

การศึกษากระบวนการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง



กัณฑ์การ

กตเวทีตาธรรม

ปณิธิ

ลปิสุนทร

ปิยะณัฐ

สมบัติทา



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....119329
วัน,เดือน,ปี.....7 S.O. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

STUDY ON THE SNOW DRY-ICE GENERATING PROCESS



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง
โดย

การศึกษาระบวนการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง

นายกันทรากร กตเวทิตาธรรม

นายปณิธิ ลิปิสุนทร

นายปิยะณัฐ สมบัติทา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อภินันท์ นัมคณิศรณ)

.....กรรมการ

(ผศ. รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การศึกษากระบวนการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง
โดย	นายกันทรกร กตเวทิตาธรรม นายปณิธิ ลิปิสุนทร นายปิยะณัฐ สมบัติทา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
บทคัดย่อ	

โครงการนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้เครื่องมือเชิงพาณิชย์ ซึ่งใช้หลักการเคลื่อนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดันสูงไหลผ่านรูออริฟิต ออกสู่บรรยากาศภายนอก เพื่อผลิตเป็นละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้พ่นทำความสะอาดพื้นผิวของวัสดุชนิดต่างๆ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันต่ำโดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อนในช่วงความดัน 385 ถึง 610 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากการทดลองพบว่า เครื่องมือผลิตละอองของน้ำแข็งแห้งสามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งได้ในช่วงความดันต่ำ 385 ถึง 610 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อน โดยถ้าใช้ความดัน อยู่ในช่วง 385 ถึง 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 560 ถึง 610 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะต้องลดอุณหภูมิลงให้อยู่ในช่วง -2.3 ถึง 6.2 และ 9 ถึง 12 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง และเนื่องจากการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อทำความสะอาดในชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและบอบบาง จึงได้ทำการวัด Impact Stress ของละอองน้ำแข็งแห้งที่กระทำต่อพื้นผิวชิ้นงาน และคำนวณหาโมเมนต์ัมของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ชนกับพื้นผิวชิ้นงาน โดยใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อนโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 450 ถึง 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 3 ถึง 15 องศาเซลเซียส พบว่าความเร็วของสารป้อนภายในท่อจะอยู่ในช่วง 33.9 ถึง 55.4 เมตรต่อวินาที โดยกระแสของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้จะมีค่าความเร็วในการชนใกล้เคียงกับความเร็วของสารป้อนภายในท่อ แต่ขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งจะอยู่ในช่วง 27.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 33.10 ไมโครเมตร และ impact stress ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 10 ถึง 54 เมกะปาสคาล ซึ่งทำให้
ทราบโมเมนต์ดัดของอนุภาคน้ำแข็งแข็งแข็งที่ตกกระทบพื้นผิวอยู่ในช่วง 0.54×10^{-9} ถึง 1.34×10^{-9}
กิโลกรัม-เมตรต่อวินาที ซึ่งจะพบว่าเมื่อลดความดันของสารป้อนลงจะส่งผลให้โมเมนต์ดัดและ
impact stress ลดลงเช่นกัน

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบสมรรถนะในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่มีขนาดอยู่ใน
ระดับไมครอนโดยใช้ทึลค์เป็นตัวจำลองสิ่งสกปรกบนพื้นผิวที่นำมาทดลองได้แก่ แผ่นวงจร (PCB)
และแผ่นพลาสติกใส และได้ทดลองทำความสะอาดอนุภาคของสารจำพวกโลหะและสารหล่อลื่น
บนงานบันทึกข้อมูล (PFPE) บนพื้นผิวชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ พบว่า การทำความสะอาด
ด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแข็งแข็งสามารถขจัดสิ่งสกปรกที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอนได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Study on the Snow Dry-Ice Generating Process

By Mr. Kantarakorn Katawetitathum

Mr. Panithi Lipisuntorn

Mr. Piyanat Sombattha

Adviser Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

Report for^{tho} 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 on the snow dry-ice generating process by using the commercial equipment. Snow dry-ice stream could be generated by using the high pressure carbon dioxide (CO₂) flowing and expanding through an orifice to atmosphere. Normally, the snow dry-ice stream is applied for the cleaning of surfaces in many industry fields. In this study, we determined the optimal conditions for the generating of snow dry-ice stream by using the low supplying CO₂ pressure that used in the range of 360-610 psi. From the experimental results, the snow dry-ice generating equipment can generate the snow dry-ice stream by using the supplying CO₂ pressure in range of 360-610 psi. If we use the supplying CO₂ pressure in range of 360-500 and 560-610 psi, the supplying CO₂ pressure must be decreased until it is in range of -2.3 to 6.2 and 9 to 12 °C respectively. This is the processing windows of the supplying CO₂ condition that are suitable for the generating of the snow dry-ice stream.

Snow dry-ice cleaning is able to apply for the cleaning in the hard disc drive industry. Thus, it might be used to clean the small and sensitive substrates. Therefore,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the impact stress of the dry-ice particles was measured. And the momentum of the dry-ice particles were also determined (the average of the supplying CO₂ pressure in range of 450-700 psi and temperature in range of 3-15°C). In addition, the velocity of supplying CO₂ when it flew in the tube before the expansion was in the range of 33.9 - 55.4 m/s and this velocity was closely with the impact velocity. However, the size of the dry-ice particles in the snow stream were in the range between 27.28 to 33.10 μm. Furthermore, the impact stress was in the range between 10 – 54 MPa. In addition, the momentum of the dry-ice particles was in range of 0.54×10^{-9} to 1.34×10^{-9} kg·m/s. Thus, when the supplying CO₂ pressure were decreased, it affect to the momentum and impact stress in the direction of decreasing.

Finally, the efficiency of snow dry-ice cleaning was determined by using the snow dry-ice stream to eliminate talc (particles size ~5 μm) on the various substrates including printed circuit boards (PCB) and plastic sheets. Moreover, it was applied to clean the hard disk drive assembly part that usually found the micro-sized metal substances and lubricant on the parts. The cleaning results, revealed that the snow dry-ice cleaning has an ability to remove the contaminants in the micron range.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้
และประสบการณ์ที่ดีในการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. อภินันท์ นัมมณีสร์ และ ผศ. รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ

ขอขอบคุณ Hitachi Global Storage Technology (Thailand) Ltd, NECTEC, NSTDA,
College of Data Storage Technology and Applications, บริษัท ฟุจิ โฟโต้ ฟิล์ม (ประเทศไทย) จำกัด
, Western Digital Thailand Co. Ltd, Faculty of science KMUTL ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ที่ใช้
ทดลองในโครงการ

ขอขอบคุณพี่และเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆทำให้โครงการนี้
สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่คณะผู้จัดทำไม่ได้กล่าวนาม หากรายงานเล่มนี้มีความ
บกพร่อง หรือข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นาย กัณฑ์การ กตเวทิตาธรรม

นาย ปณิธิ ลิปิสุนทร

นาย ปิยะณัฐ สมบัติทา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฅ
สัญลักษณ์.....	ฉ

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	5
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแข็งแห้ง.....	5
2.2 การไหลผ่านรูออร์ฟิส.....	7
2.3 กลไกการทำความสะอาด.....	9
2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำแข็งแห้ง.....	11
2.4.1 ประเภทของน้ำแข็งแห้ง.....	11
2.4.2 ประโยชน์ของน้ำแข็งแห้ง.....	11
2.4.3 ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการพ่นน้ำแข็งแห้ง.....	12
2.4.4 ประวัติความเป็นมาของการพ่นน้ำแข็งแห้งเพื่อการทำความสะอาด.....	12
2.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณ.....	13
2.5.1 การหาความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การประมาณค่าความเร็วในการชน.....	13
2.5.3 การหาโมเมนต์ของอนุภาคน้ำแข็งแข็งที่ตกกระทบพื้นผิว.....	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน	18
3.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	18
3.2 วิธีดำเนินงาน	18
3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	18
3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	19
3.2.2.1 การทดลองหาการเกิดอนุภาคน้ำแข็งแข็งจากคาร์บอนไดออกไซด์ ในสถานะที่ใช้ความดันต่ำ.....	19
3.2.2.2 การทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหล ผ่านหัวฉีดเมื่อใช้ความดันต่ำ	20
3.2.2.3 การทดลองหาขนาดอนุภาคของน้ำแข็งแข็งผ่าน Fuji Prescale Film	21
3.2.2.4 การทดลองหา Impact Stress ของละอองน้ำแข็งแข็งผ่าน Fujifilm Prescale Film.....	22
3.2.2.5 การทดลองหา Impact Stress ของละอองน้ำแข็งแข็งผ่าน Fujifilm Prescale Film.....	23
3.2.2.6 การทดสอบการทำความสะอาดชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์...24	
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	25
4.1 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อคุณลักษณะของกระแสน้ำแข็งแข็งที่ ผลิตได้	25
4.2 การคำนวณความเร็วของ CO ₂ ในท่อและความเร็วในการชนของอนุภาค น้ำแข็งแข็ง.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การศึกษาคุณลักษณะของอนุภาคน้ำแข็งแห้งผ่าน Fujifilm Prescale Film.....	30
4.3.1 การศึกษาผลของความดันที่มีต่อ โมเมนต์ในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง.....	30
4.3.2 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อ Impact Stress	33
4.4 ผลการทดสอบสมรรถนะในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกขนาดเล็กในระดับไมครอน.....	35
4.5 ผลการทดลองการทำความสะอาดบนพื้นผิวชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก ก	43
ภาคผนวก ข	44
ภาคผนวก ค	46
ภาคผนวก ง	47
ภาคผนวก จ	50
ภาคผนวก ฉ	52

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภูมิวิภาคความดันและอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์.....	5
รูปที่ 2.2 แผนภูมิวิภาคความดันและเอนทัลปีของคาร์บอนไดออกไซด์	5
รูปที่ 2.3 แผนภูมิวิภาคของสารพร้อมแสดงเส้น tie line	7
รูปที่ 2.4 กระบวนการทรอตลิ่ง.....	8
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงกลไกการทำความสะอาด.....	10
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงกลไกการทำความสะอาดด้วยหลักการละลาย.....	10
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดง Boundary layer ของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์บนพื้นผิววัสดุ	15
รูปที่ 3.1 แผนภูมิอุปกรณ์ในการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง.....	19
รูปที่ 3.2 หัวฉีดละอองน้ำแข็งแห้ง	19
รูปที่ 3.3 เครื่องซังน้ำหนัก๊าซ	20
รูปที่ 3.4 กล้อง Optical microscope	22
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งบนแผ่น Fuji Prescale Film	22
รูปที่ 3.6 Color density scale bar.....	23
รูปที่ 3.7 แผ่นวงจรพิมพ์.....	23
รูปที่ 4.1.1 ผลของความดันและอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่ออุณหภูมิของละอองน้ำแข็งแห้ง	26
รูปที่ 4.1.2 ปริมาตรร้อยละของอนุภาคน้ำแข็งแห้งในกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันและ อุณหภูมิของสารป้อนต่างๆ	26
รูปที่ 4.2.1 ผลของความดันและอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อความหนาแน่นของสาร ป้อนภายในท่อ	28
รูปที่ 4.2.2 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวล	28
รูปที่ 4.2.3 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อความเร็วของสารป้อนในท่อ	29
รูปที่ 4.2.4 ผลของความดันที่มีต่อความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง	30
รูปที่ 4.3.1.1 ผลของความของสารป้อนที่มีต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย	31
รูปที่ 4.3.1.2 ผลของความของสารป้อนที่มีต่อ โมเมนต์มในการชนของอนุภาค โดยใช้ ขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย	31
รูปที่ 4.3.1.3 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ของแต่ละช่วงความดัน.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3.1.4 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อโมเมนต์ในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง โดยใช้ขนาดของ อนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ใหญ่ที่สุดของแต่ละช่วงความดัน	33
รูปที่ 4.3.2.1 ตัวอย่าง Prescale Film ที่ใช้ในการทดลองวัด Impact Stress	34
รูปที่ 4.3.2.2 Color density scale bar.....	34
รูปที่ 4.3.2.3 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อ Impact Stress และ โมเมนต์สูงสุด.....	35
รูปที่ 4.4.1 ผลการทดลองจากการวิเคราะห์พื้นผิววัสดุด้วยกล้อง SEM โดยเปรียบเทียบปริมาณ ของอนุภาคทั้งก่อนและหลังทำความสะอาดรวมถึงแผ่นวงจรที่สะอาด.....	36
รูปที่ 4.4.2 ภาพพื้นผิววัสดุที่เป็นพลาสติกผิวเรียบ มีลายตารางด้านหลังชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบ ก่อนและหลังทำความสะอาดรวมถึงชิ้นงานที่สะอาดบันทึกด้วยกล้องไมโครสโคป กำลังขยาย 40 เท่า.....	37
รูปที่ 4.5.1 ชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟที่มีความสกปรกมาก.....	38
รูปที่ 4.5.2 ชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟที่มีความสกปรกน้อย.....	38

สัญลักษณ์

\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล	กิโลกรัมต่อวินาที
A	พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิส	ตารางเมตร
r	รัศมีของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง	เมตร
C_c	Cunningham correction factor	
P	ความดันสัมบูรณ์	กิโลปาสกาล
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง	ไมโครเมตร
Re	Reynolds number	
x	ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวของวัสดุ	เมตร
U	ความเร็วในการชน	เมตรต่อวินาที
U_0	ความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด	เมตรต่อวินาที
m	มวลของอนุภาคน้ำแข็งแห้งหนึ่งอนุภาค	กิโลกรัม
V_p	ปริมาตรของอนุภาคน้ำแข็งแห้งหนึ่งอนุภาค	ลูกบาศก์เมตร
\bar{P}	โมเมนต์ของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง	กิโลกรัมเมตรต่อวินาที

สัญลักษณ์กรีก

ρ	ความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
τ	velocity relaxation time	ไมโครวินาที
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
η	ความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	ปาสกาล.วินาที
δ	ความหนาของ Boundary layer	เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการทำความสะอาดผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปมีความจำเป็นที่จะต้องขจัดสารปนเปื้อนที่อยู่บนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ก่อนที่จะมีการส่งมอบผลิตภัณฑ์ไปยังลูกค้า โดยการเลือกกระบวนการในการทำความสะอาดพื้นผิวของผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะถูกพิจารณาบนพื้นฐานปัจจัยต่างๆ ได้แก่ พลังงานที่ใช้ในการทำความสะอาด ความยากในการทำความสะอาด และค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด รวมถึงความสามารถในการทำความสะอาดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หากไม่มีกระบวนการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพ อาจก่อให้เกิดความสูญเสียต่อผลิตภัณฑ์และความไว้วางใจจากลูกค้า ซึ่งกระบวนการทำความสะอาดในระดับอุตสาหกรรมนอกจากจะต้องมีประสิทธิภาพตามค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าในการลงทุนรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากกระบวนการที่ยอมรับได้ จึงต้องมีการพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อการเลือกใช้กระบวนการ ทำความสะอาดเพิ่มขึ้นสำหรับกระบวนการในระดับอุตสาหกรรม เช่น ประสิทธิภาพระหว่างผลิตภัณฑ์ และความต้องการของลูกค้า ผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตอันส่งผลต่อราคาขาย ความปลอดภัยในการปฏิบัติงานผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และระยะเวลาในการดำเนินกระบวนการ

กระบวนการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถตอบสนองความต้องการทั้งต่อภาคอุตสาหกรรม ลูกค้า และสิ่งแวดล้อม ได้อย่างน่าพึงพอใจ เนื่องจากใช้เวลาในการทำความสะอาดที่สั้นและไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งมักจะถูกเข้าใจผิดว่าเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ โดยแท้จริงแล้วเป็นการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ กระบวนการเผาไหม้ หรือกระบวนการหมักเป็นต้น ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ หากไม่นำมาใช้ประโยชน์ก็จะถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศ และก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนตามมา การนำก๊าซเหล่านี้มาใช้ประโยชน์จึงมิได้เป็นการผลิตก๊าซเรือนกระจกเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเป็นการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและยังเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการใช้ตัวทำละลายได้อีกทางหนึ่งด้วย

กระบวนการทำความสะอาดด้วยละอองน้ำแข็งแห้งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้กับการทำความสะอาดพื้นผิวที่มีสิ่งสกปรกจำพวกฝุ่นขนาดเล็กกว่าระดับไมครอน รวมถึงชั้นฟิล์มอินทรีย์ที่มีความหนาไม่มากนัก โดยอาศัยหลักการถ่ายเทโมเมนตัมของอนุภาค เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละอองน้ำแข็งแห้ง เป็นกลไกหลัก การทำความสะอาดด้วยวิธีนี้จะถูกพัฒนาและนำมาใช้แทนที่ การทำความสะอาดด้วย ตัวทำลาย โดยจะมุ่งเน้นในการทำความสะอาดชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งต้องการความสะอาดในระดับสูง ซึ่ง โดยปกติแล้วจะใช้ตัวทำลายซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงแต่ใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายเป็นสารล้าง การพัฒนาการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้จึงได้รับความสนใจจากผู้ประกอบการผลิตและประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การสร้างละอองน้ำแข็งทำได้โดยปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวหรือ ก๊าซผ่าน รูออร์ฟิส เพื่อให้เกิดความดันลดและเปลี่ยนแปลงวัฏภาคเป็นของผสมระหว่างของแข็ง และก๊าซซึ่งเป็นไปตามแผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในการที่จะอธิบายเกี่ยวกับ กระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งจะต้องอาศัยความรู้พื้นฐานทาง อุณหพลศาสตร์และแผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันต่ำ
- 2) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อนกับ คุณสมบัติของละอองน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้น
- 3) เพื่อทดสอบสมรรถนะในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่มีขนาดอยู่ในระดับไมครอน บนพื้นผิวที่ต่างกันด้วยการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ศึกษาการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้เครื่องมือเชิงพาณิชย์
- 2) ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง -2 ถึง 15 องศาเซลเซียส และความดันในช่วง 385 ถึง 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ของ คาร์บอน ไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อน
- 3) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อน กับคุณสมบัติของละอองน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นซึ่ง ได้แก่ ความเร็วในการชน ขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง Impact Stress และ โมเมนตัม ของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ตกกระทบ พื้นผิวของวัสดุ
- 4) ศึกษาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดโดยใช้การพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันต่ำบนพื้นผิวชนิดต่างๆ ได้แก่ แผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นพลาสติก และหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งรวมถึงสารอื่นๆ
- 2) จัดเตรียมอุปกรณ์และออกแบบการทดลอง
- 3) ทำการทดลองพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง
- 4) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันต่ำ
- 5) ศึกษาผลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อนที่มีผลต่อคุณลักษณะของละอองน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้น
- 6) ทดสอบสมรรถนะในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่มีขนาดอยู่ในระดับไมครอนบนพื้นผิวที่ต่างกัน
- 7) สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอุณหพลศาสตร์และแผนผังวิภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คั้งขึ้น
- 2) มีความรู้ความเข้าใจในหลักการของกระบวนการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในอนาคต
- 3) เรียนรู้วิธีการทำงานและแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบตลอดจนได้ฝึกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ

