

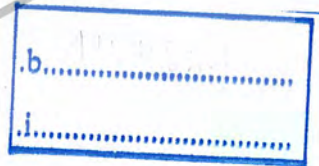
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความสัมพันธ์ทางด้านพลศาสตร์ของการดูซึมโดยใช้หอดูซึมแบบบรรจุ



นางสาวเบญจมาพร สัมฤทธิ์
นายมงคล ตันตวิวัฒน์วงศ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61430
วัน,เดือน,ปี..... 17 ก.ค. 2549



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HYDRODYNAMIC CORRELATION OF ABSORPTION IN PACKED COLUMN



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง ความสัมพันธ์ทางด้านพลศาสตร์ของการดูดซึมโดยใช้หลอดซึม
แบบบรรจุ
โดย นางสาวเบญจมาพร สัมฤทธิ์
นายมงคล ตันติวิวัฒน์วงศา
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร



ประธานกรรมการ
(ดร. อภิรักษ์ นัมคณิสร์)

กรรมการ
(รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)

กรรมการ
(ดร. สุธาณี เนมิตตพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	ความสัมพันธ์ทางด้านพลศาสตร์ของการดูดซึมโดยใช้หอดูดซึมแบบบรรจุ	
โดย	นางสาวเบ็ญจมาพร	สัมฤทธิ์
	นายมงคล	ตันติวิวัฒน์วงศา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อภินันท์	นัมคณิศรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร. ประกอบ	กิจไชยา
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี	
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์	
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของก๊าซ ความดันลด เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากตัวแปรเหล่านั้นในกระบวนการดูดซึม โดยใช้หอดูดซึมแบบบรรจุ (Packed column) ซึ่งมีวัสดุบรรจุเป็นขดลวดเหล็ก (Scrubber steel) บรรจุอยู่ในคอลัมน์ภายใต้อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ในการทดลองหาความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลดนั้น จะทำการปรับอัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของก๊าซเพื่อวัดค่าความดันลดที่เกิดขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะทำให้ได้เส้นกราฟความดันลดที่คงที่ในแต่ละค่าตั้งแต่ 1 ถึง 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุซึ่งมีอัตราการไหลของของเหลวและก๊าซที่แตกต่างกันไป จากความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้หาสมรรถนะ (capacity) ของคอลัมน์ในการรองรับปริมาณการไหลสูงสุดของของเหลวและก๊าซรวมถึงขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์

Report Title Hydrodynamic Correlation of Absorption in Packed column
 By Miss Benjamaporn Sumrit
 Mr. Mongkol Tantiviwattanawongsa
 Advisor Dr. Apinan Namkanisorn
 Co-Advisor Assoc.Prof.Dr. Prakob Kitchaiya
 Report for Bachelor's Degree of Chemical Engineering
 Department of Chemical Engineering
 Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project is to study effects of operating parameters such as liquid flow rate, gas flow rate and pressure drop on the absorption of various gas-liquid systems using a packed column under operating room temperature and atmospheric pressure condition. The non-conventional packing material used in this study is scrubber steel. The effective operating condition of the column was evaluated by varying liquid and gas flow rates to determine a corresponding pressure drop. Subsequently, the experimental results were used to establish a general correlation between pressure drop and gas and liquid flow rates. The pressure drop studied ranges from 1-6 in H₂O/ft packing at different liquid and gas flow rate. The result can be used to measure maximum vapor velocity for determining capacity and diameter of the column.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ของบุคคลเหล่านี้
คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ

1. ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำโครงการและการปรับปรุง
โครงการ รวมทั้งเป็นผู้ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในขณะที่ทำโครงการ
2. รศ.ดร. ประกอบ กิจไธยา ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการทำโครงการรวมทั้ง
การปรับปรุงและแก้ไขโครงการให้สมบูรณ์
3. อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในแต่ละวิชา อบรมสั่งสอนและ
ให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาที่ศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมเคมี
4. คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เป็นผู้ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์
และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทำโครงการ
5. ครอบครัวของคณะผู้จัดทำ ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนมาโดยตลอด
6. รุ่นพี่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ได้ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในการทำโครงการ
7. เพื่อนๆภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้กำลังใจและร่วมทุกข์ร่วมสุขกันตลอดระยะเวลา 4 ปี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฉี
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการดูซึม.....	3
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	9
บทที่ 4 ขั้นตอนการทดลอง.....	28
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	32
บทที่ 6 สรุปผลและวิเคราะห์.....	38
บทที่ 7 ข้อเสนอแนะ.....	40
เอกสารอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก.....	42

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง ก-1 แสดงค่าคงที่เฉพาะของวัสดุบรรจุที่ทำมาจากโลหะ.....	43
ตาราง ข-1 แสดงคุณสมบัติของน้ำในช่วงอุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 100 กิโล ปาสคาล (ยกเว้นค่าความดันไอ).....	44
ตาราง ค-1 เวลาในการของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันลดต่างๆ.....	45
ตาราง ค-2 เวลาในการไหลของน้ำและก๊าซฮีเลียมที่ความดันลดต่างๆ.....	48
ตาราง ค-3 เวลาในการไหลของน้ำและอากาศที่ความดันลดต่างๆ.....	49
ตาราง ค-4 แสดงผลการคำนวณสำหรับระบบของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่า ความดันลดต่างๆ.....	50
ตาราง ค-5 แสดงผลการคำนวณสำหรับระบบของน้ำและก๊าซฮีเลียมที่ค่าความดันลดต่างๆ....	53
ตาราง ค-6 แสดงผลการคำนวณสำหรับระบบของน้ำและอากาศที่ค่าความดันลดต่างๆ.....	54



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการดูดซึมของก๊าซกับของเหลว.....	3
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะกระบวนการดูดซึมที่มีการไหลทางเดียว.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะกระบวนการดูดซึมที่มีการไหลสวนทางกัน.....	5
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะกระบวนการดูดซึมที่มีการไหลแบบตั้งฉาก.....	6
รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางแสดงส่วนประกอบภายในหอบรรจุ.....	9
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแผ่นรองรับวัสดุบรรจุ.....	10
รูปที่ 3.3 วัสดุบรรจุเรียงเป็นระเบียบเพื่อเป็นตัวรองรับวัสดุบรรจุที่ไม่เป็นระเบียบ.....	11
รูปที่ 3.4 ลักษณะของตัวรองรับที่ยอมให้ก๊าซผ่านสะดวก.....	11
รูปที่ 3.5 แสดงการออกแบบตัวรองรับที่ยอมให้ก๊าซผ่านสะดวก.....	11
รูปที่ 3.6 ตัวกระจายของเหลวแบบออริฟิซ.....	12
รูปที่ 3.7 ตัวกระจายของเหลวแบบเวียร์.....	12
รูปที่ 3.8 ตัวกระจายของเหลวแบบเป็นราง.....	13
รูปที่ 3.9 ตัวกระจายของเหลวแบบเจาะรู.....	13
รูปที่ 3.10 การกระจายของเหลวใหม่.....	14
รูปที่ 3.11 ตัวกระจายของเหลวใหม่.....	15
รูปที่ 3.12 แผ่นทับหน้าวางอยู่เบดของวัสดุบรรจุ.....	16
รูปที่ 3.13 วัสดุบรรจุชนิดแรชชิก ริง (Raschig ring).....	19
รูปที่ 3.14 วัสดุบรรจุชนิดเรซซิง ริง (Lessing ring).....	20
รูปที่ 3.15 วัสดุบรรจุชนิดเบิร์ล แซดเดิล (Berl saddle).....	20
รูปที่ 3.16 วัสดุบรรจุชนิดอินทาลอกซ์ แซดเดิล (Intalox saddle).....	20
รูปที่ 3.17 วัสดุบรรจุชนิดซูเปอร์อินทาลอกซ์ (Superintalox).....	21
รูปที่ 3.18 วัสดุบรรจุชนิดพอล ริง (Pall ring).....	21
รูปที่ 3.19 วัสดุบรรจุชนิดไฮพาค (Hy-Pak).....	22
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่างความดันลดและอัตราไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส.....	25
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด.....	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 แสดงหอดูดาวแบบบรรจ.....	31
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ	32
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 2 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ	32
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 3 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ	33
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 4 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ	33
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ	34
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ	34
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 1 3 และ 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ	36
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 2 4 และ 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ	36



คำอธิบายสัญลักษณ์

L	=	ฟลักซ์การไหลของของเหลว (ปอนด์ต่อวินาที ตารางฟุต)
G	=	ฟลักซ์การไหลของก๊าซ (ปอนด์ต่อวินาที ตารางฟุต)
F	=	แฟคทิง แฟคเตอร์
μ	=	ความหนืดของของเหลว (เซนติพอยซ์)
ρ_G	=	ความหนาแน่นของก๊าซ (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)
ρ_L	=	ความหนาแน่นของของเหลว (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)
ϵ	=	สัดส่วนช่องว่างของวัสดุบรรจุ
ψ	=	อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำกับความหนาแน่นของของเหลว
α_p	=	พื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ
g_c	=	ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง (ฟุตต่อวินาที ²)
$-\Delta P$	=	ความดันลด (นิ้วน้ำ)
U_i	=	อัตราไหลเชิงปริมาตรของก๊าซ (ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปริญญานิพนธ์

ในอุตสาหกรรมเคมีนั้น กระบวนการแยกสารจัดว่าเป็นกระบวนการหนึ่ง ที่มีความสำคัญหรือมีบทบาทอย่างมาก ตัวอย่างของกระบวนการแยกสาร ได้แก่ การกลั่น (Distillation) การสกัด (Extraction) การตกผลึก (Crystallization) การดูดซับ (Adsorption) การดูดซึม (Absorption) และการแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) เป็นต้น ซึ่งจะมีวิธีการและขั้นตอนที่แตกต่างกันไป สำหรับกระบวนการแยกองค์ประกอบออกจากสารละลายเริ่มต้นที่เป็นก๊าซไปยังอีกวัฏภาคหนึ่งที่เป็นของเหลว นั้น เรียกว่า กระบวนการการดูดซึม (Absorption) ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการแยกองค์ประกอบในก๊าซสำหรับกระบวนการโดยทั่วไปและกระบวนการในอุตสาหกรรมได้ ยกตัวอย่างเช่น การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งมีอยู่ในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้สารละลายเบส การกำจัดแอมโมเนียที่มีอยู่ในอากาศโดยใช้น้ำเพื่อทำให้อากาศบริสุทธิ์ขึ้น เป็นต้น

ในกระบวนการดูดซึมและกระบวนการกลั่น นอกจากคอลัมน์แบบชั้นแล้ว อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร คือ คอลัมน์แบบบรรจุ (Packed column) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ภายในบรรจุวัสดุบรรจุที่มีสมบัติเป็นสารเฉื่อย มีรูปร่าง ขนาด และชนิดของวัสดุที่ใช้แตกต่างกันตามลักษณะของสารและระบบที่ใช้ วัสดุบรรจุที่ใช้นั้นควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสไอและเฟสของเหลวมากเพื่อทำให้คอลัมน์มีประสิทธิภาพในการแยกสารสูง

สำหรับโครงงานนี้ คอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซึมเป็นคอลัมน์แบบบรรจุ (Packed column) ภายในประกอบด้วยวัสดุบรรจุที่เป็นขดลวดเหล็ก (Scrubber steel) เป็นวัสดุที่มีราคาถูก ลักษณะของขดลวดเหล็กนั้นเป็นเส้นลวดเหล็กขนาดเล็กและยาวขดไปมาซ้อนกันหลายชั้นจนเกิดเป็นกลุ่มของขดลวดซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึงมีความเหมาะสมในการเลือกใช้เป็นวัสดุบรรจุ เพื่อทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสไอและเฟสของเหลวภายในคอลัมน์ หอดูดซึมแบบบรรจุนี้ จะใช้ทำการศึกษาดังสมรรถนะของคอลัมน์ (Column capacity) โดยหาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของของเหลวและก๊าซกับความดันตกที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้หาความเร็วสูงสุดที่คอลัมน์สามารถทำงานได้ในสภาพปกติการได้เป็นปกติ รวมทั้งนำไปใช้หาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ที่เหมาะสมในการปฏิบัติการสำหรับคอลัมน์ที่ใช้ขดลวดเหล็กเป็นวัสดุบรรจุ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการดูดซึม
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ ของเหลวและความดันลดยภายในคอลัมน์
3. เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะของหอดูดซึมแบบแพ็คคอลัมน์
4. เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบหอดูดซึม

1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

โครงการวิจัยนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากกระบวนการดูดซึมโดยมีของเหลวและแก๊สซึ่งไหลสวนทางกันภายในหอดูดซึมแบบแพ็คคอลัมน์และมีขดลวดเหล็กเป็นวัสดุบรรจุ มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของแก๊สและความดันลดยที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดที่เกิดการท่วม และจากความสัมพันธ์ที่ได้นี้ ทำให้สามารถอธิบายถึงสมรรถนะของหอดูดซึมแบบแพ็คคอลัมน์ได้ ตลอดจนนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบหอดูดซึม เช่น ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง เป็นต้น ให้เหมาะสมต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความเข้าใจในทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการดูดซึมและประเภทของหอดูดซึมแบบแพ็คคอลัมน์
2. ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ ของเหลวและความดันลดยที่เกิดขึ้นเพื่อใช้อธิบายถึงสมรรถนะของหอดูดซึมแบบแพ็คคอลัมน์ที่มีขดลวดเหล็กเป็นวัสดุบรรจุ
3. สามารถนำเอาความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการออกแบบหอดูดซึมให้มีขนาดเหมาะสมสำหรับปฏิบัติการแยกสาร
4. สามารถนำเอาความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องโดยใช้วัสดุบรรจุที่มีราคาถูก เช่น ขดลวดเหล็ก

