

การศึกษาการกำจัดฟองอากาศโดยการฟั่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจาก

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

การศึกษาการกำจัดฟองอากาศโดยการฟองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจาก
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON BREAK THE BUBBLES USED SNOW DRY ICE PRODUCED BY
CARBON DIOXIDE GAS



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษาการกำจัดฟองอากาศโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่
ผลิตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
โดย นายวีรภัทร เครือซุง
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ	การศึกษาการกำจัดฟองอากาศโดยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
โดย	นายวีรภัทร เครือซุง
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดฟองของของไหลที่เกิดขึ้นโดยใช้ละอองน้ำแข็งแห้ง ที่ผลิตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคอุตสาหกรรม ในระหว่างส่งผ่านหรือการผสมของไหลจะมีฟองเกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดที่จะนำเครื่องฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง มาใช้ในการกำจัดฟองที่เกิดขึ้น ซึ่งทำได้โดยการนำคาร์บอนไดออกไซด์มาอัดให้เป็นของเหลวด้วยความดันสูง แล้วปล่อยออกสู่บรรยากาศผ่านหัวฉีด โดยใช้ประโยชน์จากโมเมนต์ของอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้ง ให้เคลื่อนที่ไปเพื่อทำลายผิวของฟองอากาศ ในการทดลองจะใช้เครื่องฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งโมเดล KMITL_01 ความดันและอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเลือกมาจากกราฟความดัน-อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ตัวคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสถานะของเหลวก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ โดยค่าที่เลือกจะอยู่ในช่วง 450 – 600 psi และ 6 – 13 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีการใช้สารลดแรงตึงผิว span-80 และ tween-60 ในการทดลองเพื่อลดแรงตึงผิวของน้ำให้เกิดฟองได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า สภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดฟองจะอยู่ที่ความดัน 700 psi อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส โดยสามารถกำจัดฟองได้ 35 และ 31.71 เปอร์เซ็นต์ภายใน 3 วินาที ตามลำดับ

Thesis Title	STUDY ON BREAK THE BUBBLES USED SNOW DRY ICE PRODUCED BY CARBON DIOXIDE GAS
By	Veerapat Khruasoong
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

Abstract

The objective of this research is to study about bubbles disruption using snow dry ice that produce from CO₂. In industries, bubbles occur when fluid are agitated. This project will use a dry ice blasting unit to disrupt bubbles that occur. By compressed carbon dioxide into liquid phase with high pressure and then release it through nozzle. CO₂ was a waste of many industries for so long, so it can be used as an alternative to the industrial application. In this experiment, we use the dry ice blasting unit model KMITL_01, The pressure and temperature of carbon dioxide are selected from P-H diagram so that the carbon dioxide in nozzle are liquid phase before release into the atmosphere, which the selected value will be in the range 450 – 700 psi and 6 – 13 degrees Celsius. Span-80 and Tween-60 were used as surfactants to lower the surface tension to created bubbles. As the result, the best CO₂ condition in this study is at 6 °C and 700 psi with foam reduction of 35 and 31.71 percent in 3 seconds respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาชี้แนะและช่วยเหลือจาก ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ทำให้ผู้จัดทำได้หัวข้อในการทำปริญญาานิพนธ์ และกรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของผู้จัดทำ ได้ให้ข้อมูลและคำแนะนำต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้จัดทำ โดยเฉพาะการให้ความช่วยเหลือในเรื่องเนื้อหา และการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งช่วยเหลือผู้จัดทำได้เป็นอย่างดี ทั้งยังสละเวลามาตรวจสอบความถูกต้องของงานของผู้จัดทำอีกด้วย ซึ่งผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งใจเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์มาไว้ ณ ที่นี้

ผู้จัดทำยังต้องขอขอบคุณคณาจารย์ต่าง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้ทางด้านวิชาการแก่นักศึกษา และยังคงยั้งชีแนะในยามจำเป็น จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และรุ่นน้องในภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ให้อุปกรณ์ รวมถึงให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิจัย และการเขียนเล่มจนสำเร็จมาได้

สุดท้ายผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณผู้ปกครอง ที่ช่วยสนับสนุนในด้านการศึกษามาตั้งแต่วัยเยาว์ และเป็นกำลังใจสำคัญซึ่งทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ หวังว่าปริญญาานิพนธ์นี้จะ เป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ และผู้นำแนวคิดของปริญญาานิพนธ์นี้ไปใช้งานได้

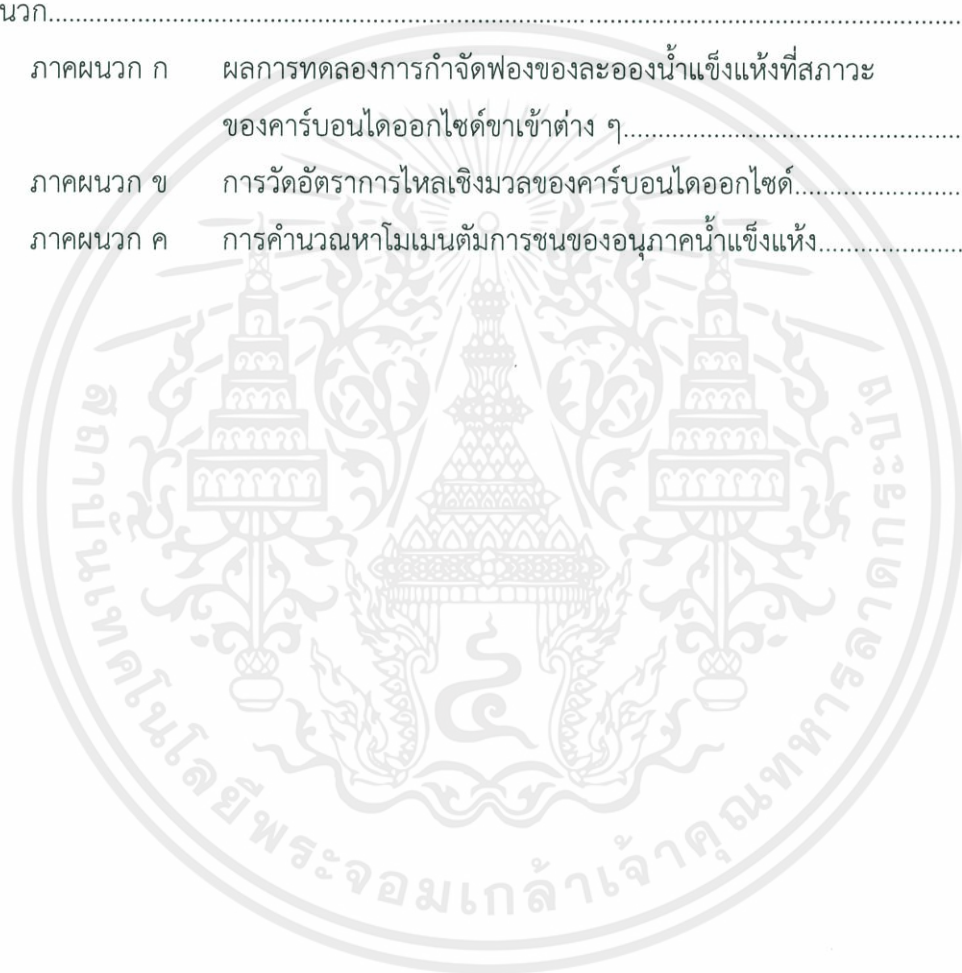
วีรภัทร เครือซุง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2.1 แรงตึงผิวและความดันภายในฟองของเหลว.....	3
2.2 สารลดแรงตึงผิว.....	4
2.3 คาร์บอนไดออกไซด์.....	5
2.4 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ.....	6
2.5 สารทำความเย็น.....	7
2.6 การคำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่หัวฉีด.....	8
2.7 การคำนวณหาความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง.....	9
2.8 การคำนวณโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง.....	10
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 การทดลอง.....	13
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	13
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	13
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	15
4.1 ผลของสภาวะขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการลดลงของปริมาณฟอง.....	15
4.2 เปรียบเทียบโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับเปอร์เซ็นต์ การลดลงของฟอง.....	18

