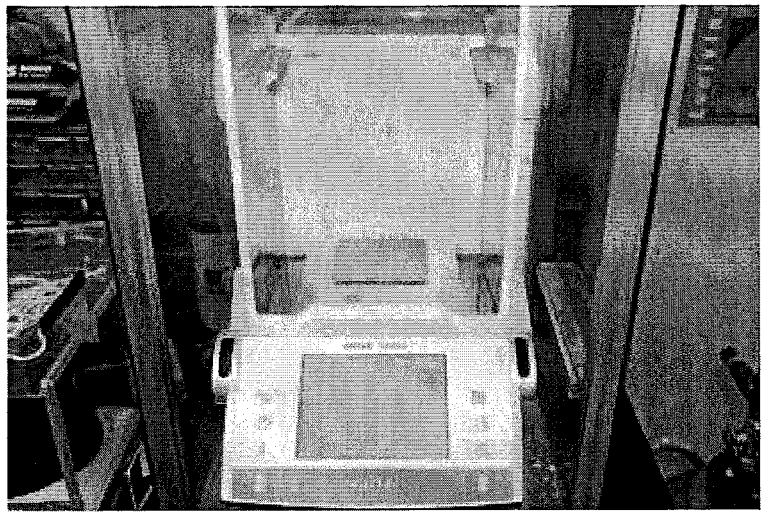
12) ชั่งน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ไปในระหว่างการพ่นน้ำแข็งแห้งโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักก๊าซ เพื่อนำไปใช้หาอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลผ่านหัวฉีดน้ำแข็งแห้ง โดยสามารถที่จะคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงมวล โดยนำค่าน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่หายไปมาหารด้วยระยะเวลาทั้งหมดที่ได้ใช้ไปในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง



รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักก๊าซ

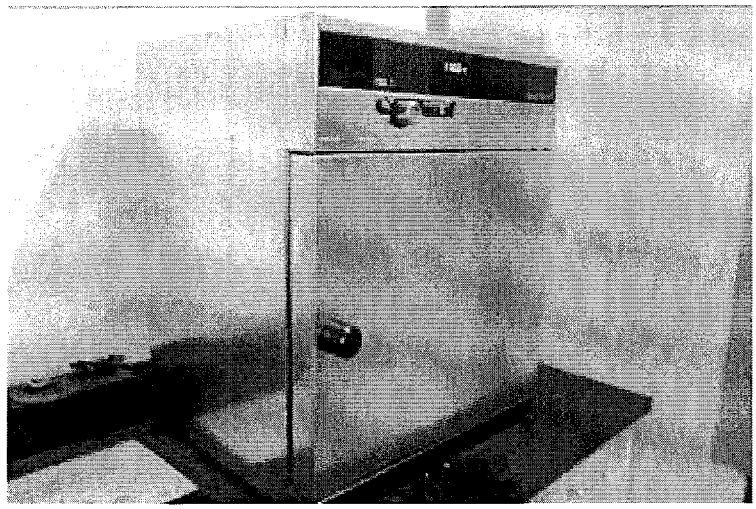
3.2.2.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

1) เตรียมแผ่นตัวอย่างที่จะใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิว ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นอะลูมิเนียม แผ่นทองแดง และแผ่นพลาสติกอะคริลิก โดยตัดแผ่นตัวอย่างให้มีขนาด 2×2 นิ้ว แล้วทำความสะอาดเบื้องต้นด้วยการล้างด้วยน้ำเปล่า และอะซิโตน นำไปอบในเตาอบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 6 ตำแหน่งและบันทึกค่า



รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก 6 ตำแหน่ง

2) เตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เคลือบพื้นผิวแผ่นตัวอย่าง โดยทำการเจือจางแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยน้ำในอัตราส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อน้ำ 1 ต่อ 20 จากนั้นทำการกวนผสมเป็นเวลา 5 นาที

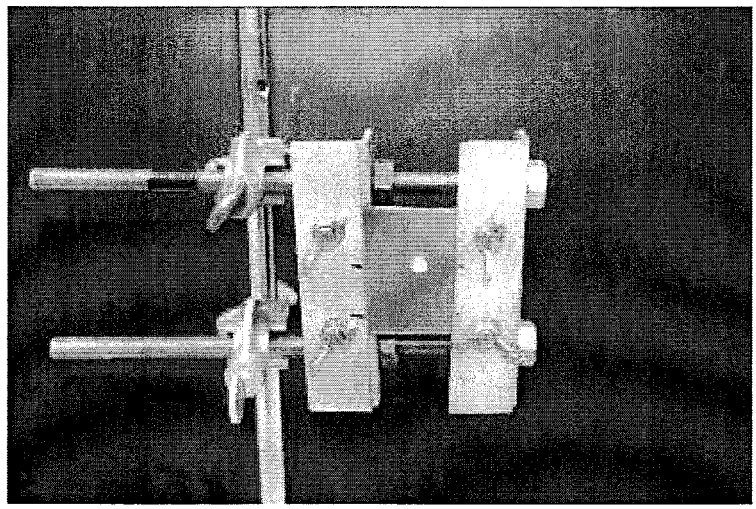


รูปที่ 3.11 ตู้อบ

3) ทำการปิเปตแคลเซียมคาร์บอเนตที่เจือจางแล้วมา 20 ไมโครลิตร และหยดลงบนพื้นผิวของแผ่นตัวอย่าง จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเครื่องชั่งน้ำหนัก 6 ตำแหน่ง และบันทึกค่า ก็จะได้ตัวอย่างที่พร้อมนำไปใช้ทดลองทำความสะอาดด้วยการพ่นน้ำแข็งแห้ง

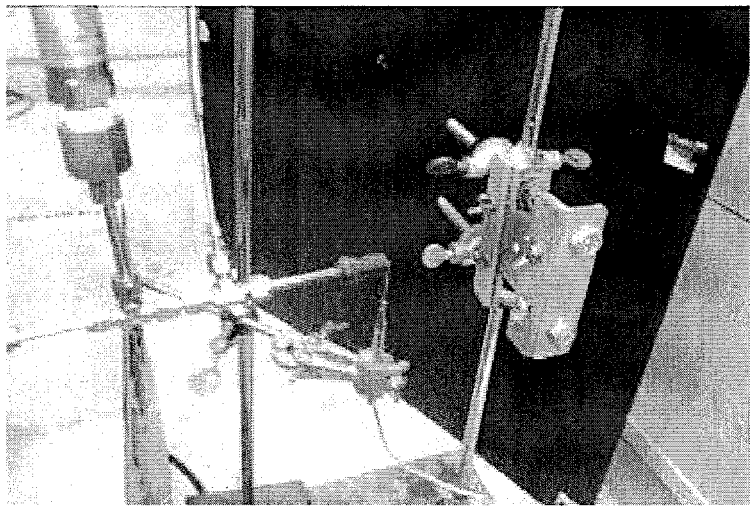
3.2.2.3 การทดลองทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

1) ทำตามข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 10 ของขั้นตอนการทดลองที่ 3.2.2.1
2) นำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนการทดลองที่ 3.2.2.2 มาชั่งน้ำหนักก่อนการทดลองทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง และบันทึกค่า



รูปที่ 3.12 ฉากที่ใช้ในการจับชิ้นงาน

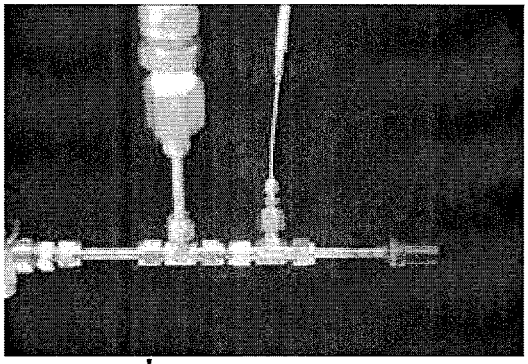
3) นำตัวอย่างที่จะทำการทดลองมายึดกับฉากรับการพ่นทำความสะอาด โดยตั้งฉากรับการพ่นทำความสะอาดห่างจากปลายหัวฉีดละอองน้ำแข็งแห้งเป็นระยะ 5 เซนติเมตร



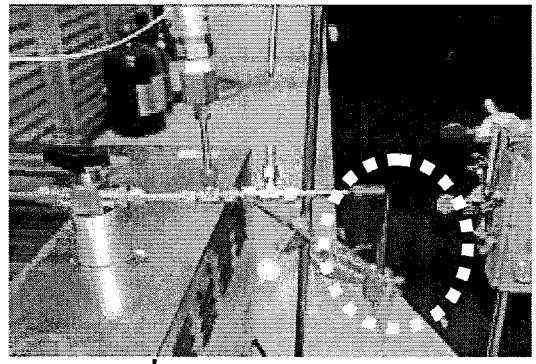
รูปที่ 3.13 การจัดวางอุปกรณ์ก่อนการทดลองทำความสะอาดพื้นผิว

4) เปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อทำการทดลองทำความสะอาดพื้นผิวเป็นเวลา 5 วินาที แล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข3
5) นำแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยการพ่นด้วยน้ำแข็งแห้งแล้วไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าเพื่อใช้ในการหาประสิทธิภาพของการทำความสะอาด

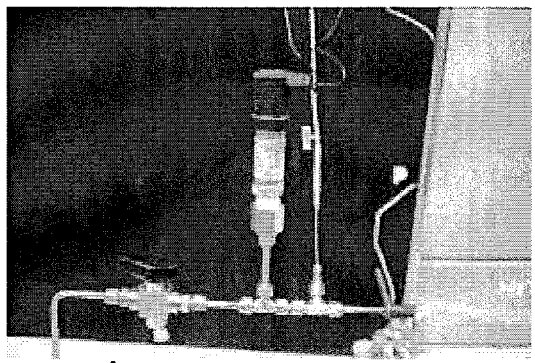
6) ทำตามข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 5 ซ้ำ แต่เปลี่ยนชนิดของตัวอย่างที่จะทำการทดลองเพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำความสะอาดบนพื้นผิวที่ต่างชนิดกัน