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซึม

2.1 ความสำคัญของการดูดซึม

กระบวนการดูดซึมเป็นกระบวนการที่ก๊าซผสมถูกทำให้สัมผัสกับของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซึม (Adsorbent หรือ absorbing medium) โดยมีจุดประสงค์คือทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกออกจากก๊าซผสมละลายเข้าไปอยู่ในของเหลวและเกิดเป็นสารละลายขององค์ประกอบนั้นขึ้นมา กระบวนการนี้เป็นเทคนิคหนึ่งที่สำคัญหลักการถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลว [1] ที่มักนำไปใช้ในการแยกองค์ประกอบก๊าซที่ไม่ต้องการหรือเป็นพิษออก ทำให้ก๊าซที่ได้มีความบริสุทธิ์ขึ้นและสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ใหม่อีกครั้ง เช่น การกำจัดแอมโมเนียที่ปนมากับอากาศโดยใช้น้ำในลักษณะที่ไหลสวนทางกันแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการดูดซึมของก๊าซกับของเหลว

รูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทมวลสารจากตัวถูกละลายแอมโมเนียที่อยู่ในอากาศไปยังน้ำซึ่งเป็นตัวดูดซึมโดยมีกลไกการดูดซึม กล่าวคือที่สภาวะเริ่มต้นความดันของแอมโมเนียที่มีอยู่ในอากาศนั้นมีค่าสูงเพียงพอ ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนมีค่าสูงและมีกระบวนการแยกเกิดขึ้นคือแอมโมเนียจะถูกถ่ายเทไปยังของเหลวที่เป็นน้ำจนกระทั่งแรงขับเคลื่อนมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่มีแรงขับเคลื่อนซึ่งเป็นสภาวะสมดุลของระบบ ทำให้การถ่ายเทมวลสารไม่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องหลีกเลี่ยงสภาวะการดำเนินงานที่เป็นสภาวะสมดุล [2]

กระบวนการดูดซึมที่ใช้สำหรับแยกก๊าซออกจากก๊าซผสมมีอยู่หลายแบบ โดยความแตกต่างของกระบวนการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสารละลายที่ใช้เป็นตัวดูดซึม การเลือกสารละลายที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซึมนั้น ควรมีปัจจัยพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการละลายของก๊าซในสารละลาย (Gas Solubility)

ควรเลือกสารละลายที่มีค่าการละลายของก๊าซสูง ซึ่งโดยปกติสารละลายที่มีลักษณะทางเคมีใกล้เคียงกับก๊าซจะมีคุณสมบัติดังกล่าว การที่ก๊าซสามารถละลายแทรกเข้าไปในเนื้อสารละลายได้มากจะเป็นการเพิ่มอัตราการดูดซึม และเป็นการลดปริมาณสารละลายที่ต้องการใช้ในการดูดซึมลงด้วย

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายและก๊าซ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้ก๊าซสามารถละลายเข้าไปในสารละลายมากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากต้องการแยกก๊าซออกจากสารละลายเพื่อนำสารละลายกลับไปใช้ในกระบวนการดูดซึมใหม่แล้ว ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวต้องเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้

2. ความสามารถในการระเหยของสารละลาย (Volatility)

สารละลายที่ใช้ควรมีความดันไอต่ำหรือเป็นสารที่ระเหยได้ยาก เพื่อที่ว่าจะไม่เกิดการสูญเสียสารละลายออกไปพร้อมกับก๊าซในขั้นตอนของการทำให้ก๊าซระเหยแยกออกจากสารละลาย

3. การกัดกร่อนของสารละลาย (Corrosiveness)

สารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีซึ่งย่อมมีราคาแพง ส่งผลให้ต้นทุนของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น

4. ต้นทุน (Cost)

สารละลายที่นำมาใช้งานควรมีราคาไม่แพงและหาได้ง่าย

5. ความหนืดของสารละลาย (Viscosity)

สารละลายที่มีความหนืดต่ำจะมีข้อดีคือมีอัตราการดูดซึมสูง ลดการเกิดการท่วม (Flooding) ในหอดูดซึม นอกจากนี้ยังมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีอีกด้วย

6. ปัจจัยอื่นๆ

หากเป็นไปได้ควรเลือกใช้สารละลายที่ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟ มีความเสถียรทางเคมี และมีจุดเยือกแข็งต่ำ [1]

การจำแนกประเภทของการดูดซึมตามลักษณะการไหลระหว่างก๊าซและของเหลวสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะดังนี้

1. การไหลแบบทางเดียว (Cocurrent cascade)

เป็นลักษณะการไหลที่ก๊าซและของเหลวมีทิศทางการไหลสัมผัสกันคือ เมื่อก๊าซมีทิศทางการไหลลงจากยอดหอของเหลวก็มีทิศทางการไหลลงจากยอดหอเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามลักษณะการไหลประเภทนี้มีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

Gas Liquid

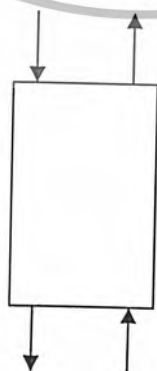


รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะกระบวนการดูดซึมที่มีการไหลทางเดียว

2. การไหลแบบสวนทางกัน (Counter current)

เป็นลักษณะการไหลที่ก๊าซและของเหลวมีทิศทางการสัมผัสแบบสวนทางกันคือ เมื่อก๊าซถูกปล่อยขึ้นจากก้นหอ ส่วนของเหลวจะถูกปล่อยจากยอดหอ ซึ่งพบว่าเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง แสดงได้ดังรูปที่ 2.3

Gas

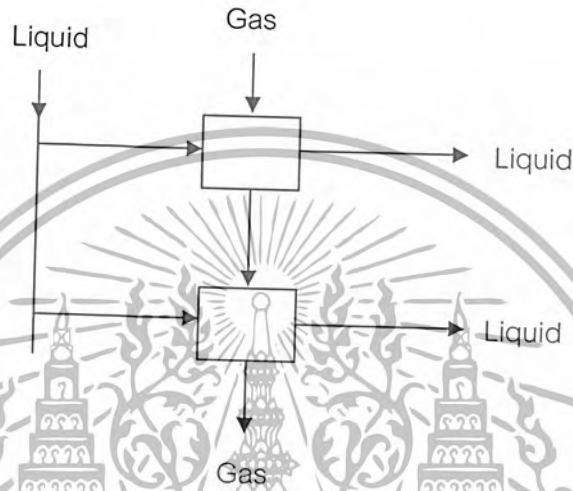


Liquid

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะกระบวนการดูดซึมที่มีการไหลสวนทางกัน

3. การไหลแบบตั้งฉาก (Crosscurrent cascade)

เป็นลักษณะการไหลที่ก๊าซและของเหลวมีทิศทางการไหลตั้งฉากกันคือ เมื่อก๊าซปล่อยจากด้านซ้ายของหอของเหลวก็จะถูกปล่อยออกจากยอดหอและตัวทำละลายจะมีการแบ่งออกเป็นส่วนๆเพื่อป้อนเข้าหอดูดซึม ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน [2] แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะกระบวนการดูดซึมที่มีการไหลแบบตั้งฉาก

2.2 ประเภทของหอดูดซึม

ปกติหอดูดซึมในอุตสาหกรรมต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวมาก
2. มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทสูง (High Mass Transfer Coefficient)
3. มีแรงขับเคลื่อนสูง (High Driving Force) เช่น ความดันย่อยสูง (Partial Pressure)
4. มีผลต่างของความเข้มข้นสูง (Concentration Difference)

หอดูดซึมในอุตสาหกรรมแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภท

1. แบบเป็นชั้น (Stagewise)

การถ่ายเทมวล และความร้อนจะเกิดขึ้นในจุดที่ของเหลวสัมผัสกับก๊าซในแต่ละชั้นเท่านั้น ซึ่งการสัมผัสจะเป็นช่วงๆไม่ติดต่อกัน ตัวอย่างของหอดูดซึมแบบนี้คือ

1.1 หอแผ่นบับเบิลและหอแผ่นตะแกรง (Bubble-Plate, Sieve-Plate Tower)

เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทมวลที่ใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในกระบวนการกลั่นซึ่งประกอบด้วยแผ่นหรือถาดโลหะจัดเรียงซ้อนกันในแนวตั้ง ลักษณะของแผ่นที่ใช้กันมากที่สุดคือแบบบับเบิลหรือแบบตะแกรง โดยการที่ของเหลวจะไหลจากส่วนบนลงสู่ส่วนล่างของหอโดยผ่านแผ่นบับเบิลหรือตะแกรง ซึ่งอยู่ลดหลั่นกัน และก๊าซจะไหลจากทางด้านล่างผ่านรูเล็กของแผ่นตะแกรงหรือแผ่นบับเบิลเกิดเป็นฟองก๊าซผ่านชั้นของเหลวเกิดการผสมกันระหว่างไอกับของเหลว

2. แบบสัมผัสต่อเนื่อง (Continuous contact)

การดูดซึมในลักษณะนี้เกิดจากการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องของทั้งสองวัฏภาคตลอดช่วงความสูงของหอ ดังนั้นการถ่ายเทมวลและความร้อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วทั้งหอโดยที่หอดูดซึมประเภทนี้นิยมใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากสามารถแยกก๊าซได้อย่างต่อเนื่องและได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูง ตัวอย่างของหอดูดซึมประเภทนี้คือ

2.1 หอผนังเปียก (Wetted wall column)

การดูดซึมทำได้โดยการปล่อยให้ของเหลวไหลเวียนไปบนผนังที่ตรงไว้ในแนวตั้ง และสัมผัสกับก๊าซที่อยู่รอบข้างซึ่งการสัมผัสอาจเป็นแบบสวนทางกันหรือทางเดียวกันก็ได้ ในระยะแรกเป็นวิธีที่ใช้กันวิจัยเป็นหลัก แต่ในปัจจุบันได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์หรือในกรณีที่เกิดการดูดซึมเป็นแบบเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วย ผนังที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นผนังมัดท่อจำนวนมาก

ข้อดีของการดูดซึมประเภทนี้คือสะดวกในการกำจัดความร้อนที่เกิดจากสารละลายหรือจากปฏิกิริยาโดยใช้น้ำหล่อเย็น นอกจากนี้ยังทราบพื้นที่สัมผัสของก๊าซและของเหลวที่แน่นอน

2.2 หอสเปรย์ (Spray tower)

เป็นลักษณะห้องขนาดใหญ่โดยที่ของเหลวไหลเข้าทางด้านบนผ่านหัวฉีดลงสู่ด้านล่างสวนทางกับกระแสก๊าซซึ่งไหลเข้าทางด้านล่าง ของเหลวที่ผ่านหัวฉีดจะอยู่ในรูปของหยดของเหลวเล็กๆทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างวัฏภาค อัตราการถ่ายเทมวล

2.3 หอบับเบิล (Bubble tower)

จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับหอสเปรย์คือ ก๊าซจะไหลผ่านวัฏภาคของเหลวในลักษณะฟองอากาศเล็กๆ การถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศ และระยะที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านของเหลว การเคลื่อนที่ของฟองอากาศจะช่วยลดความต้านทานในวัฏภาคของเหลว หอชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับการถ่ายเทมวลที่ถูกควบคุมด้วยวัฏภาคของเหลว การทำงานเป็นกะตลอดจนถึงแบบต่อเนื่องก็ได้ แต่มีข้อเสียที่ความดันลดของหอนี้มีค่าสูง

2.4 หอบรรจุ (Packed tower)

มีลักษณะเป็นทรงกระบอกวางในแนวตั้งภายในบรรจุวัสดุโดยที่ของเหลวและก๊าซส่วนมากจะไหลสวนทางกัน การที่ของเหลวไหลผ่านวัสดุบรรจุทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางๆ เป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัส หอบรรจุสามารถใช้งานได้ดีในระบบการถ่ายเทมวลซึ่งถูกควบคุมโดยความต้านทานในวัฏภาคใดก็ได้ หรือเมื่อความต้านทานในวัฏภาคมีความสำคัญพอกัน วัสดุที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่สัมผัสอาจเป็น พลาสติก เซรามิกหรือก้อนกรวด โดยมีการออกแบบเป็นรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้วัสดุนั้นๆ ต้องไม่ทำปฏิกิริยากับของไหลและใช้งานได้ดีที่อุณหภูมินั้นๆ

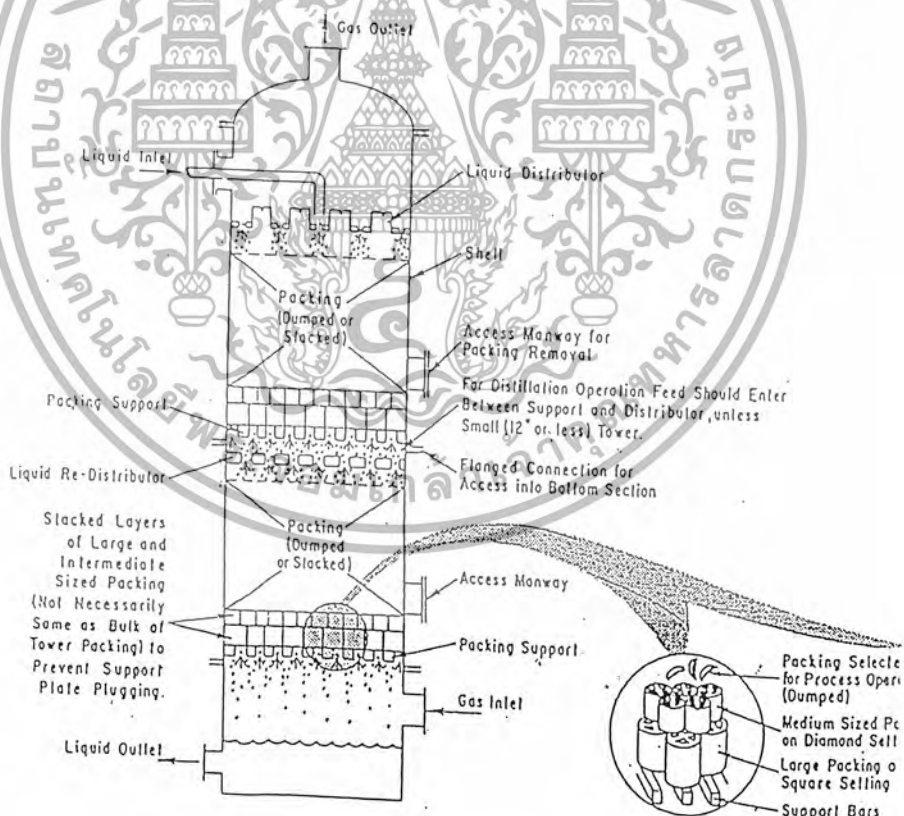
2.3 หลักการทั่วไปของหอบรรจุแบบไหลสวนทาง

จุดมุ่งหมายทั่วไปของหอบรรจุ คือการกระจายก๊าซมาสัมผัสกับของเหลวอย่างทั่วถึงโดยที่ของเหลวจะไหลจากด้านบนโดยใช้ตัวกระจายของเหลว และก๊าซถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ ซึ่งเป็นการไหลสวนทางกันโดยที่ของเหลวซึ่งเรียกว่าลิควอร์ (Liquor) เป็นตัวทำละลายทำหน้าที่ละลายก๊าซซึ่งเป็นตัวถูกละลายที่ต้องการในก๊าซผสมโดยที่อัตราการถ่ายเทมวลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย ทั้งในของเหลวและก๊าซ อัตราการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและก๊าซและลักษณะการไหลของของเหลวและก๊าซซึ่งพื้นที่สัมผัสจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของวัสดุบรรจุ [3]

บทที่ 3 ทฤษฎี หอบรรจุ

3.1 ลักษณะทั่วไปของหอบรรจุ

หอบรรจุ (Packed tower) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้แพร่หลาย ตามปกติการทำงาน ของคอลัมน์แบบนี้จะเป็นแบบไหลสวนทางกัน (Counter – current flow) โดยที่ของเหลวจะไหล จากด้านบนของหอบรรจุโดยตัวกระจาย (Distributor) และก๊าซถูกป้อนเข้าทางตอนล่างของ คอลัมน์ ของเหลวซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายจะละลายองค์ประกอบของก๊าซซึ่งเป็นตัวถูกละลาย ที่ต้องการในก๊าซผสมก่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างไอและของเหลว ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลขึ้นโดย ที่อัตราการถ่ายเทมวลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างความเข้มข้นในตัวถูกละลาย ในตัวทำละลาย ระหว่างของเหลวและในก๊าซ ซึ่งการไหลแบบสวนทางกันจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไหลแบบ ทางเดียว (Co – current flow)



รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางแสดงส่วนประกอบภายในหอบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

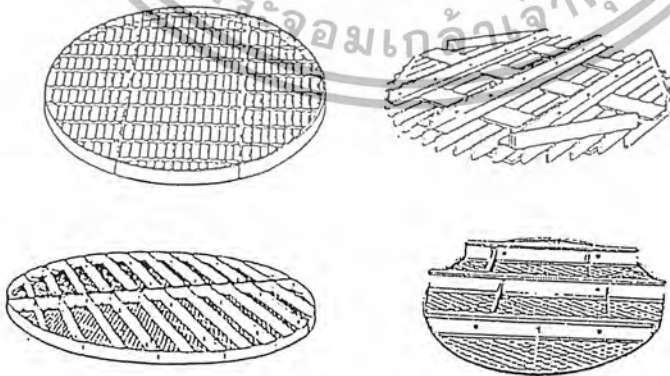
หอบรรจุประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานคือ ตัวคอลัมน์ วัสดุบรรจุ และส่วนประกอบภายในหอบรรจุ เช่น ตัวรองรับวัสดุบรรจุ ตัวกระจายของเหลว เป็นต้น รูปที่ 3.1 เป็นภาคตัดขวางแสดงส่วนประกอบภายในคอลัมน์ ปกติแล้วหอบรรจุมักมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซึ่งอาจทำด้วยแก้ว โลหะหรือพลาสติกเสริมแรง การเลือกใช้จะต้องคำนึงถึง อุณหภูมิ ความดัน และสภาวะการกักถ่วง

3.2 ส่วนประกอบภายในหอบรรจุ

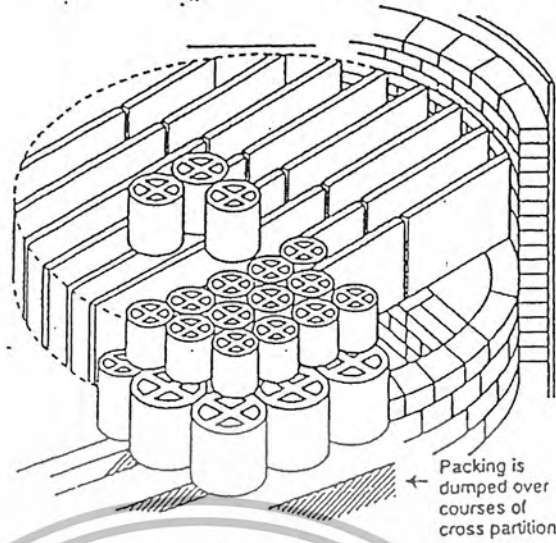
หลังจากการเลือกชนิดของหอบรรจุและทราบขนาดของหอบรรจุแล้ว (นั่นคือทราบความสูงและพื้นที่ตัดขวาง) สิ่งที่สำคัญอันดับต่อไปก็คือการเลือกส่วนประกอบภายในหอบรรจุ ในการออกแบบนั้นจำเป็นต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อให้ได้สมรรถนะ (Performance) ที่ดี

1. แผ่นรองรับวัสดุบรรจุ (Packing support)

หน้าที่ของแผ่นรองรับมีไว้เพื่อรับน้ำหนักของวัสดุบรรจุที่เปียกในขณะเดียวกันก็จะยอมให้ก๊าซไหลผ่านได้สะดวก แผ่นรองรับที่ออกแบบไม่ดีจะทำให้ความดันลดสูงและเกิดการท่วมของของเหลวได้ กริด (Grid) หรือแผ่นรูพรุน (Perforated plate) อย่างธรรมดาแต่จำเป็นต้องยอมให้ของเหลวและก๊าซไหลผ่านช่องทางเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2 บางครั้งมีการใช้กริดที่ให้ช่องว่างกว้างเพื่อให้ของเหลวไหลผ่านได้ดีแล้ววางวัสดุบรรจุขนาดใหญ่ลงถึงสามชั้นเพื่อเป็นตัวรองรับวัสดุบรรจุขนาดเล็กที่ใส่ในคอลัมน์แบบไม่เป็นระเบียบ (Random or dumped packing) แสดงดังรูปที่ 3.3 การออกแบบแผ่นรองรับวัสดุบรรจุที่เหมาะสมควรแยกช่องทางไหลของก๊าซออกจากของเหลว (ดูรูปที่ 3.4 และ 3.5) การออกแบบเช่นนี้จะให้ความดันลดต่ำและแทบจะไม่มีโอกาสเกิดการท่วมของของเหลวบนแผ่นรองรับ แผ่นรองรับจะมีขนาดต่างๆกัน วัสดุที่ใช้ อาจจะเป็นโลหะ เซรามิก และพลาสติก



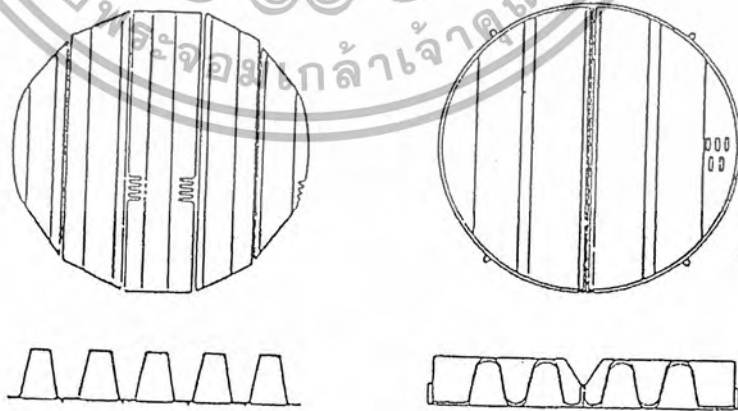
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแผ่นรองรับวัสดุบรรจุ



รูปที่ 3.3 วัสดุบรรจุเรียงเป็นระเบียบเพื่อเป็นตั้งรองรับวัสดุบรรจุที่ไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.4 ลักษณะของตัวรองรับที่ยอมให้ก๊าซผ่านสะดวก

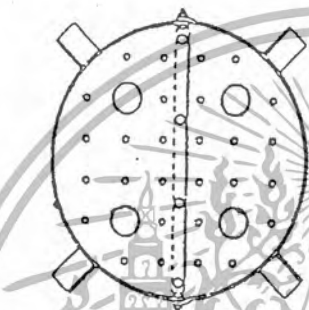


รูปที่ 3.5 แสดงการออกแบบตัวรองรับที่ยอมให้ก๊าซผ่านสะดวก

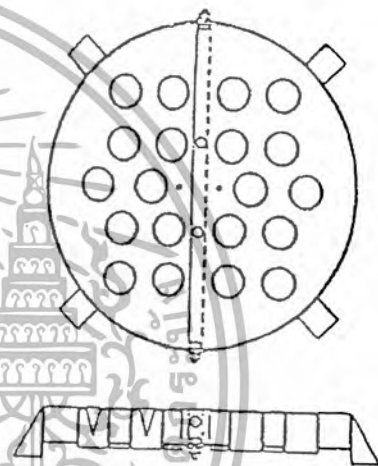
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวกระจายของเหลว (Liquid distributor)

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงในหอบรรจุ การกระจายของของเหลวนับว่าสมบูรณ์แบบจนถึงและสม่ำเสมอเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นจะพบว่ามีแบบของตัวกระจายของเหลวหลายแบบ เช่น ถ้าหอบรรจุมีขนาดเล็กจะมีตัวกระจายของเหลวขนาดเล็กซึ่งมีเพียงรูเปิดตรงกลางหรือหัวฉีดฝอยเพียงตัวเดียวก็เพียงพอสำหรับการกระจายของเหลวที่ดีแต่สำหรับวัสดุบรรจุที่มีขนาดใหญ่ การออกแบบตัวกระจายของเหลวจะยุ่งยากมากเพราะจะต้องสามารถกระจายของเหลวได้ดีทุกค่าอัตราการไหลของของเหลว แบบของตัวกระจายที่นิยมใช้มากที่สุดมีสองแบบ คือ แบบออริฟิซ (ดูรูปที่ 3.6) และแบบเวียร์ (ดูรูปที่ 3.7)



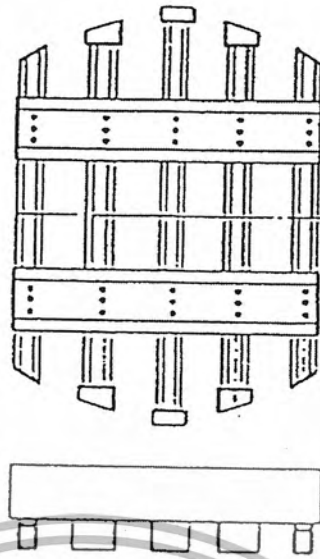
รูปที่ 3.6 ตัวกระจายของเหลวแบบออริฟิซ



รูปที่ 3.7 ตัวกระจายของเหลวแบบเวียร์

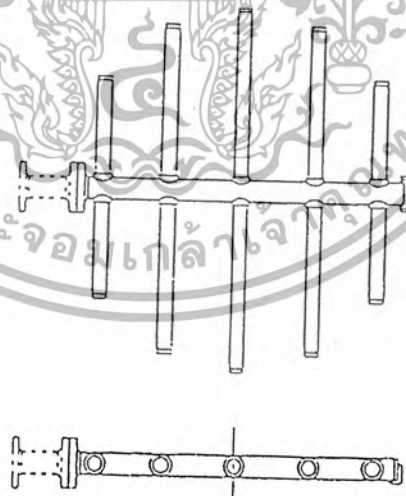
ในแบบออริฟิซ ของเหลวจะไหลผ่านรูต่างๆที่อยู่บนแผ่นกระจายของเหลวและก๊าซจะไหลขึ้นตามท่อสั้นที่ติดอยู่บนแผ่นกระจายของเหลวซึ่งจะมีขนาดพื้นที่เพียงพอเพื่อให้ก๊าซไหลอย่างสะดวกโดยเกิดความดันลดน้อยที่สุด ส่วนรูที่ของเหลวไหลลงควรมีขนาดเล็กเพียงพอเพื่อให้มีระดับของเหลวอยู่บนแผ่นกระจายสำหรับอัตราการไหลของของเหลวที่ต่ำที่สุด และในทางตรงกันข้ามรูจะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถป้องกันการล้นของอัตราการไหลของเหลวสูงสุด สำหรับเวียร์นั้นของเหลวจะไหลลงที่รอยบากของเวียร์ ส่วนก๊าซไหลขึ้นโดยใช้ท่อของเวียร์ เวียร์สามารถใช้ในช่วงของอัตราการไหลของของเหลวกว้างกว่าแบบออริฟิซ

สำหรับหอบรรจุที่มีขนาดใหญ่ตัวกระจายแบบเป็นราง (Trough) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สามารถให้การกระจายตัวของของเหลวที่ดีและให้พื้นที่อิสระที่ก๊าซสามารถไหลขึ้นมาได้สูง



รูปที่ 3.8 ตัวกระจายของเหลวแบบเป็นราง

การไหลผ่านตัวกระจายของเหลวต้องอาศัยแรงโน้มถ่วง ดังนั้นอาจจะเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีได้ จึงมีแบบของตัวกระจายอีกแบบหนึ่ง คือ ตัวกระจายแบบเจาะรู รูปที่ 3.9 โดยของเหลวป้อนเข้าสู่คอลัมน์โดยใช้เครื่องสูบล (หรือของเหลวที่อยู่ภายใต้ความดัน) ดังนั้นอัตราการไหลของของเหลวจะคงที่และท่อกระจายหรือแผ่นออริฟิซควรเลือกขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้การไหลของของเหลวเกิดขึ้นทุกรูบนท่อกระจายหรือบนแผ่นออริฟิซ



รูปที่ 3.9 ตัวกระจายของเหลวแบบเจาะรู

3. ตัวกระจายของเหลวใหม่ (Liquid redistributor)