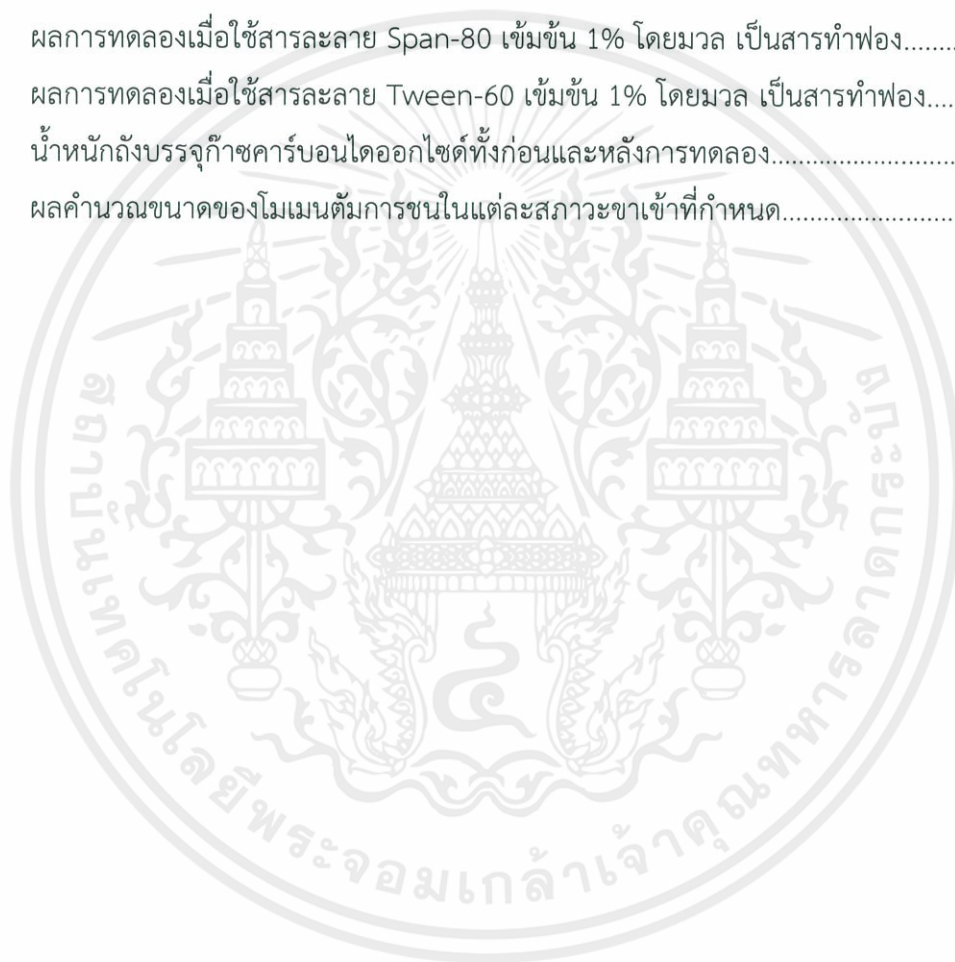
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	20
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	20
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	20
เอกสารอ้างอิง.....	21
ภาคผนวก.....	22
ภาคผนวก ก ผลการทดลองการกำจัดฟองของละอองน้ำแข็งแห้งที่สภาวะ ของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าต่าง ๆ.....	23
ภาคผนวก ข การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์.....	25
ภาคผนวก ค การคำนวณหาโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง.....	26



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ความสามารถในการกำจัดฟองของน้ำแข็งแห้งเมื่อใช้สารทำฟองเป็น Span-80.....	15
4.2	ความสามารถในการกำจัดฟองของน้ำแข็งแห้งเมื่อใช้สารทำฟองเป็น Tween-60.....	16
4.3	ขนาดของโมเมนต์ตัมของละอองน้ำแข็งแห้งเมื่อเทียบกับความสามารถในการกำจัดฟองที่สามารถทำได้ ในการละลาย Span-80 และ Tween-60.....	19
ก-1	ผลการทดลองเมื่อใช้สารละลาย Span-80 เข้มข้น 1% โดยมวล เป็นสารทำฟอง.....	23
ก-2	ผลการทดลองเมื่อใช้สารละลาย Tween-60 เข้มข้น 1% โดยมวล เป็นสารทำฟอง.....	24
ข-1	น้ำหนักถึงบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งก่อนและหลังการทดลอง.....	25
ค-1	ผลคำนวณขนาดของโมเมนต์ตัมการชนในแต่ละสภาวะขาเข้าที่กำหนด.....	39



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ภาพแสดงแรงตึงผิว ความดันอากาศภายในและภายนอกของฟองอากาศ.....	4
2.2	กราฟความดัน-เอนทัลปีของคาร์บอนไดออกไซด์.....	6
2.3	ภาพรวมของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ.....	7
2.4	แสดงความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเมื่อวิ่งผ่านชั้นขอบเขต.....	9
2.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าความตึงผิวของ สารละลาย Tween-20, Tween-60, Tween-80 , Arlacel-60, Arlacel-80.....	12
4.1	อุณหภูมิขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์กับความสามารถในการกำจัดฟอง ที่ความดันเป็น 450 psi.....	17
4.2	อุณหภูมิขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์กับความสามารถในการกำจัดฟอง ที่ความดันเป็น 500 psi.....	17
4.3	อุณหภูมิขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์กับความสามารถในการกำจัดฟอง ที่ความดันเป็น 600 psi.....	17
4.4	อุณหภูมิขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์กับความสามารถในการกำจัดฟอง ที่ความดันเป็น 700 psi.....	18

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การผสมสารโดยใช้ถังขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา หรืออุตสาหกรรมสบู่และผงซักฟอก ซึ่งการผสมมักจะทำให้การกวน ทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก ฟองเหล่านี้จะทำให้เกิดปัญหาต่อการวัดระดับของของเหลว หรืออาจทำให้สารล้นหก และสูญเสียผลิตภัณฑ์ได้ โดยวิธีการแก้ปัญหาเรื่องการเกิดฟองมีหลายวิธีเช่น การปาดฟอง ซึ่งทำให้สูญเสียของเหลวไป การเป่าด้วยลมซึ่งต้องใช้แรงลมสูง อาจทำให้เกิดการตีบนผิวของเหลว แล้วเกิดฟองเพิ่มขึ้น หรือใช้สารป้องกันฟอง (Antifoam) หรือสารลดฟอง (Defoamer) ซึ่งปัญหาหลักของสารดังกล่าวคือมีความอันตรายและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นที่มาของแนวคิดในการนำละอองน้ำแข็งแห้งเข้ามาใช้ในการกำจัดฟอง ซึ่งน้ำแข็งแห้งนั้น ทำมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มาจากกระบวนการต่าง ๆ เช่น การแยกอากาศหรือการเผาไหม้เชื้อเพลิง มาใช้ประโยชน์ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยทำการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์จากสถานะแก๊สให้กลายเป็นของเหลวแล้วพ่นออกอย่างรวดเร็วผ่านรูออร์พิทแบบเอนทาลปีคงที่ จนเกิดละอองน้ำแข็งแห้งขึ้น การกำจัดฟองด้วยวิธีนี้ จะไม่มีการสูญเสียในปริมาณของของเหลว เนื่องจากละอองน้ำแข็งแห้งมีทั้งแรงดันของแก๊สและมีอนุภาคของของแข็งปนอยู่ จึงไม่จำเป็นต้องใช้แรงลมสูงและลดโอกาสตีฟองลง และยังมีสารเคมีตกค้างอีกด้วย เพราะละอองน้ำแข็งแห้ง จะระเหิดเป็นแก๊สที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศโดยไม่กลายเป็นของเหลว

จากเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาเทคโนโลยีในการนำเอาเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งมาใช้ในการลดปริมาณฟองที่เกิดขึ้น ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องพ่นน้ำละอองน้ำแข็งแห้งนั้นคือหน่วยควบแน่นที่เปลี่ยนสถานะของคาร์บอนไดออกไซด์จากสถานะแก๊สให้กลายเป็นของเหลว

ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการลดปริมาณฟองที่เกิดขึ้น โดยหาสภาวะของอุปกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถทำให้เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งกำจัดฟองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาความสามารถในการลดปริมาณฟองของเหลว โดยใช้ละอองน้ำแข็งแห้งซึ่งเกิดจากเครื่องควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้กำจัดฟอง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณฟองที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่องฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆได้แก่ เครื่องระเหย เครื่องอัดแก๊สทำความเย็น และหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์

2. ศึกษาหาผลของสภาวะขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์และผลของโมเมนต์การชนของละอองน้ำแข็งแห้งที่เกิดขึ้นต่อความสามารถในการกำจัดฟอง และหาสภาวะขาเข้าเครื่องฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งที่เหมาะสมต่อการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอุตสาหกรรมทั่วไป ปัญหาเรื่องการเกิดฟอง เป็นผลมาจากความแตกต่างของความตึงผิวของของไหล ที่เป็นของเหลว โดยทั่วไปเมื่อของเหลวมีความตึงผิวที่ลดลง จะทำให้มีโอกาสเกิดฟองได้มากขึ้น ดังนั้นความเข้าใจเรื่องการเกิดฟองที่เป็นมาจากความตึงผิว จึงมีส่วนสำคัญในการช่วยแก้ปัญหา เรื่องการเกิดฟอง