รูปที่ 3.14 เทอร์โมคอปเปิล



รูปที่ 3.15 เทอร์โมคอปเปิล



รูปที่ 3.16 เพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

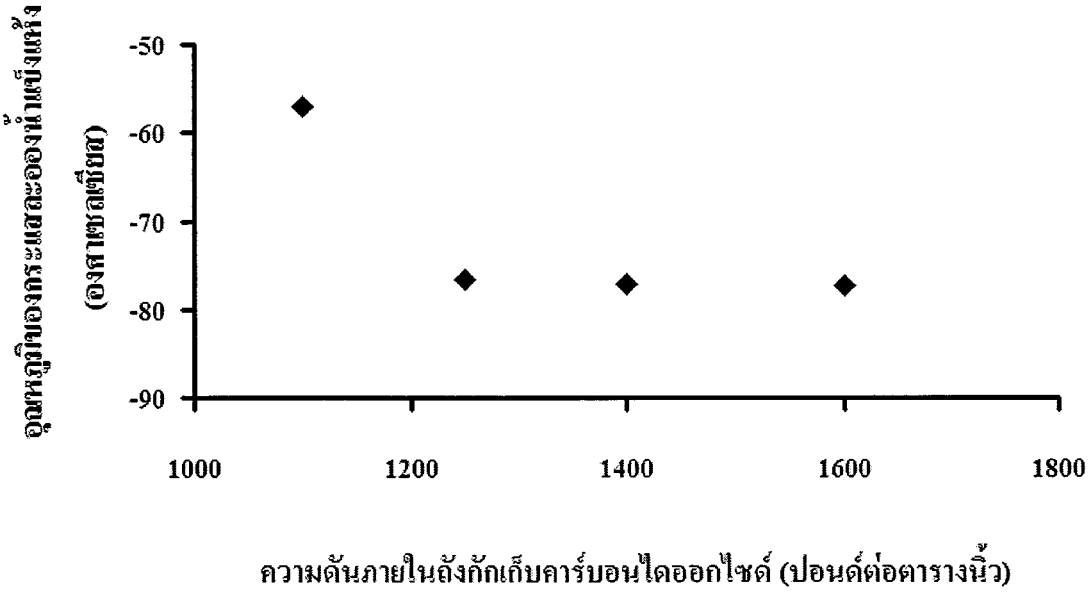
โครงงานวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษาหาผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการผลิตน้ำแข็งแห้งที่สภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งแห้งในช่วง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอิทธิพลของอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งแห้งในช่วง 30 องศาเซลเซียส รวมถึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวชนิดต่างๆ ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง โดยพื้นผิวที่นำมาทดลองได้แก่ อะลูมิเนียม อะคริลิกพลาสติก และทองแดง โดยในการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำความสะอาดนี้ ได้ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4.1 ผลการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้อุปกรณ์ที่ได้ออกแบบ

จากผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งขณะพ่นละอองน้ำแข็งแห้งและทำการทดลองเปลี่ยนค่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้อุณหภูมิของละอองน้ำแข็งแห้งตามรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บไม่มีผลต่ออุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง โดยอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งจะมีค่าประมาณ -76 องศาเซลเซียส หากใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บในช่วง 1,250 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แต่ถ้าใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังที่กักเก็บที่ต่ำกว่า 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แต่ไม่ต่ำกว่า 1,100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะส่งผลให้อุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งนั้นจะลดต่ำลงตามความดันที่ลดลงโดยอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งจะมีค่าในช่วงระหว่าง -55 ถึง -76 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งนั้นสามารถที่บ่งบอกถึงแนวโน้มในการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส โดยถ้าอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งนั้นมีค่าต่ำลงแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มในการเปลี่ยนวัฏภาคไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งมากขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้เมื่อทำการทดลองโดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บอยู่ในช่วง 1,250 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งนั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ถ้าทำการทดลองโดย

ใช้ความดันในถังกักเก็บที่ต่ำกว่า 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งนั้นมีค่าน้อยลง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำเอาค่าอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งไปใช้ในการยืนยันการเกิดของละอองน้ำแข็งแห้งที่ปลายของหัวฉีดได้โดยอาศัยแผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์

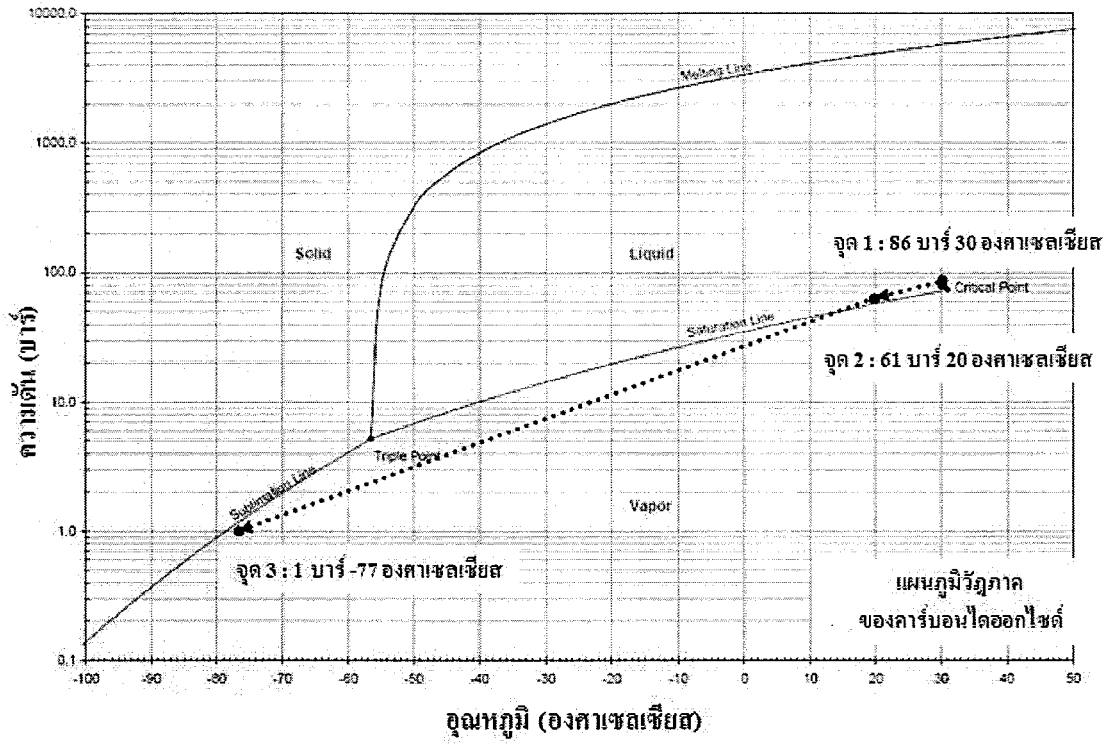


รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่มีต่ออุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง

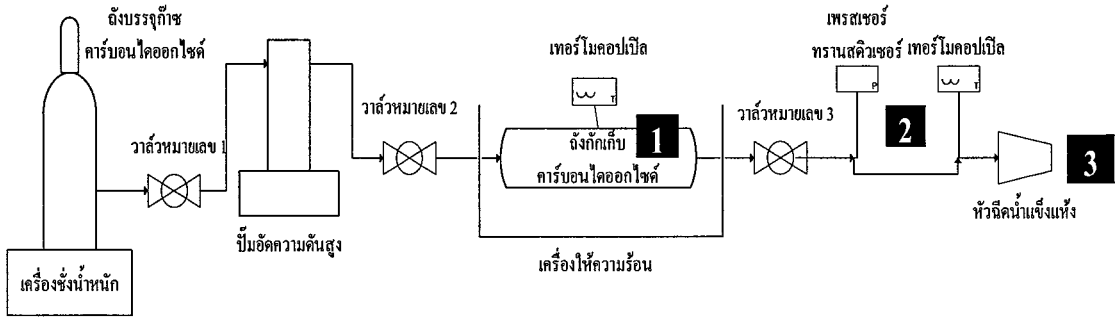
4.2 การศึกษาทิศทางในการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์

จากแผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นการทดลองที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บเป็น 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จึงเริ่มต้นจากจุดที่ 1 บนแผนภูมิวัฏภาครูปที่ 4.2 จากนั้นเมื่อทำการพ่นคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บผ่านรูออริฟิสของหัวฉีดที่ได้ออกแบบไว้ออกสู่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิห้อง จากข้อมูลที่เพรสเชอร์ทรานสดิวเซอร์ และเทอร์โมคอปเปิลได้บันทึกไว้ในระหว่างการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งพบว่าที่บริเวณท่อก่อนผ่านรูออริฟิส คาร์บอนไดออกไซด์ตรงจุดนั้นมีความดันโดยประมาณ 885 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งคือจุดที่ 2 บนแผนภูมิวัฏภาครูปที่ 4.2 และเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสออกมาแล้วพบว่าที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลายหัวฉีดที่ความดันบรรยากาศ มีอุณหภูมิประมาณ -76 องศาเซลเซียส หรือจุดที่ 3 บนแผนภูมิวัฏภาครูปที่ 4.2 โดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ

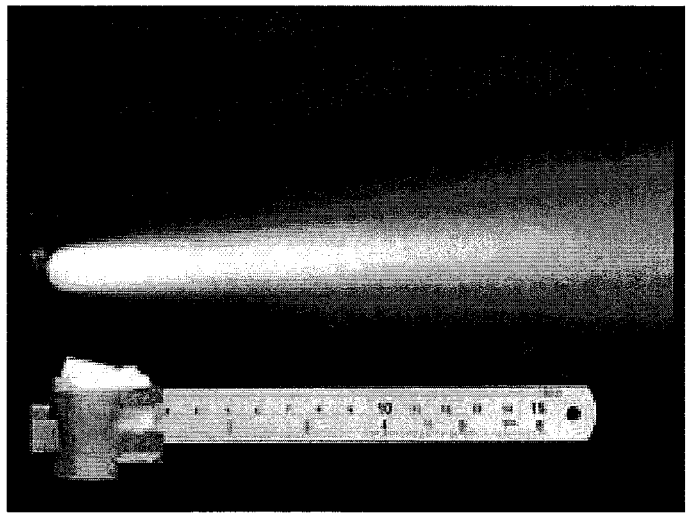
คาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความดัน 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิเป็น 30 องศาเซลเซียส ดังนั้นจากการศึกษาทิศทางของการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า ละอองสีขาวที่เกิดขึ้นบริเวณปลายหัวฉีดในขณะทำการทดลอง ตามรูปที่ 4.3 เป็นกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งจริง



รูปที่ 4.2 แผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แสดงทิศทางการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ขณะทำการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง [5]



รูปที่ 3.3 แผนภูมิอุปกรณ์ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

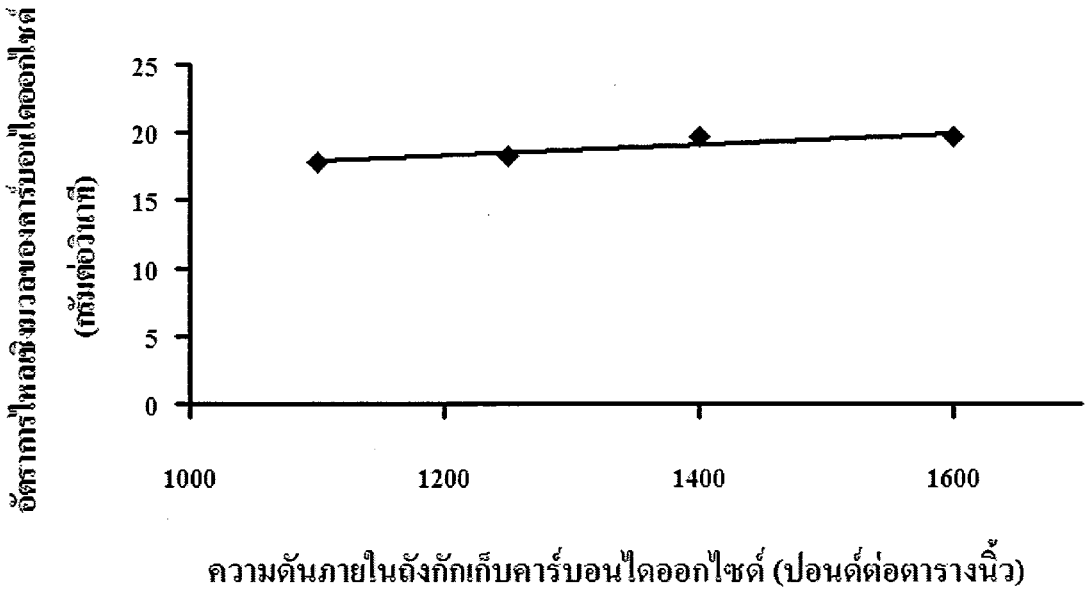


รูปที่ 4.3 กระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีด

4.3 การหาอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ขณะพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

ภายหลังจากการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งแล้ว จะพบว่าเมื่อได้ทำการชั่งน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่ถูกใช้ไปในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง พร้อมทั้งหาระยะเวลาที่ได้ทำการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งในแต่ละกะ ก็จะสามารถที่จะประมาณค่าอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสของหัวฉีด โดยค่าอัตราการไหลที่หาได้จากผลการทดลอง เมื่อใช้ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิเป็น 30 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการไหลเชิงมวลตามรูปที่ 4.4

ซึ่งจากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงของความดัน 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไม่มีผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสของหัวฉีด โดยอัตราการไหลเชิงมวลที่ได้จากการทดลองจะมีค่าอยู่ในช่วง 17 ถึง 19 กรัมต่อวินาที ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลที่หาได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความเร็วของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง และความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งต่อไป



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์

4.4 การประมาณค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้ง

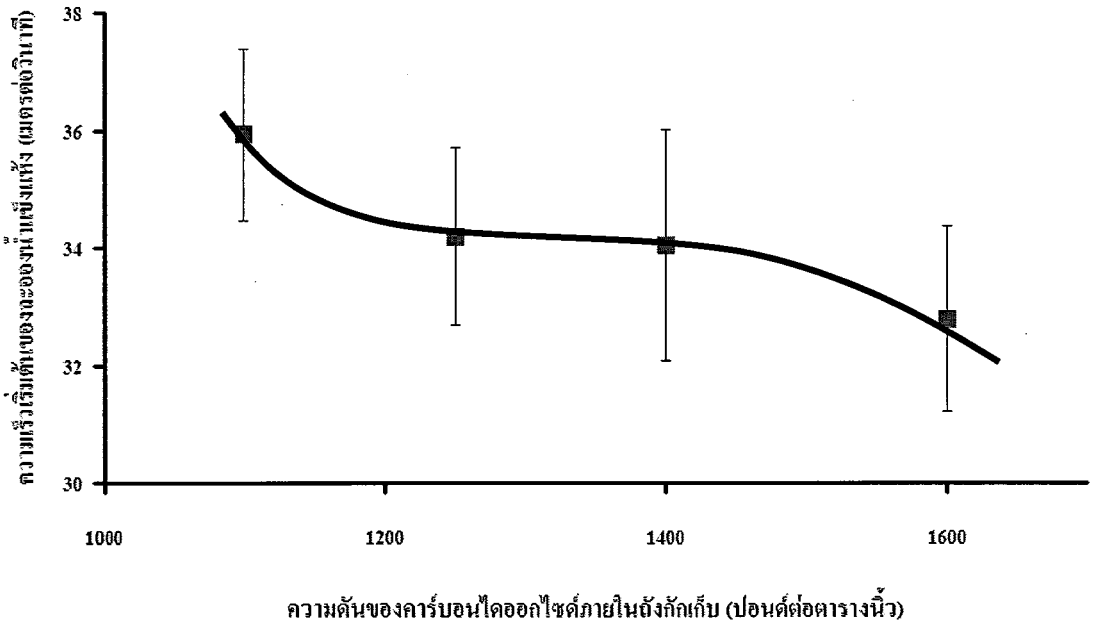
จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส และเมื่อนำค่าอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้คำนวณในตอนที่ 4.3 มาใช้ในการประมาณค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งที่ถูกพ่นออกมาจากปลายหัวฉีด ซึ่งที่ค่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่างกันทำให้สามารถประมาณความเร็วเริ่มต้นของน้ำแข็งแห้งได้ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความเร็วเริ่มต้นเฉลี่ยของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ

ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ความเร็วเริ่มต้นเฉลี่ยของละอองน้ำแข็งที่พ่นออกมาจากปลายหัวฉีด** (เมตรต่อวินาที)	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1100	35.93	2.94
1250	34.20	3.02
1400	34.05	3.95
1600	32.79	3.15

** ทำการทดลองที่อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ 30 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 จะพบว่าที่อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียสนั้น ความเร็วของละอองน้ำแข็งแห้งลดลงเล็กน้อยเมื่อความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บสูงขึ้น โดยค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งที่ได้จากการทดลองจะมีค่าอยู่ในช่วง 32 ถึง 36 เมตรต่อวินาที แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแม้ว่าจะทดลองที่ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น แต่ความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งกลับไม่ได้เพิ่มขึ้นตาม แต่กลับลดลง ซึ่งที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากปรากฏการณ์ทางอุณหพลศาสตร์ของคาร์บอนไดออกไซด์ อันเนื่องมาจากความดันจะมีผลต่อสมดุลระหว่างวัฏภาคของเหลว – ก๊าซของคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นถ้าหากความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นก็จะส่งผลให้สมดุลเกิดการเบี่ยงเบนไปทางวัฏภาคของเหลวมากกว่าเดิม ซึ่งถ้าเป็นเช่นนี้แล้วแนวโน้มในการเปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสจะมีโอกาสสูงขึ้น จึงเป็นผลทำให้วัฏภาคก๊าซภายในละอองน้ำแข็งแห้งลดลงซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วโดยรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ทั้งในวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคก๊าซลดลง เมื่อทำการทดลองที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บสูงขึ้น โดยการที่ความเร็วโดยรวมของละอองน้ำแข็งแห้งลดลงนั้นเนื่องมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซจะมีพลังงานจลน์ที่สูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคของแข็ง ดังนั้นการที่แนวโน้มในการเปลี่ยนวัฏภาคไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งมากขึ้นก็จะยิ่งส่งผลให้ความเร็วโดยรวมของละอองน้ำแข็งแห้งนั้นลดลงตาม