1.6 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของโครงการ วิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์

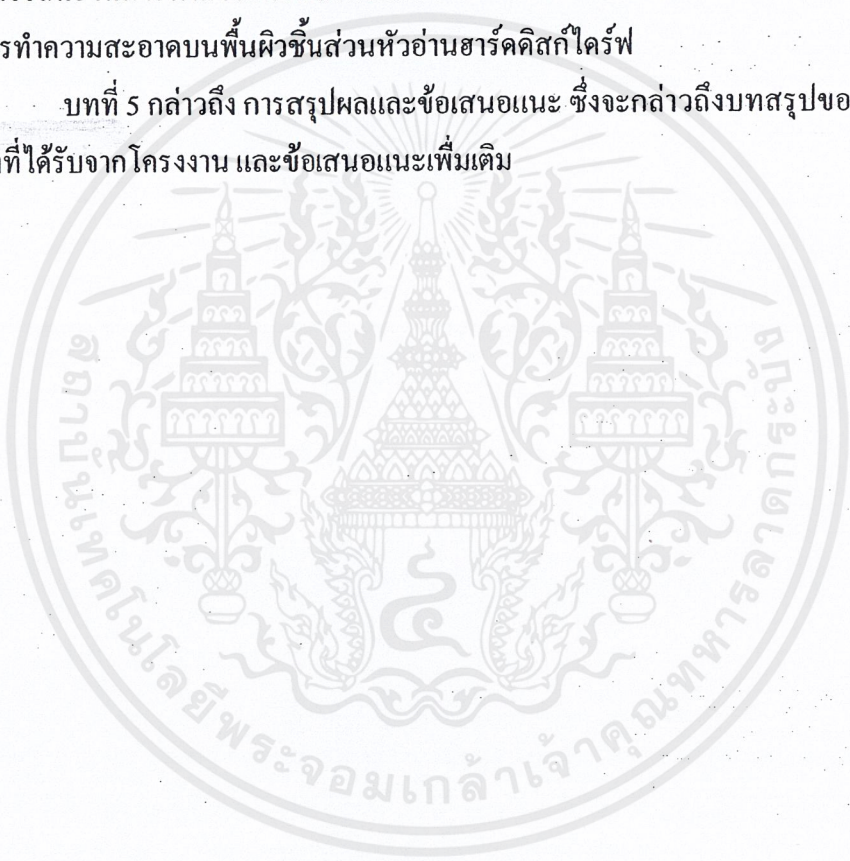
บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีอะไรบ้าง รวมถึงสมการที่เกี่ยวข้องกับโครงการทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึง ขั้นตอนการศึกษา วิธีการดำเนินงานของโครงการ และวิธีการทดลองแต่ละขั้นตอนโดยละเอียด

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งได้แก่ ผลของควมดันของสารป้อนที่มีต่อคุณลักษณะของกระแสของน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้ การคำนวณความเร็วของคาร์บอน ไดออกไซด์ในท่อและความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง การศึกษาคุณลักษณะของอนุภาคน้ำแข็งแห้งผ่าน Fujifilm Prescale Film ผลการทดสอบสมรรถนะในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกขนาดเล็กระดับไมครอน และผลการทดลองการทำความสะอาดบนพื้นผิวชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

บทที่ 5 กล่าวถึง การสรุปผลและข้อเสนอแนะ ซึ่งจะกล่าวถึงบทสรุปของโครงการ สิ่งที่ได้รับจากโครงการ และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

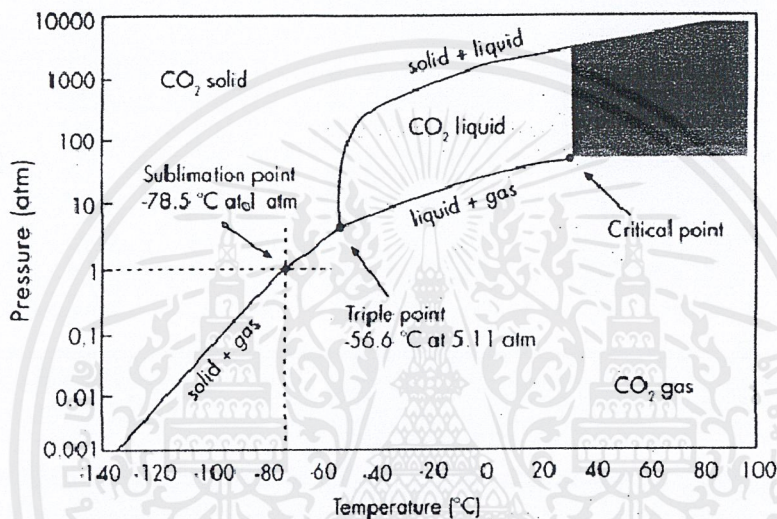
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแข็งแห้ง [1]

น้ำแข็งแห้ง คือ คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของแข็งซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าหรือเท่ากับ -78.5 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ และ ถ้ามีอุณหภูมิสูงกว่า -78.5 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ น้ำแข็งแห้งจะเกิดการระเหิดแทนการหลอมเหลว ซึ่งหมายความว่า น้ำแข็งแห้งจะเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นสถานะก๊าซโดยตรง และ ไม่มีการเปลี่ยนเป็นสถานะของเหลวก่อน น้ำแข็งแห้ง ไม่มีอันตรายโดยตรงต่อร่างกาย แต่หากมีการสัมผัสผิวของน้ำแข็งแห้งโดยตรงนั้นจะเป็นอันตรายมาก จึงไม่ควรสัมผัสด้วยมือเปล่าโดยไม่สวมถุงมือ

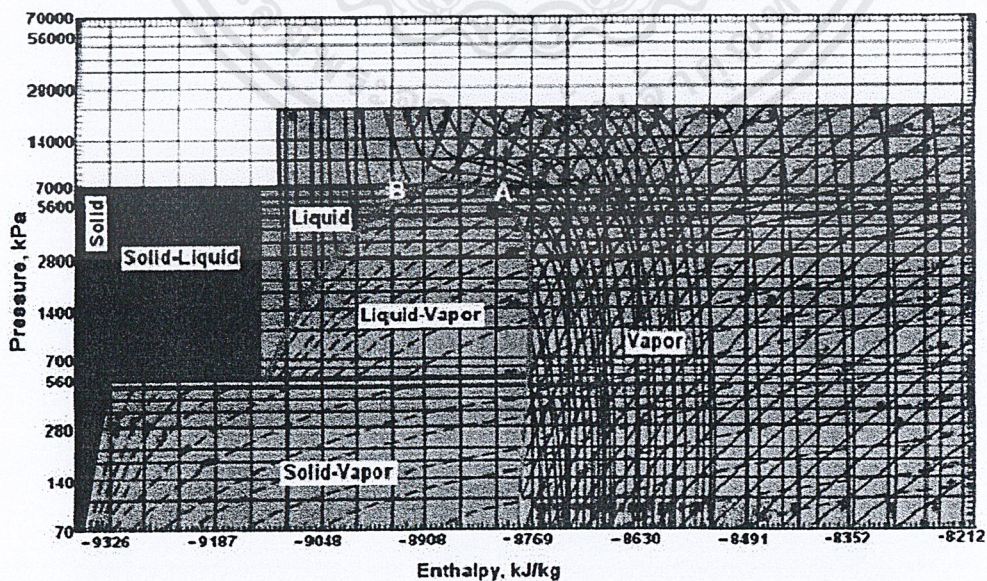
คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบเคมีที่เป็นที่รู้จักกันมากซึ่งจะอยู่ในบรรยากาศที่ความดันและอุณหภูมิปกติ และมีอยู่ในบรรยากาศประมาณ 0.039 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร คาร์บอนไดออกไซด์เป็น สารที่ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน ไม่ติดไฟ ไม่ทำลายโอโซน และ เมื่ออยู่ในบรรยากาศ จะ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส แต่ถ้าหายใจเอาก๊าซนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ จะเกิดการระคายเคืองที่จมูก และระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากอาจเกิดการละลายของแก๊สนี้ในเมือกภายในอวัยวะ ก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกอย่างอ่อน โดยทั่วไปคาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่น 1.98 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งประมาณ 1.5 เท่าของอากาศ คาร์บอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนจากบรรยากาศเป็นสถานะของแข็ง ภายใต้ความดันสูง และ อุณหภูมิต่ำ โดยจะเปลี่ยนเป็นสถานะของแข็งที่อุณหภูมิ -78.5 องศาเซลเซียส โดยปกติแล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเสถียร เมื่ออยู่ภายใต้ความดันสูง และมีน้ำหนักรวมมากกว่าอากาศ ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถเพิ่มขึ้นได้ในพื้นที่อับอากาศ โดยเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศมีค่าเกินกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มมีความเป็นพิษ ดังนั้นในพื้นที่ที่มีการใช้น้ำแข็งแห้งจะต้องมีระบบระบายอากาศที่ดีพอ

จากแผนภูมิวัฏภาคในรูปที่ 2.1 และ ข้อมูลคุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ จะทำให้ทราบว่า คาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 4 วัฏภาค คือ ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และ ของไหลเหนือวิกฤติ ซึ่งจุดที่สนใจ คือ เส้นที่แบ่งขอบเขต วัฏภาคของแข็ง และวัฏภาคก๊าซ ซึ่งความหมายทางกายภาพก็คือคาร์บอนไดออกไซด์สามารถที่จะเปลี่ยนกลับไปมาระหว่างวัฏภาคทั้งสองนี้ เมื่อสภาวะของอุณหภูมิ หรือความดันเปลี่ยนแปลงไป แต่ในสภาวะปกติแล้ว ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้องคาร์บอนไดออกไซด์จะเสถียรที่สุดเมื่ออยู่ใน วัฏภาคก๊าซ ดังนั้น

ท้ายที่สุดของการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซ และเมื่อถึงจุดนี้สารปนเปื้อนที่ถูกขจัดออกมาจากพื้นผิวก็จะถูกแยกออกจากกระแสของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นตัวทำลายสำหรับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วที่ดีมาก พร้อมกับคุณสมบัติในการละลายที่มากขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ตามค่าของความดันและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1 แผนภูมิวัฏภาคความดันและอุณหภูมิของคาร์บอน ไดออกไซด์ [2]



รูปที่ 2.2 แผนภูมิวัฏภาคความดันและเอนทัลปีของคาร์บอน ไดออกไซด์ [3]

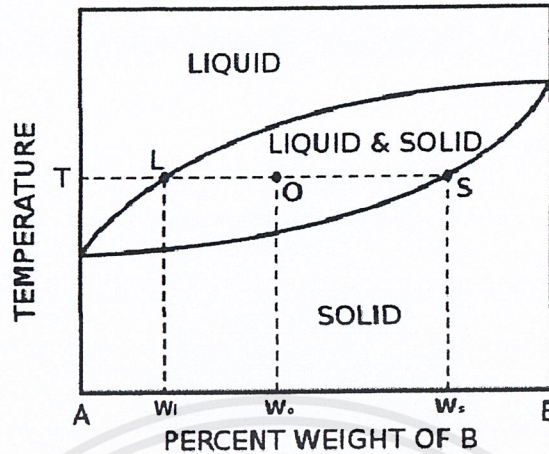
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเอนทัลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคทั้ง 4 วัฏภาคได้แก่ วัฏภาคของแข็งของเหลว ก๊าซ และของไหลเหนือวิกฤติ หากพิจารณาแผนภูมินี้ร่วมกับ แผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ดังรูปที่ 2.1 จะทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์การขยายตัวแบบเอนทัลปีคงที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะเคลื่อนที่ผ่านรูออริฟิสได้โดยเรียกกระบวนการที่ของไหลไหลผ่านรูออริฟิสนี้ว่า กระบวนการทrottle (Throttling process) ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป จากกระบวนการดังกล่าวที่เกิดขึ้นทำให้สภาพทางอุณหพลศาสตร์ของคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งถ้าสังเกตในแผนภูมิจะเห็นว่าจุดบนแผนภูมิจะเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งตามเส้นทางของเอนทัลปี (ขนานกับแกนความดัน)

โดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง คาร์บอนไดออกไซด์ที่บรรจุอยู่ในถังจะมีความดันโดยประมาณ 830 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งเส้นความดันนี้จะลากผ่านทั้งในส่วนของสมดุของเหลวและก๊าซ โดยค่าเอนทัลปีสำหรับวัฏภาคของเหลวและก๊าซจะอยู่ในขอบเขตของวัฏภาคของเหลวและก๊าซ

จากรูปที่ 2.2 ได้ระบุให้จุด A แทนวัฏภาคก๊าซ และจุด B แทนวัฏภาคของเหลว โดยเมื่อมีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังผ่านรูออริฟิสออกสู่บรรยากาศ จะทำให้ส่วนที่เคยอยู่ในวัฏภาคก๊าซ และส่วนที่เคยอยู่ในวัฏภาคของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อความดันลดลงจนเข้าสู่ในบริเวณสมดุระหว่างวัฏภาคก๊าซ-ของแข็ง และถ้านำกฎของคาน (Lever rule) มาคำนวณร้อยละของน้ำแข็งแข็งที่เกิดขึ้น จะพบว่า ถ้าที่สมดุของเหลวและก๊าซตอนเริ่มต้น (ก่อนผ่านรูออริฟิส) มีสัดส่วนที่เป็นของเหลวมากกว่า จะส่งผลให้ร้อยละของน้ำแข็งแข็งที่เกิดขึ้นมีมากกว่าเช่นกัน ซึ่งจากปรากฏการณ์นี้หากความดันลดลงไปอีกอย่างต่อเนื่องก็จะไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำแข็งแข็งอีก เนื่องจากร้อยละของการเกิดน้ำแข็งแข็งจะขึ้นกับสมดุระหว่างของเหลวและก๊าซภายในถังคาร์บอนไดออกไซด์ตอนเริ่มต้นก่อนการปล่อยผ่านรูออริฟิส ซึ่งสมดุของวัฏภาคทั้งสองจะถูกควบคุมด้วยความดันและอุณหภูมิของระบบอีกทีหนึ่ง

สำหรับการคำนวณหาร้อยละของการเกิดน้ำแข็งแข็งจะต้องทราบองค์ประกอบของสารผสมและอุณหภูมิของสาร ซึ่งจุดที่จะทำการคำนวณหาร้อยละของการเกิดน้ำแข็งแข็งนั้น จะอยู่ในช่วงระหว่างเส้น solidus และเส้น liquidus ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภูมิวิภูภาคของสารพร้อมแสดงเส้น tie line

ก่อนการคำนวณจะต้องทำการลากเส้น tie line บนแผนภูมิวิภูภาคเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่มีอยู่ของแต่ละองค์ประกอบ จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าเส้น LS นั้นก็คือ เส้น tie line โดยทำการลากเป็นเส้นในแนวนอน เริ่มจากที่ค่าอุณหภูมิหนึ่งๆมาตัดเส้น ณ จุดของสารที่เป็นของเหลวเริ่มที่จะมีการเกิดเป็นสองวิภูภาคเกิดขึ้น ซึ่งก็คือ จุด L ของเส้น liquidus จากนั้นลากเส้นในแนวตรงระนาบต่อไปทางด้านขวายังจุดที่สารผสมสองวิภูภาคจะกลายเป็นวิภูภาคของแข็ง ซึ่งก็คือ จุด S บนเส้น solidus ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักขององค์ประกอบ B ที่จุด liquidus นั้นถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ w_l และค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักขององค์ประกอบของ B ที่จุด solidus มีค่าเท่ากับ w_s โดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักในส่วนวิภูภาคของแข็งและวิภูภาคของเหลวนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการกฎของคานดังต่อไปนี้

$$\text{Percent weight of the solid phase} = X_s = \frac{w_o - w_l}{w_s - w_l} \quad (2.1)$$

$$\text{Percent weight of the liquid phase} = X_l = \frac{w_s - w_o}{w_s - w_l} \quad (2.2)$$

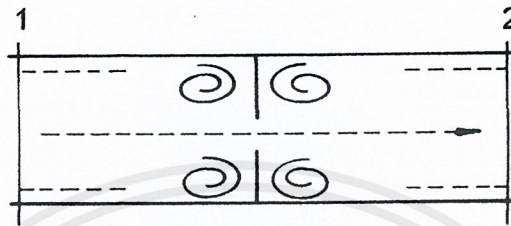
เมื่อ w_o คือ ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของธาตุ B ที่กำหนดให้ขององค์ประกอบนั้นๆ

2.2 การไหลผ่านรูออริฟิส [4]

เมื่อของไหลมีการไหลในท่อผ่านส่วนที่ถูกบีบให้มีพื้นที่ในการไหลผ่านน้อยลง หรืออุปกรณ์ทรอตตลิ่ง เช่น วาล์วทรอตตลิ่ง หรือวาล์วลดความดัน ซึ่งมีลักษณะเป็นวาล์วที่มีช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงเล็กน้อยแผ่นรูพรุน ออร์ฟิส หรือ ท่อขนาดเล็ก จะทำให้ความดันของของไหลนั้นลดลงและเกิดการขยายตัว โดยจะเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการทรอตทลิ่ง ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการทรอตทลิ่ง

จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัวคือ

$$\dot{q} - \dot{w} = \Delta \dot{h} + \Delta \dot{ke} + \Delta \dot{pe} \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุม 1-2 โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุปกรณ์ทรอตทลิ่งกับสิ่งแวดล้อมนั้นมีค่าน้อยมาก ระบบไม่มีงานเข้ามาเกี่ยวข้อง และไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ พลังงานจลน์และพลังงานศักย์จะได้

$$h_2 = h_1 \quad (2.4)$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าเอนทัลปีของของไหลที่ทางออกเท่ากับที่ทางเข้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า กระบวนการในอุปกรณ์ทรอตทลิ่ง มีค่าเอนทัลปีคงที่ (Isenthalpic process)

จากรูปที่ 2.3 ถ้าระบบการไหลของของไหลจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 เป็นระบบคงตัว และของไหลเป็นของไหลที่ไม่สามารถอัดได้ สมการสมดุลพลังงานจะอยู่ในรูปของสมการที่ (2.5) ดังนี้

$$\frac{1}{2} \alpha (V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + l_v + w = 0 \quad (2.5)$$

สำหรับระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน ค่า α มีค่าประมาณ 1