2.1 แรงตึงผิวและความดันภายในฟองของเหลว [7]

แรงตึงผิว เป็นคุณสมบัติของของเหลว ทำให้ผิวหน้าของน้ำเป็นเสมือนผิวหนังบางคลุมน้ำข้างใต้ไว้ แรงตึงผิวคือแรงในผิวของเหลวต่อหน่วยความยาว ซึ่งแสดงให้เห็นในสมการที่ 2.1

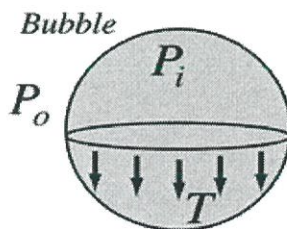
$$\gamma = \frac{F}{2L} \quad (2.1)$$

เมื่อ γ คือ ความตึงผิว (N/m, dyne/cm)
 F คือ แรงที่กระทำบนผิวของเหลว (N)
 L คือ ความยาวของส่วนที่ถูกแรงกระทำ (m)

แรงตึงผิวเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูด 2 ชนิด คือ

- แรงโคฮีชัน (Cohesive force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้ำ
- แรงแอดฮีชัน (Adhesion force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลน้ำกับวัสดุอื่น

แรงตึงผิวทำให้เกิดผลต่างระหว่างความดันภายใน และภายนอกของฟองของ หรือหยดของเหลว ฟองของเหลวจะประกอบด้วยผิวของฟิล์มสองผิว (ภายในกับภายนอก) โดยมีของเหลวที่เป็นชั้นบาง ๆ อยู่ระหว่างผิวทั้งสอง ภายในมีอากาศอยู่ แรงตึงผิว ทำให้ฟิล์มทั้งสองพยายามหดตัวเพื่อให้ได้พื้นที่ผิวของฟองมีขนาดเล็กที่สุด แต่ในขณะที่มีมันหดตัวไปเรื่อย ๆ ความดันอากาศภายใน จะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดมันสามารถดันฟิล์มทั้งสองไม่ให้หดตัวอีกต่อไป ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงแรงตึงผิว ความดันอากาศภายในและภายนอกของฟองอากาศ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาผลต่างระหว่างความดันภายในกับภายนอกในรูปของรัศมีของฟอง และความตึงผิวของของเหลว จะใช้การสมมติว่าภายนอกฟองไม่มีความดัน รัศมีภายในกับภายนอกของฟองต่างกัน น้อยมาก และแต่ละครึ่งของฟองอยู่ในสมดุล จากสมมติฐานข้างต้น จะทำให้มีแรงกระทำบนพื้นผิววงกลมทั้งหมด 2 แรงคือ แรงดึงขึ้นที่ขอบเนื่องจากความตึงผิวและแรงกดลงเนื่องจากความดันของอากาศในส่วนครึ่งบน ขนาดของเส้นรอบวงที่แรงตึงผิวกระทำอยู่มีค่าเป็น $2\pi r$ และแรงตึงผิว ซึ่งของผิวภายในจะมีค่าเท่ากับภายนอก ดังนั้นจะได้แรงตึงผิวสุทธิมีค่าเป็น $(2\gamma)(2\pi r)$

ส่วนความดันอากาศภายใน P_i ทำให้เกิดแรงกระทำในทิศลงกับพื้นที่หน้าตัด πr^2 จึงเกิดแรงเนื่องจากความดันอากาศภายในเท่ากับ $P_i \pi r^2$ เพื่อให้ฟองอยู่ในสภาวะสมดุล ผลรวมของแรงทั้ง 2 จะต้องมามีค่าเท่ากัน จึงได้ว่า ขนาดของแรงตึงผิวสุทธิ = ขนาดของแรงเนื่องจากความดันอากาศ ดังที่แสดงในสมการที่ 2.2

$$(2\gamma)(2\pi r) = P_i \pi r^2$$

$$P_i = \frac{4\gamma}{r} \quad (2.2)$$

ซึ่งในความจริงแล้ว ความดันอากาศจะไม่เป็นศูนย์ จึงจะได้ว่า ผลต่างความดันภายในและภายนอกฟองของเหลวจะเท่ากับ 4 เท่าของแรงตึงผิวหารด้วยรัศมีของฟอง ดังสมการที่ 2.3

$$\Delta P = \frac{4\gamma}{r} \quad (2.3)$$

2.2 สารลดแรงตึงผิว [1]

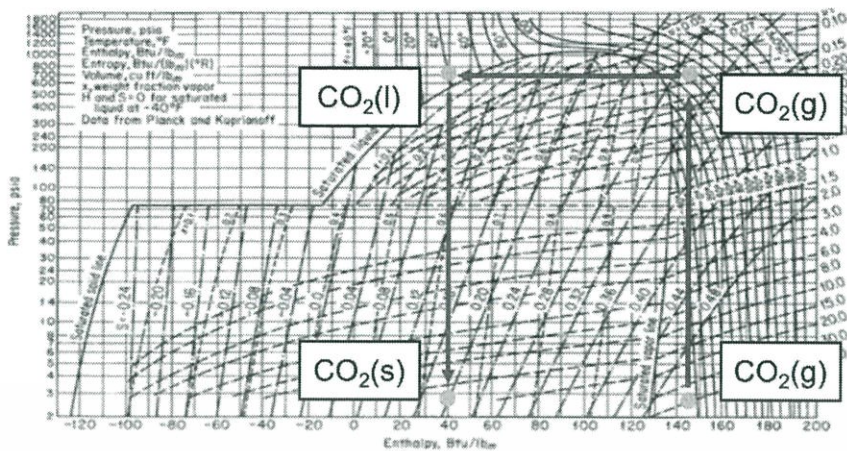
สารลดแรงตึงผิว มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า “ Surfactant ” สารลดแรงตึงผิวเดิมทีเดียวมาจากภาษาเยอรมันว่า Tensid ซึ่งตั้งโดยนักเคมีชาวเยอรมันในปี ค.ศ. 1960 สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และโพลีเมอร์สังเคราะห์ เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวลงไปในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ ได้ง่ายขึ้น เช่น การเกิดฟอง การทำให้เปียก และกระบวนการทำความสะอาด เป็นต้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะพยายามหนีน้ำโดยไปเกาะกับพื้นผิวที่ว่าง เช่น อากาศ ส่วนที่ชอบน้ำจะยังคงอยู่ในน้ำ ดังนั้นจึงผสมสารลดแรงตึงผิวในความเข้มข้นที่เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้เกิดฟองแล้วนำมาใช้ในการทดลอง

2.3 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) [2]

ในงานวิจัยนี้ สนใจที่จะศึกษาการใช้ประโยชน์จากคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อที่จะลดปริมาณฟองในของเหลว โดยใช้อุณหภูมิที่มีขนาดเล็กระดับ ไมครอนหรือไมโครเมตร ฟุ้งเข้าชนฟองให้ฟองแตกตัว ดังนั้น การศึกษาเพื่อเข้าใจคุณสมบัติทางกายภาพของคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีส่วนสำคัญในการออกแบบการทดลอง โดยทั่วไปคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี มีสัดส่วนในชั้นบรรยากาศประมาณ 0.03% โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอมและออกซิเจน 2 อะตอม (CO₂) เมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง จะเรียกว่า น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเกิดจากธรรมชาติ และเกิดจากฝีมือมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอย่างสมบูรณ์ โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีประโยชน์หลายอย่าง ที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ พืชชนิดต่าง ๆ ล้วนต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างอาหาร ตลอดจนมีการใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมากมาย เช่น ผลิตโซดา น้ำอัดลม ผลิตลูกอม ใช้เป็นแก๊สในการดับเพลิงบรรจุอยู่ในถังดับเพลิง งานเชื่อมด้วยแก๊ส (Gas Welding) อุตสาหกรรมผลิตยาและเคมี ในกระบวนการขุดเจาะน้ำมันซึ่ง คาร์บอนไดออกไซด์ ถูกฉีดลงในแหล่งน้ำมันเพื่อเพิ่ม ปริมาณน้ำมันดิบหรืออุตสาหกรรมแช่เย็น เป็นต้น

2.3.1 น้ำแข็งแห้ง [3]