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้

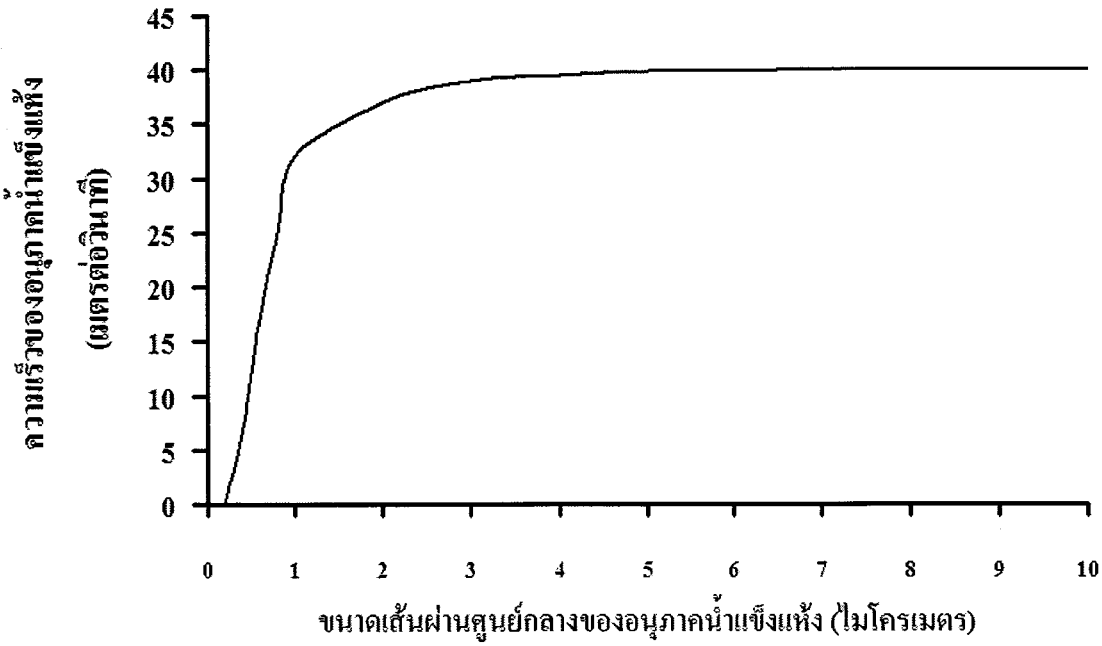
แต่จากสมการของเบอร์นูลี (Bernoulli Equation) จะเห็นได้ว่าหากทำการทดลองโดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บมีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งก็จะส่งผลให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งที่ปลายหัวฉีดน้ำแข็งแห้งจะต้องมีค่าสูงขึ้นตามค่าความดันภายในถังกักเก็บหากของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสนั้นมีเพียงวัฏภาคเดียวและไม่มีการเปลี่ยนวัฏภาคเมื่อเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิส แต่ที่ค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งที่คำนวณได้จากผลการทดลองไม่เป็นไปตามการคำนวณค่าความเร็วโดยอาศัยสมการเบอร์นูลี เนื่องจากในการทดลองนั้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสนั้นมี 2 วัฏภาค และเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสจะเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคอีกด้วยจึงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของเบอร์นูลี

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บสูงขึ้นก็จะพบว่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งที่ถูกพ่นออกมานั้นมีค่าลดลงตามค่าความดันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ความเร็วของละอองน้ำแข็งแห้งนั้นลดลงจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของละอองน้ำแข็งแห้ง เนื่องจากเมื่อความเร็วลดลงจะส่งผลให้ค่าโมเมนตัมในการเข้าชนของละอองน้ำแข็งแห้งนั้นลดลงไปโดยปริยาย แต่ในความเป็นจริงแล้วประสิทธิภาพในการทำความสะอาดไม่ได้ด้อยลงแต่กลับมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทดลองโดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่สูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้แนวโน้มในการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งมีมาก

ขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่ามีแนวโน้มที่ปริมาณของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตขึ้นมาได้จะมีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งปริมาณละอองน้ำแข็งแห้งที่มากขึ้นนี้จะส่งผลให้ค่าโมเมนตัมในการชนสูงขึ้น หรือโอกาสในการชนระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวมีมากขึ้น

4.5 การประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งจากค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้ง

จากผลการทดลองในตอนที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าสามารถที่จะประมาณความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งได้ และจากความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งนี้ทำให้สามารถที่จะทำการประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ โดยจากงานวิจัยของ Souvik Banerjee และ Andrea Campbell [8] ซึ่งได้มีการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเย็นยิ่งยวด โดยอนุภาคเย็นยิ่งยวดที่ Souvik Banerjee และAndrea Campbell ได้ใช้ศึกษาในงานวิจัยก็คืออนุภาคของน้ำแข็งแห้งเช่นเดียวกันกับโครงงานวิจัยนี้ โดยจากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนั้นสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของน้ำแข็งแห้งนั้นสูงขั้นตาม แต่เมื่อความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเป็น 40 เมตรต่อวินาที ความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนั้นจะไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่สามารถผลิตออกมาได้



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง [8]

ทำให้สามารถที่จะประมาณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้โดยอาศัยกราฟในรูปที่ 4.6 โดยจากข้อมูลของงานวิจัยนั้นไม่สามารถที่จะใช้กับอนุภาคของน้ำแข็งแห้งที่มีความเร็วสูงกว่า 40 เมตรต่อวินาที ดั้งนั้นจากข้อมูลผลการทดลองในตารางที่ 4.1 จะทำให้สามารถประมาณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความเร็วเริ่มต้นเฉลี่ยของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ที่ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ

ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ความเร็วเริ่มต้นเฉลี่ยของละอองน้ำแข็งที่พ่นออกมาจากปลายหัวฉีด** (เมตรต่อวินาที)	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (ไมโครเมตร)
1100	35.93	1.46
1250	34.20	1.29
1400	34.05	1.28
1600	32.79	1.19

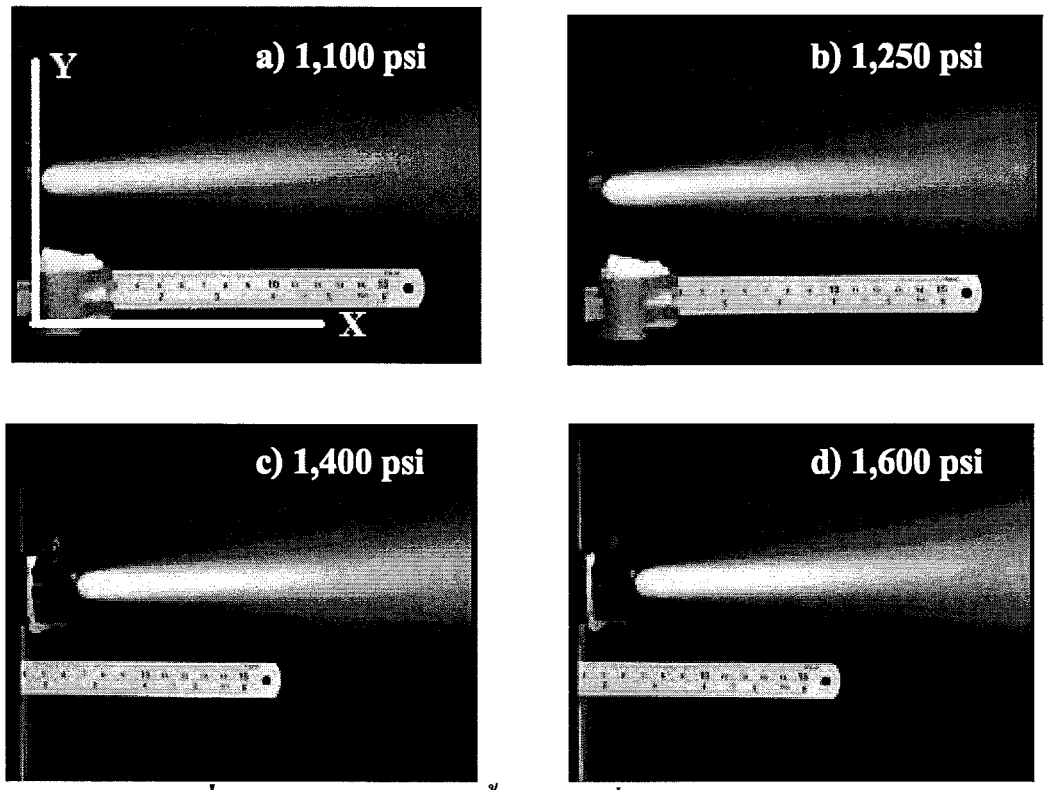
** ทำการทดลองที่อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ 30 องศาเซลเซียส

โดยจากตารางที่ 4.2 จะพบว่าเมื่อใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บในช่วง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะสามารถผลิตละอองของน้ำแข็งแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งในช่วงระหว่าง 1.19 ถึง 1.46 ไมโครเมตร โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนี้จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาด เนื่องจากกลไกในการขจัดอนุภาคของการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งนี้ มีข้อจำกัดในกลไกการทำความสะอาด คือถ้าหากอนุภาคที่ยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนั้นก็จะส่งผลให้โมเมนตัมในการชนนั้นไม่สามารถที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับชิ้นงานได้ และจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดลดลง

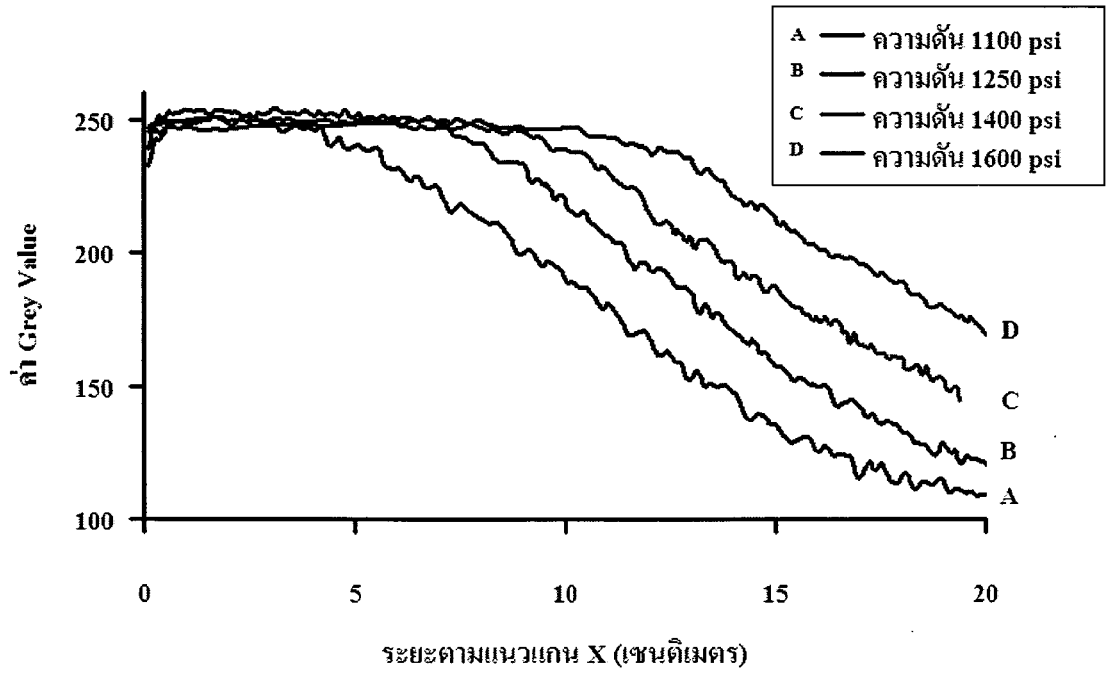
4.6 การประมาณค่าสัดส่วนช่องว่าง (Void Fraction) และค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของละอองน้ำแข็งแห้ง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.5 เมื่อทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง และสมมติให้อนุภาคของน้ำแข็งแห้งที่ผลิตขึ้นมาได้นั้นมีรูปทรงกลมทำให้สามารถที่จะคำนวณปริมาตรของอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ และจากการทดลองที่ได้มีการบันทึกภาพไว้ในระหว่างการพ่น

ละอองน้ำแข็งแห้งทำให้สามารถนำภาพที่ได้บันทึกไว้ในระหว่างการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งมาใช้ในการคำนวณหาปริมาตรรวม (Bulk Volume) ของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตออกมาได้



รูปที่ 4.6 กระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจากการใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังเก็บต่างๆ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Grey Value กับระยะทางตามแนวแกน X

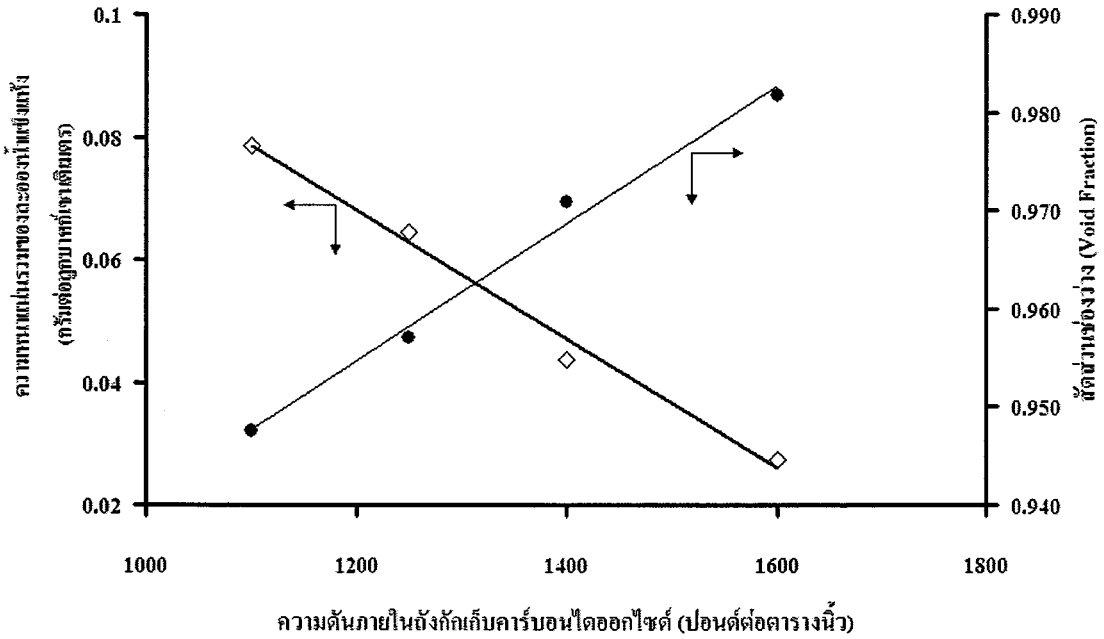
โดยค่าปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้งนี้หาจากการถ่ายภาพขณะทำการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง โดยจะเริ่มต้นจากการวัดขนาดความยาวตามแนวแกนนอน (X) ของละอองน้ำแข็งแห้งที่ถูกพ่นออกมาจากปลายหัวฉีดโดยอาศัยค่า Grey Value เป็นมาตรฐานในการวัดขนาดความยาวตามแกนนอนของละอองน้ำแข็งแห้ง โดยวัดความยาวของละอองน้ำแข็งแห้งจากบริเวณปลายหัวฉีดจนถึงจุดที่ค่า Grey Value มีค่าเท่ากับ 240 ซึ่งผลของการวัดขนาดความยาวตามแกนนอนของละอองน้ำแข็งแห้งของรูปที่ 4.6 ได้ผลของการวัดความยาวตามแกนนอนของละอองน้ำแข็งแห้งเป็นดังรูปที่ 4.7 โดยค่าความยาวตามแกนนอนของละอองน้ำแข็งแห้งที่วัดได้นั้นจะอยู่ในช่วง 7 ถึง 25 เซนติเมตร หากใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยค่าความยาวของละอองน้ำแข็งแห้งนี้จะส่งผลโดยตรงต่อค่าปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งค่าทั้ง 2 ค่านี้จะมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรง และถ้าหากค่าปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้งมีค่าสูงก็จะส่งผลให้ค่าของความหนาแน่นรวมที่คำนวณได้นั้นมีค่าต่ำ แต่ในทางกลับกันถ้าค่าปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้งสูงจะเป็นการแสดงให้เห็นว่าเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสสู่บรรยากาศแล้วมีการเปลี่ยนวัฏภาคไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งมากกว่ากรณีที่ค่าปริมาตรรวมของน้ำแข็งแห้งต่ำ ดังนั้นจากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อเพิ่มความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บให้สูงขึ้น จะส่งผลให้เมื่อทำการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งจะได้ปริมาณของละอองน้ำแข็งแห้งที่สูงขึ้นตามไปด้วย

ซึ่งจากปริมาตรของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง และปริมาตรรวมของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งที่คำนวณมาได้ในตอนแรกนั้นทำให้สามารถที่จะคำนวณหาค่าสัดส่วนช่องว่างของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง รวมถึงค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ ซึ่งจากการคำนวณทำให้ได้ค่าสัดส่วนช่องว่าง และค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตที่สภาวะความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ ที่ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ

ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	สัดส่วนช่องว่าง (Void Fraction ; ε)	ความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งที่ผลิตได้** (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1100	**0.948**	**0.085**
1250	**0.957**	**0.064**
1400	**0.971**	**0.042**
1600	**0.982**	**0.027**

** ทำการทดลองที่อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันที่มีผลต่อค่าสัดส่วนช่องว่าง และค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งที่ผลิตได้ที่ความดันต่างๆ จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการทดลองที่ใช้ความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นจะพบว่าค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่าที่สูงขึ้นตาม โดยค่าสัดส่วนช่องว่างที่คำนวณได้นั้นมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.94 ถึง 0.98 แต่เมื่อลดความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่ใช้ใน

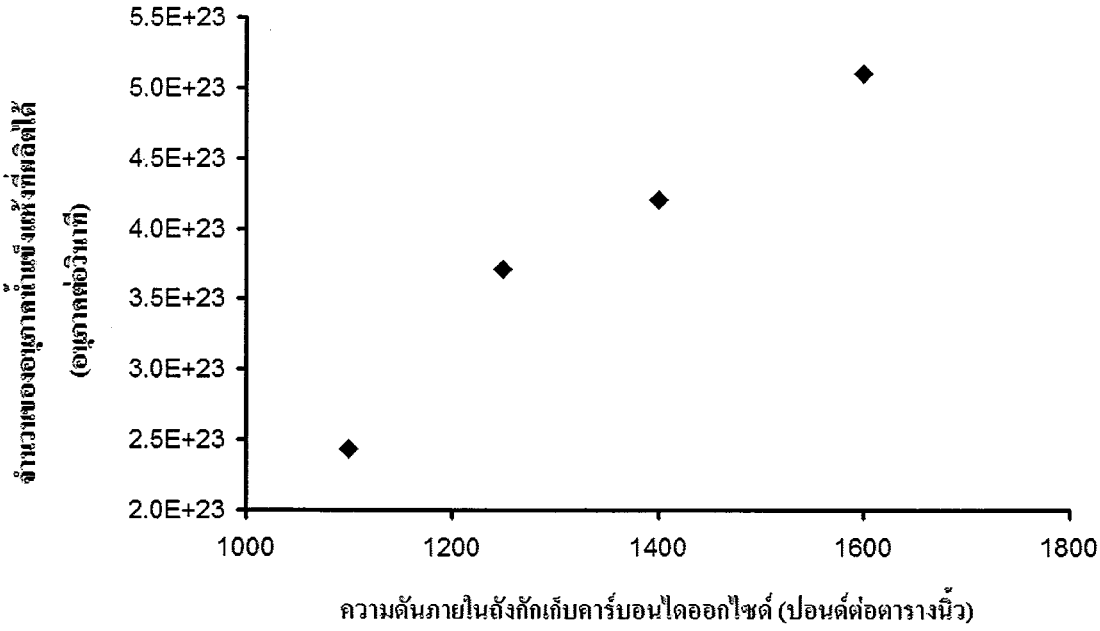
การทดลองจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้นั้นมีค่าลดลง โดยค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่คำนวณได้นั้นมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.027 ถึง0.078 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้น่าจะเป็นเพราะการคำนวณค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งนี้ได้คำนวณมาจากค่าอัตราการไหลเชิงมวล และค่าสัดส่วนช่องว่างของละอองน้ำแข็งแห้ง โดยจากรูปที่ 4.4 จะพบว่าค่าอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะไม่แตกต่างกัน ในการทดลองที่ใช้ช่วงของความดันภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนั้นค่าที่จะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งก็คือ ค่าสัดส่วนช่องว่างของละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งเมื่อทำการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้ค่าความดันภายในถังกักเก็บสูงก็จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ต่ำอันเนื่องมาจากการที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่สูงจะมีค่าสัดส่วนช่องว่างของละอองน้ำแข็งแห้งที่สูงขึ้นตามไป ดังจะเห็นได้ตามรูปที่ 4.8