เมื่อ

V = อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของของไหล

g = ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก

Z = ความสูงของตำแหน่งที่สนใจ

P = ความดันของของไหล

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

L_v = ค่าปรับแก้เนื่องจากแรงเสียดทาน

W = งานของระบบ

ถ้าตั้งสมมติฐานว่าของไหลเคลื่อนที่ในแนวราบ และไม่มีงาน (Shaft Work) เกิดขึ้นระหว่างที่ของไหลเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการเบอร์นูลลีจะลดรูปสมการเป็น

$$\frac{V_2^2}{2} = \frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1 - P_2}{\rho} - L_v \quad (2.6)$$

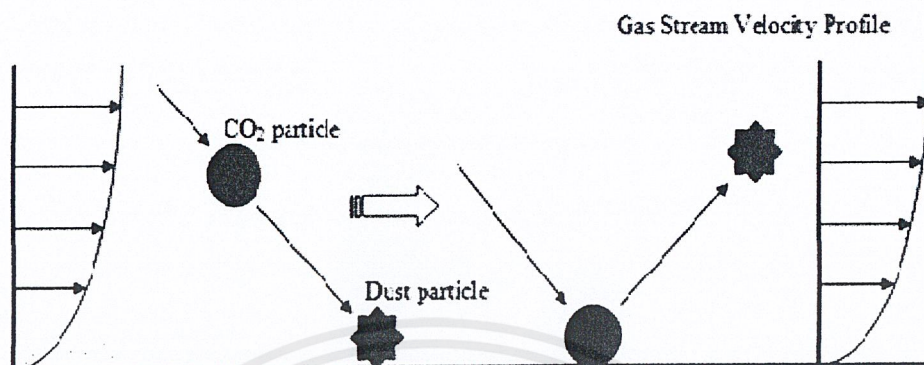
จากสมการที่ (2.6) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านรูออร์ฟิสได้

2.3 กลไกการทำความสะอาด [5]

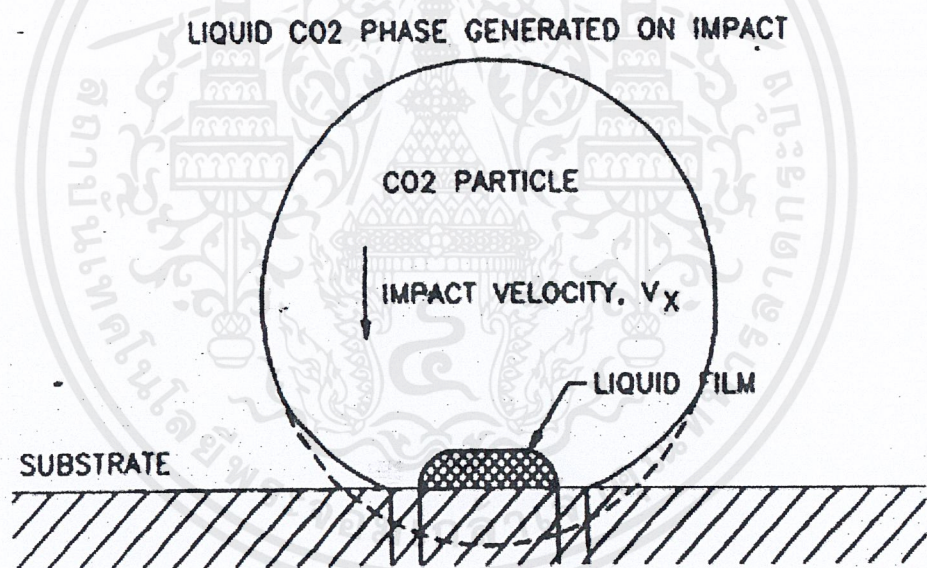
ในการทำความสะอาดด้วยละอองน้ำแข็งแห้งจะประกอบไปด้วย 3 กลไกสำคัญได้แก่ การถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับอนุภาคสิ่งสกปรก แรงลากโดยความเร็วของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการละลายโดยวิฤภาคของเหลวขณะที่น้ำแข็งแห้งสัมผัสกับวัสดุและเปลี่ยนแปลงวิฤภาคจากของแข็งเป็นของเหลวอย่างรวดเร็ว โดยกลไกนี้จะเกิดกับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขี้

กลไกที่สำคัญที่สุดของการทำความสะอาดชนิดนี้คือ การถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างอนุภาค เพราะเป็นจุดเด่นของการทำความสะอาดชนิดนี้ เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกแรงลากขจัดไปอย่างสมบูรณ์ อนุภาคน้ำแข็งแห้งจะเข้าไปชนกับสิ่งสกปรกให้กระเด็นออกจากพื้นผิวของวัสดุ และจะเกิดการระเหิดหลังจากที่ชนกับอนุภาค ที่สภาวะบรรยากาศในห้องแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยมีปัจจัยสำคัญคือขนาดของอนุภาค ความเร็วของอนุภาคและปริมาณของอนุภาค

CO₂ Cleaning Mechanism



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงกลไกการทำความสะอาด



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงกลไกการทำความสะอาดด้วยหลักการละลาย

กลไกที่เป็นสมบัติเฉพาะของการทำความสะอาดชนิดนี้อีกอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีความสามารถในการละลายสารที่ไม่มีขั้วได้ดี โดยจะเกิดกลไกดังรูปที่ 2.6 เมื่ออนุภาคของน้ำแข็งแห้งตกกระทบพื้นผิว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงวิฤภาคจากของแข็งเป็นของเหลวอย่างรวดเร็วพร้อมเข้าทำลายสารอินทรีย์บนพื้นผิว จากนั้นจะเปลี่ยนวิฤภาคเป็นก๊าซอย่างรวดเร็วอีกครั้งทำให้สารที่ละลายอยู่ใน

คาร์บอนไดออกไซด์หลุดออกไปจากพื้นผิววัสดุด้วย โดยในการศึกษาครั้งนี้จะไม่คำนึงถึงผลที่เกิดจากกลไกนี้

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำแข็งแห้ง

2.4.1 ประเภทของน้ำแข็งแห้ง [6]

- 1) Dry Ice Snow : จะมีลักษณะที่คล้ายๆกับเป็นหิมะ มีอัตราการทำความสะอาดที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับกับแบบอื่นๆเนื่องจากมันมีอนุภาคขนาดเล็ก
- 2) Dry Ice Pallet : มีลักษณะเป็นเกล็ดบางๆขนาดเท่าเม็ดข้าว โดยน้ำแข็งแห้งประเภทนี้จะมีความหนาแน่นสูง จึงใช้สำหรับการทำ Dry ice blasting
- 3) Dry Ice Nuggets : โดยปกติจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละเม็ดอยู่ที่ประมาณ 6 - 19 mm. ใช้งานทั่วไปในอุตสาหกรรมการขนส่งอาหาร การแช่อาหารเพื่อให้ไม่ให้อาหารนั้นเน่าเสีย
- 4) Dry Ice Slabs : มีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 19 mm การใช้งานส่วนใหญ่มักอยู่ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอาหารของสายการบินต่างๆ
- 5) Dry Ice Blocks : ใช้สำหรับการขนส่งสินค้า หรือเพื่อต้องการให้เย็นในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น โดยขนาดของแต่ละบล็อกก็มีความแตกต่างกันไปในแต่ละทวีป
- 6) High-Density Pellets : สร้างขึ้นโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Pelletizer ซึ่งมีคุณสมบัติต่างจาก pellets ธรรมดาตรงที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีค่าความหนาแน่นของอนุภาคคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า

2.4.2 ประโยชน์ของน้ำแข็งแห้ง [2,3]

ในอุตสาหกรรมทั่วไปน้ำแข็งแห้งมักใช้ในอุตสาหกรรมทำความสะอาดเครื่องจักร เครื่องมือ หรือ อุปกรณ์ต่างๆในส่วนที่เข้าถึงได้ยากหรือส่วนของอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กมากๆ เช่น แผ่นแผงวงจรคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความละเอียดอ่อน การทำความสะอาดจะจกก่อนการนำไปเคลือบเพื่อใช้งาน รวมไปถึงการใช้งานในทางการแพทย์ เช่น การฆ่าเชื้อกระดูกมนุษย์ เอ็นกล้ามเนื้อ และเนื้อเยื่อต่างๆ เป็นต้น วิธีการทำความสะอาดโดยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์นี้กำลังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีการใช้งานที่ง่าย และไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำแข็งแห้งนำไปทำความสะอาดทางด้านอื่นๆ อีก ตัวอย่างเช่น การทำความสะอาดชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องมือที่เป็นระบบสุญญากาศ การกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนโลหะ การทำความสะอาดเลนส์ เช่น เลนส์เคลือบเลเซอร์ IR และแสง UV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการพ่นน้ำแข็งแห้ง [7]

- 1) อาจเกิดเสียงดังรบกวนในขณะที่กำลังดำเนินการทำความสะอาดอยู่ ซึ่งอาจเกิดผลกระทบต่อบุคคลที่ทำความสะอาด หรือบุคคลที่อยู่ใกล้เคียง
- 2) หากมีการใช้ความดันในขณะที่พ่นมากเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายงานต่อชิ้นงานที่ไม่มีความแข็งแรงได้ ดังนั้นก่อนการทำความสะอาดทุกครั้งต้องแน่ใจว่ามีการใช้แรงดันขณะพ่นที่เหมาะสมกับตัวชิ้นงานแล้ว
- 3) เนื่องจากน้ำแข็งแห้งเป็นอันตรายโดยตรงต่อผิวหนัง หากสัมผัสน้ำแข็งแห้งโดยตรงอาจทำให้ผิวหนังไหม้ได้จากความเย็นจัด (Frost bite) ดังนั้นในขณะที่มีการทำความสะอาดทุกครั้งผู้ปฏิบัติงานจึงควรใส่อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลทุกครั้ง

2.4.4 ประวัติความเป็นมาของการพ่นน้ำแข็งแห้งเพื่อการทำมาสะอาด [8]

ในปีคริสต์ศักราช 1930 นั้น ได้มีผู้ที่สามารถผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของแข็งขึ้นได้เป็นผลสำเร็จ โดยในช่วงเวลานั้นส่วนมากจะใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ หลังจากนั้นก็ได้นำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆที่หลากหลายขึ้นจนกระทั่งในปี 1972 Edwin Rice ได้ทำการทดลองและนำเสนอวิธีการทำความสะอาดสิ่งสกปรกโดยใช้การฉีดพ่นอนุภาคสองเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์ความเร็วสูง ต่อมาไม่นานนักในปี 1977 Calvin Fong วิศวกรของบริษัท Lockheed ซึ่งเป็นบริษัทที่เกี่ยวกับอุตสาหกรรมการบิน ได้นำวิธีการนี้เข้ามาใช้ประโยชน์ในการทำมาสะอาดชิ้นส่วนเครื่องบิน อันเป็นการเริ่มต้นของการนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ทำความสะอาดนั่นเอง

ในปี 1980 นั้นได้มีการสร้างเครื่องผลิตน้ำแข็งแห้งขึ้นมาเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งในขณะนั้น อนุภาคของน้ำแข็งแห้งนี้ ยังมีขนาดใหญ่อยู่่มาก พร้อมกับความต้องการในการที่จะควบคุมความดันที่เกิดขึ้นสูงในระหว่างกระบวนการผลิต (มากกว่า 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) หลังจากนั้นการทำมาสะอาดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์นี้ ก็ได้กลายมาเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทางในเชิงพาณิชย์นับตั้งแต่ปี 1987 เป็นต้นมา ซึ่งในปัจจุบันนี้สามารถใช้ nozzle technology ผลิตอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ ซึ่งจะทำให้ความดันในระหว่างกระบวนการผลิตไม่สูงมากนัก

2.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

2.5.1 การหาความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด

เมื่อทราบอัตราการไหลเชิงมวลของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด ก็จะทำให้สามารถหาความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีดจากสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\dot{m} U_0 = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2.7)$$

เมื่อ	U_0	คือ	ความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด (เมตรต่อวินาที)
	\dot{m}	คือ	อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิส (ตารางเมตร)

2.5.2 การประมาณค่าความเร็วในการชน [11]

เมื่อทำการพ่นน้ำละอองน้ำแข็งแห้งตกกระทบพื้นผิว จะเกิด Boundary layer ของกระแสน้ำคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิว โดยอนุภาคของน้ำแข็งแห้งจะเคลื่อนที่ผ่าน Boundary layer นี้และทำความสะอาออนุภาคถึงสทกรบนพื้นผิว ซึ่งในขณะที่อนุภาคของน้ำแข็งแห้งเคลื่อนที่ผ่าน Boundary layer ความเร็วของอนุภาคของน้ำแข็งแห้งจะลดลงเนื่องจากแรงลากของกระแสน้ำคาร์บอนไดออกไซด์ใน Boundary layer โดย velocity relaxation time จะคำนวณจากสมการ

$$\tau = \frac{2r^2 \rho_p C_c}{9\eta} \quad (2.8)$$

เมื่อ	τ	คือ	velocity relaxation time (ไมโครวินาที)
	r	คือ	รัศมีของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (เมตร)
	ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	η	คือ	ความหนืดของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ (ปาสคาล.วินาที)
	C_c	คือ	Cunningham correction factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$C_c = 1 + \frac{2}{Pd} [6.32 + 2.01 \exp(-0.1095Pd)] \quad (2.9)$$

ซึ่ง P คือ ความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสกาล)
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (ไมโครเมตร)

สำหรับความหนาของ Boundary layer จะคำนวณจากสมการ

$$\delta = 0.16 * \frac{x}{(Re)^{1/7}} \quad (2.10)$$

เมื่อ δ คือ ความหนาของ Boundary layer (เมตร)
x คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวของวัสดุ (เมตร)
Re คือ Reynolds number

โดย

$$Re = \frac{\rho U_0 x}{\eta} \quad (2.11)$$

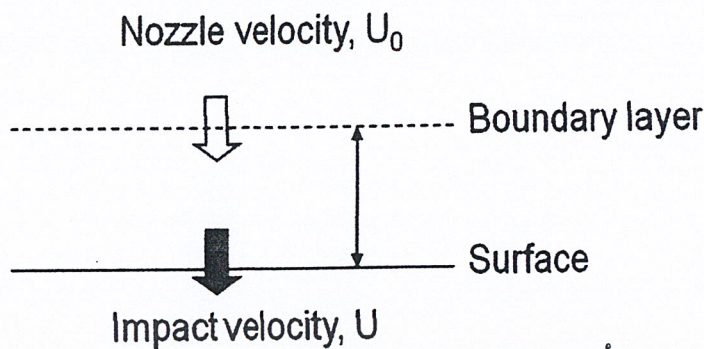
เมื่อ Re คือ Reynolds number
 ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 U_0 คือ ความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด (เมตรต่อวินาที)
x คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวของวัสดุ (เมตร)
 η คือ ความหนืดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ปาสกาล.วินาที)

จากนั้นจะคำนวณความเร็วในการชน จากสมการ

$$U = U_0 \left(1 - \frac{\delta}{U_0 \tau} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ U คือ ความเร็วในการชน (เมตรต่อวินาที)
 U_0 คือ ความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด (เมตรต่อวินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดง Boundary layer ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนพื้นผิววัสดุ

2.5.3 การหาโมเมนต์ของอนุภาคน้ำแข็งแข็งที่ตกกระทบพื้นผิว เมื่อทราบปริมาตรของอนุภาคน้ำแข็งแข็งก็จะทำให้สามารถหามวลของอนุภาคน้ำแข็งแข็งจากสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$m = \rho_p V_p = \frac{4\rho_p \pi r^3}{3} \quad (2.13)$$

เมื่อ	m	คือ	มวลของอนุภาคน้ำแข็งแข็งหนึ่งอนุภาค (กิโลกรัม)
	ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	r	คือ	ขนาดรัศมีของอนุภาคน้ำแข็งแข็ง (เมตร)
	V_p	คือ	ปริมาตรของอนุภาคน้ำแข็งแข็งหนึ่งอนุภาค (ลูกบาศก์เมตร)

จากความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถนำไปหาโมเมนต์ของอนุภาคน้ำแข็งแข็งที่ตกกระทบพื้นผิวโดยหาจากสมการ

$$\bar{P} = mU \quad (2.14)$$

เมื่อ	\bar{P}	คือ	โมเมนต์ของอนุภาคน้ำแข็งแข็ง (กิโลกรัม.เมตรต่อวินาที)
	m	คือ	มวลของอนุภาคน้ำแข็งแข็งหนึ่งอนุภาค (กิโลกรัม)
	U	คือ	ความเร็วในการชน (เมตรต่อวินาที)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Hiroshi Yamaguchi และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการการขยายตัว และผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ไหลผ่าน Expansion valve ซึ่งได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว 2 ค่า คือ 2.50 เมตรต่อวินาทีและ 0.78 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ โดยที่สถานะเริ่มต้น (ก่อนผ่าน Expansion valve) คาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีความดัน และอุณหภูมิเท่ากับ 1.0 เมกกะปาสกาล และ -45 องศาเซลเซียส ตามลำดับแล้วทำการจับภาพในหลอดที่ทดลองโดยใช้กล้องจับภาพความเร็วสูงตรวจสอบผลที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ได้เกิดการเปลี่ยนวิภาคจากวิภาคของเหลวเป็นวิภาคของแข็ง และก๊าซ ซึ่งเมื่อสังเกตลักษณะของอนุภาคน้ำแข็งแข็งที่เกิดขึ้นแล้ว จะพบว่าที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเท่ากับ 2.50 เมตรต่อวินาที จะได้ขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ซึ่งได้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร พร้อมทั้งมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี แต่ถ้าอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเท่ากับ 0.78 เมตรต่อวินาทีจะเกิดการสะสมกันของตะกอนอนุภาคขึ้นที่หลอดทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารมีอัตราการไหลที่ต่ำและขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 1.078 มิลลิเมตร จากการทดลองนี้ได้มีการสรุปไว้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแข็ง คือ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ขนาดรูเปิดของ Expansion valve ที่ใช้ อุณหภูมิและความดัน ของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