ของเหลวเมื่อไหลลงบนตัวบรรจุที่อยู่ในหอบรรจุของเหลวจะซึมผ่านตัวบรรจุลงสู่ก้นหอ โดยไหลลงในแนวตั้ง ขณะเดียวกันก็ไหลก็ไหลสู่ทางออกด้านข้างเข้าหาผนังท่อ ช่องว่างที่เกิดจากผนังคอลัมน์กับวัสดุบรรจุจะมีช่องว่างสำหรับการไหลของของไหลมากกว่าบริเวณที่เป็นวัสดุบรรจุอย่างเดียว โดยปกติแล้วของเหลวมักจะไหลผ่านทางไหลที่สะดวกกว่า ดังนั้นของเหลวส่วนใหญ่เมื่อไหลผ่านวัสดุบรรจุไปได้ระยะหนึ่งก็จะไหลไปตามผนังท่อแทนการไหลผ่านวัสดุบรรจุที่อยู่ตรงกลาง วัสดุบรรจุที่อยู่ตรงกลางจึงไม่สัมผัสกับของเหลวเลยทำให้ประสิทธิภาพของคอลัมน์ลดลง เพื่อไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงจำเป็นต้องใส่ตัวกระจายของเหลวใหม่เพื่อให้ของเหลวส่วนใหญ่ที่ที่ไหลอยู่ใกล้กับผนังท่อกลับมาไหลกระจายตัวผ่านวัสดุบรรจุอีกครั้งและยังสามารถสามารถทำหน้าที่เป็นเป็นตัวรองรับวัสดุบรรจุที่อยู่ด้านบนได้ด้วย



รูปที่ 3.10 การกระจายของเหลวใหม่

สำหรับอีกแบบหนึ่งของตัวกระจายของเหลว ได้แก่ แบบกวาดผนัง (Wall wiper) แบบนี้จะประกอบด้วยวงแหวนซึ่งรวบรวมของเหลวจากผนังคอลัมน์ แล้วเปลี่ยนทิศทางการไหลสู่ศูนย์กลางของคอลัมน์ซึ่งส่วนมากมักใช้กับคอลัมน์ที่มีขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่น คอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.6 เมตร การออกแบบตัวกระจายของเหลวจะต้องระมัดระวังการท่วมเฉพาะที่ของของเหลวและต้องให้การไหลของก๊าซเป็นไปอย่างสะดวกด้วย (ตัวอย่างจากรูปที่ 3.11)

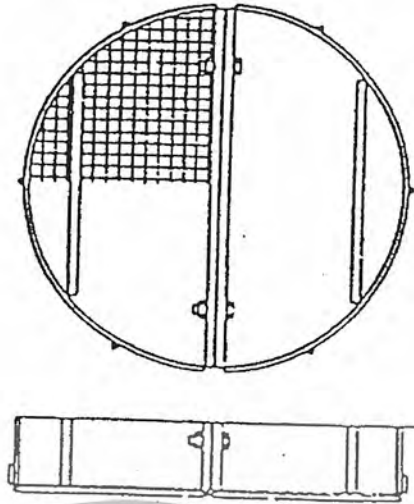
ระยะที่สูงที่สุดจากเบตสำหรับติดตั้งตัวกระจายของเหลวนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุบรรจุและกรรมวิธีที่ใช้ หอแบบบรรจุที่ใช้ในกระบวนการกลั่นจะมีการกระจายของเหลวต่ำกว่ากระบวนการดูดซึม ในทางปฏิบัติทั่วไปมักใช้ความสูงของเบตไม่ควรเกิน 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์สำหรับแรซซิก ริง และไม่ควรเกิน 8 ถึง 10 เท่าสำหรับพอลริงและเบิร์ต แซดเดิล สำหรับคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่มาก ความสูงของเบตจะถูกจำกัดโดยน้ำหนักสูงสุดของวัสดุบรรจุซึ่งรองรับโดยตัวรองรับและผนังคอลัมน์ซึ่งความสูงนี้ควรมีค่าประมาณ 8 เมตร



รูปที่ 3.11 ตัวกระจายของเหลวใหม่

4. แผ่นทับหน้า (Hold – down plate)

ที่อัตราการไหลของก๊าซที่มีค่าสูงและพบว่าวัสดุบรรจุเกิดการเคลื่อนที่ฟุ้งกระจายแล้วลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของคอลัมน์ (Fluidization) ภายใต้สภาวะเช่นนี้ วัสดุบรรจุที่เป็นเซรามิกอาจแตกได้และชิ้นส่วนเล็กๆอาจจะหล่นลงมาสู่วัสดุบรรจุที่อยู่ข้างล่าง ถ้าวัสดุเป็นโลหะหรือพลาสติกก็อาจจะลอยออกจากคอลัมน์ได้ ดังนั้น แผ่นทับหน้าจะวางอยู่บนเบตเพื่อป้องกันการเกิดฟลูอิดไดซ์ (รูปที่ 3.12) ช่องเปิดของแผ่นทับหน้าจะมีขนาดเล็กกว่าวัสดุบรรจุแต่ไม่กีดขวางการไหลของก๊าซและของเหลว [3]



รูปที่ 3.12 แผ่นทึบหน้าวางอยู่เบดของวัสดุบรรจุ

ในการออกแบบหอบรรจุมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายประการ เช่น ความดันลด อัตราการไหล และน้ำหนักของหอ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ให้สอดคล้องกับสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. ความดันลดต่ำ (Low pressure drop)

ในหอแบบบรรจุทั่วไป วัสดุบรรจุเป็นสิ่งที่สำคัญที่ก่อให้เกิดความต้านทานการไหลภายในคอลัมน์ ถ้ามีช่องว่างระหว่างวัสดุบรรจุก็จะทำให้เกิดความดันลดลงด้วย

2. สมรรถนะในการรองรับปริมาณหรืออัตราการไหลของของไหลสูง (High capacity)

หอแบบบรรจุจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมในการรองรับปริมาณหรืออัตราการไหลของของไหลสูงๆ และวัสดุบรรจุภายในคอลัมน์จะต้องมีคุณสมบัติที่ก่อให้เกิดการไหลของของไหลได้สะดวกและมากพอที่จะไม่ก่อให้เกิดความดันลดสูงหรือไม่เกิดการสะสมของของไหลจนเกิดการท่วม (Flooding) ในคอลัมน์

3. น้ำหนักและลิกวิด โฮลด์อัฟต่ำ (Low weight and low liquid hold up)

น้ำหนักรวมของคอลัมน์ น้ำหนักของวัสดุบรรจุและน้ำหนักที่เกิดจากลิกวิด โฮลด์อัฟในหอ ต้องน้อยเพื่อก่อให้เกิดลิกวิด โฮลด์อัฟได้เพียงพอสำหรับการถ่ายเทมวลที่ดี

4. พื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรสูง (Large active surface area per unit volume)

วัสดุบรรจุภายในคอลัมน์ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสไอและเฟสของเหลวสูง ย่อมทำให้คอลัมน์มีประสิทธิภาพสูง

5. ปริมาตรช่องว่างต่อหน่วยปริมาตรรวมสูง (Large free volume per unit total volume) กรณีที่ภายในคอลัมน์มีช่องว่างระหว่างวัสดุบรรจุมาก เมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมด จะทำให้ประสิทธิภาพของคอลัมน์สูงด้วย

6. สมบัติอื่นๆ

เช่น คอลัมน์และวัสดุบรรจุควรมีความต้านทานการกัดกร่อน มีความทนทาน เป็นต้น [4]

3.3 เจือไนท์ทั่วไปที่หอบรรจุเอื้ออำนวยต่อการใช้งาน

1. เหมาะกับการใช้งานกับกรดและสารที่กัดกร่อนชนิดอื่นๆได้ เพราะสามารถเลือกใช้วัสดุบรรจุเป็นเซรามิก (Ceramic) หรือวัสดุที่ต้านทานการกัดกร่อนได้
2. ภายใต้ระบบสุญญากาศ ความดันลดที่เกิดขึ้นสำหรับวัสดุบรรจุที่ค่าน้อยกว่าคอลัมน์แบบชั้นมาก
3. ด้วยวิธีการหรือระบบที่เข้าไปเกี่ยวข้องกับความดันลดที่มีค่าน้อยนั้นเมื่อเทียบกับคอลัมน์แบบชั้นแล้วจะพบว่า คอลัมน์ที่ใช้วัสดุบรรจุจะเหมาะแก่การนำไปใช้ในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเลือกใช้วัสดุบรรจุเพื่อจะให้เกิดความดันลดต่ำที่สุด ตัวอย่างของคอลัมน์ได้แก่ คอลัมน์ภายใต้ความดันบรรยากาศ คอลัมน์ภายใต้ความดันต่ำ เป็นต้น
4. สำหรับคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 3 ฟุตแล้วจะเป็นการยุ่งยากในการติดตั้ง คอลัมน์ชนิดชั้นจึงนิยมใช้คอลัมน์ชนิดที่มีวัสดุบรรจุมากกว่า
5. วัสดุบรรจุจะให้ค่าความดันลดและประสิทธิภาพที่เหมาะสม
6. ภายในหอแบบบรรจุของเหลวจะเปลี่ยนเป็นฟองและสัมผัสกับไอน้ำมากยิ่งขึ้น

3.4 เจือไนท์ที่หอบรรจุไม่เอื้ออำนวยต่อการใช้งานเมื่อเทียบกับหอประเภทชั้น

1. หอประเภทชั้นจะสามารถถอดทำความสะอาดได้ง่ายกว่าหอประเภทบรรจุ
2. วัสดุบรรจุจำนวนหนึ่งอาจสูญหายหรือแตกหักได้ง่ายในระหว่างที่ทำการบรรจุเข้าไปภายในหอหรืออาจได้รับความเสียหายจากการขยายตัวและหดตัวของอุณหภูมิ
3. หอประเภทชั้นมีความสามารถในการจัดการกับวัตถุดิบปริมาณมากได้ดีกว่าหอบรรจุ เพราะสามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่มากๆได้
4. หอบรรจุไม่เหมาะกับการใช้งานที่อัตราการป้อนของเหลวต่ำเพราะจะเป็นการลดประสิทธิภาพในการสัมผัสกันระหว่างเฟสไอกับเฟสของเหลวลง

3.5 ปัญหาในการออกแบบ

ปัญหาสำคัญในการออกแบบหอประเภทบรรจุ คือ การเลือกวัสดุบรรจุ โดยควรเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับสารที่ใช้ในกระบวนการ อีกทั้งควรคำนึงถึงค่าความดันลดที่จะเกิดขึ้นภายในหอ ปัจจุบันวัสดุบรรจุแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด เช่น แรชชิก ริง (Raschig ring) เบิร์ล แซดเดิล (Berl saddle) เป็นต้น โดยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติจำเพาะเจาะจง ทั้งในด้านพื้นผิวสำหรับการใช้งาน ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นและราคา [5]

3.6 วัสดุบรรจุ (Packing)

วัสดุบรรจุที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

1. ควรให้มีพื้นที่เปียกของของเหลวต่อปริมาตรของหอนี้ค่ามากเพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial area) สำหรับวัฏภาคที่จะสัมผัสกันมาก
2. ควรมีปริมาณของช่องว่าง (Void volume) มาก ทั้งนี้เพื่อให้ของไหลทั้งสองไหลผ่านกันได้สะดวกไม่เกิดความดันลดมากเกินไป
3. ควรมีลักษณะที่เปียกของเหลวได้ดี
4. ควรมีความหนาแน่นต่ำเพราะว่าในหอบรรจุที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักของวัสดุจะมากซึ่งมีผลต่อการคำนวณของวัสดุบรรจุให้อยู่ภายในหอได้
5. ควรมีราคาไม่แพง
6. อายุการใช้งานนาน ไม่สึกหรองง่าย
7. มีรูปร่างเหมาะสม [3]

3.6.1 ชนิดของวัสดุบรรจุ (Type of packing) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1. วัสดุบรรจุแบบสุ่ม (Random or dumped packings)

วัสดุบรรจุชนิดนี้จะมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันไป และไม่ยึดติดอยู่ภายในคอลัมน์ การนำไปใช้คือเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้กับของเหลวและก๊าซที่ไหลอยู่ภายในคอลัมน์ยกตัวอย่างเช่น แรชชิก ริง (Raschig ring) เบิร์ล แซดเดิล (Berl saddle) เป็นต้น

2. วัสดุบรรจุแบบโครงสร้าง (Structured packings)

วัสดุบรรจุชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายการพับของขดลวดไปมาเป็นแผ่นซึ่งมีโครงสร้างและรูปร่างที่ยึดติดอยู่ภายในคอลัมน์ การนำไปใช้คือเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้กับของเหลวและก๊าซที่ไหลอยู่ภายในคอลัมน์

3. วัสดุบรรจุชนิดกริด (Grids)

วัสดุบรรจุชนิดนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับวัสดุบรรจุแบบโครงสร้างแต่จะแตกต่างกันตรงที่วัสดุบรรจุแบบกริดนั้นจะเป็นโครงสร้างแบบแลตทิซ (Open-lattice structure)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าวัสดุบรรจุแบบสุ่มมักจะนิยมนำมาใช้เป็นส่วนใหญ่ในทางการค้าเมื่อเทียบกับวัสดุบรรจุประเภทอื่น ๆ ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่ามีความยุ่งยากในการทำความสะดวก

3.6.2 วัตถุประสงค์ของการนำเอาวัสดุบรรจุมาใช้

1. เพื่อที่จะให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสสูงสุดโดยพบว่าประสิทธิภาพจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของวัสดุมีค่าลดลง
2. เพื่อช่วยให้มีการกระจายไปบนพื้นผิวอย่างทั่วถึง
3. เพื่อช่วยทำให้ของเหลวและก๊าซมีการสัมผัสกันอย่างทั่วถึง จึงทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการถ่ายเทมวลสารของสองวัฏภาค