4.7 การประมาณจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้ง

จากผลการทดลองในตอนที่ 4.5 และ 4.6 นั้นจะทำให้สามารถที่จะหา ค่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ค่าสัดส่วนช่องว่างของละอองน้ำแข็งแห้ง และปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้งได้ตามลำดับ จากค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวมาทำให้สามารถที่จะประมาณจำนวนของของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ โดยจะตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคของน้ำแข็งแห้งภายในกระแสละอองน้ำแข็งแห้งนั้นมีรูปทรงกลม

ซึ่งทำให้ได้ผลการทดลองที่แสดงถึงจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในละอองน้ำแข็งแห้ง*** ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 โดยหากทำการทดลองโดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บในช่วงของความดัน 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้วนั้นจะส่งผลให้สามารถที่จะผลิตอนุภาคของน้ำแข็งแห้งออกมาภายในกระแสละอองน้ำแข็งแห้งได้เป็นจำนวนถึง 2.4×10^{23} ถึง 5.1×10^{23} อนุภาคต่อวินาที โดยจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนี้จะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการขจัดอนุภาค เนื่องจากการที่มีอนุภาคของน้ำแข็งแห้งภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่สูงนั้น จะทำให้โอกาสที่อนุภาคของน้ำแข็งแห้งนั้นเข้าชนกับอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวนั้นสูงขึ้นตามเช่นกัน

*** การคำนวณหาจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในกระแสละอองน้ำแข็งแห้งได้แสดงไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้กับความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่ความดันต่างๆ

4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวชนิดต่างๆ ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

จากการทดลองที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวชนิดต่างๆ ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง โดยพื้นผิวที่นำมาใช้ทดลองได้แก่ อะลูมิเนียม อะคริลิกพลาสติก และทองแดง โดยในการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำความสะอาดนี้ ได้ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4.8.1 การพิจารณาสภาวะความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการผลิตละอองน้ำแข็งเพื่อพ่นทำความสะอาด

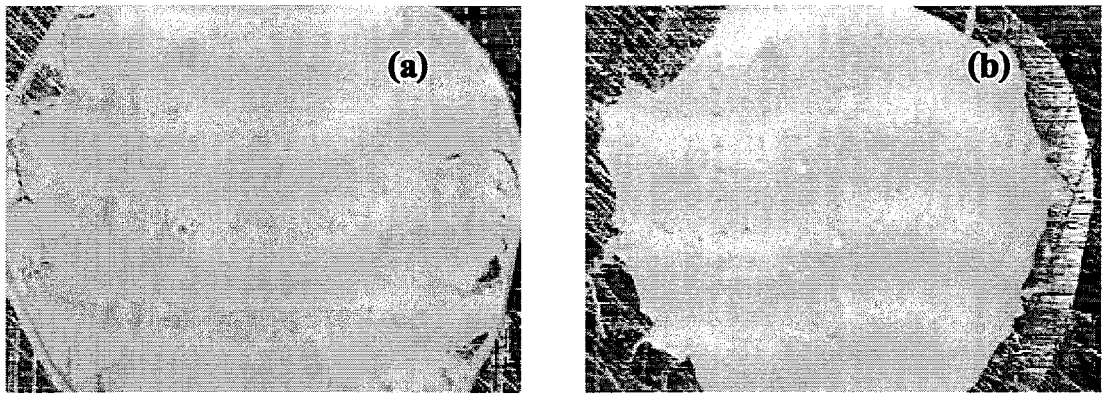
จากตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 เมื่อนำค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้ง ค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้ง และค่าสัดส่วนช่องว่างของละอองน้ำแข็งแห้ง รวมถึงจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ มาพิจารณาร่วมกันจะทำให้สามารถที่จะพิจารณาถึงค่าความดัน

ของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่เหมาะสมที่จะใช้ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง โดยค่าความดันที่เหมาะสมนั้นจะต้องเป็นค่าความดันที่จะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพในการขจัดอนุภาคบนพื้นผิวที่ดี และยังเหมาะสมในด้านค่าใช้จ่ายและความปลอดภัยในการปฏิบัติงานอีกด้วย

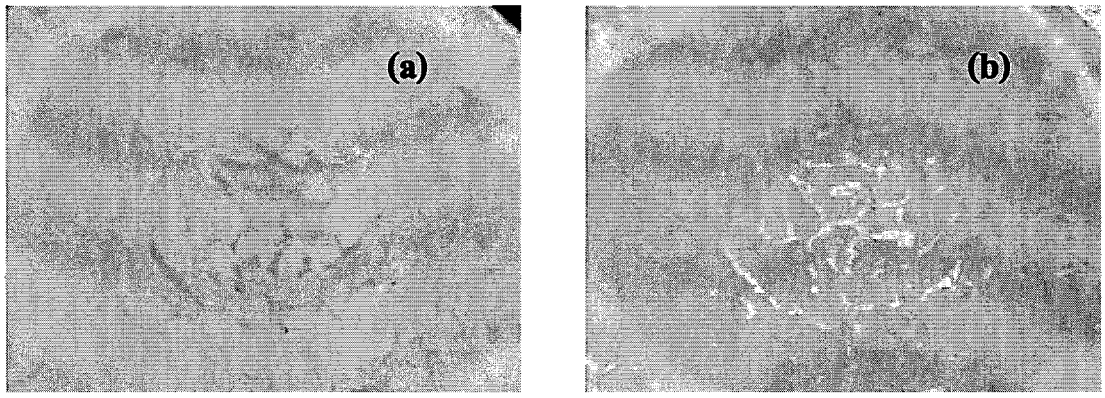
ดังนั้นสาเหตุในการเลือกใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บอยู่ในช่วง 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เนื่องมาจากผลการทดลองในรูปที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งในช่วงการทดลองที่ใช้ความดันในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่าง 1,250 ถึง 1,400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีค่าคงที่โดยประมาณ 40 เมตรต่อวินาที แม้จะมีการปรับเปลี่ยนค่าความดันภายในถังกักเก็บที่ใช้ทดลอง และจากการประมาณค่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางในตอนที่ 4.5 นั้นจะพบว่าการใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ในถังกักเก็บเป็น 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นั้นสามารถที่จะผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งใหญ่กว่าการทดลองที่ใช้ความดันของถังกักเก็บเป็น 1,400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และนอกจากนี้จากผลการทดลองในตอนที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าหากใช้ความดันในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่าง 1,250 ถึง 1,400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นั้นจะพบว่าจำนวนอนุภาคของน้ำแข็งแห้งภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้นั้นจะมีจำนวนที่ใกล้เคียงกันตามรูปที่ 4.9 รวมถึงหากใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่สูงเกินไปจะทำให้ค่าสัดส่วนช่องว่างของละอองน้ำแข็งแห้งมีค่าสูง และค่าความหนาแน่นรวมมีค่าต่ำ ซึ่งค่าทั้ง 2 นี้จะส่งผลให้โอกาสในการชนกันระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวนั้นลดลงและทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวลดดง นอกจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนี้แล้วการที่ใช้ความดันในการปฏิบัติการต่ำย่อมเป็นผลดีกว่าทั้งในแง่ของเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัย ดังนั้นจึงควรเลือกปฏิบัติการที่ความดันต่ำหากประสิทธิภาพของกระบวนการที่ใช้ความดันต่างกันนั้นแตกต่างกันไม่มาก

4.8.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวชนิดต่างๆ ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยอาศัยภาพถ่าย

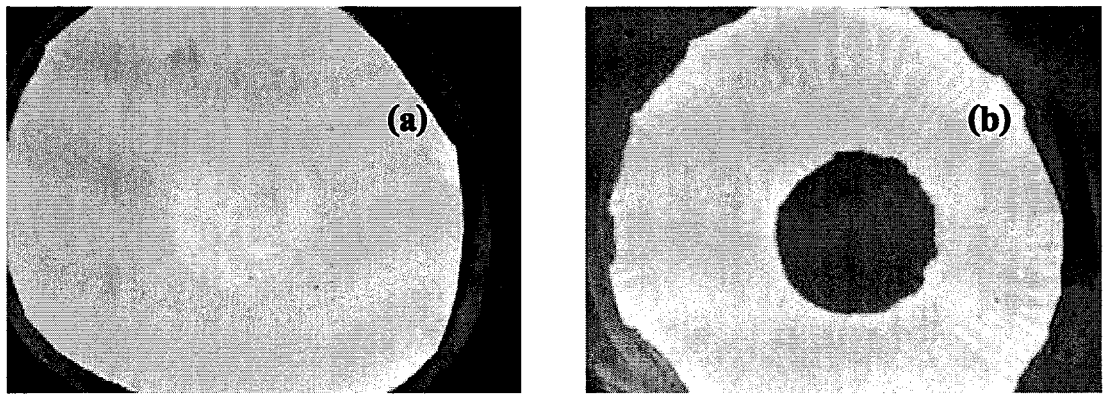
จากรูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 เป็นภาพถ่ายพื้นผิวที่ได้ฉาบแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนที่จะถูกพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง (a) และหลังจากที่ได้ทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง (b) ซึ่งจากภาพถ่ายทางกายภาพจะเห็นได้ว่า เมื่อผ่านการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งแล้วจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นถูกขจัดออกจากพื้นผิว ไม่ว่าพื้นผิวที่แคลเซียมคาร์บอเนตนั้นเกาะอยู่จะเป็นพื้นผิวชนิไหนก็ตาม ซึ่งจากการสังเกตจากภาพถ่ายในเบื้องต้นนี้ จะเห็นได้ว่าการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งสามารถที่ขจัดแคลเซียมคาร์บอเนตได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อใช้ทำความสะอาดบนพื้นผิวอะคริลิกพลาสติก