Cheol Nam Yoon และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดด้วยละอองสารเย็นยิ่งยวดหลายชนิด แต่สิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้คือวิธีการวัดประสิทธิภาพซึ่งมีการใช้ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่าระดับไมครอนโดยใช้วัสดุเป็นสไลด์แก้วเพื่อทำการวัดประสิทธิภาพโดยใช้เครื่อง UV-VIS แม้ว่าไม่สามารถนำมาใช้กับวัสดุที่เป็นโลหะได้แต่ทำให้ได้ข้อคิดอย่างหนึ่งว่าการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพที่สูงและสามารถประยุกต์ใช้กับการใช้กล้อง SEM ในการหาประสิทธิภาพได้โดยการนับปริมาณอนุภาคใน 1 หน่วยพื้นที่ขนาดเล็ก และสิ่งที่น่าสนใจอีกหนึ่งสิ่งคือการศึกษาผลของระยะทางระหว่างหัวฉีดกับวัสดุ ซึ่งมีผลอย่างมีนัยเมื่อมีระยะห่างมากกว่า 1 เซนติเมตรขึ้นไปโดยในการทดลองนี้มีความดันภายในกล่องบรรจุชิ้นงานเท่ากับ 8 กิโลปาสกาล จึงต้องมีการศึกษาต่อไปในการปรับระยะห่างของหัวฉีดกับชิ้นงานในระบบที่ใช้กับความดันบรรยากาศ

Christopher Toscano และคณะ [11] ได้ทำการศึกษากลไกในการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยอนุภาคเย็นยิ่งยวดของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะในการทำความสะอาดต่างๆ โดยทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันไปบนพื้นผิว ซึ่งพบว่ากลไกในการทำควมสะอาดพื้นผิวโดยการชนกันระหว่างอนุภาคประกอบด้วย 2 กลไกคือ

- 1) กลไกการชนแบบม้วน (Rolling) จะเกิดขึ้นเมื่อโมเมนตัมที่เกิดจากแรงต่างๆที่กระทำกับอนุภาคสิ่งสกปรกได้แก่ แรงกระแทก แรงลาก และแรงยก สามารถเอาชนะโมเมนตัมต้านทานที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสิ่งสกปรกกับพื้นผิวได้
- 2) กลไกการชนแบบเลื่อน (Sliding) จะเกิดขึ้นเมื่อแรงต่างๆในแนวขนานกับพื้นผิวที่กระทำกับอนุภาคสิ่งสกปรกสามารถเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคสิ่งสกปรกกับพื้นผิวได้

นอกจากนี้ Christopher Toscano และคณะ ยังพบว่าความเร็ววิกฤตของการขจัดอนุภาคบนพื้นผิวด้วยกลไกการชนแบบม้วนนั้นมีค่าน้อยกว่าความเร็ววิกฤตของการขจัดอนุภาคบนพื้นผิวด้วยกลไกการชนแบบเลื่อน และพบว่าอนุภาคเขี่ยยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่สามารถกำจัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่บนพื้นผิวได้ง่ายแต่สำหรับการใช้อนุภาคเขี่ยยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่นี้ ไม่สามารถขจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าบนพื้นผิวได้

เลขที่เอกสาร 119329

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1.1 ศึกษา รวบรวมข้อมูลจากทั้งทางทฤษฎีและจากการทดลองที่เกี่ยวข้อง

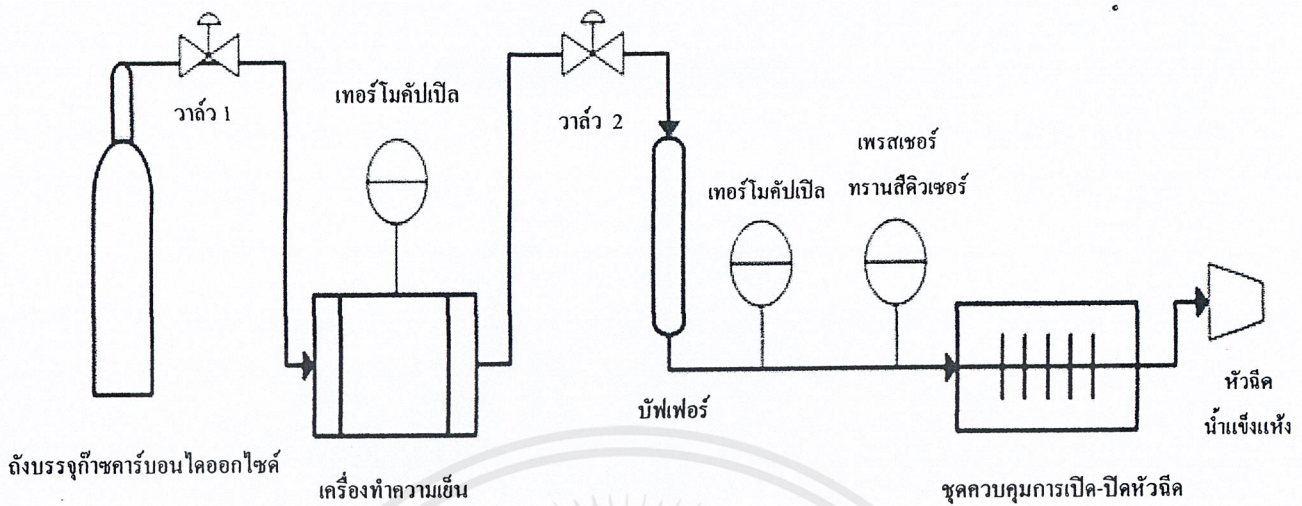
3.1.2 ออกแบบวิธีการทดลอง

3.1.3 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- 1) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความบริสุทธิ์ 99.95% (CO_2)
- 2) ทัลค์ (Talc)
- 3) น้ำ (Water)
- 4) แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board)
- 5) ซิลิกาเจล
- 6) กล้อง SEM (Scanning Electron Microscope)
- 7) เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง
- 8) เคซิเคเตอร์ (Desiccators)
- 9) เครื่องซังน้ำหนักก๊าซ
- 10) นาฬิกาจับเวลา
- 11) แผ่น Fuji Prescale Film
- 12) กล้อง Optical microscope กำลังขยาย 40 และ 80 เท่า

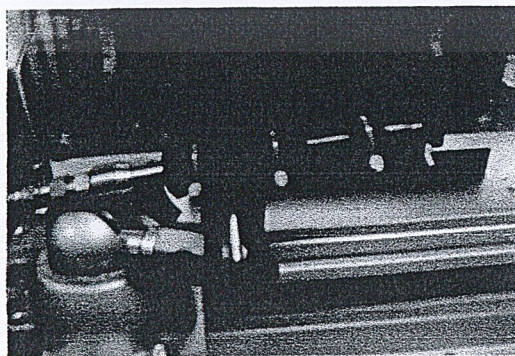


รูปที่ 3.1 แผนภูมิอุปกรณ์ในการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.2.1 การทดลองหาการเกิดอนุภาคน้ำแข็งแห้งจากคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะที่ใช้ความดันต่ำ

- 1) เปิดเครื่องทำความเย็น โดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ -20 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งได้อุณหภูมิตามค่าที่ตั้งไว้
- 2) จากนั้นเปิดวาล์วถังบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และวาล์วหมายเลข 2 พร้อมกับปรับค่าความดัน P1 ให้อยู่ในช่วง 385-610 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 3) หลังจากนั้นทำการเปิดสวิตซ์หัวฉีดฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ชุดควบคุมการเปิด-ปิดหัวฉีด เพื่อสังเกตว่ามีการเกิดขึ้นของอนุภาคน้ำแข็งแห้งหรือไม่



รูปที่ 3.2 หัวฉีดละอองน้ำแข็งแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ในแต่ละช่วงความดันที่ใช้ จะทำการฉีดพ่นเป็นระยะเวลา 10 วินาทีต่อครั้ง โดยทำช่วงความดันละ 5 ครั้ง พร้อมกับการบันทึกข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

5) จากนั้นทำการเปลี่ยนช่วงความดันที่ใช้ โดยเปลี่ยนเป็นช่วงความดันที่ต่ำกว่าในแต่ละครั้ง จนกระทั่งช่วงความดันที่ใช้ในช่วงความดันต่ำๆนั้น ไม่สังเกตเห็นว่าเกิดละอองน้ำแข็งแข็งขึ้นแล้วขณะทำการทดลอง

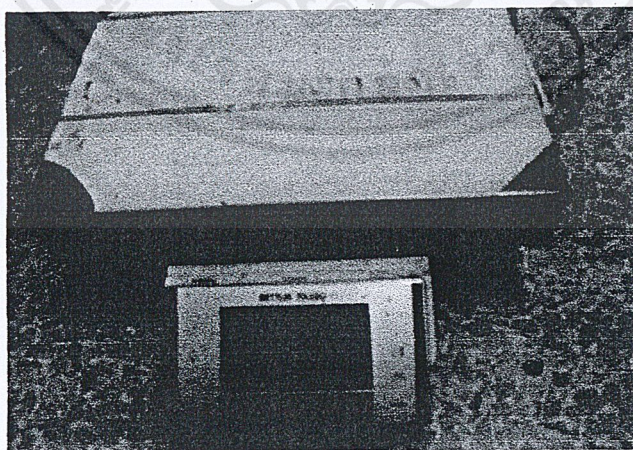
3.2.2.2 การทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลผ่านหัวฉีดเมื่อใช้ความดันต่ำ

1) ทำการจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง โดยเริ่มจากการนำถังบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปตั้งไว้บนเครื่องชั่งน้ำหนักก๊าซ

2) จากนั้นเปิดเครื่องทำความเย็นโดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ -20 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งได้อุณหภูมิตามค่าที่ตั้งไว้

3) เปิดวาล์วของถังบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และวาล์วหมายเลข 2 พร้อมกับปรับค่าความดันให้อยู่ในช่วง ความดันที่ต้องการจะทำการศึกษาที่ 450 - 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

4) เมื่อได้ค่าความดันที่ต้องการแล้ว จากนั้นเริ่มทำการทดลองโดยกดเปิดสวิตซ์หัวฉีดพ่นที่กล่องควบคุมการเปิด-ปิด โดยก่อนที่จะทำการฉีดพ่นนั้น ต้องบันทึกค่ามวลของก๊าซเริ่มต้นก่อน



รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักก๊าซ

5) เริ่มทำการฉีดพ่นโดยกำหนดเวลาในการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห้งในแต่ละครั้ง เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นทำการบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุกครั้ง โดยจะทำการทดลองซ้ำช่วงความดันละ 5 ครั้ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย

6) จากนั้นทำการเปลี่ยนช่วงของความดันเป็นช่วงของค่าความดันที่ต่ำลงมาจากกระทั่งช่วงความดันที่ใช้ นั้น ไม่เห็นว่ามีอนุภาคของละอองน้ำแข็งแห้งเกิดขึ้น

7) นำผลที่บันทึกได้ไปคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงมวล โดยนำค่าน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ในถังบรรจุที่หายไปมาหารด้วยระยะเวลาทั้งหมดที่ได้ใช้ไปในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

3.2.2.3 การทดลองหาขนาดอนุภาคของน้ำแข็งแห้งผ่าน Fuji Prescale Film

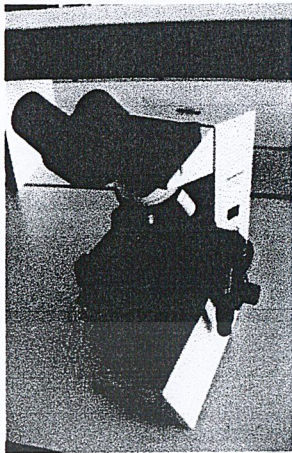
1) เตรียมแผ่น Prescale Film สำหรับการทดลอง จำนวน 4 แผ่น โดยในที่นี้จะใช้แผ่น Fuji Prescale Film ชนิด Medium เนื่องจากมีขนาดของแรงกระแทกของอนุภาคน้ำแข็งแห้งในขนาดที่เหมาะสมกับความสามารถในการวัดของแผ่น Fuji Prescale Film ระดับนี้

2) นำแผ่น Fuji Prescale Film ติดตั้งบนแท่นที่เตรียมไว้ โดยขณะทำการติดตั้งแผ่นจะต้อง จัดวางลงบนแท่นอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับผิวหน้าแผ่น Fuji Prescale Film

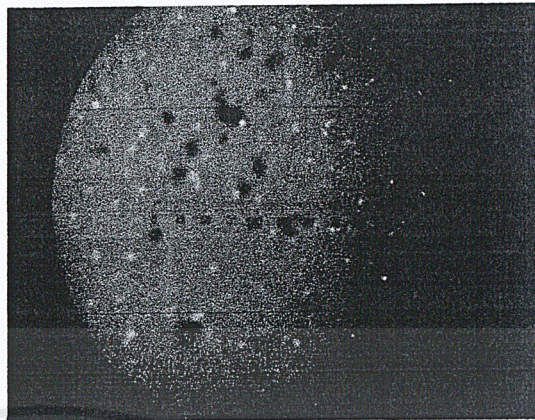
3) เริ่มทำการทดลอง โดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งลงบนแผ่น Fuji Prescale Film ที่เตรียมไว้ ซึ่งค่าความดันที่ใช้ในการพ่นคือ 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และใช้เวลาในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งนี้ 1 วินาที หลังจากนั้นทำการเก็บแผ่น Fuji Prescale Film ที่พ่นแล้ว เก็บไว้ในถุงที่ป้องกันความชื้นและแสงสว่าง

4) ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับในข้อที่ 3 โดยเปลี่ยนค่าความดันในการพ่นเป็น 600, 500 และ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นนำไป เก็บไว้ในถุงที่ป้องกันความชื้นและแสงสว่าง

5) นำแผ่น Fuji Prescale Film ทั้งหมดที่เตรียมไว้ มาทำการส่องด้วยกล้อง Optical microscope กำลังขยาย 100 เท่า เพื่อวัดขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้น หลังจากการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง ที่ใช้ระดับความดันแตกต่างกัน พร้อมกับการเก็บบันทึกภาพของอนุภาคที่ได้จากกล้อง



รูปที่ 3.4 กล้อง Optical microscope



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งบนแผ่น Fuji Prescale Film

6) จากนั้นนำรูปภาพที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งโดยใช้โปรแกรม Image J จากนั้นทำการสรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์

3.2.2.4 การทดลองหา Impact Stress ของละอองน้ำแข็งแห้งผ่าน Fuji Prescale Film

- 1) เตรียมแผ่น Fuji Prescale Film สำหรับการทดลอง ทั้งหมดจำนวน 4 แผ่น โดยในที่นี้จะใช้แผ่น Fuji Prescale Film ชนิด medium เช่นเดียวกันกับการทดลองเพื่อหาขนาดอนุภาคของละอองน้ำแข็งแห้ง
- 2) นำแผ่น Fuji Prescale Film ติดตั้งบนแท่นที่เตรียมไว้ โดยขณะทำการติดตั้งแผ่น จัควางลงบนแท่นอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับผิวหน้าของแผ่น Fuji Prescale Film ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการทดลองที่อยู่ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นในอากาศต่ำ
- 3) เริ่มทำการทดลอง โดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งลงบนแผ่น Fuji Prescale Film ที่เตรียมไว้ ซึ่งค่าความดันที่ใช้ในการพ่นคือ 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และใช้เวลาในการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง 1 นาที หลังจากนั้นทำการบันทึกภาพของแผ่น Fuji Prescale Film หลังจากการพ่นด้วยอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งทันทีด้วยกล้องบันทึกภาพ
- 4) ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับในข้อที่ 3 โดยเปลี่ยนค่าความดันในการพ่นเป็น 600, 500 และ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ

5) จากนั้นนำรูปภาพที่ได้มาทำการวิเคราะห์หา Impact Stress ของละอองน้ำแข็งแห้ง จากการเทียบความเข้มของสีที่เกิดขึ้นกับ Color density scale bar



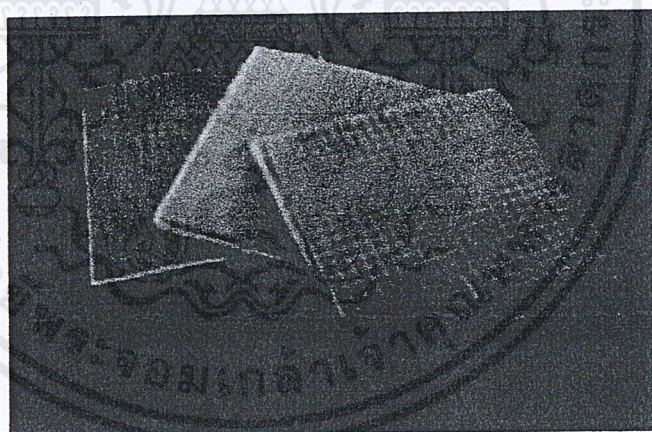
๓๖.