น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของแข็ง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คาร์บอนไดออกไซด์แข็ง หรือ solid carbon dioxide เตรียมได้จากการนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาผ่านกระบวนการอัดและทำให้เย็นลงภายใต้ความดันสูงกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว แล้วลดความดันลงอย่างรวดเร็วโดยการพ่นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวสู่ความดันบรรยากาศ ผลที่ได้คือเกล็ดน้ำแข็งคล้ายเกล็ดหิมะ แล้วจึงนำมาอัดเป็นรูปแบบและขนาดต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ โดยน้ำแข็งแห้งแตกต่างจากน้ำแข็งธรรมดาทั่วไปคือ มีอุณหภูมิเย็นจัดถึง -79°C ในขณะที่น้ำแข็งธรรมดาทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ 0°C ที่อุณหภูมิห้องน้ำแข็งแห้งจะระเหิดกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่ละลายเป็นของเหลวเหมือนน้ำแข็งธรรมดาทั่วไป ซึ่งน้ำแข็งแห้งจะให้ความเย็นได้มากกว่าน้ำแข็งทั่วไป 2 ถึง 3 เท่าเมื่อเทียบโดยปริมาตรที่เท่ากัน

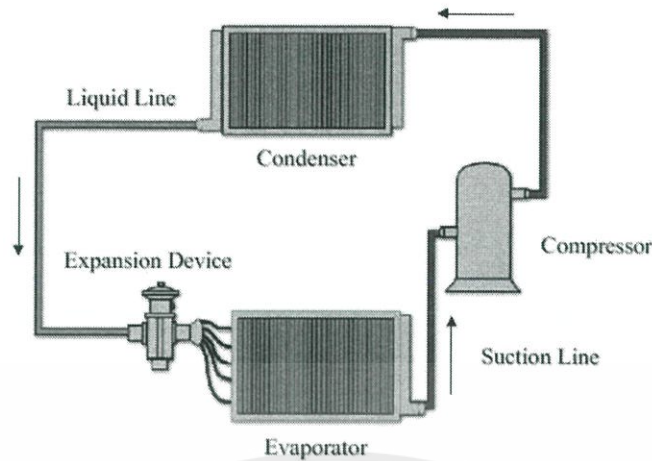


รูปที่ 2.2 กราฟความดัน-เอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์

น้ำแข็งแห้งถูกนำมาใช้ประโยชน์หลาย ๆ ด้าน เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อถนอมอาหาร ในขั้นตอนการผลิตหรือในการขนส่งหรือเก็บอาหารสำหรับเสิร์ฟบนเครื่องบิน ใช้ในการขนส่งเวชภัณฑ์ ใช้ในการทำความสะอาดเครื่องจักร แบบหล่อหรือแม่พิมพ์ หรือใช้ในการบัดเย็นวัสดุสังเคราะห์ที่แตกยาก นอกจากนี้ยังใช้ในการทำหมอก ควัน ในการแสดงต่าง ๆ และอาจใช้ผสมในเครื่องดื่มเพื่อให้เกิดฟองปุด และให้เกิดความเย็น เป็นต้น

2.4 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ [5]

โดยทั่วไปการผลิตน้ำแข็งจำเป็นจะต้องการลดอุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยเล่นนี้จะ ต้องใช้ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ ที่สามารถควบคุมสถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ทำให้เกิดโมเมนตัม การชนที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณฟองได้ ซึ่งการจะคำนวณโมเมนตัมการชนได้นั้นจะต้องคำนวณหาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะศึกษาในส่วนถัดไป โดยระบบทำความเย็นและปรับอากาศที่ใช้ในปัจจุบันอาศัยการทำงานแบบอัดไอน้ำยาทำความเย็นด้วยคอมเพรสเซอร์เพื่อนำน้ำยาทำความเย็นแล้วกลับมาใช้อีก น้ำยาทำความเย็นจะไหลเวียนภายในระบบปิดอยู่ตลอดเวลา จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งประกอบไปด้วย คอยล์เย็น คอมเพรสเซอร์ คอนเดนเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุมการไหล ซึ่งอุปกรณ์แต่ละส่วนมีหน้าที่ดังนี้



รูปที่ 2.3 ภาพรวมของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ [5]

2.5 สารทำความเย็น (Refrigerant) [4]

สารทำความเย็น หมายถึง สารซึ่งหมุนเวียนอยู่ในวงจรทำความเย็นและใช้เป็นตัวกลางดูดซับความร้อนที่มาจากภายนอกวงจรทำความเย็นและนำความร้อนไปถ่ายเททิ้งภายนอกระบบ ตัวสารจะหมุนเวียนในระบบ โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สเมื่อได้รับความร้อนจากระบบ และเมื่อถ่ายเทความร้อนออกแล้วจะกลับมาเป็นของเหลวโดยตัวสารสามารถแบ่งได้หลายรูปแบบดังนี้

2.5.1 แบ่งตามกระบวนการผลิต

- Natural refrigerants เช่น HC-600a (isobutane), HC-290 (propane), CO₂
- Synthesis refrigerants เช่น HCFCs, HFCs

2.5.2 แบ่งตามสมบัติ

- Pure refrigerants เช่น HCFC-22, HFC-134a
- Mixture refrigerants เช่น HFC-407C, HFC-410A

2.5.3 แบ่งตามสูตรเคมี

- CFC (chlorofluorocarbon) ประกอบด้วย คลอรีน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R-11
- HFC (hydrofluorocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน ฟลูออรีน และคาร์บอน
- HCFC (hydrochlorofluorocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน คลอรีน ฟลูออรีน และคาร์บอน
- HC (hydrocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน และคาร์บอน เช่น เช่น R-290

2.6 การคำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่หิวซีต [10]

ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ ซึ่งความดันสามารถปรับเพิ่มลดได้ที่ตัวปรับแรงดันขาเข้าส่วนอุณหภูมิปรับเพิ่มลดได้จากเครื่องทำความเย็น ซึ่งมีหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ โดยในที่นี้ จะทำการคำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ จากสมการของ Peng-Robinson ดังสมการที่ 2.4 – 2.8

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a \cdot \alpha(T)}{v^2 + 2bv - b^2} \quad (2.4)$$

โดยที่ $a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2.5)$

$$b = 0.0778 \frac{RT_c}{P_c} \quad (2.6)$$

$$\alpha(T) = [1 + K(1 - \sqrt{T_r})]^2 \quad (2.7)$$

$$K = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (2.8)$$

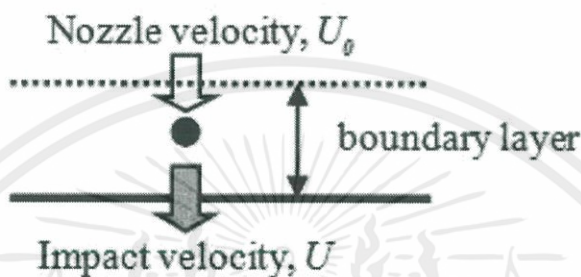
ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$\rho = \frac{MW}{v} \quad (2.9)$$

เมื่อ	P	คือ ความดันที่วัดได้ (Pa (N/m ²), bar)
	T	คือ อุณหภูมิที่วัดได้ (K)
	R	คือ ค่าคงที่แก๊ส (Pa.m ³ /mol.K, J/mol.K)
	v	คือ ปริมาตรเชิงโมล (m ³ /mol)
	T _c	คือ อุณหภูมิวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์
	P _c	คือ ความดันวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์
	T _r	คือ อุณหภูมิลด (Reduce Temperature)
	ω	คือ Pitzer Acentric Factor ของคาร์บอนไดออกไซด์
	MW	คือ มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์

2.7 การคำนวณหาความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง [9]

ในการคำนวณหาความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง เมื่อทำการฉีดละอองน้ำแข็งแห้งออกจากหัวฉีดเพื่อไปกำจัดฟอง อนุภาคของน้ำแข็งแห้งนั้นจะต้องเคลื่อนตัวผ่านชั้นขอบเขตก่อนที่มันจะสามารถพุ่งไปชนฟองของเหลวได้ โดยผลของแรงต้านอากาศระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านชั้นขอบเขตนั้นจะส่งผลให้ความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้งมีค่าลดลง จึงทำให้ความเร็วในการชนฟองมีค่าลดลงจากความเร็วที่ปลายหัวฉีด ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณความเร็วที่ปลายหัวฉีด แล้วจึงนำค่าความเร็วที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็ง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงความเร็วของอนุภาคน้ำแข็งแห้งเมื่อวิ่งผ่านชั้นขอบเขต

2.7.1 ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์ที่หัวฉีด

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$U_0 = \frac{\dot{m}}{\rho_{CO_2} \cdot \emptyset} \quad (2.10)$$

- โดยที่ U_0 คือ ความเร็วคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณหัวฉีด (m/s)
 \dot{m} คือ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในหัวฉีด (kg/s)
 ρ_{CO_2} คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในหัวฉีด (kg/m³)
 \emptyset คือ พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด (m²)

2.7.2 การคำนวณหาความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

เราสามารถหาความเร็วในการชนได้จากสมการที่ 2.11

$$U = U_0 \left(1 - \frac{\delta}{U_0 \tau}\right) \quad (2.11)$$

- เมื่อ U คือ ความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (m/s)
 U_0 คือ ความเร็วคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณหัวฉีด (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