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมก่อน (a) และหลัง (b) การทำความสะอาด



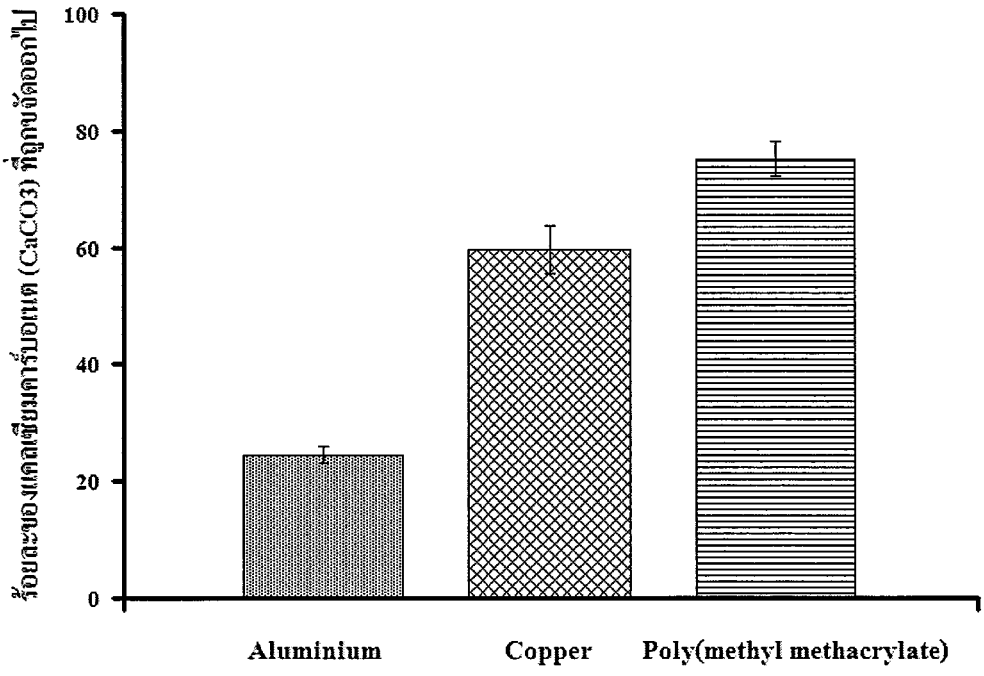
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นทองแดงก่อน (a) และหลัง (b) การทำความสะอาด



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นอะคริลิกพลาสติกก่อน (a) และหลัง (b) การทำความสะอาด

4.8.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวชนิดต่างๆ ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยอาศัยการชั่งน้ำหนัก

โดยจากผลการทดลองจากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการทำความสะอาดแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวที่ต่างชนิดกันด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งนั้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดที่แตกต่างกันตามแต่ชนิดของพื้นผิว และจะพบว่าผลของการทำความสะอาดส่งผลให้แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนพื้นผิวถูกขจัดออกไปเป็นร้อยละ 25 ถึง 75 โดยประสิทธิภาพการทำความสะอาดนี้จะขึ้นกับชนิดของพื้นผิวที่อนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตเกาะอยู่ เนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของพื้นผิวที่ใช้เคลือบแคลเซียมคาร์บอเนตก็จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากแรงกระทำซึ่งกันและกันระหว่างพื้นผิวและอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นเปลี่ยนไปตามชนิดของพื้นผิวที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.13 ร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกขจัดออกไปจากพื้นผิวตัวอย่างชนิดต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีสาเหตุอื่นที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวที่ต่างชนิดกัน อาจจะเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวแต่ละชนิดที่นำมาทดลองนั้นแตกต่างกัน โดยจากการใช้กล้องบันทึกภาพกำลังขยายสูงส่องดูลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวที่นำมาทดลองในเบื้องต้น พบว่าลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างของพื้นผิวทั้ง 3 ชนิดนี้คือความขรุขระของพื้นผิว และเนื่องจากการทดลองในการทำความสะอาดพื้นผิวทั้ง 3 ชนิดนี้ได้มีการควบคุมตัวแปรอื่นๆ ให้

เหมือนกันหมด ดังนั้นความขรุขระจึงน่าจะเป็นตัวแปรที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดพื้นผิวแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยอะลูมิเนียมน่าจะมีความขรุขระมากที่สุดเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถที่จะยึดเกาะได้ดีกว่าพื้นผิวอื่น ส่วนทองแดง และอะคริลิกพลาสติกนั้นมีความขรุขระน้อยลงไปตามลำดับ

ซึ่งในส่วนของการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งในโครงงานวิจัยนี้ได้เพียงแต่ทำการศึกษาแต่เพียงเบื้องต้นยังไม่ได้มีการศึกษาวิจัยในประสิทธิภาพในการทำความสะอาดในเชิงลึก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถังประสิทธิภาพในการทำความสะอาดในเชิงลึกต่อไป อาทิเช่น การเปลี่ยนชนิดของสารที่ใช้สมมติเป็นสารปนเปื้อนบนพื้นผิวทำความสะอาด การเปลี่ยนชนิดของพื้นผิวที่นำมาใช้ในการทำความสะอาด ร่วมถึงในส่วนของการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งเพื่อทำความสะอาดพื้นิวนั้นจะต้องมีการปรับสภาพของพื้นผิวที่จะใช้ในการทดลองทำความสะอาดเบื้องต้นก่อนด้วย เป็นต้น

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง รวมถึงทำการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวที่ดี ควบคู่ไปกับความเหมาะสมทางด้านเศษฐศาสตร์และความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบนั้นสามารถที่จะผลิตกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งได้จริง เมื่อทำการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 30 องศาเซลเซียส โดยในระหว่างทำการทดลองสามารถที่จะบันทึกภาพของการเกิดกระแสละอองน้ำแข็งแห้งไว้ได้ และสามารถที่จะยืนยันได้ว่าสิ่งที่เห็นในภาพนั้นคือละอองของน้ำแข็งแห้งจริง โดยจะอาศัยการยืนยันผลการเกิดละอองน้ำแข็งแห้งจากเส้นทางของการเปลี่ยนความดันและอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์บนแผนภูมิวัฏภาค

5.1.1 ผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ

จากผลการทดลองของการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิเป็น 30 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความเร็วเริ่มต้นของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 32 ถึง 36 เมตรต่อวินาที ซึ่งจากค่าความเร็วเริ่มต้นในช่วงระหว่างนี้จะให้อนุภาคของน้ำแข็งแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงระหว่าง 1.19 ถึง 1.46 ไมโครเมตร และมีจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งเป็นจำนวน 2.4×10^{23} ถึง 5.1×10^{23} อนุภาคต่อวินาที โดยกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้นี้จะมีค่าสัดส่วนช่องว่างอยู่ในช่วง 0.948 ถึง 0.982 และมีค่าความหนาแน่นรวมของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งในช่วงคาบเวลาหนึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 0.027 ถึง0.078 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

และจากการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อนำค่าความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ ค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งและค่าสัดส่วนช่องว่างของละออง

น้ำแข็งแห้ง รวมถึงจำนวนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งภายในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้นั้นมาพิจารณาร่วมกันก็จะสามารถที่จะพิจารณาถึงค่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่เหมาะสมที่จะใช้ในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง โดยค่าความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บที่เหมาะสมจะใช้เป็นค่าความดันที่จะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพในการขจัดอนุภาคบนพื้นผิวที่ดี และเหมาะสมในด้านค่าใช้จ่ายและความปลอดภัยในการปฏิบัติงานอีกด้วย คือความดันในช่วง 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

5.1.2 ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิว

การทดลองทำความสะอาดเพื่อขจัดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนพื้นผิวอะลูมิเนียม ทองแดง และอะคริลิกพลาสติก ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งโดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งจะสามารถขจัดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนพื้นผิวออกไปได้คิดเป็นร้อยละ 25 ถึง 75 โดยจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการขจัดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนพิ้นผิวอะคริลิกพลาสติก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาด โดยเฉพาะหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

2) ในการทดสอบประสิทธิภาพในการทำความสะอาดน่าจะมีการทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวชนิดอื่นที่ไม่ใช่แคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มเติม

3) ควรทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำความสะอาดกับงานวิจัยอื่นที่ได้มีผู้ทำการศึกษาไว้แล้ว

4) ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งในเชิงลึก เช่น ทดลองปรับเปลี่ยนเกี่ยวกับสารที่ใช้เป็นสารปนเปื้อนบนพื้นผิว โดยอาจจะเปลี่ยนขนาดของอนุภาค หรือชนิดของอนุภาค หรืออาจทดลองปรับเปลี่ยนชนิดของพื้นผิวที่ใช้ทดลองทำความสะอาด

เอกสารอ้างอิง

[1] Russell Allan S. (1997). **Encyclopedia of Science & Technology Vol. 5.** New York : McGraw-Hill.