รูปที่ 3.6 Color density scale bar

3.2.2.5 การทดลองหา Impact Stress ของละอองน้ำแข็งแห้งผ่าน Fuji Prescale

Film

1) เตรียมแผ่นวงจรพิมพ์จำนวน 3 แผ่น โดยแผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 ทำการโรยทัลคัลลงบนชิ้นงานเคลือบด้วยแป้งจนอ่อน ส่วนแผ่นที่ 3 ไม่ต้องทำการเคลือบทัลคัล



รูปที่ 3.7 แผ่นวงจรพิมพ์

2) นำแผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 ไปพ่นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่มีละอองน้ำแข็งแห้งเพื่อขจัดอนุภาคที่จะถูกกำจัดได้โดยแรงลากเนื่องจากความเร็วของก๊าซ

3) นำแผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ไปทำการฉีดพ่นทำความสะอาดด้วยละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันเฉลี่ย 816 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิเฉลี่ย 20 องศาเซลเซียส โดยเน้นที่จุดกึ่งกลางของแผ่นเป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นเก็บชิ้นงานไว้ในกล่องที่มีซิลิกาเจลอยู่ทันที

4) แผ่นวงจรที่ 1 ที่ไม่ได้ทำความสะอาดเก็บไว้ในกล่องเปล่าได้ทันที และแผ่นวงจรที่ 3 นำไปล้างด้วยน้ำและถูด้วยฟองน้ำจากนั้นเก็บไว้ในกล่องที่มีซิลิกาเจลทันที

5) ทำการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นวงจรพิมพ์ทั้ง 3 แผ่นด้วยกล้อง SEM โดยเป็นการตรวจสอบหารายละเอียดของอนุภาคที่สะสมอยู่บนพื้นผิว พร้อมทั้งทำการบันทึกภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาหลักการในการวัดประสิทธิภาพของการทำความสะอาดสำหรับออกแบบการทดลองต่อไป

3.2.2.6 การทดสอบการทำความสะอาดชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

1) นำชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมาบันทึกภาพก่อนทำความสะอาดด้วยกล้อง Optical microscope กำลังขยาย 80 เท่า

2) ทำความสะอาดชิ้นงาน โดยกำหนดระยะห่างระหว่างชิ้นงานและปลายหัวฉีดเท่ากับ 1 เซนติเมตร ใช้ความดันของสารป้อนเท่ากับ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิของสารป้อนประมาณ 5 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการทำความสะอาด 10 วินาที

3) บันทึกภาพชิ้นส่วนหลังการทำความสะอาด วิเคราะห์ผลการทดลอง

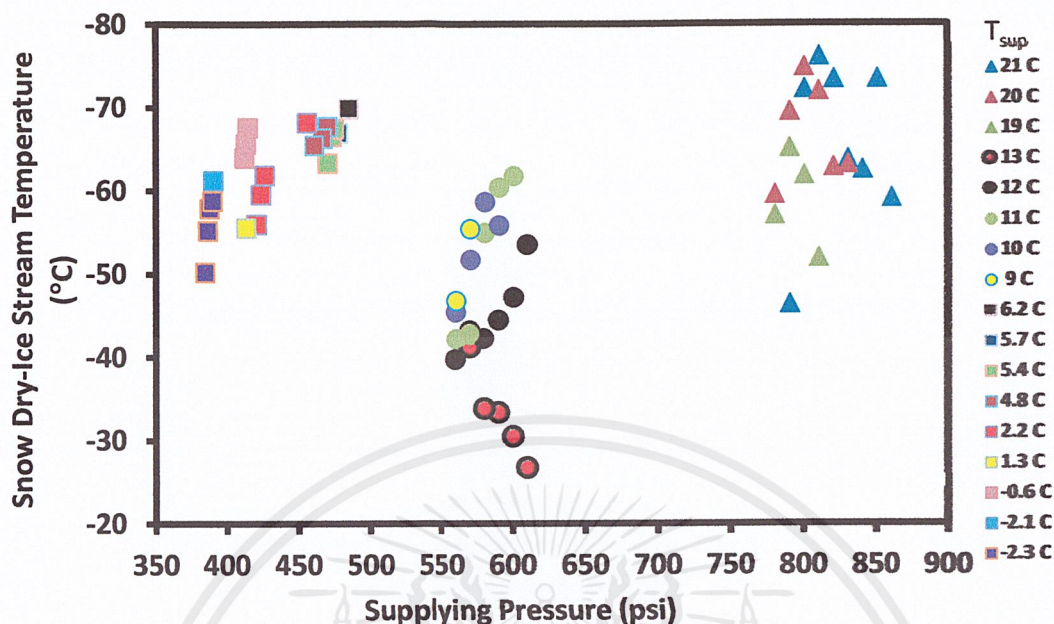
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

โครงการนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งจากการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อนในช่วงความดันต่ำและความดันปานกลาง โดยทำการลดอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารป้อน และทำการศึกษาอิทธิพลของความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งในช่วงอุณหภูมิ -2.3 ถึง 12 องศาเซลเซียส รวมถึงได้ทำการทดสอบสมรรถนะในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่มีขนาดอยู่ในระดับไมครอน โดยอาสัยทัลค์ (Talc) เป็นตัวจำลองสิ่งสกปรกบนพื้นผิวที่นำมาทดลอง ได้แก่ แผ่นวงจร PCB และแผ่นพลาสติกใส และเนื่องจากการทำความสะอาดชนิดนี้จะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งใช้ทำความสะอาดในชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและบอบบาง จึงต้องมีการวัดแรงกระแทกของละอองน้ำแข็งแห้งให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับชิ้นส่วนนั้นๆ โดยใช้ Fuji Prescale Film ในการวัดแรงกระแทกโดยเทียบความดันที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มจากระดับความเข้มของสีที่เกิดขึ้น ซึ่งได้ทำการทดลองในช่วงความดัน 450 - 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 3-15 องศาเซลเซียส

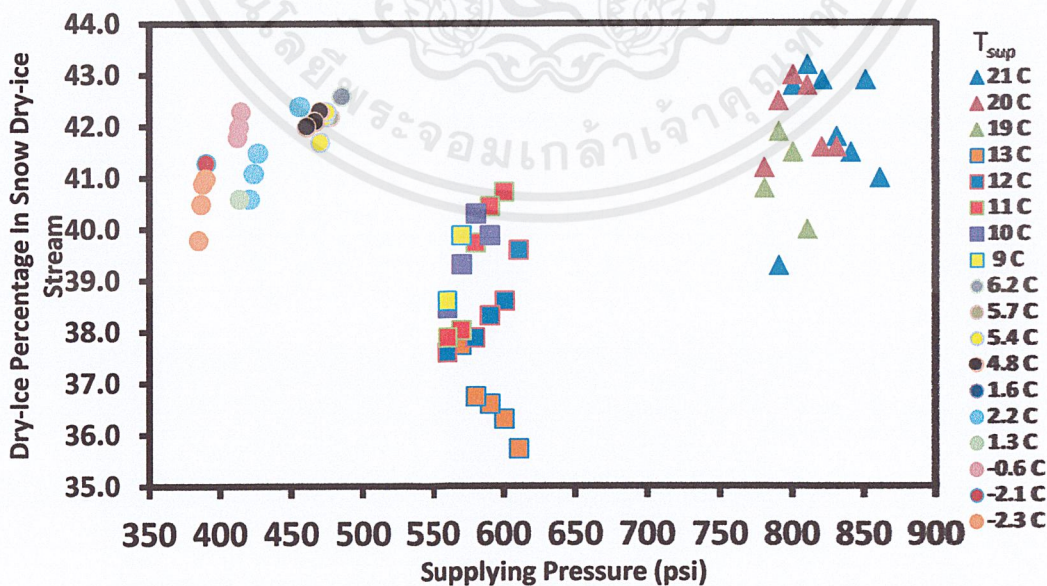
4.1 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อคุณลักษณะของกระแผลละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้

ในการทดลองนี้จะแบ่งช่วงความดันของสารป้อนที่ใช้เป็น 3 ช่วงคือ 750 ถึง 850 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ระบบความดันสูง ช่วง 550 ถึง 610 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สำหรับระบบความดันปานกลาง และระบบความดันต่ำจะใช้ความดันของสารป้อนในช่วง 385 ถึง 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยจะสนใจสถานะของกระแผลละอองน้ำแข็งแห้งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -56 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่าจุด Triple Point ของคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้แน่ใจว่ามีการเกิดขึ้นของละอองน้ำแข็งแห้งอย่างแน่นอน จากผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งได้จากการใช้ความดันของสารป้อนต่ำ ซึ่งมีอุณหภูมิของกระแผลน้ำแข็งแห้งในช่วงเดียวกับที่ระบบความดันสูง โดยจะต้องลดอุณหภูมิของสารป้อนลงด้วย จากเดิมที่ระบบความดันสูงใช้อุณหภูมิของสารป้อน 19 ถึง 21 องศาเซลเซียส เมื่อต้องการลดความดันให้อยู่ในระดับปานกลางจะต้องลดอุณหภูมิของสารป้อนมาอยู่ในช่วง 9 ถึง 11 องศาเซลเซียส และในระบบความดันต่ำก็จะต้องลดอุณหภูมิของสารป้อนลงอีก ซึ่งอยู่ในช่วง -2.3 ถึง 6.2 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.1.1



รูปที่ 4.1.1 ผลของความดันและอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่ออุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง

อุณหภูมิของกระแสน้ำแข็งแห้งสามารถนำไปคำนวณเป็นปริมาณร้อยละของน้ำแข็งแห้งในกระแสได้โดยใช้แผนภูมิวิภาคและใช้ กฎของคาน จะพบว่าสามารถผลิตน้ำแข็งแห้งที่ระบบความดันต่ำและระบบความดันปานกลางได้เป็นปริมาณร้อยละในช่วงเดียวกับที่ใช้ระบบความดันสูง ดังรูปที่ 4.1.2



รูปที่ 4.1.2 ปริมาณร้อยละของอนุภาคน้ำแข็งแห้งในกระแสละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันและอุณหภูมิของสารป้อนต่างๆ

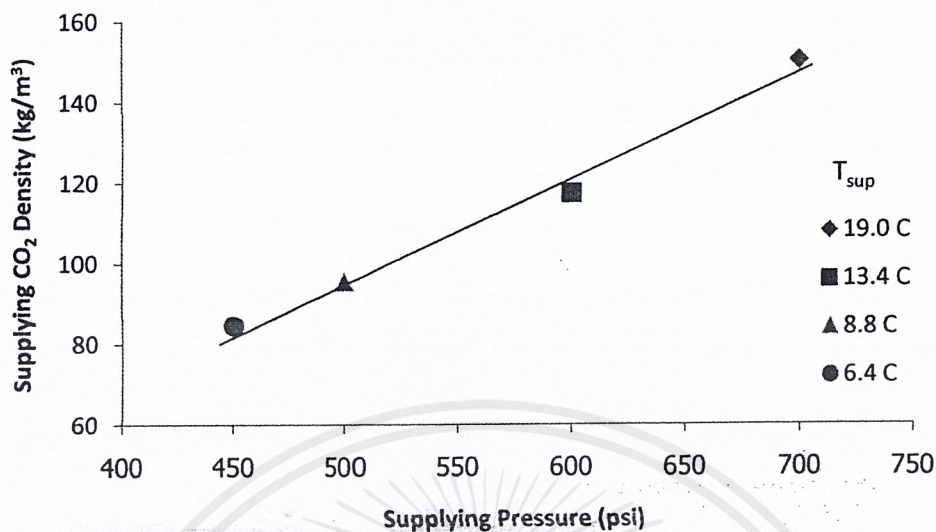
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสถานะที่สนใจคือช่วงที่อุณหภูมิของกระแสของน้ำแข็งแห้งต่ำกว่า -56 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อใช้กฎของคาน แล้วสามารถคำนวณเป็นร้อยละของปริมาณน้ำแข็งแห้งในกระแสของน้ำแข็งแห้งได้ 39.9 จากผลการทดลองพบว่าที่ระบบความดันสูง ปานกลางและต่ำ สามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งได้เป็นปริมาณร้อยละในช่วงที่สนใจ โดยจะต้องใช้อุณหภูมิของสารป้อนที่ระบบความดันสูงคือ 19-21 องศาเซลเซียส ที่ระบบความดันปานกลาง 9-11 องศาเซลเซียส และที่ระบบความดันต่ำ -2.3-6.2 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งได้ปริมาณร้อยละของอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งในกระแสของน้ำแข็งแห้งมากกว่า 39.9 ^๕

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่ระบบความดันปานกลางและความดันต่ำได้เป็นปริมาณร้อยละในช่วงเดียวกับที่ใช้ระบบความดันสูง แต่มิได้หมายความว่าสามารถผลิตละอองน้ำแข็งออกมาได้ในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากเมื่อทำการลดความดันในระบบแล้ว จะทำให้อัตราการไหลของสารป้อนเปลี่ยนไป ซึ่งอาจมีผลต่อกลไกการเกิดละอองน้ำแข็งแห้งรวมถึงความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ใช้การชนของอนุภาคเป็นกลไกหลักในการทำความสะดวก

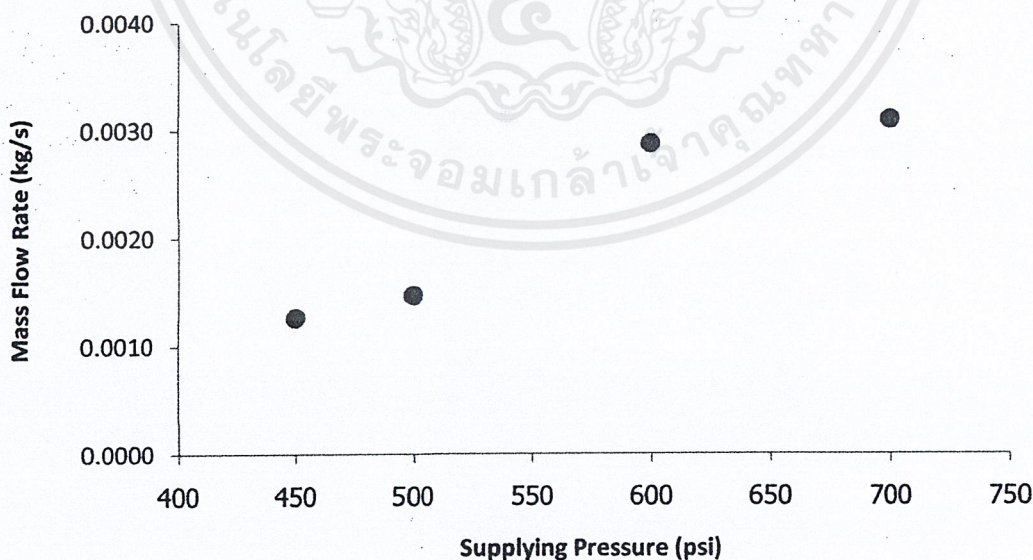
4.2 การคำนวณความเร็วของ CO_2 ในท่อและความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

เนื่องจากกลไกหลักในการทำความสะดวกคือการชนกันของอนุภาค หรือการถ่ายเทโมเมนตัม สิ่งที่สำคัญสำหรับหลักการนี้ก็คือ มวลของอนุภาคและความเร็วของอนุภาค โดยในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาความเร็วในการชนของอนุภาคจากความเร็วของสารป้อนภายในท่อ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงมวลและความหนาแน่นของสารป้อน โดยความหนาแน่นของสารป้อนที่ใช้ในการทดลองในส่วนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการสถานะ Peng-Robinson ในโปรแกรม Hysys และมีค่าความหนาแน่นดังรูปที่ 4.2.1



รูปที่ 4.2.1 ผลของความดันและอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อความหนาแน่นของสารป้อนภายในท่อ

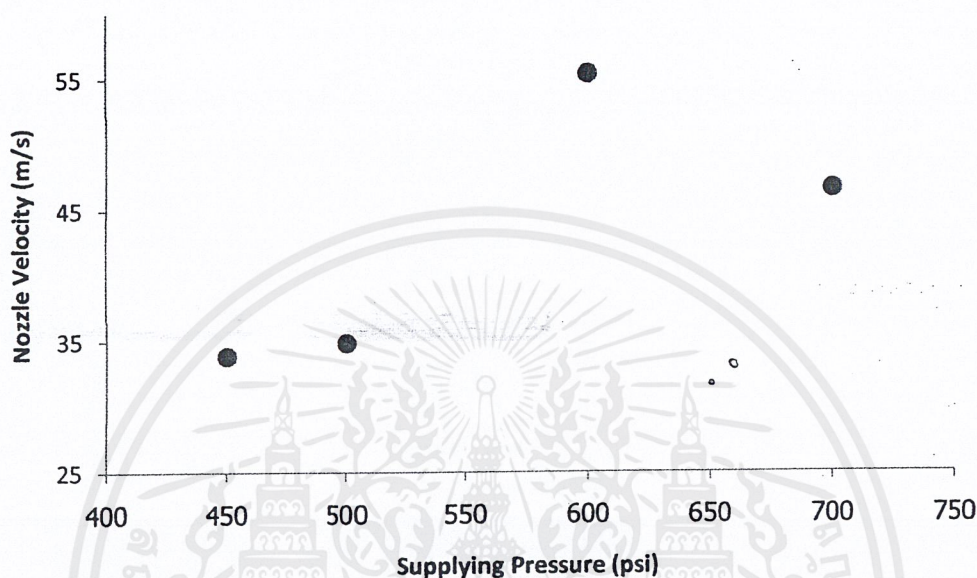
จากรูปที่ 4.2.1 จะเห็นว่าเมื่อลดความดันของสารป้อนลงแล้วจะทำให้ความหนาแน่นของสารป้อนลดลงไปด้วย ซึ่งหลังจากที่ทราบความหนาแน่นของแต่ละสถานะของสารป้อนแล้ว จึงนำความหนาแน่นของสารป้อนจากรูปที่ 4.2.1 มาคำนวณความเร็วของสารป้อนในท่อจากอัตราการไหลเชิงมวลในรูปที่ 4.2.2



รูปที่ 4.2.2 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวล

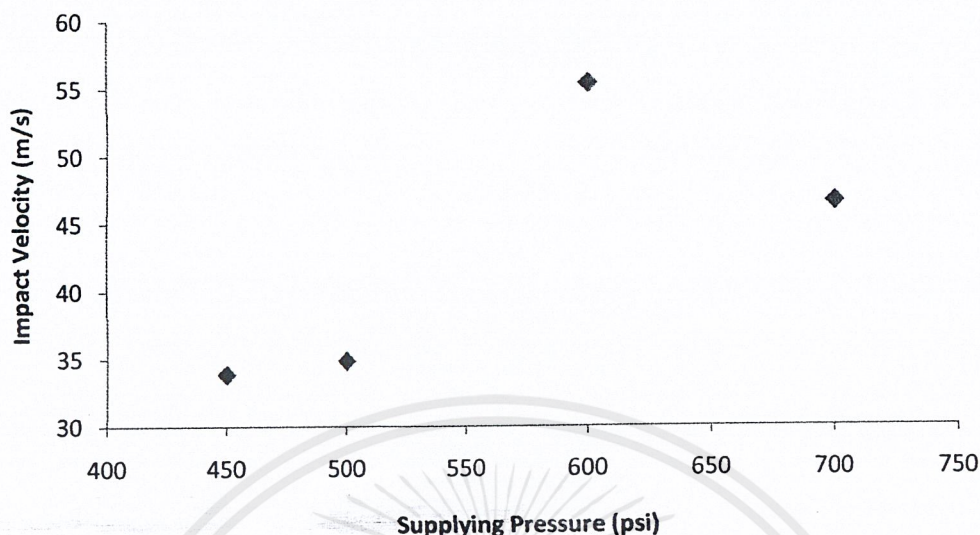
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำอัตราการไหลเชิงมวลในรูปที่ 4.2.2 มาคำนวณเป็นความเร็วของสารป้อนในท่อ โดยใช้ความหนาแน่นจากรูปที่ 4.2.1 และพื้นที่หน้าตัดของท่อเท่ากับ $4.42 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ จะสามารถคำนวณความเร็วของสารป้อนในท่อได้ดังรูปที่ 4.2.3



รูปที่ 4.2.3 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อความเร็วของสารป้อนในท่อ

จากผลการคำนวณจะเห็นว่า เมื่อใช้ความดันของสารป้อนที่ลดลงขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ความเร็วของสารป้อนในท่อลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้ความดันของสารป้อนลดลงจะทำให้ความหนาแน่นของสารป้อนลดลงซึ่งความหนาแน่นมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวล เนื่องจากเป็นการไหลในท่อที่มีการควบคุมอัตราการไหลเชิงปริมาตร อีกทั้งความต่างของความดันภายในท่อกับความดันบรรยากาศมีค่าลดลง ทำให้ของไหลภายในท่อไหลช้าลงตามหลักของกลศาสตร์ของไหล นอกจากนี้ทำการคำนวณความเร็วของสารป้อนในท่อไปเป็นความเร็วในการชนของกระแสการไหล โดยใช้สมการที่ (2.12) ในการคำนวณและได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 4.2.3 ซึ่งพบว่าความเร็วในการชนยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความเร็วของสารป้อนในท่อ โดยความเร็วทั้งสองค่านี้มีค่าต่างกันน้อยมากเนื่องจากระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับชิ้นงานห่างกันเพียง 1 เซนติเมตร ทำให้ Boundary Layer มีขนาดเล็กมาก ผลของ Boundary Layer ที่มีต่อความเร็วของอนุภาคจึงมีน้อยมาก