3.6.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกชนิดของวัสดุบรรจุมาใช้

1. จะต้องต้องมีช่องว่างเพียงพอเพื่อให้ก๊าซสามารถเคลื่อนที่ไปข้างบนได้อย่างอิสระและทั่วถึง
2. จะต้องต้องมีแรงเสียดทานระหว่างผิวของวัสดุบรรจุกับก๊าซหรือของเหลวที่เหมาะสม
3. มีความต้านทานต่อการสูญเสียรูปแบบหรือการแตกหักได้ดี
4. สามารถทำความสะอาดได้ง่าย
5. มีของเหลวตกค้างน้อย [6]

3.6.4 ตัวอย่างวัสดุบรรจุแบบสุ่ม (Random packings)

1. แรชชิก ริง (Raschig ring)

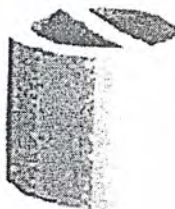
วัสดุบรรจุชนิดนี้เป็นชนิดแรกที่มีการใช้เป็นเวลานานและมีราคาถูก โดยจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกใกล้เคียงกับความยาวแสดงดังรูปที่ 3.13 ส่วนใหญ่วัสดุบรรจุชนิดนี้มักจะทำมาจากเซรามิก โลหะ พลาสติกหรือเหล็กคาร์บอน



รูปที่ 3.13 วัสดุบรรจุชนิดแรชชิก ริง (Raschig ring)

2. เรซซิง ริง (Lessing ring)

มีลักษณะคล้ายกับเรซซิก ริง (Raschig ring) แต่จะแตกต่างกันตรงที่มีการแบ่งครึ่งภายในวัสดุบรรจุโดยนำเอาแผ่นมาคั่นตรงกลางไว้เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วัสดุบรรจุชนิดเรซซิง ริง (Lessing ring)

3. เบิร์ล แซดเดิล (Berl saddle)

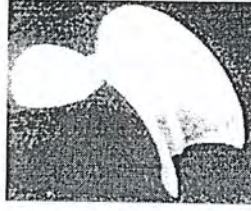
วัสดุบรรจุชนิดนี้ได้ถูกพัฒนาให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มมากขึ้นกว่าวัสดุบรรจุ 2 ประเภทแรกทั้งนี้ก็เพื่อที่จะให้มีความดันลดต่ำลงแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 ดังนั้นจึงทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเรซซิก ริง และ เรซซิง ริง



รูปที่ 3.15 วัสดุบรรจุชนิดเบิร์ล แซดเดิล (Berl saddle)

4. อินทาลอกซ์ แซดเดิล (Intalox saddle)

เป็นวัสดุบรรจุที่ถูกพัฒนาและปรับปรุงมาจากเบิร์ล แซดเดิล (Berl saddle) ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะลดช่องว่างภายในวัสดุบรรจุซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดการตกค้างของของเหลวภายในวัสดุบรรจุ และการเกิดบับเบิลแก๊สได้ โดยการปรับแต่งช่องทางการไหลของของเหลวและก๊าซเพื่อให้เกิดสมรรถนะและมีประสิทธิภาพที่ดี อีกทั้งยังให้ค่าความดันลดต่ำกว่า ดังรูปที่ 3.16 [5]



รูปที่ 3.16 วัสดุบรรจุชนิดอินทาลอกซ์ แซดเดิล (Intalox saddle)

5. ซุปเปอร์อินทาลอกซ์ (Superintalox)

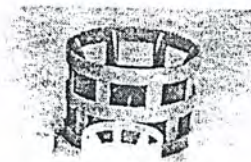
เป็นวัสดุบรรจุที่ถูกพัฒนาและนำมาปรับปรุงโดยตรงปลายของอินทาลอกซ์ แซดเดิล (Intalox saddle) นั้นจะมีพื้นผิวที่ไม่เรียบเสมอกันหรือมีการแหงนคอดเข้าไปข้างใน ดังรูปที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงนี้จะช่วยป้องกันการเกิดของเหลวตกค้างภายในห่อให้ดียิ่งขึ้นและทำให้มีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพและสมรรถนะที่สูงขึ้น ส่วนใหญ่วัสดุบรรจุชนิดนี้มักทำมาจากเซรามิกและพลาสติก [6]



รูปที่ 3.17 วัสดุบรรจุชนิดซุปเปอร์อินทาลอกซ์ (Superintalox)

6. พอล ริง (Pall ring)

เป็นวัสดุบรรจุที่ปรับปรุงมาจากแรชชิก ริง (Raschig ring) โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาวที่มีการเจาะผนังภายในเข้าไปบางส่วนแสดงดังรูปที่ 3.18 ซึ่งการเจาะพื้นผิวจะทำให้ก๊าซและของเหลวไหลได้ดี อีกทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสระหว่างเฟสไอและเฟสของเหลว [5]



รูปที่ 3.18 วัสดุบรรจุชนิดพอล ริง (Pall ring)

7. ไฮพาค (Hy-Pak)

คล้ายคลึงกับพอล ริง (Pall ring) แต่มีล้นข้างในมากกว่าเพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัส ให้มีค่ามากขึ้นอีกทั้งยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและสมรรถนะในการใช้งานได้ดีกว่าพอลริง (Pall ring) โดยส่วนใหญ่แล้วมักมาจากโลหะ แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วัสดุบรรจุภัณฑ์ไฮพาค (Hy-Pak)

นอกจากนี้ก็มีอินทาลอกซ์ เมทัล (Intalox metal) คาสเคด (Cascade) เคมพาค (Chempak) นัตเตอร์ (Nutter ring) เฟล็กซ์แมกซ์ (Fleximax) ฮีฟโฟลว์ (Hiffflow ring) อิมแพค (Impac) เป็นต้น

3.6.5 ประเภทของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นวัสดุบรรจุ

ส่วนใหญ่แล้วประเภทของวัสดุที่นำมาใช้ทำมักจะคำนึงถึงความสามารถในการทนทานต่อการสึกกร่อน พอจำแนกได้ดังต่อไปนี้

1. โลหะ (Metal)

เหล็กคาร์บอนมักเป็นตัวเลือกแรกที่ถูกนำมาใช้ในระบบที่ไม่มีกรดกัดกร่อน เมื่อเทียบกับเซรามิกและพลาสติกพบว่าเหล็กคาร์บอนมีประสิทธิภาพและสมรรถนะที่ดีกว่า

นอกจากนี้ยังมีรูปร่างการใช้งานที่หลากหลายมาก การนำกลับไปใช้ใหม่ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทรง แดกหักยากหรือทนแรงอัดได้ดี อย่างไรก็ตาม วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่เป็นสแตนเลส นั้นจะมีราคาค่อนข้างแพงแต่สามารถใช้กับระบบที่มีการกัดกร่อนได้

2. เซรามิก (Ceramic)

เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากก่อนที่จะมีการใช้พลาสติกมาทำวัสดุบรรจุแทน โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะนำไปใช้กับงานที่มีความเฉพาะมากกว่า เช่น การนำไปใช้กับสารเคมีที่มีความหนืดสูง สารเคมีที่มีอุณหภูมิสูงยกตัวอย่างเช่น การดูดซึมในกรดซัลฟิวริก เป็นต้น

3. พลาสติก (Plastic)

พอลิโพรพิลีนจัดว่าเป็นพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์นี้ก็เนื่องมาจากว่ามีราคาไม่แพง แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องทำภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิไม่เกิน 121 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดจุดร้อน (Hot spot) อันเนื่องมาจากการให้ความร้อนกับสารละลาย นอกจากนี้ก็ยังมีความเสี่ยงอีกที่สามารถนำมาใช้ได้กับสารละลายที่มีอุณหภูมิสูงแต่โดยส่วนใหญ่แล้วราคาค่อนข้างแพง

ข้อเสียสำหรับการใช้พลาสติกเป็นวัสดุบรรจุที่สำคัญคือ มีความสามารถในการเปียกต่ำ เมื่อเทียบกับเซรามิกและโลหะ ดังนั้นจึงทำให้พลาสติกไม่มีแผ่นฟิล์มของเหลวเคลือบบางๆเกิดขึ้น ในกรณีที่มีอัตราการไหลของของเหลวต่ำเกินไป อย่างไรก็ตามการใช้พลาสติกเป็นวัสดุบรรจุก็ยังมีข้อดีกล่าวคือ ราคาถูก ง่ายในการจัดการ ตลอดจนความสะดวกรวดเร็วในการทำความสะดวก

3.7 ลิควิด โฮลด์อัป (Liquid holdup)

ลิควิด โฮลด์อัป คือ ของเหลวที่มีอยู่ภายในช่องว่างของวัสดุบรรจุ ซึ่งพบว่า ณ สภาวะจุดท่วมนั้น ช่องว่างที่มีอยู่ภายในวัสดุบรรจุทั้งหมดจะถูกบรรจุด้วยของเหลวหรือฟองของของเหลว ดังนั้น ภายใต้สภาวะปกติ (ต่ำกว่าจุดท่วม) ลิควิด โฮลด์อัปที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้อย่างดีและทำให้คอลัมน์มีการปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อลิควิด โฮลด์อัปมีค่าเพิ่มขึ้นหรือสูงเกินไปจึงควรที่จะปรับให้ลิควิด โฮลด์อัปนั้นมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่า สภาวะที่ลิควิด โฮลด์อัปมีค่าสูงเกินไปนั้นจะส่งผลทำให้การเพิ่มความดันลด น้ำหนักของวัสดุบรรจุ วัสดุประกอบอื่นๆที่ส่วนล่างของวัสดุบรรจุและคอลัมน์ รวมถึงเวลาที่ใช้ในการระบายของเหลวออกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมามีความเข้มข้นลดลงด้วย วัสดุบรรจุที่มีขนาดเล็กกว่ามักจะมีลิควิด โฮลด์อัปมากกว่าวัสดุบรรจุที่มีขนาดใหญ่กว่า

ลิควิด โฮลด์อัปจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. โฮลด์อัปคงที่ (Static holdup)

โฮลด์อัปคงที่ (Static holdup) คือของเหลวที่ยังเหลืออยู่ในวัสดุบรรจุหลังจากที่ได้มีการทำให้เปียกและระบายของเหลวออกไปจากคอลัมน์แล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งการที่เกิดโฮลด์อัปคงที่นั้นจะส่งผลทำให้ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารระหว่างของเหลวและไอถูกจำกัด

2. โฮลด์อัประหว่างปฏิบัติการ (Operating holdup)

โฮลด์อัปดำเนินการ (Operating holdup) คือ ของเหลวที่อยู่ในวัสดุบรรจุที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินการหรือมีการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในคอลัมน์หรือหาได้จากความแตกต่างระหว่างโฮลด์อัปทั้งหมดกับโฮลด์อัปคงที่นั่นเอง โฮลด์อัปดำเนินการนั้นนำมาซึ่งการถ่ายเทมวลสารระหว่างของเหลวและก๊าซในช่วงเวลาระหว่างการดำเนินการ

3.8 ความดันลดของหอบรรจุ

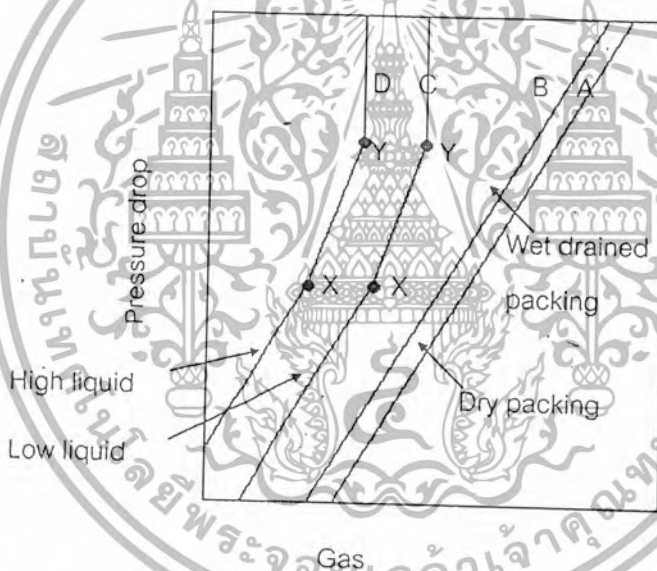
ความดันลดเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ระบุถึงความสามารถ (Capacity) ของคอลัมน์ในการดำเนินการเพื่อป้องกันการเกิดการท่วม (Flooding) ภายในคอลัมน์ได้ โดยจำแนกได้ดังต่อไปนี้

1. สำหรับคอลัมน์ที่มีขนาดเล็ก กล่าวคือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 3 ฟุต พบว่า ความดันลดจะแปรผันตามเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ เช่น ในกรณีที่ใช้วัสดุบรรจุชนิดสุ่มพบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ยังมีขนาดเล็กเท่าไร ความดันลดก็ยิ่งต่ำลงเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของคอลัมน์ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับกรณีที่ใช้วัสดุบรรจุชนิดโครงสร้างซึ่ง ความดันลดจะมีค่าลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้น
2. วัสดุบรรจุที่มีขนาด รูปร่าง และความหนาต่างกัน จะมีผลทำให้ความดันลดมีค่าแตกต่างกันไป
3. ความดันลดเป็นฟังก์ชันกับความเร็วของไอและของเหลว ความหนาแน่นและคุณสมบัติทางกายภาพ
4. ความดันลดที่วัดจากคอลัมน์สุญญากาศ (ในกรณีที่มีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิเมตรปรอท) ได้รับผลมาจากความดันลดและความดันเกรเดียนต์ตลอดความยาวเบด
5. ความดันลดที่วัดจากคอลัมน์ความดันนั้น ไม่ใช่ค่าความดันลดที่แท้จริงแต่จะต้องนำค่าความดันไอนิ่ง (Static head of the vapor) ลบออกจากความดันลดที่วัดได้
6. ในบางกรณีของเหลวมีการกระจายไม่สม่ำเสมอจะส่งผลทำให้ความดันลดต่ำกว่าในกรณีของเหลวมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ
7. วัสดุที่ทำมาจากพลาสติกและโลหะบางนั้นจะไวต่อ เวลา อุณหภูมิและแรงอัด ปัญหานี้จะส่งผลมากขึ้นในเบดที่มีความสูงมากขึ้น โดยพบว่า เมื่อมีการอัดมากขึ้นจะทำให้ความดันลดนั้นเพิ่มสูงขึ้น
8. ความดันลดสำหรับการเกิดโฟม (Foaming system) จะมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่ทำให้เกิดโฟม (Non-foaming system) [6]