[2] K. L. Mittal. (1999). **Particles on Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal.** Brill Academic.

[3] Morton M. Denn. (1979). **Process Fluid Mechanic.** New Jersey: Prentice-hall.

[4] ชมรมคนหัวกะทิ. (2008). **น้ำแข็งแห้ง.** สืบค้นเมื่อ 9 กรกฎาคม 2551, จาก http://www.coconuthead.org/content/

[5] Diamond Dry Ice Blasting. (2008). **Dry Ice Blasting.** Retrieved July 9, 2008, from http://www.diamonddryiceblasting.com/cleaner.php

[6] J. M. Smith, H. C. Van Ness, and M. M. Abbott. (2001). **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics.** 6th ed. Singapore: McGraw-Hill International Edition.

[7] 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(2005), 739–751.

[8] Warren L. McCabe, Julian C. Smith, and Peter Harriott. (2005). **Unit Operations of Chemical Engineering.** 7th ed. Singapore: McGraw-Hill International Edition.

[9] Sheng-Chung Yang, Keng-Shiang Huang, and Yu-Cheng Lin. **"Optimization of a pulsed carbon dioxide snow jet for cleaning CMOS image sensors by using the Taguchi method"** Sensors and Actuators A: Physical, 13. 1-2(2006), 265-271.

[10] C. Toscano, G. Ahmadi. **"Particle removalmechanisms in cryogenic surface cleaning"** Journal of Adhesion, 79. 2(2003),175–201.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของละอองน้ำแข็งแห้ง

สมมติฐาน :

1. ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ และจะขึ้นกับค่าความดันและอุณหภูมิภายในถังกักเก็บ
2. พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิสของหัวฉีดมีค่าคงที่เท่ากับ $7.85\times10^{-3}cm^2$

การคำนวณ :

จาก
$$v=\frac{\dot{m}}{\rho A} \qquad (2.5)$$

v คือ ความเร็วของละอองน้ำแข็งแห้ง (เมตรต่อวินาที)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (กรัมต่อวินาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิส (ตารางเซนติเมตร)

ตัวอย่างการคำนวณความเร็วของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้จากการทดลองที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บเป็น 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังกักเก็บเป็น 30 องศาเซลเซียส

ทำการหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลจากค่าที่บันทึกได้จากเครื่องชั่งซึ่งมีค่าเท่ากับ 18 กรัมต่อวินาที โดยค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.6787 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

แทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในสมการ จะได้ $v=\dfrac{18(\frac{g}{s})}{0.6787(\frac{g}{cm^3})\times0.00785(cm^2)}(\dfrac{1m}{100cm})$

$=34.19$ เมตรต่อวินาที

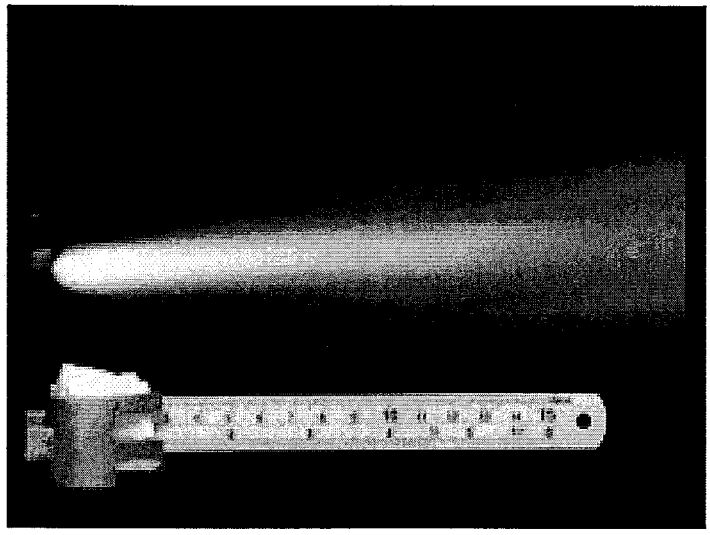
ผลการคำนวณ :

กระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้มีความเร็วเท่ากับ 34.19 เมตรต่อวินาที

ภาคผนวก ข

การประมาณค่าปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้ง

(Bulk Volume Estimation)



รูปที่ ข – 1 ภาพการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ในการหาปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้

รูปที่ ข – 2 กราฟแสดงค่า Grey Value ของกระแสละอองน้ำแข็งแห้งในรูปที่ ข-1

สมมติฐาน :

1. กำหนดให้รูปทรงของละอองน้ำแข็งแห้งที่พ่นออกมาจากหัวฉีดเป็นรูปทรงกระบอก
2. ความยาวของทรงกระบอกวัดระยะที่ค่าความเข้มแสง (Grey Value) เท่ากับ 240 โดยอาศัยโปรแกรม Image J เป็นเครื่องมือในการวัดความยาวของทรงกระบอก
3. เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกนั้นวัดจากระยะที่ละอองน้ำแข็งแห้งห่างจากรูออริฟิสที่จุดสุดท้ายก่อนที่จะเกิดการกระจายตัวของน้ำแข็งแห้งออกจากกระแสเจ็ท (Jet Flow) ของการไหลโดยอาศัยโปรแกรม Image J เป็นเครื่องมือในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก

การคำนวณหาปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้, V_B

ตัวอย่างการประมาณค่าปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดัน 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถประมาณได้จากสมการที่ (2.7)

$$V_B = \frac{\pi D^2 h}{4} \qquad (2.7)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกที่วัดได้มีเค่าเท่ากับ 1.297 เซนติเมตร

ความยาวของทรงกระบอกที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 7.358 เซนติเมตร

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการ จะได้ $V_B = \frac{3.14 \times 1.297^2 (cm^2) \times 7.358(cm)}{4}$

$= 9.715$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

ภาคผนวก ค

การประมาณค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้

(Bulk Density Estimation)

ตัวอย่างการประมาณค่าความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ ที่ความดัน 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถหาได้จากสมการที่ (2.6)

$$\rho_B = \frac{\dot{m}t}{V_B} \qquad (2.6)$$

เมื่อคาบเวลาที่ใช้ในการบันทึกภาพมีค่าคงที่เท่ากับ $\frac{1}{30}$ วินาที

แทนค่าปริมาตรรวมของละอองน้ำแข็งแห้ง (V_B) และค่าอัตราการไหลเชิงมวลของละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดัน 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้วลงในสมการ (2.6) จะได้

$$\rho_B = \frac{18.776(\frac{g}{\sec})(\sec)}{9.715(cm^3)\times 30}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นรวมของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ 0.064 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ภาคผนวก ง

การประมาณสัดส่วนช่องว่างของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง

(Void Fraction Estimation)

ตัวอย่างการประมาณค่าสัดส่วนช่องว่างในกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดัน 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้วซึ่งค่าสัดส่วนช่องว่าง (ε) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.8)

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{CO_2}}{V_B} \qquad (2.8)$$

เมื่อ

$$V_{CO_2} = \frac{\dot{m}t}{\rho_p} \qquad (2.9)$$

แทนค่า $\dot{m}$ ρ_P และ t ลงในสมการ (2.9) จะได้

$$V_{CO_2} = \frac{18.77(\frac{g}{\sec})(\sec)}{1.5(\frac{g}{cm^3}) \times 30}$$

$$= 0.417 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

แทนค่า V_{CO_2} ลงในสมการ (2.8) จะได้

$$\varepsilon = 1 - \frac{0.417}{9.715}$$

$$= 0.957$$

ภาคผนวก จ

การประมาณจำนวนอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

(Dry ice Particulate Estimation)

ตัวอย่างการประมาณค่าจำนวนอนุภาคน้ำแข็งแห้งในกระแสของละอองน้ำแข้งแห้งที่ความดัน 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้วซึ่งค่าจำนวนอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (N) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.14)

$$N(V_T, V_P, \varepsilon) = \frac{V_B}{\left[\frac{V_P \varepsilon}{1-\varepsilon}\right] + V_P} \qquad (2.14)$$

เมื่อ $$V_P = \frac{4\pi r^3}{3} \qquad (2.13)$$

แทนค่า r ในสมการ (2.13) จะได้

$$V_P = \frac{4 \times \pi \times (6.45 \times 10^{-9})^3 (cm^3)}{3}$$

$$= 1.12 \times 10^{-24} \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

ซึ่งจากค่าปริมาตรรวมของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง (V_B) ที่ความดัน 1,250 ปอนด์ต่อตารางนิ้วมีค่าเท่ากับ 9.715 ลูกบาศก์เซนติเมตร

แทนค่า V_B, V_P และ ε ลงในสมการที่ (2.14) จะได้

$$N(V_T, V_P, \varepsilon) = \frac{9.715}{\left[\frac{1.12 \times 10^{-24} \times 0.957}{1-0.957}\right] + 1.12 \times 10^{-24}}$$

$$= 3.714 \times 10^{23} \text{ อนุภาคต่อวินาที}$$

ภาคผนวก ฉ

การหาสัมประสิทธิ์แสดงประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวของการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง

(Cleaning Efficiency Coefficient; CEC)

ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิวสามารถหาได้จากสมการที่ (2.15)

$$\%CEC = \frac{m_{before} - m_{after}}{m_{before} - m_{substrate}} \times 100 \qquad (2.15)$$

ตัวอย่างการหาสัมประสิทธิ์แสดงประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพื้นผิว PMMA

m_{before} มีค่าเท่ากับ 9.921 กรัม

m_{after} มีค่าเท่ากับ 9.894 กรัม

$m_{substrate}$ มีค่าเท่ากับ 9.887 กรัม

แทนค่าลงในสมการที่ (2.15) จะได้

$$\%CEC = \frac{9.921(g) - 9.894(g)}{9.921(g) - 9.887(g)} \times 100$$

$$= 79.41\%$$