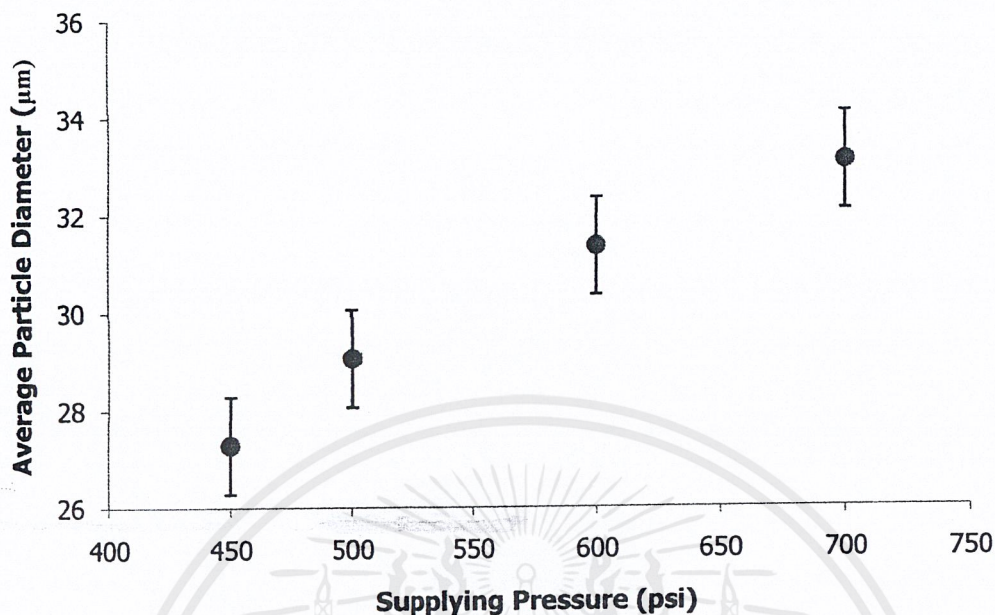


รูปที่ 4.2.4 ผลของความดันที่มีต่อความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

4.3 การศึกษาคุณลักษณะของอนุภาคน้ำแข็งแห้งผ่าน Fuji Prescale Film

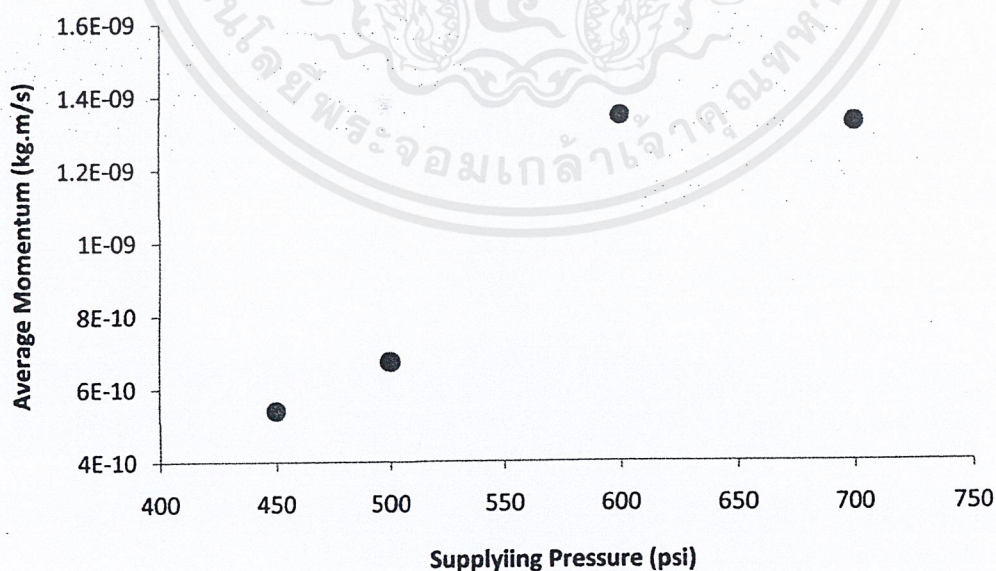
4.3.1 การศึกษาผลของความดันที่มีต่อโมเมนต์ในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ในการคำนวณโมเมนต์จำเป็นต้องใช้ขนาดของอนุภาคของละอองน้ำแข็งแห้ง เพื่อคำนวณหามวลของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง จึงได้นำเทคนิคการวัด โดยใช้ Fuji Prescale Film โดยเมื่อมีแรงกดลงบนแผ่นฟิล์มนี้จะเกิดสีแดงขึ้นที่บริเวณดังกล่าว ซึ่งจะใช้ขนาดของรอยกดบนแผ่นฟิล์มเป็นขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง โดยขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ใช้ในการคำนวณจะใช้เป็นขนาดเฉลี่ยของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเพื่อนำไปหาโมเมนต์เฉลี่ยที่อนุภาคชนกับพื้นผิววัสดุ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อลดความดันของสารป้อนลงจะมีผลทำให้ขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งมีแนวโน้มที่จะลดลง ดังรูปที่ 4.3.1.1



รูปที่ 4.3.1.1 ผลของความของสารป้อนที่มีต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย

และเมื่อนำขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งไปคำนวณเป็น โมเมนตัมในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง โดยใช้ความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งจากรูปที่ 4.2.3 จะได้ผลการคำนวณ โมเมนตัมในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งดังรูปที่ 4.3.1.2

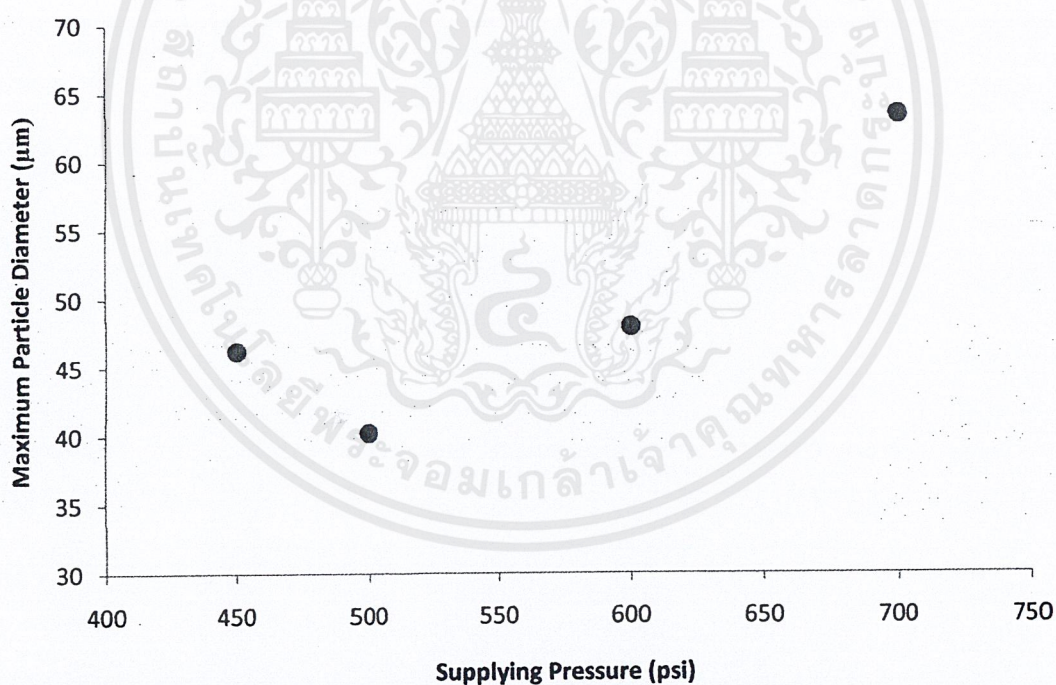


รูปที่ 4.3.1.2 ผลของความของสารป้อนที่มีต่อ โมเมนตัมในการชนของอนุภาค โดยใช้ขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อลดความดันของสารป้อนลงแล้วมีแนวโน้มที่โมเมนต์ในการชนของอนุภาคจะลดลงไปเช่นเดียวกับ ความเร็วของสารป้อนภายในท่อรวมถึงความเร็วในการชนของอนุภาคด้วยทั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้โดยหากสิ่งสกปรกมีความสกปรกมากหรือยากต่อการทำความสะอาด ก็สามารถเพิ่มความดันของระบบ เพื่อเพิ่มโมเมนต์ในการชนของอนุภาคน้ำแข็งเข้ากับอนุภาคของสิ่งสกปรกได้

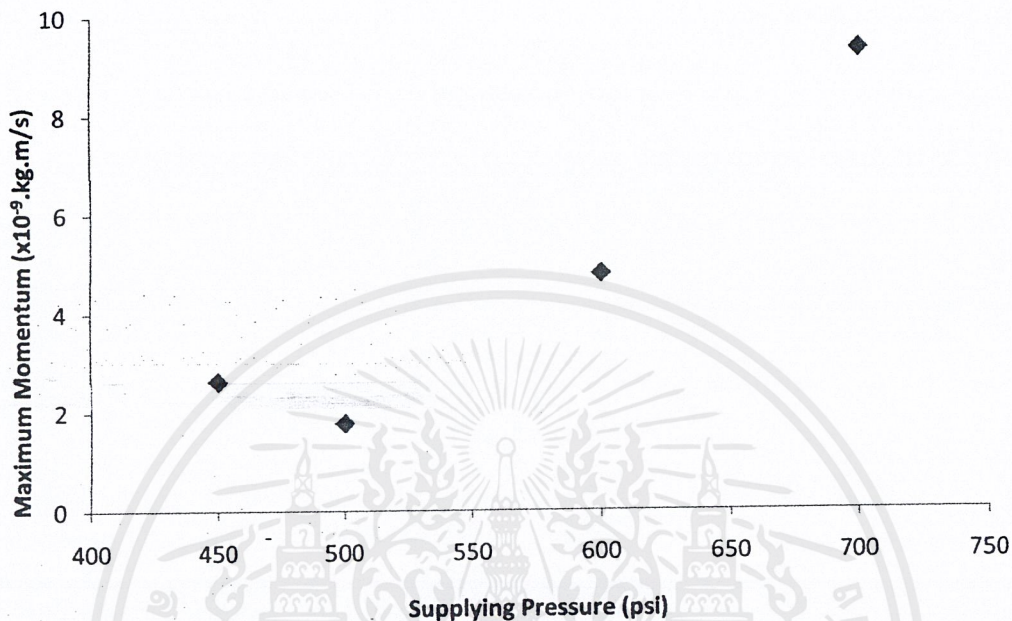
แต่ในกรณีที่ใช้ในการทำความสะอาดชิ้นงานที่บอบบาง เช่น หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ไซร์ฟ จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับแรงที่กระทำบนพื้นผิวของวัสดุด้วย เนื่องจากโมเมนต์ในการชนของอนุภาคอาจทำให้ชิ้นงานที่ต้องการทำความสะอาดเกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปจะทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ฉะนั้นต้องคำนึงถึงโมเมนต์ในการชนของอนุภาคสูงสุด ซึ่งเกิดจากขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดที่ผลิตออกมาในช่วงความดันหนึ่งๆ แสดงดังรูปที่ 4.3.1.3



รูปที่ 4.3.1.3 ผลของความของสารป้อนที่มีต่อขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่มีขนาดใหญ่ที่สุดของแต่ละช่วงความดัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคน้ำแข็งที่ใหญ่ที่สุดของแต่ละช่วงความดันมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อลดความดันของสารป้อน ขนาดของอนุภาคนี้จะมีผลโดยตรงต่อ

โมเมนตัมในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง โดยเมื่อนำมาคำนวณเป็นโมเมนตัมในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ได้ดังรูปที่ 4.3.1.4

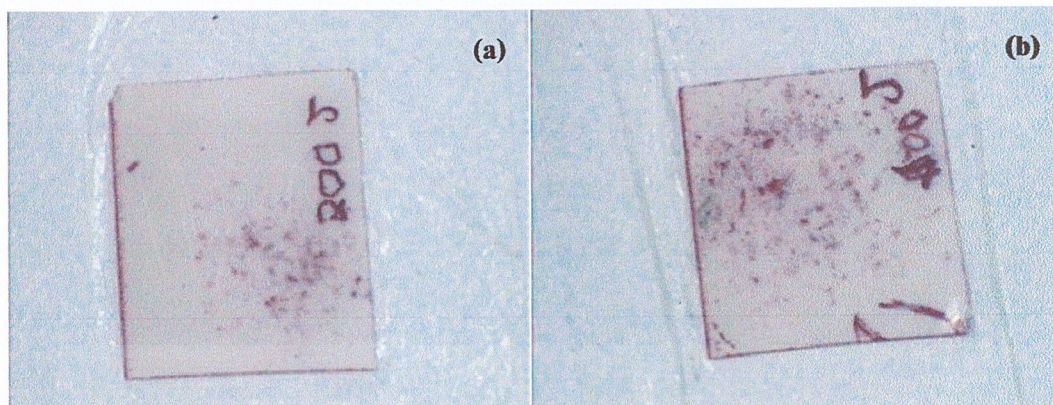


รูปที่ 4.3.1.4 ผลของความของสารป้อนที่มีต่อโมเมนตัมในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง โดยใช้ขนาดของ อนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ใหญ่ที่สุดของแต่ละช่วงความดัน

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อทำการลดความดันของสารป้อนลงมีแนวโน้มที่จะทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ที่สุดของน้ำแข็งแห้งลดลง โดยขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งมีผลโดยตรงต่อโมเมนตัมในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ฉะนั้นการลดลงของความดันของสารป้อนจะทำให้โมเมนตัมในการชนสูงสุดลดลงด้วย โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นงานที่บอบบางได้ โดยทำการลดความดันของสารป้อนลงให้โมเมนตัมในการชนต่ำกว่าความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุที่ต้องการจะทำความสะอาด

4.3.2 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อ Impact Stress

ในส่วนนี้ได้นำเทคนิคในการวัดแรงที่กระทำบนพื้นผิววัสดุด้วยการใช้ฟิล์มวัดความดัน ซึ่งความดันที่เกิดจากการชนของอนุภาคน้ำแข็งหรือ Impact Stress จะถูกแสดงด้วยระดับความเข้มของสีแดงที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม โดยถ้าหากแรงกดมีปริมาณมากสีแดงก็จะเกิดขึ้นเป็นสีแดงเข้ม หากมีแรงกดน้อยก็จะมีสีแดงที่จางลงไป ซึ่งต้องนำผลการทดลองในรูปที่ 4.3.2.1 ไปเทียบกับ Color density scale bar ในรูปที่ 4.3.2.2

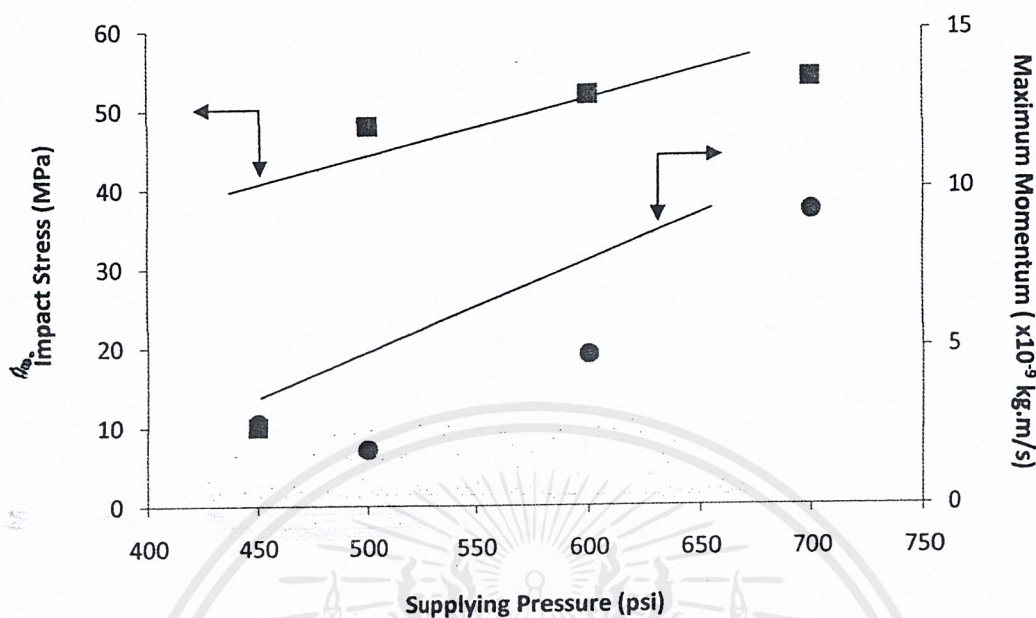


รูปที่ 4.3.2.1 ตัวอย่าง Fuji Prescale Film ที่ใช้ในการทดลองวัด Impact Stress



รูปที่ 4.3.2.2 Color Density Scale Bar

ซึ่งได้ผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ของ Impact Stress กับความดันของสารป้อน โดยนำมาเปรียบเทียบกับโมเมนต์ในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ดังรูปที่ 4.3.2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า Impact Stress และโมเมนต์ในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อใช้ความดันของสารป้อนลดลง โดยที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะเห็นว่า Impact Stress มีค่าลดลงไปอย่างมากผิดปกติ ทั้งนี้เนื่องจากขณะทำการทดลองไม่สามารถลดอุณหภูมิของสารป้อนให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ กระแสละอองน้ำแข็งแห้งจึงมีอุณหภูมิไม่ถึง -56 องศาเซลเซียสตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 ทำให้สถานะต่างๆของละอองน้ำแข็งแห้งในกระแส เช่น ขนาดของอนุภาค ปริมาตร ร้อยละของน้ำแข็งแห้งในกระแสละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งมีผลต่อมวลของอนุภาคน้ำแข็งแห้งในการชนกับแผ่นฟิล์ม ทำให้ Impact Stress ที่ช่วงความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าเบี่ยงเบนไปจากความจริง