ความสัมพันธ์โดยทั่วไป ระหว่างความดันลด ($-\Delta P$) และอัตราไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส (U_g) ต่อพื้นที่หน้าตัดของหอ แสดงในรูปที่ 3.20 โดยที่ $-\Delta P$ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณ $U_g^{1.8}$ ถ้าขณะที่แก๊สไหลขึ้นมีของเหลวเริ่มไหลลงในหอ จะพบว่า ที่อัตราไหลของของเหลวต่ำ เส้นความดันลดจะคล้ายกับกรณีที่ไม่มีของเหลวไหลอยู่ด้วย นั่นคือการไหลของของเหลวไม่มีผลต่อทางเดินของแก๊ส แต่เมื่อความเร็วของแก๊ส เพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง $-\Delta P$ จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและ $-\Delta P$ จะแปรผันตาม $U_g^{2.5}$ ดังแสดงในช่วง xy บนเส้นกราฟ C บนช่วง xy นี้ การไหลของของเหลวมีผลต่อการไหลของแก๊ส และค่าโวลด์ อัมของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเกิดการสะสมของ

ของเหลวอยู่ในช่องว่างของวัสดุบรรจุ ส่งผลให้การต้านทานการไหลเพิ่มขึ้นและที่การไหลของแก๊สเหนือจุด y จะทำให้ค่า $-\Delta P$ สูงขึ้นมาก จนอาจทำให้ของเหลวในหอยูดไหล

จุด x เรียกว่า จุดการไหล (Loading point) และจุด y เรียกว่า จุดการท่วม (Flooding point) สำหรับการไหลของของเหลวที่ค่านี้ๆ ถ้าการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจะได้กราฟเส้นใหม่คือ เส้นกราฟ D ซึ่งจะพบว่าจุดการท่วมจะเกิดขึ้นที่ค่าการไหลของแก๊สต่ำกว่า แต่ค่า $-\Delta P$ ยังคงเป็นค่าเดิม โดยปกติหอกลับประเภทบรรจุจะทำงานอยู่ในช่วง xy นั่นคือ กำหนดค่า ไฮลด์อัฟ เป็นค่าค่าหนึ่งซึ่งช่วงของความเร็วของก๊าซที่สามารถทำงานได้นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 50-70% ของความเร็วของก๊าซที่สภาวะจุดท่วม (Flooding velocity) เพื่อให้การสัมผัสระหว่างของเหลวกับแก๊สเกิดได้ดี และหอกลับประเภทบรรจุจะไม่สามารถทำงานที่สภาวะการท่วมได้ จากรูปที่ จะพบว่า ช่วง xy นี้มีช่วงการไหลของก๊าซสั้นมาก ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการออกแบบ จะกำหนดให้การทำงานของหอยูดอยู่ที่จุดการไหล นั่นก็คือที่จุด x [5]



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่างความดันลดและอัตราไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส

3.9 คำจำกัดความของสภาวะจุดท่วม

ได้มีผู้ให้คำจำกัดความของคำว่าสภาวะจุดท่วม (Flooding) ซึ่งแตกต่างกันไป โดยจำแนกได้ดังต่อไปนี้

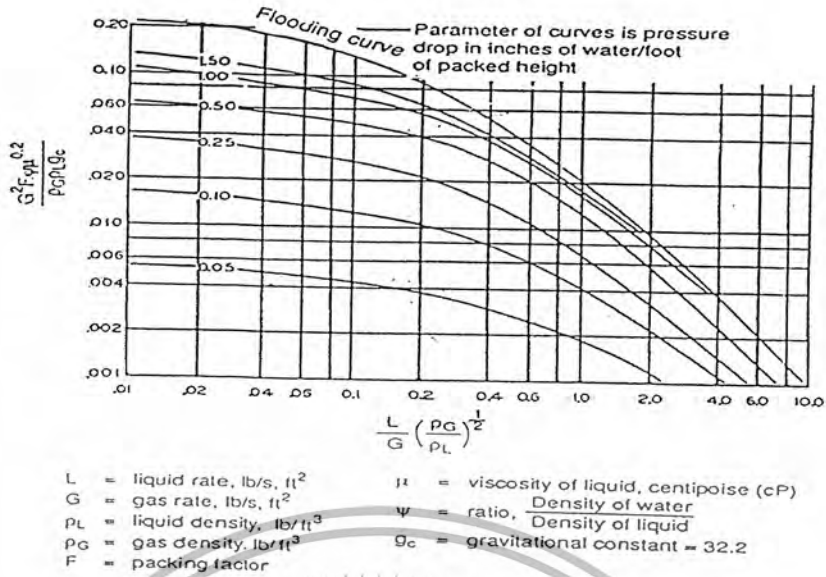
1. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อช่องว่างทั้งหมดของวัสดุบรรจุถูกบรรจุให้เต็มด้วยของเหลว
2. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อค่าลิกวิด ไฮลด์อัฟเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

3. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อของเหลวค้างอยู่ส่วนบนของเบดส่งผลให้ก๊าซเคลื่อนที่ขึ้นในลักษณะของฟอง (Gas bubbles)
4. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อความชันของกราฟระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลของก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด
5. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อสภาวะการดำเนินการภายในคอลัมน์ไม่เสถียร [7]
6. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงไปโดยมีแนวโน้มที่ลดลง
7. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อมีการล้นของของเหลวออกมาทางส่วนบนของเบด

อย่างไรก็ตาม ได้มีการปรับปรุงค่าจำกัดความของสภาวะจุดท่วม โดยการกำหนดปริมาณหรือตัวเลขเข้าไปเพื่อขยายค่าจำกัดความให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อมีของเหลวเกิดขึ้นหรือค้างเป็นครึ่งหนึ่งของเบดหรือคอลัมน์นับจากส่วนบน หรือ สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อมีความดันลดเกิดขึ้นเป็น 2 นิ้วของน้ำต่อความสูงของวัสดุบรรจุ (ฟุต) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีผู้ให้ค่าจำกัดความว่า สภาวะจุดท่วมเป็นสภาวะที่กำหนดความสามารถสูงสุดของคอลัมน์ที่สามารถดำเนินการได้ (Maximum operating capacity: MOC) ซึ่งพิจารณาจากอัตราการไหลของแก๊สสูงสุดที่ทำให้คอลัมน์มีประสิทธิภาพในการดำเนินการอยู่ในสภาวะปกติ

3.9.1 การทำนายจุดท่วม

เซอร์วูด-เอทเคิร์ต (Sherwood – Etkert) ได้คิดค้นความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด (Generalized pressure drop correlation: GPDC) เพื่อใช้ในการทำนายจุดท่วมซึ่งกราฟนี้ถือว่าเป็นมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องทั่วไปสำหรับวัสดุบรรจุแบบสุ่ม แสดงดังรูปที่ 3.21 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันลด อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของก๊าซ ตั้งแต่ช่วงการดำเนินการได้ในสภาวะที่เป็นปกติจนถึงสภาวะจุดท่วม จากค่าของตัวแปรเหล่านี้ พบว่า ที่สภาวะจุดท่วมเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถสูงสุดของคอลัมน์ที่สามารถดำเนินการได้ โดยในการดำเนินการจริงนั้นต้องหลีกเลี่ยงสภาวะการท่วม ดังนั้น จึงต้องใช้ค่าในการปฏิบัติการต่ำกว่าค่าที่สภาวะจุดท่วมซึ่งค่าของตัวแปรเหล่านี้จะเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหอหรือคอลัมน์ในการดำเนินการด้วย [6]



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด

จากกราฟความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรไร้หน่วยในแกนตั้งและแกนนอน โดยที่ค่าของตัวแปรไร้หน่วยในแกนตั้งอธิบายถึงความสมดุลระหว่างโมเมนตัมของก๊าซซึ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการไหลของของเหลวกับแรงโน้มถ่วงของของเหลวซึ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการไหลของก๊าซ จากความสัมพันธ์นี้ แสดงให้เห็นว่า เมื่อแรงโน้มถ่วงของของเหลวมีค่าสูงกว่าโมเมนตัมของก๊าซจะช่วยป้องกันการเกิดของเหลวล้นยอดหอได้เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของของเหลวมีอิทธิพลเหนือกว่าแรงดันของก๊าซ ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการดำเนินการของคอลัมน์ให้อยู่ในสภาวะปกติได้โดยไม่เกิดการท่วม ส่วนค่าของตัวแปรไร้หน่วยในแกนนอนเรียกว่า พารามิเตอร์ของการไหล (Flow parameter) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานจลน์ของของเหลวต่อพลังงานจลน์ของก๊าซ โดยที่พารามิเตอร์นี้ใช้อธิบายถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวที่มีต่ออัตราการไหลของก๊าซในลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน จากกราฟ เมื่อพิจารณาที่เส้นของความดันลดคงที่ค่าหนึ่ง พบว่า ถ้าอัตราการไหลของก๊าซมีค่าสูงกว่าอัตราการไหลของของเหลวจะทำให้โมเมนตัมของก๊าซมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงของของเหลว ดังนั้น ค่าของตัวแปรไร้หน่วยในแนวแกนตั้งจึงมีค่าสูง ในขณะที่เดียวกันค่าของตัวแปรไร้หน่วยในแนวแกนนอนจะมีค่าน้อยเนื่องจากว่าพลังงานจลน์ของก๊าซที่เกิดจากการเคลื่อนที่ขึ้นมีค่าสูงกว่าพลังงานจลน์ของของเหลวซึ่งเคลื่อนที่ลงมา ดังนั้น ความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้นที่ความดันลดคงที่ค่าหนึ่งจึงมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 3.21

บทที่ 4

ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด อัตราการไหลของก๊าซและอัตราการไหลของของเหลวด้วยหลอดซีมแบบบรรจุ

1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1.1 อุปกรณ์

- 1.1.1 หลอดซีมโดยใช้ขวดหลอดเหล็กเป็นวัสดุบรรจุ (ดูรายละเอียดในหมายเหตุหน้า 31)
- 1.1.2 กระจกตวงปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- 1.1.3 นาฬิกาจับเวลา
- 1.1.4 เทอร์โมมิเตอร์
- 1.1.5 เครื่องวัดอัตราการไหลของของเหลว
- 1.1.6 มานอมิเตอร์
- 1.1.7 ท่อยางและถังน้ำขนาด 5,600 มิลลิลิตร
- 1.2 สารเคมี
 - 1.2.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
 - 1.2.2 ก๊าซฮีเลียม
 - 1.2.3 อากาศ
 - 1.2.4 น้ำ

2. ขั้นตอนการทดลอง

- 2.1 บ่อน้ำเข้าสู่ส่วนบนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ส่วนล่างของหลอดซีมโดยปรับอัตราการไหลของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้ค่าความดันลดเป็น 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ
- 2.2 บันทึกเวลาที่ใช้ในการแทนที่ก๊าซในถังจนมีปริมาตรครบ 5600 มิลลิลิตร และทำซ้ำอีก 2 ครั้ง
- 2.3 บันทึกเวลาที่ได้สำหรับของเหลวโดยรอให้ระดับของเหลวที่ก้นของหลอดซีมมีระดับคงที่ก่อนและจับเวลาจนกระทั่งของเหลวมีปริมาตรครบ 200 มิลลิลิตร และทำซ้ำอีก 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

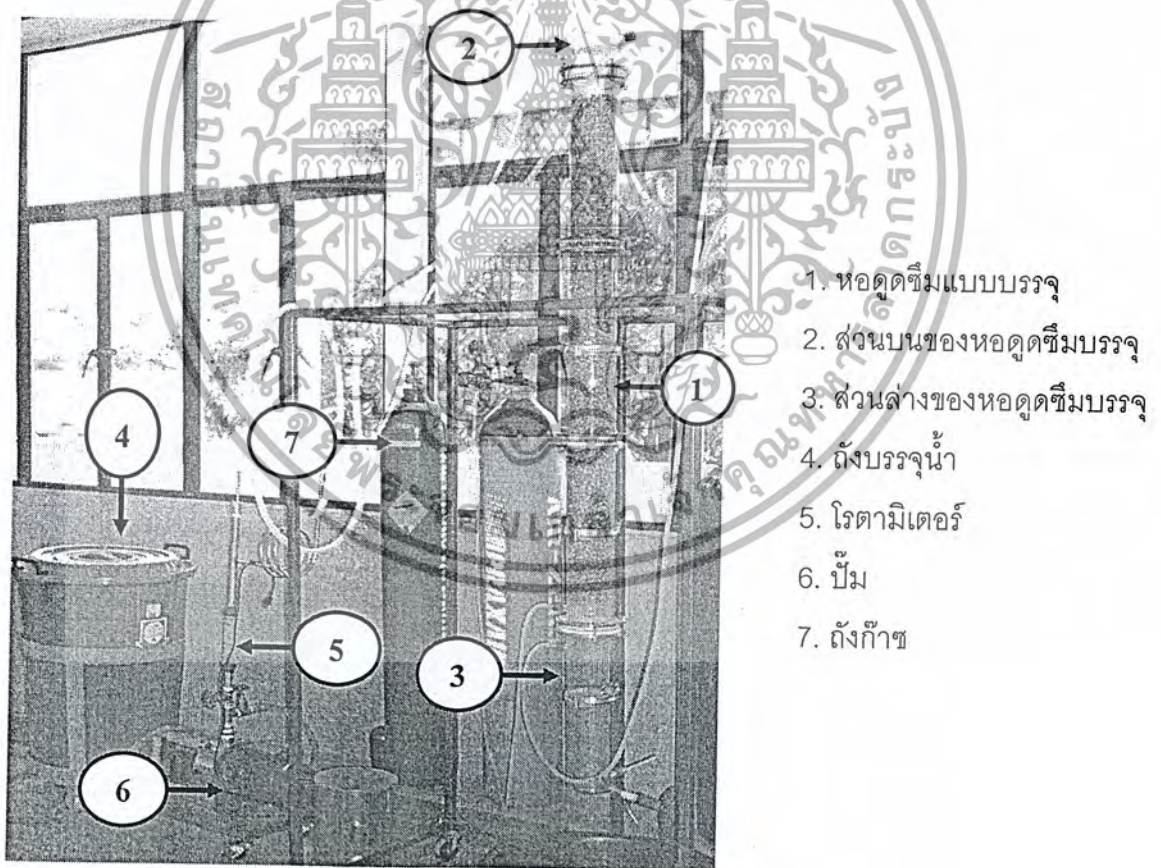
- 2.4 คำนวณหาอัตราการไหลของของเหลวและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 2.5 อ่านอุณหภูมิที่ทางเข้าทั้งส่วนบนและส่วนล่างของหอดูดซึม บันทึกผลที่ได้
- 2.6 คำนวณหาความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมถึงความหนืดของของเหลว
- 2.7 ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใหม่ที่ค่าความดันลดเดิมคือ 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ
- 2.8 ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.2 จนถึง 2.7 จนครบทุกอัตราการไหลของน้ำนั่นคือ 40 60 80 100 120 140 160 ลิตรต่อชั่วโมง (อ่านจากโรตاميเตอร์)
- 2.9 ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1 จนถึง 2.8 โดยให้ได้ค่าความดันลดเป็น 2 3 4 5 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ ตามลำดับ
- 2.10 เปลี่ยนชนิดของก๊าซเป็นอากาศแล้วทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1 จนถึง 2.9 โดยเลือกปรับอัตราการไหลของของเหลวเพียงบางส่วน โดยที่ความดันลด 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 40 และ 60 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 2 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 40 60 80 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 3 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 60 100 และ 140 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 4 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 80 และ 120 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 40 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 40 ลิตรต่อชั่วโมง
- 2.11 เปลี่ยนชนิดของก๊าซเป็นฮีเลียมแล้วทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1 จนถึง 2.9 โดยเลือกปรับอัตราการไหลของของเหลวเพียงบางส่วน โดยที่ความดันลด 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 40 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 2 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 40 และ 60 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 3 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 40 80 และ 120 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 4 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 40 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 60 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันลด 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ มีอัตราการไหลของของเหลวเป็น 60 ลิตรต่อชั่วโมง