δ คือ ความหนาของชั้นขอบเขต (m) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$\delta = 0.16 \times \frac{x}{(Re)^{1/7}} \quad (2.12)$$

ซึ่งค่า Re คือค่า Reynolds number ซึ่งหาได้จากสมการ 2.13

$$Re = \frac{U_0 x}{\nu} \quad (2.13)$$

เมื่อ ν คือ ความหนืดไคเนมาติกของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

x คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับฟองอากาศ (m)

U_0 คือ ความเร็วคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณหัวฉีด (m/s)

τ คือ velocity relaxation time (μs) หาได้จากสมการสมการที่ 2.14

$$\tau = \frac{2r_p^2 \rho_p C_c}{9\mu} \quad (2.14)$$

เมื่อ r_p คือ รัศมีของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (m)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (kg/m^3)

μ คือ ค่าความหนืดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Pa.s)

C_c คือ Cunningham correction factor ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.15

$$C_c = 1 + \frac{2}{Pd} [6.32 + 2.01e^{(-0.1095Pd)}] \quad (2.15)$$

เมื่อ P คือ ความดันสัมบูรณ์ (kPa)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (μm)

2.8 การคำนวณโมเมนตัมการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

โมเมนตัมการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง จะมีความสัมพันธ์กับความสามารถการลดปริมาณของฟอง สำหรับโมเมนตัมก่อนการชนของอนุภาคน้ำแข็งนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

$$\bar{P} = m \cdot U \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	\bar{P}	คือ โมเมนตัมก่อนการชนของอนุภาคน้ำแข็ง (kg.m/s)
	m	คือ มวลของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (kg)
	U	คือ ความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (m/s)

เมื่อสมมติว่าอนุภาคน้ำแข็งแห้งมีรูปร่างเป็นทรงกลม เราจะสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ ซึ่งจะนำไปใช้หามวลของอนุภาคน้ำแข็งแห้งจากสมการที่ 2.17

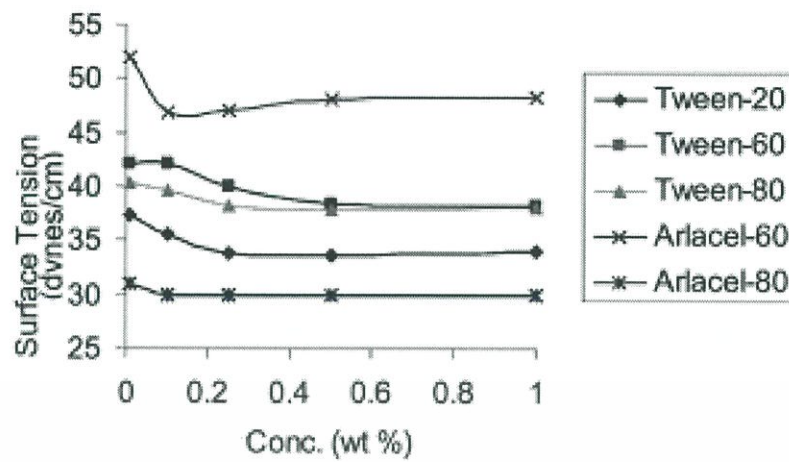
$$m = \frac{4\pi r^3 \rho_p}{3} \quad (2.17)$$

เมื่อ	ρ_p	คือ ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (kg/m ³)
	r	คือ รัศมีของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (m)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สิวิขและสุรัตน์ [9] ได้ศึกษาการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สัน ซึ่งเป็นกลไกหลักที่มีผลต่อการเกิดละอองน้ำแข็งแห้ง และคุณลักษณะของละอองน้ำแข็งแห้ง โดยจากการทดลองจะพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันและอุณหภูมิเดียวกันกับการทดลองนั้น มีค่าจูล-ทอมป์สัน (μ_{JT}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.0218-0.0380 K/psi ซึ่งบ่งบอกว่าการจะเพิ่มประสิทธิภาพ (ให้ μ_{JT} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) ควรจะเน้นไปที่การลดอุณหภูมิป้อนเข้ามากกว่าการเพิ่มความดัน และค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนออกจากรูออร์ฟิกที่สูงขึ้น ยังส่งผลให้ค่าโมเมนตัมการชนของละอองน้ำแข็งแห้งและขนาดของอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งสูงขึ้นด้วย โดยเมื่อค่าความหนาแน่นและความดันเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 78-144 kg/m³ และ 450-700 psi จะทำให้อนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 27-33 μm

Shrinivas C. Kotheka, Adinath M. Ware, Jyotsna T. Waghmare, S. A. Momin [8] ได้ศึกษาคุณสมบัติของฟองของของเหลว ที่เกิดจากการนำสารลดแรงตึงผิว 5 ชนิดคือ Tween-20, Tween-60, Tween-80, Arlacel(Span)-60 และ Arlacel(Span)-80 มาละลายน้ำในอัตราส่วนที่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ซึ่งเมื่อนำสารละลายที่แต่ละความเข้มข้นไปวัดหาค่าแรงตึงผิว จะได้เป็นกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าความตึงผิวของ สารละลาย Tween-20, Tween-60, Tween-80 , Arlachel-60, Arlachel-80



บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 ชุดเครื่องฟั่นละอองน้ำแข็ง Model KMITL_01

3.1.2 ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.9% จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด ขนาด 29 kg และ 6 kg

3.1.3 สารลดแรงตึงผิว span-80 และ tween-60

3.1.4 ขวดและปีกเกอร์สำหรับเตรียมฟอง

3.1.5 ตัวปรับแรงดันลม (Air Regulator)

3.1.5 หัวฉีดแรงดันสูง (Nozzle Spray)

3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบเสถียร (Mettler Toledo รุ่น XS32001L)

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองจะใช้ความดันและอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันเพื่อทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดฟองในแต่ละอุณหภูมิและความดัน ซึ่งอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการทดลองจะถูกเลือกมาจากกราฟความดัน-เอนทาลปี โดยจะเลือกจากจุดที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนสภาพเป็นของเหลว(ที่เส้น saturated liquid line) ส่วนของของเหลวที่ใช้ทำฟองจะเป็นของเหลวที่มีค่าความตึงผิวที่ต่างกัน โดยของเหลวที่เลือกคือ สารละลาย tween-60 และ span-80 ในส่วนของขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. ต่อถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขนาด 29 kg เข้ากับเครื่องฟั่นละอองน้ำแข็ง เป็นระบบทำความเย็น รออุณหภูมิในถังเป็น 13 °C
2. เปิดวาล์วที่ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และปรับความดันจากตัวปรับแรงดันลมให้ความดันขาเข้าเป็น 450 psi
3. เปิดระบบผลิตละอองน้ำแข็ง
4. เตรียมสารละลาย span-80 1 %w จากนั้นนำมาเขย่า 10 วินาที จนเกิดฟอง แล้วเทลงบนปีกเกอร์สำหรับทดลอง
5. ตั้งหัวฉีดให้ห่างจากชั้นฟอง 40 cm. แล้วจึงเปิดวาล์วฟั่นละอองน้ำแข็ง แล้วฟั่นลงบนภาชนะที่เตรียมไว้เป็นเวลา 3 วินาทีแล้วจึงปิดวาล์ว บันทึกผลทั้งก่อนและหลังการฟั่นละออง
6. ทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง

7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง 7 โดยปรับความดันขาเข้าเป็น 500, 600 และ 700 psi ตามลำดับ
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง 8 โดยเปลี่ยนของเหลวชนิดเป็นสารละลาย tween-60
9. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 9 โดยตั้งอุณหภูมิของถังใหม่เป็น 9 และ 6 °C ตามลำดับ
10. ปิดระบบ
11. เปลี่ยนถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นถังขนาด 6 kg โดยนำตัวถังวางบนเครื่องชั่งแล้วเปิดระบบอีกครั้ง
12. ทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์โดยบันทึกค่าน้ำหนักที่หายไปเทียบกับเวลา 20 วินาที โดยใช้สภาวะขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 450 psi 6 °C, 500 psi 9 °C และ 600 psi 13 °C ตามลำดับ
13. ปิดระบบ



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของสภาวะขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการลดลงของปริมาณฟอง

ความสามารถในการกำจัดฟองที่เกิดขึ้นนั้น จะคำนวณจากการวัดความสูงของชั้นฟอง ทั้งก่อนและหลังการฉีดพ่นคาร์บอนไดออกไซด์ โดยนำค่าที่ได้มาหาเปอร์เซ็นต์ที่หายไปของฟอง ซึ่งตารางที่ 4.1 และ 4.2 จะแสดงความสามารถในการกำจัดฟองที่เกิดจากสารละลาย Span-80 และ Tween-60 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการกำจัดฟองของน้ำแข็งแห้งเมื่อใช้สารทำฟองเป็น Span-80

สภาวะขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์		ความสูงชั้นโฟม (cm.)		ความสูงที่หายไป (cm.)	ความสามารถในการกำจัดฟอง (%)
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (psi)	ก่อนพ่น	หลังพ่น		
13	450	1.3	1.1	0.2	15.38
	500	1.1	0.9	0.2	18.18
	600	1.15	0.85	0.3	26.09
	700	1.25	0.9	0.35	28.00
9	450	1.1	0.9	0.2	18.18
	500	1.15	0.85	0.3	26.09
	600	1.2	0.85	0.35	29.17
	700	1.1	0.75	0.35	31.82
6	450	1.2	0.95	0.25	20.83
	500	1.1	0.8	0.3	27.27
	600	1	0.7	0.3	30.00
	700	1	0.65	0.35	35.00

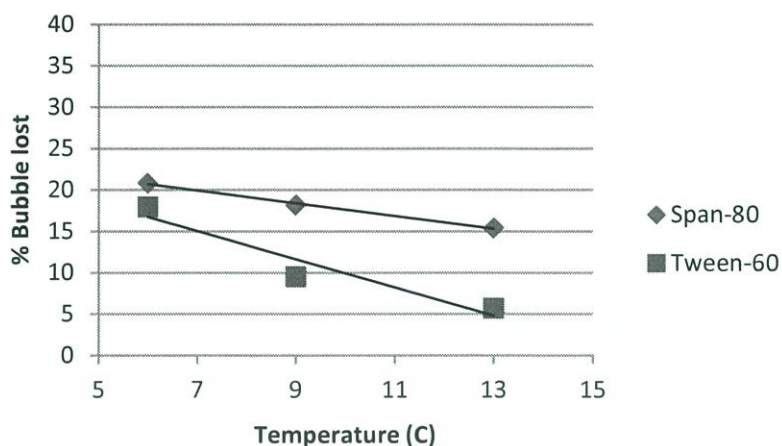
ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการกำจัดฟองของน้ำแข็งแห้งเมื่อใช้สารทำฟองเป็น Tween-60

สภาวะขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์		ความสูงชั้นโฟม (cm.)		ความสูงที่หายไป (cm.)	ความสามารถในการกำจัดฟอง (%)
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (psi)	ก่อนพ่น	หลังพ่น		
13	450	1.75	1.65	0.1	5.71
	500	2	1.8	0.2	10.00
	600	1.7	1.4	0.3	17.65
	700	1.9	1.35	0.55	28.95
9	450	2.1	1.9	0.2	9.52
	500	2	1.65	0.35	17.50
	600	1.8	1.45	0.35	19.44
	700	1.9	1.35	0.55	28.95
6	450	1.95	1.6	0.35	17.95
	500	2	1.55	0.45	22.50
	600	2.05	1.5	0.55	26.83
	700	2.05	1.4	0.65	31.71

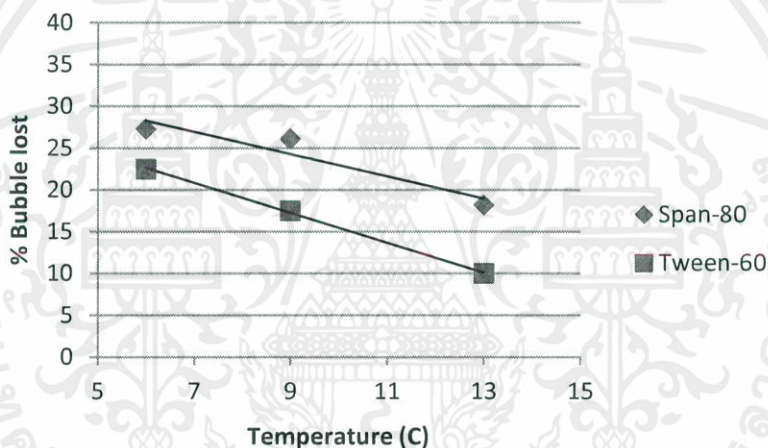
จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการกำจัดฟองของน้ำแข็งแห้งนั้น แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะละลายและความสูงของชั้นฟอง โดยสภาวะที่กำจัดฟองได้ดีที่สุดคือที่อุณหภูมิ 6 °C ความดัน 700 psi ซึ่งสามารถกำจัดฟองของสารละลาย Span-80 และ Tween-60 ได้ 35 และ 31.71 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการกำจัดฟอง

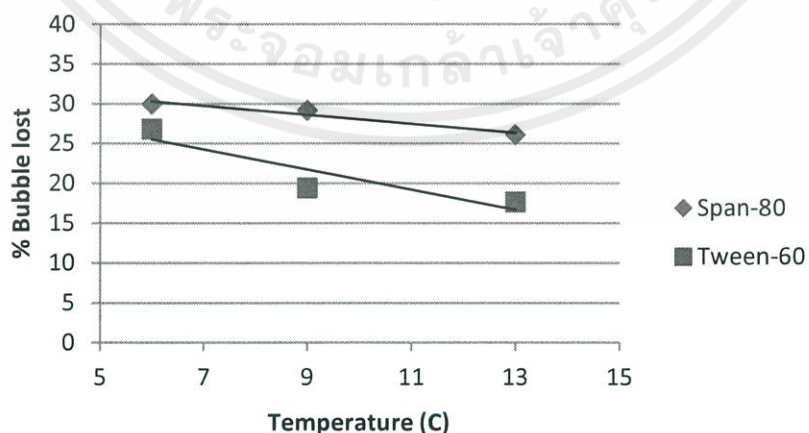
เมื่อนำผลการทดลองมาแสดงในรูปของกราฟ โดยแยกให้แต่ละกราฟมีความดันคงที่ จะได้เป็นกราฟเส้นตรงในรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.4



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์กับความสามารถในการกำจัดฟอง
ที่ความดัน 450 psi

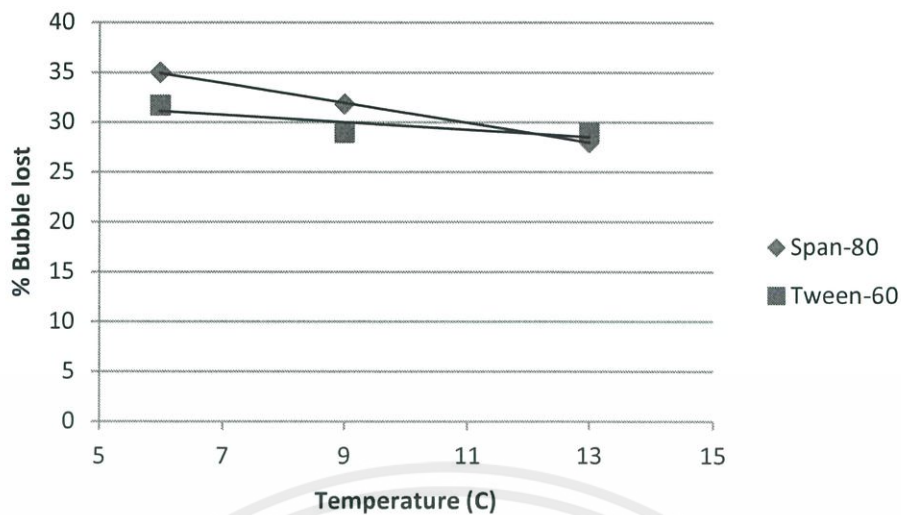


รูปที่ 4.2 อุณหภูมิขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์กับความสามารถในการกำจัดฟอง
ที่ความดัน 500 psi



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์กับความสามารถในการกำจัดฟอง
ที่ความดัน 600 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 อุณหภูมิขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์กับความสามารถในการกำจัดฟอง
ที่ความดัน 700 psi

เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดฟองที่เกิดขึ้นกับสารตัวอย่างทั้ง 2 นั้นลดลง โดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ผลเกิดจากเมื่ออุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น จะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ในหัวฉีดไม่เป็นของเหลวทั้งหมด ส่งผลให้ปริมาณการเกิดละอองน้ำแข็งแห้งลดลง จึงทำให้กำจัดฟองได้ไม่ดี แต่ความต่างของอุณหภูมิ จะมีผลต่อการกำจัดฟองน้อยลงเมื่อความดันที่ใช้สูงขึ้น เพราะที่ความดันที่สูง จะสามารถเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะแก๊สให้เป็นของเหลวได้ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ผลของอุณหภูมิจึงลดลง