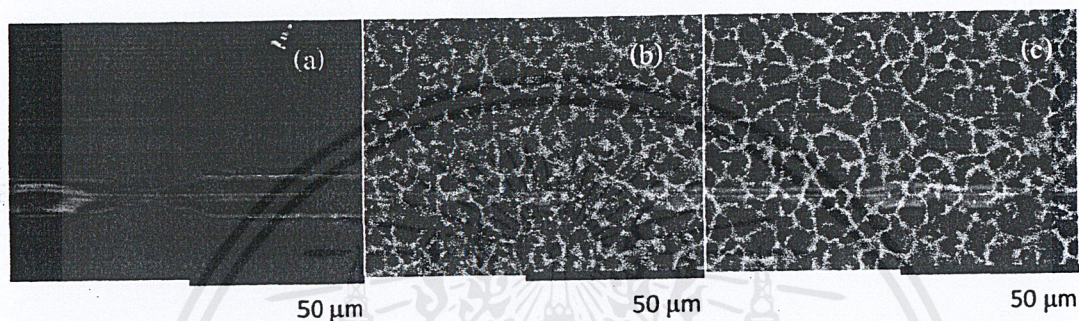
รูปที่ 4.3.2.3 ผลของความดันของสารป้อนที่มีต่อ Impact Stress และ โมเมนตัมสูงสุด

4.4 ผลการทดสอบสมรรถนะในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกขนาดเล็กระดับไมครอน

เมื่อสามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งในช่วงความดัน 385-610 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ได้แล้ว จึงได้ทำการทดลองเพื่อการทดสอบสมรรถนะของการทำความสะอาด ซึ่งให้ความสนใจในด้านการทำความสะอาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยก่อนที่จะทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบที่ใช้ ในการทำความสะอาดจำเป็นต้องทราบก่อนว่าการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้มีความสามารถในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่มีขนาดเล็กระดับไมครอนหรือไม่ ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นแผ่นวงจรที่ทำกรกัดลายเป็นตารางเพื่อให้สามารถกำหนดพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM ให้อยู่ที่บริเวณเดียวกันหรือบริเวณจุดศูนย์กลางของการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้งได้

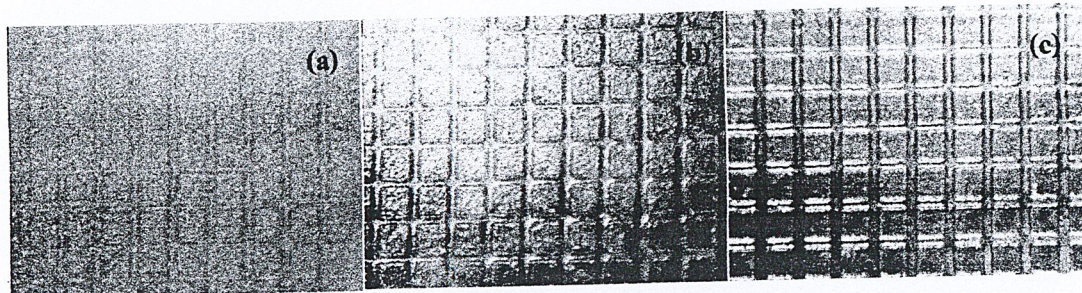
ในการทดลองนี้จะใช้การทำความสะอาดพื้นผิววัสดุด้วยความดันของสารป้อนอยู่ในช่วงความดันสูงคือใช้ความดันของสารป้อนเฉลี่ย 816 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งจากการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้อง SEM แสดงในรูปที่ 4.4.1(a) แสดงลักษณะของอนุภาคของทัลค์บนแผ่นวงจรที่ 1 โดยจะเห็นว่ามีความหนาของอนุภาคตั้งแต่เล็กกว่า 5 ไมครอนไปจนถึงขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน หลังจากนั้นนำแผ่นวงจรที่ 2 ซึ่งได้จากการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีเดียวกันมาทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ความดันเฉลี่ย 816 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิเฉลี่ย 20 องศาเซลเซียส

ได้ผลดังรูปที่ 4.4.1(b) โดยจะพบอนุภาคของทัลค์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอนจะถูกขจัดออกด้วย
 ละอองน้ำแข็งแห้งจนหมด แต่ยังคงเหลืออนุภาคที่มีขนาดเล็กประมาณ 1 – 5 ไมครอนเหลืออยู่เพียง
 เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของแผ่นวงจรเป็นดังรูปที่ 4.4.1(c) คือมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและมี
 หลุมขนาดเล็กเฉลี่ยประมาณ 5 ไมครอน ซึ่งสภาวะของละอองน้ำแข็งแห้งที่ใช้ในการทำความสะอาด
 สะอาดอาจจะยังไม่เหมาะสมในการทำความสะอาดพื้นผิวลักษณะนี้



รูปที่ 4.4.1 ผลการทดลองจากการวิเคราะห์พื้นผิววัสดุด้วยกล้อง SEM โดยเปรียบเทียบปริมาณ
 ของอนุภาคทั้งก่อนและหลังทำความสะอาดรวมถึงแผ่นวงจรที่สะอาด (a) หลังจากพ่นด้วยแก๊ส
 เปลา (b) หลังทำความสะอาด (c) แผ่นวงจรสะอาด

เมื่อทำการทดลองดังกล่าวอีกครั้ง โดยเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการทำการทดลองเป็นพลาสติก
 ไสแต่ยังคงใช้ทัลค์เป็นตัวจำลองสิ่งสกปรกเหมือนเดิม หลังจากทำการเตรียมตัวอย่างและพ่นด้วย
 แก๊สเปลาแล้ว จะเห็นว่าแผ่นพลาสติกยังมีลักษณะทึบแสงเนื่องจากอนุภาคของทัลค์ที่เกาะอยู่บน
 แผ่นพลาสติก แต่เมื่อทำการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้งแล้วจะเห็นว่าแผ่นพลาสติกกลับมาโปร่งแสง
 เช่นเดียวกับขณะก่อนเตรียมตัวอย่างดังรูปที่ 4.4.2



รูปที่ 4.4.2 ภาพพื้นผิววัสดุที่เป็นพลาสติกผิวเรียบ มีลายตารางด้านหลังซึ่งงาน โดยเปรียบเทียบก่อน และหลังทำความสะอาดถึงชั้นงานที่สะอาดบันทึกด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 40 เท่า (a) หลังจากพ่นด้วยแก๊สเปล่า (b) หลังทำความสะอาด (c) แผ่นพลาสติกสะอาด

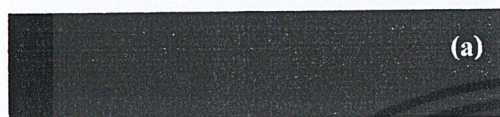
จากผลการทดลองทั้งสองครั้งสามารถกล่าวได้ว่าการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองน้ำแข็งแห่งนี้ มีความสามารถในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอนได้ และหลักการกระชนของอนุภาคมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาดอย่างมาก เนื่องจากเมื่อพ่นด้วยแก๊สที่ไม่มีละอองน้ำแข็งแห้งขณะเตรียมตัวอย่าง ก็ยังคงเหลือที่ล้นคั่งอยู่บนวัสดุเป็นปริมาณมาก และหลังจากการทำความสะอาดอนุภาคที่ล้นคั่งเหล่านั้นก็ได้ถูกกำจัดออกไปเกือบหมด

4.5 ผลการทดลองการทำความสะอาดบนพื้นผิวชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

เมื่อได้ทดลองการทำความสะอาดพื้นผิวตัวอย่างและพบว่ามีความสามารถในการทำความสะอาดจริง จึงได้ทำการทดลองทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อทดสอบเบื้องต้นว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทำความสะอาดวัสดุดังกล่าวได้หรือไม่ โดยชิ้นส่วนนี้เป็นวัสดุประเภทเซรามิกหรือเฟอร์ไรต์[11] โดยมีสิ่งสกปรกเป็นอนุภาคของสารจำพวกโลหะและสารหล่อลื่นบนงานบันทึกข้อมูล(PFPE)[12] ซึ่งเป็นวัสดุในการทำตัวบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวได้ใช้ความดันของสารป้อน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและชิ้นงาน 1 เซนติเมตร เนื่องจากหากใช้ความดันของสารป้อนที่สูงกว่านี้จะมีโอกาสที่จะทำให้ชิ้นงานเสียรูปได้ ซึ่งจากการทำการทดลองหลายครั้งพบว่าหากใช้ความดันของสารป้อน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะไม่เกิดการเสียรูปของชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนชิ้นส่วนหัวอ่านนี้ได้ถูกกำจัดออกไปจนหมดในชิ้นส่วนที่มีความสกปรกมากในรูปที่ 4.5.1 และในชิ้นส่วนที่มีความสกปรกไม่มากจะถูกกำจัดออกไปเกือบหมดดังรูปที่ 4.5.2



รูปที่ 4.5.1 ชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟที่มีความสกปรกมากที่กำลังขยาย 80 เท่า (a) ก่อนทำ
ความสะอาด (b) หลังทำความสะอาด



รูปที่ 4.5.2 ชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟที่มีความสกปรกน้อยที่กำลังขยาย 80 เท่า (a) ก่อนทำ
ความสะอาด (b) หลังทำความสะอาด

เนื่องจากชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟนั้นมีความบอบบางมาก หากถูกกระทำด้วยแรงที่
มากเกินไปจนเกินกว่าขีดจำกัดของวัสดุแล้วจะทำให้ชิ้นส่วนนี้เสียรูปและไม่สามารถใช้งานได้ โดยจากการ
ทดลองเบื้องต้นพบว่าหากใช้ความดันของสารป้อนที่ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะทำให้ชิ้นส่วนนี้ไม่
เกิดการเสียรูปเลย แต่หากใช้ความดันของสารป้อนตั้งแต่ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ขึ้นไปจะมีโอกาส
ที่จะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ ซึ่งจากรูปที่ 4.5.2 จะเห็นว่าในช่วงความดันของสารป้อนประมาณ 450
ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นั้นสามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งที่มี Impact Stress น้อยกว่าละออง
น้ำแข็งแห้งที่ใช้ช่วงความดันของสารป้อนตั้งแต่ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ขึ้นไปอย่างเห็นได้ชัด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้ความดันของสารป้อนในช่วง 385 ถึง 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 550 ถึง 610 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ช่วงอุณหภูมิของสารป้อนที่ -2.3 ถึง 6.2 องศาเซลเซียส และ 9 ถึง 11 ตามลำดับ โดยให้ปริมาณน้ำแข็งแห้งในกระแสดังกล่าวของน้ำแข็งแห้งในช่วงปริมาณมากกว่าร้อยละ 40.6 ขึ้นไป เช่นเดียวกับที่ใช้ความดันของสารป้อนสูงในช่วง 750-850 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ช่วงอุณหภูมิของสารป้อนที่ 19 ถึง 21 องศาเซลเซียส

เมื่อใช้ความดันของสารป้อนที่ 700 600 500 และ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงโดยมีค่า 150.3 117.5 95.6 และ 84.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแนวโน้มว่าความดันของสารป้อนมีผลทำให้อัตราการไหลเชิงมวลลดลงโดยมีค่า 0.0031 0.0029 0.0015 และ 0.0013 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ รวมไปถึงความเร็วของ CO₂ ในท่อเป็น 46.6 55.4 3.49 และ 3.39 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งจะมีผลความเร็วในการขนของอนุภาคเพราะความเร็วในการขนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเป็นค่าปรับแก้จากความเร็วในท่อของสารป้อน หลังจากนั้นมาคำนวณได้ความเร็วในการขนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งมีค่าเป็น 46.6 55.4 34.9 และ 33.9 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

การลดลงของความเร็วในการขนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนี้จะมีผลโดยตรงต่อโมเมนต์ในการขนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง เพราะฉะนั้นเมื่อทำการลดความดันของสารป้อนจะมีแนวโน้มที่จะทำให้โมเมนต์ในการขนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งลดลงด้วย โดยในการคำนวณโมเมนต์ในการขนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งจะต้องทราบมวลของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง โดยคำนวณจากขนาดของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่วัดได้จากแผ่น Prescale Film โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคน้ำแข็งแห้งที่ใช้ความดันของสารป้อนที่ 700 600 500 และ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีขนาดเท่ากับ 33.1 31.4 29.1 และ 27.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ และเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่ที่สุดมีขนาด 63.4 48.0 40.24 และ 46.23 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยความหนาแน่นของน้ำแข็งแห้งมีค่า 1,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้ผลการคำนวณพบว่าเมื่อทำการลดความดันของสารป้อนโดยใช้ความดันของสารป้อนที่ 700 600 500 และ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โมเมนต์ในการขนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งมีแนวโน้มที่จะลดลงตามไปด้วย โดยโมเมนต์ในการขนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเฉลี่ยมีค่า 1.3×10^9 1.3×10^9 6.7×10^{10} และ 5.4×10^{10} กิโลกรัม.เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และโมเมนต์ในการขนของ

อนุภาคน้ำแข็งแห้งสูงสุดมีค่า 9.3×10^{-9} 4.8×10^{-9} 1.8×10^{-9} และ 2.6×10^{-9} กิโลกรัม.เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ในด้านกรวัด Impact Stress โดยใช้แผ่นวัดความดัน Prescale Film ในการทำการทดลอง ซึ่งใช้ความดันของสารป้อนที่ 700 600 500 และ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นวัดความดันที่ 1 เซนติเมตร พบว่า Impact Stress มีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการลดความดันของสารป้อนมีค่า 54 52 48 และ 10 เมกกะปาสกาล ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับโมเมนต์ในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ในด้านประสิทธิภาพในการทำความสะอาด โดยใช้ความดันของสารป้อนเฉลี่ยที่ 815 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิของสารป้อนเฉลี่ย 20 องศาเซลเซียส ให้ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับชิ้นงานห่างกัน 1 เซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดอนุภาคที่เล็กซึ่งมีขนาดเล็กระดับไมครอนออกได้เกือบทั้งหมดในทั้งแผ่น PCB และแผ่นพลาสติกใส รวมถึงการทำความสะอาดชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่ทำการทดลองโดยใช้ความดันของสารป้อน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิของสารป้อน 5 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับชิ้นงานห่างกัน 1 ก็ สามารถกำจัดสิ่งสกปรกออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้มีความอ่อนไหวต่อสภาวะของสารป้อนมาก รวมถึงตัวแปรต่างๆ ที่ต้องคำนึงในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งก็มีมากพอสมควร จึงควรมีการศึกษาตัวแปรต่างๆ เหล่านั้นเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาดรวมถึงป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุที่จะทำความสะอาดด้วย

แนวทางในการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

- ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดและชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการทำความสะอาด
- ศึกษาผลของมุมระหว่างปลายหัวฉีดกับชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการทำความสะอาด
- ศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหัวฉีดที่มีต่อโมเมนต์ในการชน และ Impact Stress
- การนำอากาศแห้งมาใช้ควบคู่กันในการทำความสะอาด เพื่อการจัดการความชื้นของไอน้ำในอากาศเกิดเป็นหยดน้ำบนชิ้นงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wikipedia, the free encyclopedia “Carbon dioxide”, [Online]. Available: [http://th.wikipedia.org/wiki/Carbon dioxide](http://th.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide).
- [2] Journal of Orthopaedics, “**Studies on the Sterilization of Human Bone and Tendon Musculoskeletal Allograft Tissue Using Supercritical Carbon Dioxide**”, [Online]. Available: <http://www.jortho.org/2009/6/2/e9/index.htm.2009>.
- [3] Applied Surface Technologies, “**Carbon dioxide snow cleaning**”, [Online]. Available: <http://www.co2clean.com/issues.html>.
- [4] Jaime Wisniak, **The Joule-Thomson Coefficient for Pure Gases and Their Mixtures**, Department of Chemical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel 84105, wisniak@bgumail.bgu.ac.il, Chem. Educator 4, 51-57, 1999.
- [5] Robert Sherman and Paul Adams, “**Carbon Dioxide Snow Cleaning – The Next Generation of Clean**”, Precision Cleaning Magazine, page 271 , 1995.
- [6] IDS packaging, “**Types of Dry Ice**”, [Online]. Available: http://www.idspackaging.com/packaging/us/cold_jet/dry-ice-production/12417_0/g_supplier_2.html.
- [7] SEMATECH, “**Cryogenic CO2 Parts Cleaning Technology (ESH001)**”, Final Report ,[Online]. Available: <http://www.sematech.org/docubase/document/3286atr.pdf.1997>.
- [8] Alpha & Omega Ice Blast “**History of Dry Ice Blast Cleaning**”, [Online]. Available: http://iceblastingservice.com/technical_papers.htm.

- [9] Hiroshi Yamaguchi, Xin-Rong Zhang, Katsumi Fujima, **“Basic study on new Cryogenic refrigeration using CO₂ solid-gas two phase flow”**, International Journal of Refrigeration 31, 404- 410, 2008.
- [10] Cheol Nam Yoon, Hoe Tae Kim, Sun-Geon Kim, Byung-Hun Min, **“Removal of Surface Contaminants by Cryogenics Aerosol Jets”**, Korean J. Chem. Eng., 16(1), 96-103, 1999.
- [11] Souvik Banerjee and Andrea Campbell, **“Principles and Mechanisms of Sub-Micrometer Particle Removal by CO₂ Cryogenic Technique”**, Journal of Adhesion Science and Technology, Volume 19, Number 9, 2005 , pp. 739-751(13)
- [12] Lei Zhi Pei, Kelvin Tong, **“Materials of the parts that are found in hard disk drive”**, SETSCO SERVICES PTE LTD.
- [13] D. Y. Lee, J. Hwang, G. N. Bae, **“Effect of disk rotational speed on contamination particles generated in a hard disk drive”**, Microsystem Technologies 10 (2004) 103–108.

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด

สมมติฐาน :

1. ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในถังกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ และจะขึ้นกับค่าความดันและอุณหภูมิภายในถังกักเก็บ
2. พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิสของหัวฉีดมีค่าคงที่ $4.42 \times 10^{-7} \text{ m}^2$

การคำนวณ :

จาก

$$U_0 = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2.7)$$

เมื่อ

U_0	คือ	ความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด (เมตรต่อวินาที)
\dot{m}	คือ	อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิส (ตารางเมตร)

ตัวอย่างการคำนวณความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านหัวฉีด ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ความดันของสารป้อนเป็น 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิของสารป้อนอยู่ในช่วง 3-15 องศาเซลเซียส

ทำการหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลจากค่าที่บันทึกได้จากเครื่องชั่งซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.00309 กิโลกรัมต่อวินาที โดยค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 150.29 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

แทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในสมการ จะได้

$$U_0 = \frac{0.00309}{150.29 \times 4.42 \times 10^{-7}}$$

$$= 46.52 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ผลการคำนวณ :

กระแสน้ำของละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตได้มีความเร็ว 46.52 เมตรต่อวินาที

ภาคผนวก ข

การประมาณค่าความเร็วในการชน

ตัวอย่างการประมาณค่าความเร็วในการชน ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ความดันของสารป้อนเป็น 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิของสารป้อนอยู่ในช่วง 3-15 องศาเซลเซียสซึ่งค่าความเร็วในการชน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.12)

$$U = U_0 \left(1 - \frac{\delta}{U_0 \tau} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ $\tau = \frac{2r^2 \rho_p C_c}{9\eta} \quad (2.8)$

โดย $C_c = 1 + \frac{2}{Pd} [6.32 + 2.01 \exp(-0.1095Pd)] \quad (2.9)$

และ $\delta = 0.16^* \frac{x}{(Re)^{1/7}} \quad (2.10)$

โดย $Re = \frac{\rho U_0 x}{\eta} \quad (2.11)$

แทนค่า ρ , U_0 , x และ η ลงในสมการ (2.11) จะได้

$$\begin{aligned} Re &= \frac{150.29 \times 46.52 \times 0.01}{1.01 \times 10^{-5}} \\ &= 6.9 \times 10^6 \end{aligned}$$

และแทนค่า P และ d ลงในสมการ (2.9) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_c = 1 + \frac{2[6.32 + 2.01 \exp(-0.1095 \times 4925.11 \times 33.1)]}{4925.11 \times 33.1}$$

$$= 1.000078$$

จากนั้นแทนค่า x และ Re ลงในสมการ (2.10) จะได้

$$\delta = \frac{0.16 \times 0.01}{(6.9 \times 10^6)^{1/7}}$$

$$= 1.69 \times 10^{-4} \text{ เมตร}$$

และแทนค่า C_c , r , ρ_p และ η ลงในสมการ (2.8) จะได้

$$\tau = \frac{2(1.655 \times 10^{-5})^2 (1500)(1.000078)}{9(1.01 \times 10^{-5})}$$

$$= 0.00904 \text{ ไมโครวินาที}$$

แทนค่า U_0 , δ และ τ ลงในสมการ (2.12) จะได้

$$U = 46.52 \left(1 - \frac{1.69 \times 10^{-4}}{46.52(0.00904)} \right)$$

$$= 46.59 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ภาคผนวก ค

การหาโมเมนตัมของอนุภาคน้ำแข็งแข็งแห่งที่ตกกระทบพื้นผิว

ตัวอย่างการหาค่าโมเมนตัมของอนุภาคน้ำแข็งแข็งแห่งที่ตกกระทบพื้นผิวที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ความดันของสารป้อนเป็น 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิของสารป้อนอยู่ในช่วง 3-15 องศาเซลเซียส สามารถหาได้จากสมการที่ (2.14)

$$\bar{P} = mU \quad (2.14)$$

เมื่อ $m = \rho_p V_p = \frac{4\rho_p \pi r^3}{3} \quad (2.13)$

แทนค่า r และ ρ_p ลงในสมการ (2.13) จะได้

$$m = \frac{4(1,500)(3.14)(0.00001655)^3}{3}$$

$$= 2.85 \times 10^{-11} \text{ กิโลกรัม}$$

แทนค่า m และ U ลงในสมการ (2.14) จะได้

$$\bar{P} = (2.85 \times 10^{-11})(46.59)$$

$$= 9.31 \times 10^{-9} \text{ กิโลกรัม.เมตรต่อวินาที}$$

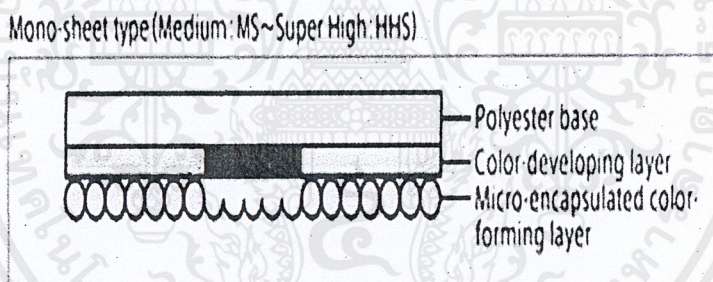
ภาคผนวก ง

หลักการใช้งานแผ่น Fuji Precale Film

เป็นวัสดุที่สามารถวัดแรงกดได้ รวมทั้งวัดการกระจายของแรงและความสมดุลของแรงได้อย่างเที่ยงตรง ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีของฟูจิฟิล์มในการผลิตฟิล์มสี ทำให้ฟูจิสามารถผลิต Fuji Precale Film ได้บางเพียง 0.2 มิลลิเมตร โดยมีโครงสร้าง 2 ชนิดคือ

1. แบบแผ่นเดี่ยว (Mono-Sheet Type)

ใช้สำหรับงานที่รับแรงระหว่าง 50-300 เมกกะปาสคาล โครงสร้างของ Fuji Precale Film ชนิดนี้จะประกอบด้วย 3 ชั้น ชั้นที่ 1 คือ Polyester base ชั้นที่ 2 จะถูกเคลือบด้วยชั้นของสารสร้างภาพ และชั้นบนสุดจะถูกเคลือบด้วย เม็ดแคปซูลสี ดังรูป

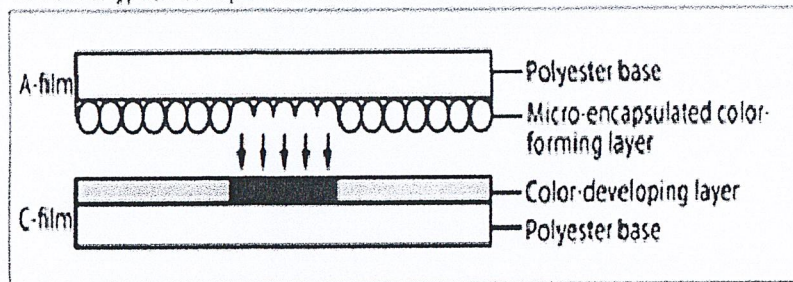


รูปที่ ง-1 ภาพแสดงโครงสร้างของแผ่น Fuji Precale Film แบบแผ่นเดี่ยว

2. แบบแผ่นคู่ (Two-sheet Type)

ใช้สำหรับงานที่รับแรงระหว่าง 0.2-50 เมกกะปาสคาล โครงสร้างของ Fuji Precale Film ชนิดนี้จะประกอบด้วยฟิล์ม 2 ชนิด คือ ฟิล์ม A และ ฟิล์ม C โดยโครงสร้างของฟิล์ม A จะประกอบด้วย Polyester base และถูกเคลือบด้วยชั้นของเม็ดแคปซูลสี ซึ่งโครงสร้างของฟิล์ม C จะประกอบด้วย Polyester base และเคลือบด้วยชั้นของสารสร้างภาพ ดังรูป

Two-sheet type (Ultra Super Low:LLLW~Medium:MW)



รูปที่ ง-2 ภาพแสดงโครงสร้างของแผ่น Fuji Precale Film แบบแผ่นคู่

ความดันที่ต้องการวัดจะแสดงออกมาในรูปแบบของความเข้มของสี ถ้าหากมีความเข้มมากแสดงว่าบริเวณนั้นมีความดันสูง โดยสีที่แสดงให้เห็นจะเกิดจากความดันมีผลทำให้เม็ดสีแตกไปทำปฏิกิริยากับสารช่วยให้เกิดสี ทำให้เกิดเป็นสีแดงขึ้น ในกรณีนี้จะนำมาใช้วัดแรงดันของกระแสดองน้ำแข็งแห้ง โดยใช้ชนิดแผ่นเดี่ยว ซึ่งด้านที่ไม่ได้เคลือบด้วย Polyester จะต้องป้องกันด้วยแผ่นพลาสติกไม่ให้ละอองน้ำแข็งแห้งกระแทกเม็ดสีโดยตรง ซึ่ง Fuji Precale Film มีทั้งหมด 6 ชนิด แบ่งตามระดับของแรงกด ควรเลือกชนิดที่เหมาะสมกับแรงที่ใช้ในงานนั้นๆ โดยมีรายละเอียดดังรูปต่อไปนี้

type	Film type	Pressure range[MPa] 1MPa≐10kgf/cm ² ≐145lb/in ²							Product size W(mm)×L(m)
		0.2	0.50.6	2.5	10	50	130	300	
Two-sheet type	Ultra Super Low Pressure(LLLW)	■							270×5
	Super Low Pressure(LLW)		■						270×6
	Low Pressure(LW)			■					270×12
	Medium Pressure(MW)				■				270×12
Mono-sheet type	Medium Pressure(MS)				■				270×12
	High Pressure(HS)					■			270×12
	Super High Pressure(HHS)						■		270×12

*Film type W:Two-sheet
S:Mono-sheet

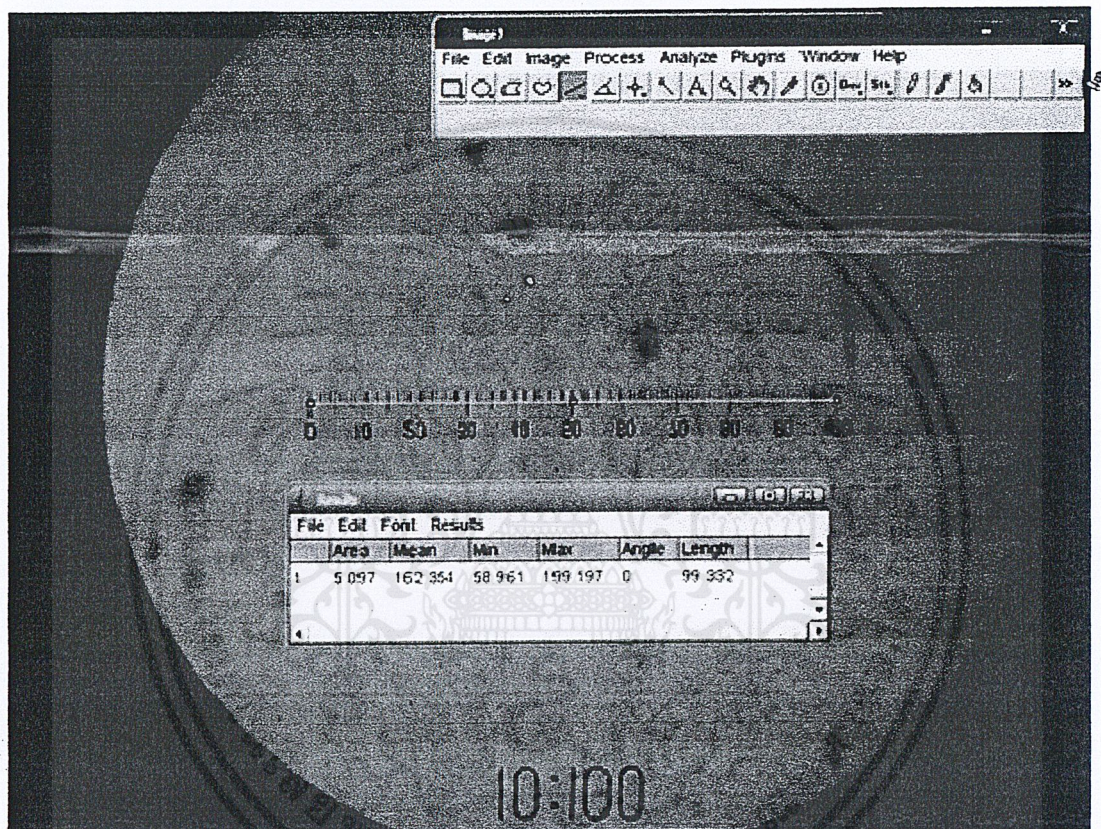
รูปที่ ง-3 ภาพแสดงรายละเอียดในการเลือกใช้แผ่น Fuji Precale Film โดยแบ่งตามระดับของแรงกด

การทดลองหาค่า Impact Stress ที่เกิดขึ้นโดยใช้แผ่น Fuji Precal Film

1. เตรียมแผ่น Fuji Precal Film ในขนาดที่เท่ากัน จำนวนทั้งหมด 4 แผ่น โดยในที่นี้จะเลือกใช้ชนิดของแผ่น Fuji Precal Film เป็นแบบ Medium เนื่องจากค่าความดันของสารป้อนที่จะใช้ในการทดลองอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับขีดความสามารถของแผ่น Fuji Precal Film ที่สามารถจะบอกถึงค่า Impact Stress ที่เกิดขึ้นได้
2. นำแผ่น Fuji Precal Film ที่เตรียมไว้ทำการยิงพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง ณ ที่ความดันของสารป้อนที่ใช้ต่างกัน คือ 700 600 500 และ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. นำแผ่น Fuji Precal Film ที่ได้หลังจากการยิงด้วยละอองน้ำแข็งแห้งแล้ว ไปทำการส่องด้วยกล้องไมโครสโคปเพื่อจะได้สังเกตเห็นลักษณะความเข้มของสีที่ชัดเจนยิ่งขึ้น แล้วทำการบันทึกภาพที่ได้จากการส่อง
4. นำภาพที่ได้จากการส่องด้วยกล้องไมโครสโคป มาทำการวัดเทียบความเข้มสีกับแผ่นวัดเทียบมาตรฐานเพื่อหาค่า Impact Stress ที่เกิดขึ้น กับแผ่น Fuji Precal Film แต่ละแผ่นออกมา

ภาคผนวก จ

การวัดขนาดของอนุภาคโดยใช้โปรแกรม Image J



รูปที่ จ-1 ภาพแสดงรายละเอียดในการใช้งานโปรแกรม Image J

โปรแกรม Image J เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการวัดขนาดของวัตถุจากภาพที่ได้จากการทดลองต่างๆ โดยในที่นี้จะนำมาใช้เพื่อการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดสีแดงที่เกิดขึ้นบนแผ่น Fuji Prescale Film หลังจากการพ่นด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง โดยมีขั้นตอนคือ

1. เริ่มด้วยการบันทึกภาพแผ่น Fuji Prescale Film ที่ได้จากการส่องด้วยกล้องไมโครสโคป จากนั้นนำภาพที่ได้มาทำการวัดด้วยโปรแกรม Image J

2. ทำการตั้งค่าสเกลโดยการลากเส้นตรงให้มีความยาวเท่ากับขนาดของสเกลอ้างอิง โดยในที่นี้ใช้เทียบกับความยาวสเกลของเลนส์ใกล้ตาของกล้องไมโครสโคป ที่มีค่า 100 ไมครอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กดตั้งค่าสเกล ที่ Set scale ในแถบ Analyze โดยใส่เลขที่จะกำหนดค่าให้กับความยาวของเส้นตรงที่ลากไว้ซึ่งมีค่า 100 ในหน่วย ไมโครเมตร เป็นการเสร็จสิ้นการตั้งค่าสเกลการวัด
4. เริ่มต้นการวัดขนาดของอนุภาค โดยการลากเส้นตรงจากขอบอีกด้านหนึ่งของจุดสีแดงที่เกิดขึ้นบนแผ่น Prescale Film ผ่านจุดศูนย์กลางของจุดไปยังขอบอีกด้านหนึ่งของจุด จากนั้นกดคำสั่ง Ctrl+M โปรแกรมก็จะแสดงผลการวัดความยาวของเส้นที่ลากผ่านจุดสีแดงออกมา



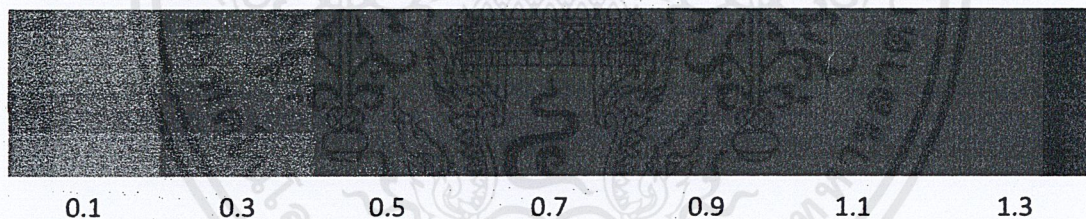
ภาคผนวก ฉ

การวัด Impact Stress โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop

การวัด Impact Stress สามารถทำได้โดยสังเกตจากระดับความเข้มสีที่เกิดขึ้นบนแผ่น Fuji Prescale Film ซึ่งจะต้องใช้ Color Density Scale Bar ในการวัดค่า โดยแถบวัดระดับสีนี้จะต้องสร้างขึ้นเอง โดยใช้แผ่น Fuji Prescale Film ที่มีระดับสีเข้มสูงสุดและแผ่นเปล่าในการทำ

ขั้นตอนในการทำ Color Density Scale Bar

1. นำรูปแผ่น Fuji Prescale Film ที่มีระดับสีเข้มสูงสุด วางทับกับแผ่นเปล่าโดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop
2. ปรับค่าความโปร่งแสงของรูปแผ่น Fuji Prescale Film ที่มีระดับสีเข้มสูงสุดเริ่มจาก 0% เป็น 14% 28% 42% 56% 70% 85% และ 100% ซึ่งแต่ละระดับสีก็จะมีความสัมพันธ์กับ Impact Stress ในเชิงอัตราส่วนของช่วงที่สามารถวัดได้ดังรูป



รูปที่ ฉ-1 Color Density Scale Bar

ขั้นตอนในการวัด Impact Stress จากแผ่น Fuji Prescale Film ที่ใช้ในการทดลอง

1. นำรูปของแผ่น Fuji Prescale Film ที่ใช้ในการทดลอง วัดค่าระดับสีเขียวของจุดที่มีระดับสีเขียวมากที่สุดในแผ่นนั้น โดยในรูปหนึ่งรูปจะประกอบไปด้วยสีแดง เขียว น้ำเงิน ซึ่งรูปที่ได้จากการทดลองจะเป็นสีแดง ระดับของสีแดงในรูปจะค่อนข้างใกล้เคียงกัน จึงต้องวัดระดับความเข้มสีผ่านระดับสีเขียวแทน

2. เมื่อทราบระดับความเข้มสีของผลการทดลองแล้ว นำค่าอัตราส่วนความเข้มสีไปคำนวณ

เป็น Impact Stress ดังตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ Impact Stress จากผลการทดลอง

ตัวอย่างในการคำนวณจากผลการทดลองโดยใช้ความดันของสารป้อน 600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และวัดระดับที่ได้โดยมีค่าอัตราส่วนความเข้มสี 1.05 ซึ่งช่วงของ Impact Stress ที่สามารถวัดได้ของแผ่น Fuji Prescale Film นี้คือ 10 -50 เมกกะปาสคาล ฉะนั้นพิสัยของช่วงในการวัดของแผ่นนี้คือ 40 เมกกะปาสคาล นำไปคำนวณได้ดังสมการ

$$\sigma = (\text{อัตราส่วนความเข้มสี} \times \text{พิสัยของช่วง Impact Stress}) + \sigma_0$$

เมื่อ σ คือ ค่า Impact Stress ที่สามารถวัดได้จากผลการทดลอง

σ_0 คือ ค่า Impact Stress ที่ต่ำที่สุดที่สามารถวัดได้โดยแผ่น Fuji Prescale Film

เมื่อนำค่าต่างๆ ไปแทนลงในสมการจะได้ผลการคำนวณดังนี้

$$\sigma = (1.05 \times 40) + 10 = 42 \text{ เมกกะปาสคาล}$$