4.1.2 ผลของความดันที่มีต่อความสามารถในการกำจัดฟอง

เมื่อดูผลจากกราฟในรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 จะพบว่า ที่อุณหภูมิที่เท่ากัน เมื่อเพิ่มเพิ่มความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดฟองสูงขึ้นไปด้วยเนื่องจากทั้งแรงดันที่สูงขึ้นและความสามารถในการสร้างละอองน้ำแข็งแห้งที่ปลายหัวฉีดที่สูงขึ้นด้วย โดยจะสังเกตว่า ความดันที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้กำจัดฟองได้มากกว่าผลของอุณหภูมิลดลงซึ่งสอดคล้องกับกราฟความดัน-เอนทาลปี ที่การเพิ่มความดันสามารถทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ในหัวฉีด กลางเป็นสถานะของเหลวได้ง่ายกว่า การลดอุณหภูมิ

4.2 เปรียบเทียบโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟอง

เนื่องจากในการทดลองนี้ ผู้ทดลองไม่สามารถวัดขนาดของอนุภาคน้ำแข็งได้ จึงได้อ้างอิงขนาดของอนุภาคน้ำแข็งจากการทดลองของนายสิวัช [9] โดยผลการทดลองของนายสิวัชกล่าวว่า ที่ค่า

อุณหภูมิและความดันที่กำหนด (6 °C 450 psi, 9 °C 500 psi และ 13 °C 600 psi) จะสามารถวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งได้ 27.2 , 29.0 และ 31.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ

เมื่อนำค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในหัวฉีดไปคำนวณหาขนาดโมเมนต์การชนของละอองน้ำแข็งแห้งโดยใช้ข้อมูลขนาดของอนุภาคจากงานวิจัยของนายสิวัช นำผลการคำนวณมาเทียบกับความสามารถในการกำจัดฟอง จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.3 ขนาดของโมเมนต์การชนของละอองน้ำแข็งแห้งเมื่อเทียบกับความสามารถในการกำจัดฟองที่สามารถทำได้ ในการละลาย Span-80 และ Tween-60

อุณหภูมิและความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่หัวฉีด (kg/m ³)	ขนาดของโมเมนต์การชน (kg.m/s)	เปอร์เซ็นต์ของฟองที่ลดลงในสารละลาย	
			Span-80	Tween-60
6 °C 450 psi	72.20	6.06×10^{-10}	20.83	17.95
9 °C 500 psi	81.57	8.36×10^{-10}	26.09	17.50
13 °C 600 psi	102.58	1.24×10^{-9}	26.09	17.65

จากตารางที่ 4.3 เมื่อขนาดของโมเมนต์การชนมีค่าเพิ่มขึ้น กลับพบว่าเปอร์เซ็นต์ของฟองที่กำจัดได้นั้น กลับมีค่าที่ไม่ต่างกันมากจึงไม่สามารถบอกได้ว่า โมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งนั้น มีผลโดยตรงกับความสามารถในการกำจัดฟอง ซึ่งผลที่ออกมาแสดงให้เห็นว่า ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดฟองนอกจากขนาดของโมเมนต์การชนจากละอองน้ำแข็งแห้ง เช่น อัตราส่วนของอนุภาคน้ำแข็งในละอองน้ำแข็งที่ทำได้ แรงดันเนื่องจากความดันที่สูงขึ้น ซึ่งจะต้องทำการศึกษาต่อไป

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสภาวะของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการกำจัดฟองนั้น คือที่อุณหภูมิ 6 °C ความดัน 700 psi โดยสามารถกำจัดฟองของสารละลาย Span-80 และ Tween-60 ได้ 35 และ 31.71 เปอร์เซ็นต์ภายใน 3 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟที่แสดงในการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มความดันหรือทำการลดอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า จะส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดฟองนั้นเพิ่มสูงขึ้น โดยผลของการเพิ่มความดันจะส่งผลมากกว่าการลดอุณหภูมิซึ่งเป็นผลมาจากการที่เมื่อเพิ่มความดันจะเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีสถานะเป็นของเหลวที่หิวฉิดได้ง่าย แต่ผลที่ได้นั้นยังถือว่าไม่เป็นที่น่าพึงพอใจเพราะความสามารถในการกำจัดฟองนั้น ยังต่ำเกินไป และจากการคำนวณโมเมนตัมการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งในสภาวะที่กำหนดนั้นไม่ได้บ่งบอกถึงผลที่ชัดเจนว่าโมเมนตัมการชนนั้นมีผลโดยตรงต่อการกำจัดฟองของเหลว จึงจะต้องมีการศึกษาผลเหล่านี้เพิ่มเติม ก่อนที่จะสามารถนำไปใช้งานได้

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลอง ความสูงของชั้นโฟมที่ใช้ในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน จึงทำให้แม้ว่าจะสามารถลดความสูงของชั้นโฟมได้เท่ากัน แต่ความสามารถในการกำจัดฟองที่ได้กลับต่างกัน ซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองนั้น คลาดเคลื่อนจากสิ่งที่ทำได้ และมีความคลาดเคลื่อนในการทดลองหรือการคำนวณต่าง ๆ อาจเกิดจากปัจจัยภายนอกอีกหลายอย่าง เช่น การอ่านสเกลในเกจความดัน หรือวัดความสูงของชั้นฟองด้วยสายตา การคำนวณอัตราการไหลโดยใช้น้ำหนักที่หายไปโดยตรง และการจับเวลาในระยะสั้นที่อาจไม่แม่นยำ เป็นต้น

ผลการกำจัดฟองที่ได้นั้น ยังถือว่ามีประสิทธิภาพที่ไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้งาน เนื่องจากเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองนั้น มีเพียงเพื่อใช้หาสภาวะที่กำจัดฟองได้ดีที่สุดในระยะเวลาสั้นๆ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอง การหาอัตราการกำจัดฟองที่เกิดขึ้น การทดลองการใช้งานในระยะยาวและการอัปเดตอุปกรณ์ เพื่อการใช้งานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี “สารลดแรงตึงผิว” [online]. กรุงเทพฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=3>. 2549.
- [2] สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ “แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ” [PDF]. ปทุมธานี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2560.
- [3] ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา “น้ำแข็งแห้ง” [online] กรุงเทพฯ ศูนย์พิษวิทยารามาธิบดี : http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=265.
- [4] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ “สารทำความเย็น คือสารประเภทใด?” [online]. ปทุมธานีสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ : <https://old.mtec.or.th/academic-services/mtec-question-answer/1648-สารทำความเย็น-refrigerant-คือสารประเภทใด-มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร>.
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2004 “ระบบทำความเย็น” [online]. กระทรวงพลังงาน : <http://refrigerations.blogspot.com/2012/01/vapor-compression-system.html>.
- [6] YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles, 2014 “Thermodynamics”. Eighth Edition in SI Unit.
- [7] P. W. Atkins, 1994 “Physical Chemistry”. Fifth Edition.
- [8] Shrinivas C. Kotheka, Adinath M. Ware, Jyotsna T. Waghmare, S. A. Momin, “Comparative Analysis of the Properties of Tween-20, Tween-60, Tween-80, Arlacel-60, and Arlacel-80”. Journal of Dispersion Science and Technology, pp 477-484, 2007.
- [9] สิวซ์ เต็งสุวรรณ และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การศึกษากระบวนการผลิตละอองลอยของคาร์บอนไดออกไซด์เย็นยิ่งยวดผ่านกระบวนการแพร่กระจายแบบจูล-ทอมป์สัน” วิศวกรรมสาร 28 (3), 2553.
- [10] นันทภพ ้วยคุนา และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนรวมของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นของเครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งแห้ง” วิศวกรรมสาร 28 (3), 2553. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการกำจัดฟองของละอองน้ำแข็งแห้งที่สภาวะของ คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าต่าง ๆ

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองเมื่อใช้สารละลาย Span-80 เข้มข้น 1% โดยมวล เป็นสารทำฟอง

สภาวะขาเข้าของ คาร์บอนไดออกไซด์		ความสูงชั้นโฟมครั้งที่ 1 (cm.)		ความสูงชั้นโฟมครั้งที่ 2 (cm.)	
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (psi)	ก่อนพ่น	หลังพ่น	ก่อนพ่น	หลังพ่น
13	450	1.3	1.1	1.3	1.1
	500	1.2	1.0	1.0	0.8
	600	1.2	0.9	1.1	0.8
	700	1.3	0.9	1.2	0.9
9	450	1.0	0.8	1.2	1.0
	500	1.2	0.9	1.1	0.8
	600	1.2	0.9	1.2	0.8
	700	1.0	0.7	1.2	0.8
6	450	1.2	1.0	1.2	0.9
	500	1.1	0.8	1.1	0.8
	600	1.1	0.8	0.9	0.6
	700	0.9	0.6	1.1	0.7

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองเมื่อใช้สารละลาย Tween-60 เข้มข้น 1% โดยมวล เป็นสารทำฟอง

สภาวะขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์		ความสูงชั้นโฟมครั้งที่ 1 (cm.)		ความสูงชั้นโฟมครั้งที่ 2 (cm.)	
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (psi)	ก่อนพ่น	หลังพ่น	ก่อนพ่น	หลังพ่น
13	450	1.7	1.6	1.8	1.7
	500	1.9	1.7	2.1	1.9
	600	1.8	1.5	1.6	1.3
	700	1.9	1.3	1.9	1.4
9	450	2.0	1.9	2.2	1.9
	500	2.0	1.6	2.0	1.7
	600	1.9	1.5	1.7	1.4
	700	1.9	1.4	1.9	1.3
6	450	1.9	1.6	2.0	1.6
	500	2.0	1.5	2.0	1.6
	600	2.2	1.6	1.9	1.4
	700	2.1	1.4	2.0	1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์

1. บันทึกน้ำหนักของถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับเวลา

บันทึกน้ำหนักของถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงขณะทำการทดลอง ที่ความดันและอุณหภูมิขาเข้าของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ เทียบกับเวลา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่การทดลอง

ตารางที่ ข-1 น้ำหนักถังบรรจุแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งก่อนและหลังการทดลอง

สภาวะ คาร์บอนไดออก ไซด์ขาเข้า	น้ำหนักของถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (kg)						อัตรา การไหล	
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ผลต่าง			ค่าเฉลี่ย ผลต่าง
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
6 °C 450 psi	19.264	19.239	19.239	19.215	0.025	0.024	0.026	0.0013
9 °C 500 psi	19.215	19.184	19.184	19.152	0.031	0.032	0.033	0.0017
13 °C 600 psi	19.152	19.105	19.105	19.060	0.047	0.045	0.046	0.0023

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ในการคำนวณใช้ค่าความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 450 psi ที่อุณหภูมิ 6 °C

1. คำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ห้วง

เริ่มจากการคำนวณปริมาตรเชิงโมล (v) ของคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการ

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a \cdot \alpha(T)}{v^2 + 2bv - b^2}$$

เมื่อ	P	คือ ความดันที่วัดได้ (Pa (N/m ²), bar) มีค่า 450 psi หรือ 31.03 bar
	T	คือ อุณหภูมิที่วัดได้ (K) มีค่า 279 K
	R	คือ ค่าคงที่แก๊ส (Pa.m ³ /mol.K, J/mol.K) คือ 8.317 x 10 ⁻²
	T _c	คือ อุณหภูมิวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 304.2 K
	P _c	คือ ความดันวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 73.76 bar
	T _r	คือ อุณหภูมิลด (Reduce Temperature) มีค่า 0.92
	ω	คือ Pitzer Acentric Factor ของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 0.228

$$\text{จะได้ } a = 0.45724 \frac{R^2 T^2}{P_c} = 0.45724 \frac{(8.314 \times 10^{-2})^2 (279)^2}{73.76} = 3.335$$

$$b = 0.0778 \frac{RT_c}{P_c} = 0.0778 \frac{(8.314 \times 10^{-2})(304.2)}{73.76} = 0.0267$$

$$K = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \\ = 0.37464 + 1.54226(0.267) - 0.26992(0.267)^2 \\ = 0.707$$

$$\alpha(T) = [1 + K(1 - \sqrt{T_r})]^2 \\ = [1 + 0.707(1 - \sqrt{292/304.2})]^2 \\ = 1.061$$

จากนั้นแทนค่าทั้งหมดลงในสมการ 2.4

$$48.263 = \frac{(8.314 \times 10^{-2})(279)}{v - 0.0267} - \frac{3.335 \times 1.061}{v^2 + 2(0.0267)v - 0.0267^2}$$

แก้สมการออกมาจะได้ $v = 0.61 \text{ m}^3/\text{mol}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า v ที่ได้ แทนลงในสมการ 2.9 โดยที่มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 44.01 g

$$\rho_{CO_2} = \frac{MW}{v} = \frac{44.01}{0.61} = 72.199 \text{ kg/m}^3$$

2. คำนวณหาความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์ที่หัวฉีด

เมื่อได้ค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่หัวฉีดแล้ว เราจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์ที่หัวฉีด จากสมการ 2.10

$$U_0 = \frac{\dot{m}}{\rho_{CO_2} \cdot \phi}$$

เมื่อ U_0 คือ ความเร็วคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณหัวฉีด (m/s)
 \dot{m} คือ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในหัวฉีดซึ่งที่อัตราการไหลที่ความดัน 450 psi อุณหภูมิ 6 °C มีค่า 0.00123 kg/s
 ρ_{CO_2} มีค่า 72.2 kg/m³
 ϕ คือ พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด มีขนาด $4.42 \times 10^{-7} \text{ m}^2$

จะได้ $U_0 = \frac{\dot{m}}{\rho_{CO_2} \cdot \phi} = \frac{0.00123}{72.2 \times 4.42 \times 10^{-7}} = 38.387 \text{ m/s}$

3. คำนวณหาความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งจะถูกคำนวณจากสมการ 2.11

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

เมื่อ U คือ ความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง (m/s)
 U_0 คือ ความเร็วคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณหัวฉีด มีค่า 38.39 m/s

เราต้องทำการหาค่า δ และค่า τ เพื่อนำมาแทนในสมการที่ 2.11

- หาค่าความหนาของชั้นขอบเขต δ คำนวณโดยใช้สมการ 2.12

-

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

เมื่อ x คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับฟองอากาศ มีค่า 0.4 m

Re คือ เลขเรย์โนลด์ ซึ่งในที่นี้มีค่า 4.412×10^6

$$\text{แทนค่า } \delta = 0.16 \times \frac{0.4}{(4.412 \times 10^6)^{1/7}} = 7.19 \times 10^{-3} \text{ m}$$

- หาค่า velocity relaxation time (τ) ได้จากสมการ 2.14

$$\tau = \frac{2r_p^2 \rho_p C_c}{9\eta}$$

เมื่อ r_p คือ รัศมีของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง มีค่า $1.36 \times 10^{-5} \text{ m}$

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ในที่นี้มีค่า $1,500 \text{ kg/m}^3$

η คือ ค่าความหนืดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า $7 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$

C_c คือ Cunningham correction factor ซึ่งหาได้จากสมการ 2.15

$$C_c = 1 + \frac{2}{Pd} [6.32 + 2.01e^{(-0.1095Pd)}]$$

เมื่อ P คือ ความดันสัมบูรณ์ มีค่า $3,203.97 \text{ kPa}$

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง มีค่า $27.2 \text{ }\mu\text{m}$

เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในสมการ 2.15 จะได้

$$C_c = 1 + \frac{2}{4927.66 \times 33} [6.32 + 2.01e^{(-0.1095 \times 4927.66 \times 33)}] \\ = 191.73$$

จากนั้นนำค่าทั้งหมด แทนลงในสมการ 2.14

$$\tau = \frac{2 \left(\frac{1.36 \times 10^{-5}}{2} \right)^2 \times 1500 \times 191.73}{9 \times 7 \times 10^{-5}} = 0.169 \text{ }\mu\text{m}$$

เมื่อได้ค่า δ และค่า τ แล้วนำค่าทั้ง 2 แทนลงในสมการ 2.11

$$U = 38.39 \left(1 - \frac{279}{38.39 \times 0.169} \right) = 38.34 \text{ m/s}$$

4. คำนวณโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ทำการหามวลของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง จากสมการ 2.17

$$m = \frac{4\pi r^3 \rho_p}{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง ณ ที่นี้ มีค่า $1,500 \text{ kg/m}^3$

r คือ รัศมีของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง มีค่า $1.36 \times 10^{-5} \text{ m}$

และจากสมการโมเมนตัม

$$\bar{P} = m \cdot U$$

แทนค่าตัวแปรทั้งหมด

$$\bar{P} = \frac{4\pi(1.36 \times 10^{-5})^3 \times 1,500}{3} \cdot 38.34 = 6.063 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

5. ผลการคำนวณโมเมนตัมการชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งในแต่ละสภาวะ

ตารางที่ ค-1 ผลคำนวณขนาดของโมเมนตัมการชนในแต่ละสภาวะขาเข้าที่กำหนด

สภาวะขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์	ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/m^3)	ความเร็วที่ปลายหัวฉีด (m/s)	ความเร็วในการชนของอนุภาคน้ำแข็ง (m/s)	ขนาดของโมเมนตัมการชน ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$)
6 °C 450 psi	72.20	38.39	38.34	6.063×10^{-10}
9 °C 500 psi	81.57	43.68	43.64	8.363×10^{-10}
13 °C 600 psi	102.58	50.70	50.68	1.245×10^{-9}