ส่วนที่ 2 การหาค่าแพ็คกิ้ง แพลคเตอร์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
 - 1.1 ขดลวดเหล็กตัวอย่าง
 - 1.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก
 - 1.3 เวอร์เนียคาลิเปอร์

2. ขั้นตอนการทดลอง ประกอบด้วย 3 ส่วน
 - 2.1 การหาพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุต่อหน่วยปริมาตรของคอลัมน์ (a_p)
 - 2.1.1 นำขดลวดเหล็กตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก พร้อมบันทึกค่า
 - 2.1.2 คำนวณหาพื้นที่ผิวของขดลวดเหล็กตัวอย่าง
 - 2.1.3 นำเอาขดลวดเหล็กที่บรรจุอยู่ในหลอดซีมีมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า
 - 2.1.4 ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักของขดลวดเหล็กตัวอย่างกับขดลวดเหล็กที่อยู่ในหลอดซีมีทั้งหมดเพื่อหาพื้นที่ผิวของขดลวดเหล็กที่อยู่ในหลอดซีมี
 - 2.1.5 วัดความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดซีมีเพื่อหาปริมาตรของหลอดซีมี
 - 2.1.6 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุต่อหน่วยปริมาตรของคอลัมน์
 - 2.2 การหาสัดส่วนปริมาตรช่องว่าง (ϵ)
 - 2.2.1 นำขดลวดเหล็กตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาคำนวณหาปริมาตรของขดลวดเหล็กตัวอย่าง
 - 2.2.2 นำเอาขดลวดเหล็กที่บรรจุอยู่ในหลอดซีมีทั้งหมดที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาทำการเปรียบเทียบน้ำหนักกับขดลวดเหล็กตัวอย่างเพื่อหาปริมาตรของขดลวดเหล็กที่อยู่ในหลอดซีมี
 - 2.2.3 นำเอาปริมาตรที่ได้มาจากข้อ 2.2.2 มาหักออกจากปริมาตรของหลอดซีมีเพื่อหาปริมาตรของช่องว่าง
 - 2.2.4 นำค่าที่ได้จากข้อ 2.2.2 และ 2.2.3 มาคำนวณหาสัดส่วนปริมาตรช่องว่าง
 - 2.3 การหาค่าแพ็คกิ้ง แพลคเตอร์ (F)
 - 2.3.1 นำค่าที่ได้จากข้อ 2.1.6 และ 2.2.4 มาคำนวณหาค่าแพ็คกิ้ง แพลคเตอร์ (ดูวิธีการหาในภาคผนวก ก)

หมายเหตุ: ข้อมูลของหอดูดูดซึมแบบบรรจุที่ใช้ในการทดลอง	
ความสูงของคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุบรรจุ	4.224 ฟุต
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของคอลัมน์	0.349 ฟุต
พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์	0.096 ตารางฟุต
ปริมาตรของคอลัมน์	0.404 ลูกบาศก์ฟุต
น้ำหนักของวัสดุบรรจุทั้งหมด	2.715 ปอนด์
พื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุทั้งหมด	150.635 ตารางฟุต
ปริมาตรของวัสดุบรรจุทั้งหมด	8.147×10^{-3} ลูกบาศก์ฟุต
พื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุต่อปริมาตรคอลัมน์ (a_p)	372.859 ตารางฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต
สัดส่วนช่องว่าง (ϵ)	0.941
ค่าแฟคทิง แฟคเตอร์ (F)	396.216 ตารางฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต



1. หอดูดูดซึมแบบบรรจุ
2. ส่วนบนของหอดูดูดซึมบรรจุ
3. ส่วนล่างของหอดูดูดซึมบรรจุ
4. ถังบรรจุน้ำ
5. โรตاميเตอร์
6. บั้ม
7. ถังก๊าซ

รูปที่ 4.1 แสดงหอดูดูดซึมแบบบรรจุ

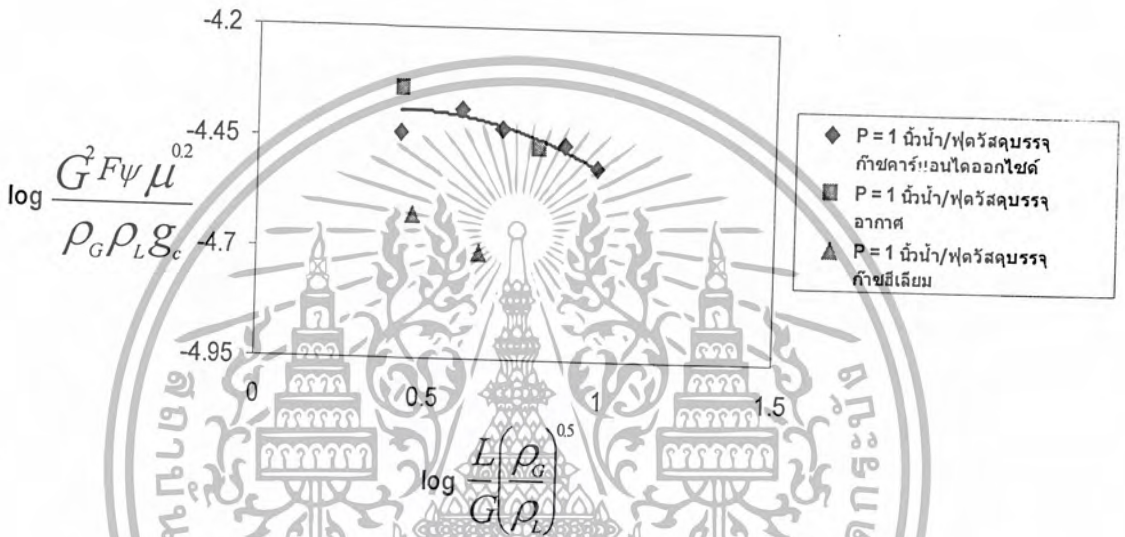
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

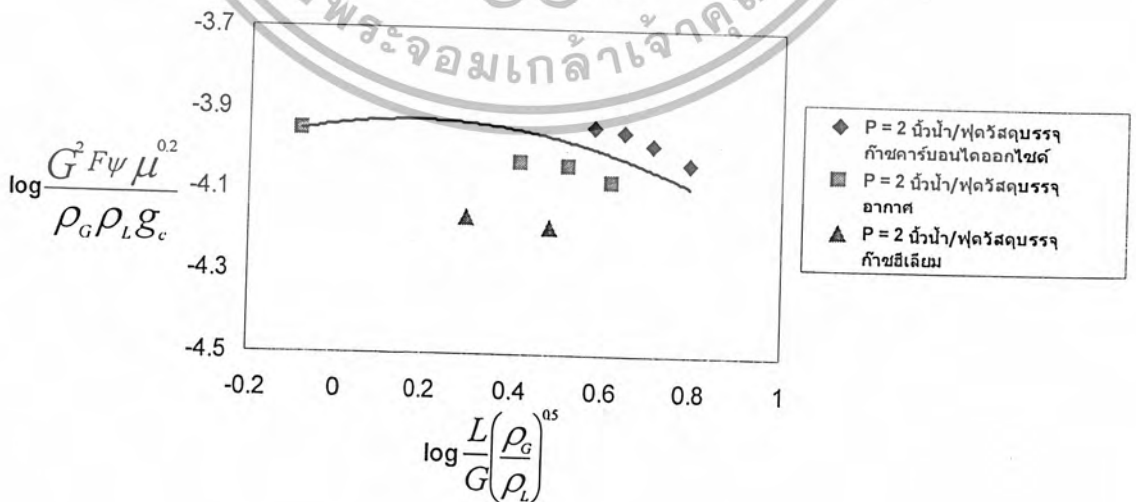
5.1 ความสัมพันธ์ทั่วไปของระบบน้ำกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม และอากาศที่ค่าความดันลดต่างๆ

5.1.1 ความดันลด 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

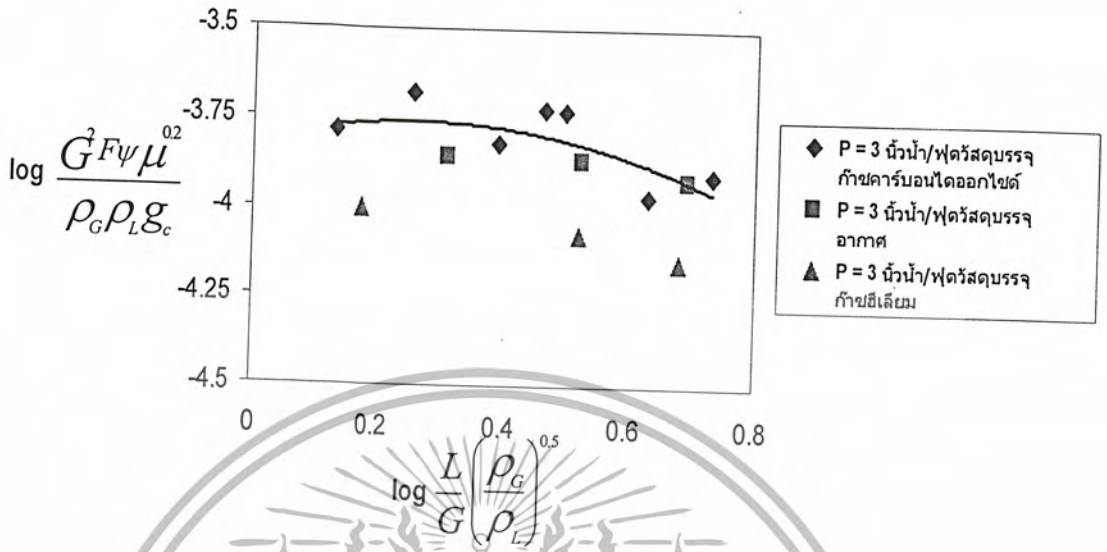
5.1.2 ความดันลด 2 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 2 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

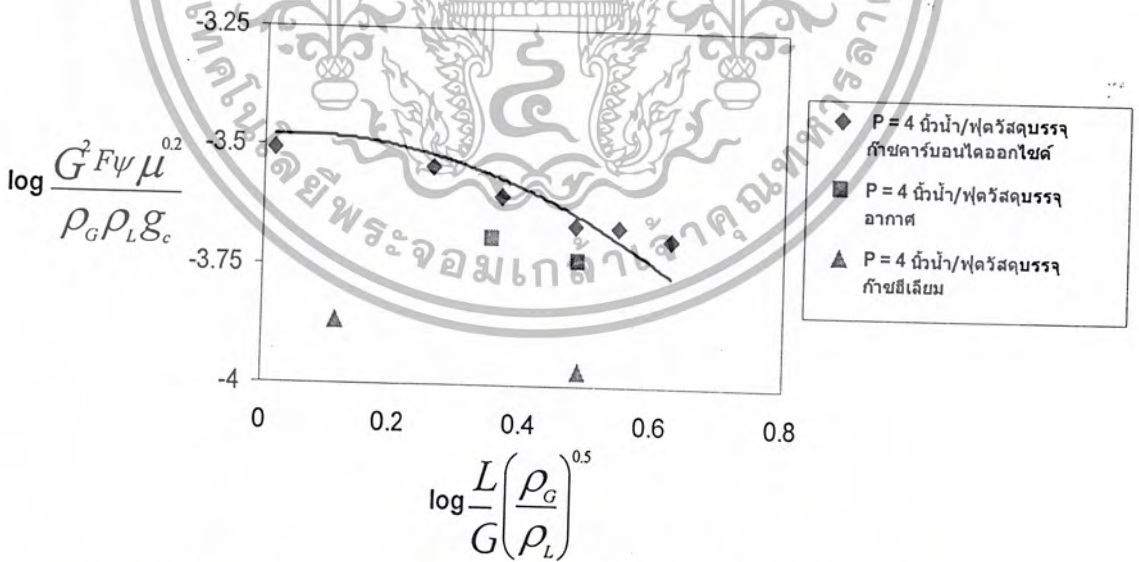
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ความดันลด 3 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ



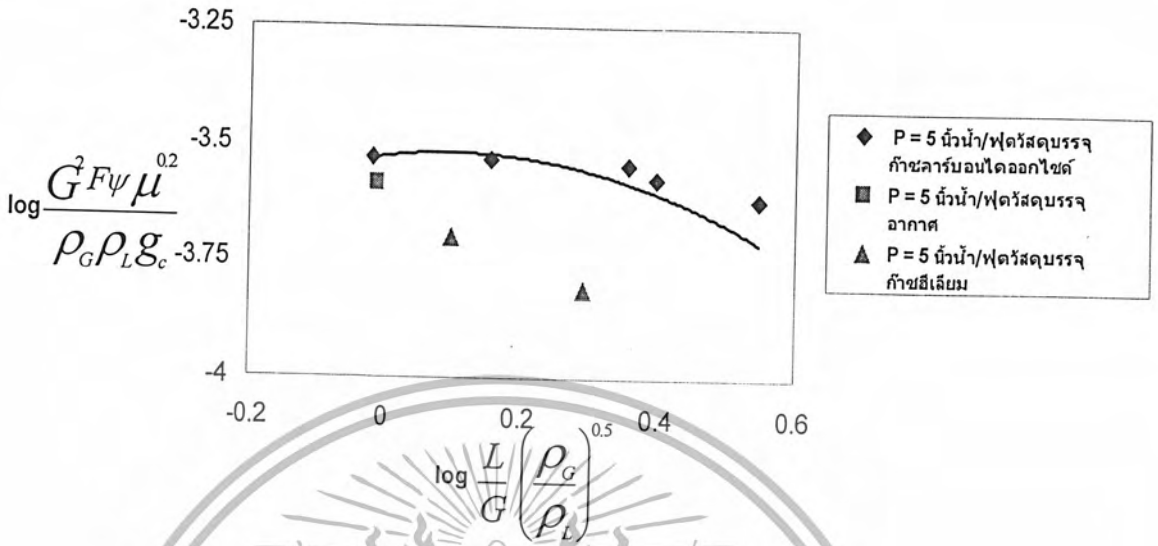
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 3 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

5.1.4 ความดันลด 4 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ



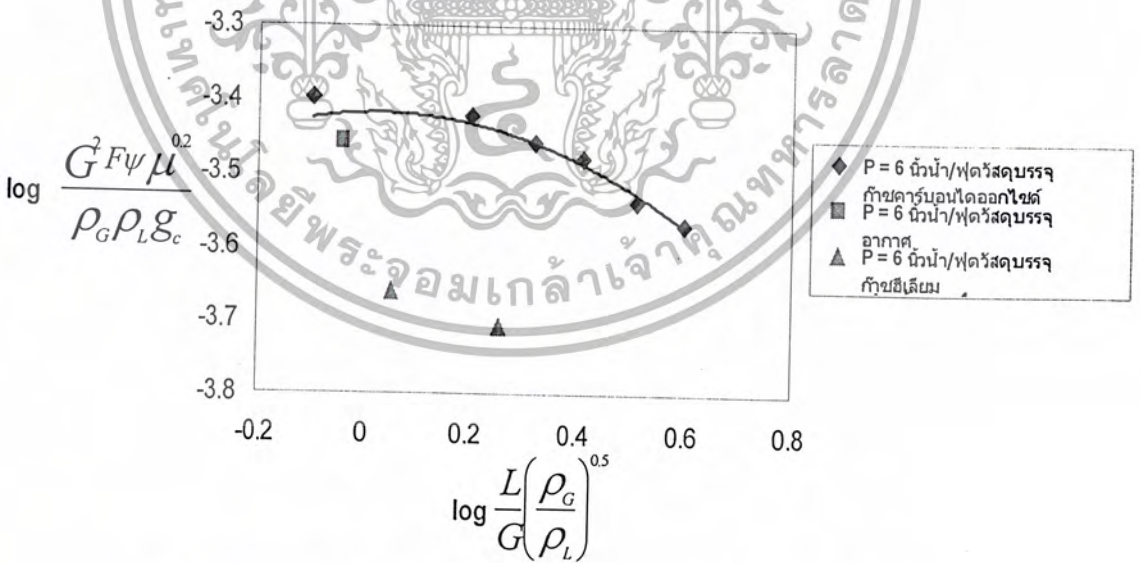
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 4 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

5.1.5 ความดันลด 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

5.1.6 ความดันลด 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

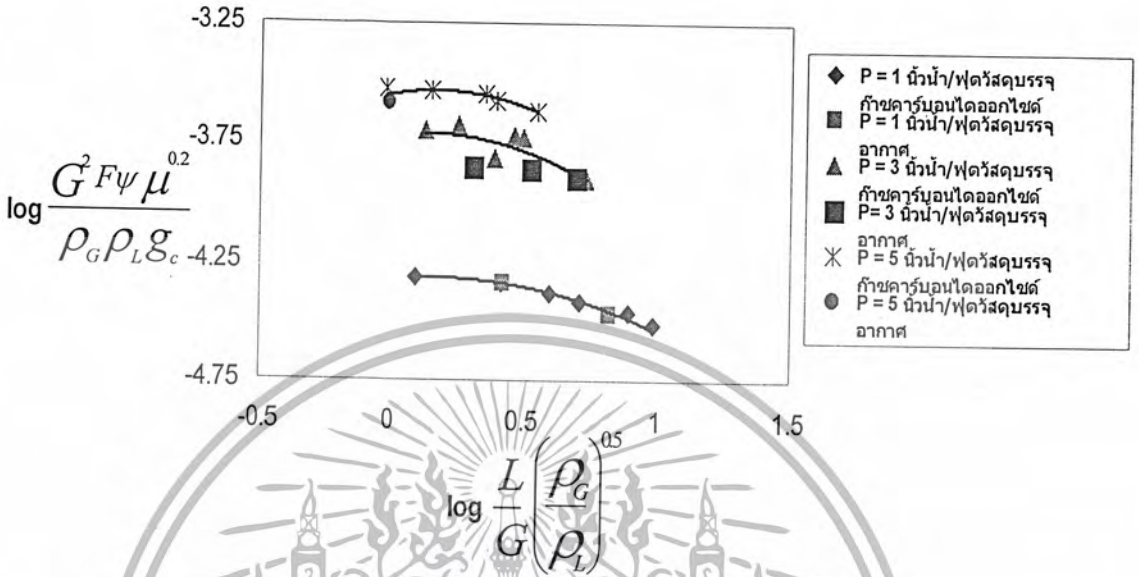


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลด 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

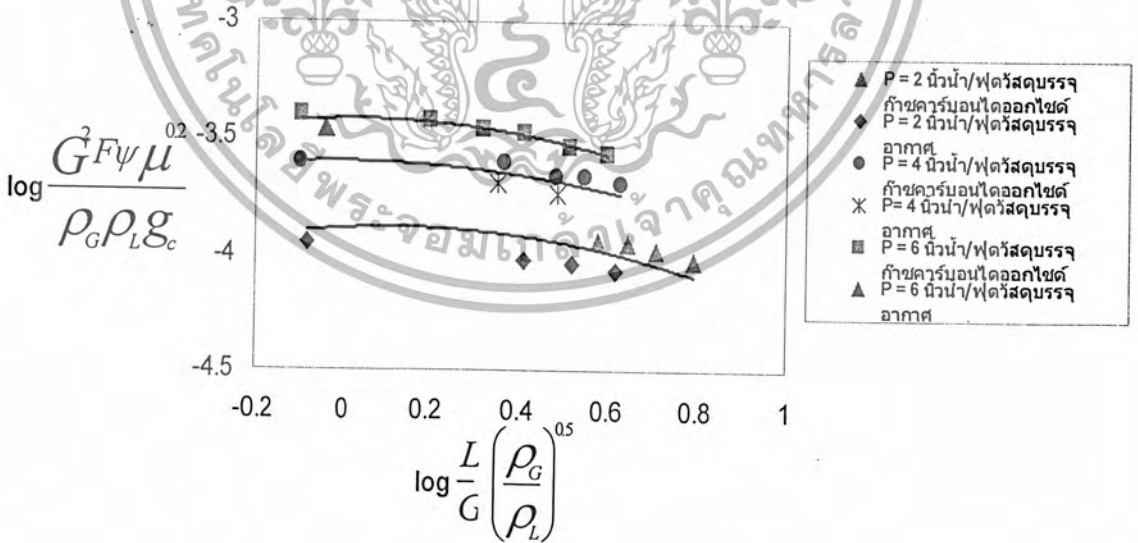
จากรูปที่ 5.1-5.6 สำหรับระบบของน้ำกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม และอากาศ พบว่า ที่ค่าความดันลดตั้งแต่ 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ จนถึง 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ จะมีความสัมพันธ์เป็นไปในลักษณะเดียวกัน นั่นคือ ที่ค่าความดันลดคงที่ในแต่ละค่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลว (ค่าตัวแปรไร้นิยามบนแกน x มีค่าเพิ่มขึ้น) จะมีผลทำให้อัตราการไหลของก๊าซมีค่าลดน้อยลง (ค่าตัวแปรไร้นิยามบนแกน y มีค่าลดลง) ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า เมื่อของเหลวมีปริมาณมากขึ้นทำให้มีพลังงานจลน์ของของเหลวรวมถึงแรงโน้มถ่วงของของเหลวมีค่าสูงกว่าพลังงานจลน์ของก๊าซและโมเมนต์ของก๊าซซึ่งจะทำให้การไหลของก๊าซในการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของคอลัมน์ได้ช้าลง แต่สำหรับระบบของก๊าซฮีเลียมกับน้ำนั้น ค่าของตัวแปรไร้นิยามบนแกนตั้งและแกนนอนไม่ได้อยู่บนเส้นโค้งเดียวกันกับระบบของน้ำกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ



5.2 ความสัมพันธ์ทั่วไปของระบบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียมและอากาศ โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายที่ค่าความดันลดต่างๆ



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ทั่วไปของค่าความดันลด 1 3 และ 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ทั่วไปของค่าความดันลด 2 4 และ 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.7-5.8 พบว่าระบบของอากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีน้ำเป็นของเหลว สำหรับการดูดซึมทุกระบบจะมีความสัมพันธ์เป็นไปในทางเดียวกันและอยู่บนเส้นแนวโน้มเดียวกัน นั่นคือเมื่อ ที่ค่าความดันลดคงที่ในแต่ละค่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลว (ค่าตัวแปรไร้มิติหน่วยบนแกน x มีค่าเพิ่มขึ้น) จะมีผลทำให้อัตราการไหลของก๊าซมีค่าน้อยลง (ค่าตัวแปรไร้มิติหน่วยบนแกน y มีค่าน้อยลง) ทั้งนี้เนื่องจากว่า เมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าสูงจะทำให้พลังงานจลน์ของของเหลวและแรงโน้มถ่วงของของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ก๊าซเคลื่อนที่ขึ้นไปส่วนบนของคอลัมน์ได้ช้าลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออัตราการไหลของของเหลวและก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันลดมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้มีการสะสมของของเหลวอยู่ภายในวัฏศุภรรจุมากขึ้นจึงทำให้มีการต้านทานการไหลสูงขึ้น



บทที่ 6

สรุปผลและวิเคราะห์

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลดคงที่ตั้งแต่ 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ จนถึง 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ ที่ได้จากการทดลองของระบบอากาศ ก๊าซฮีเลียมและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีน้ำเป็นของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม จะเห็นว่าคุณสมบัติเป็นไปในทางเดียวกัน นั่นคือเมื่อ ที่ค่าความดันลดคงที่ในแต่ละค่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลว (ค่าตัวแปรไร้หน่วยบนแกน x มีค่าเพิ่มขึ้น) จะมีผลทำให้อัตราการไหลของก๊าซมีค่าลดน้อยลง (ค่าตัวแปรไร้หน่วยบนแกน y มีค่าลดลง)

ดังนั้นเมื่อของเหลวมีปริมาณมากขึ้นจะไปขัดขวางการไหลของก๊าซให้เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของคอลัมน์ได้ช้าลง ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของของเหลวมีค่าสูงกว่าโมเมนต์ของก๊าซ จึงช่วยป้องกันไม่ให้เกิดของเหลวล้นยอดหอได้ ซึ่งนับว่าเป็นการเพิ่มความสามารถในการปฏิบัติการของคอลัมน์ให้อยู่ในสภาวะปกติได้โดยไม่เกิดการท่วม ดังนั้นค่าของตัวแปรไร้หน่วยในแนวแกนตั้งซึ่งอธิบายถึงความสมดุลระหว่างโมเมนต์ของก๊าซกับแรงโน้มถ่วงของของเหลวจึงมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าของตัวแปรไร้หน่วยในแนวแกนนอนจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากว่าพลังงานจลน์ของก๊าซที่เกิดจากการเคลื่อนที่ขึ้นมีค่าต่ำกว่าพลังงานจลน์ของของเหลวซึ่งเคลื่อนที่ลงมา ดังนั้น ความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้นที่ความดันลดคงที่ค่าหนึ่งจึงมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 5.1-5.8

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลดคงที่ตั้งแต่ 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ จนถึง 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ ที่ได้จากการทดลองของระบบอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีน้ำเป็นของเหลวที่ใช้ในการดูดซึมนั้น จะเห็นได้ว่า ก๊าซที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีความหนาแน่นต่างกันนั้นจะได้กราฟเส้นโค้งที่ค่าความดันลดคงที่ค่าหนึ่งโดยมีแนวโน้มลดลงเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้หาสมรรถนะ (Capacity) ของหอดูดซึมที่ดำเนินการอยู่ภายใต้ช่วงความดันลดคงที่ตั้งแต่ 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ จนถึง 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุได้

6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

1. เมื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซและของเหลวให้มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความดันลดเป็น 5 และ 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ จะทำให้ความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์มีค่าไม่คงที่และทำให้ยากต่อการควบคุมค่าความดันลดให้คงที่ตามที่ต้องการ

2. การวัดอัตราการไหลของก๊าซโดยอาศัยการแทนที่น้ำและจับเวลา อาจเกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าระดับที่แสดงปริมาตรของก๊าซที่เข้าไปแทนที่น้ำซึ่งการจับเวลาในขณะนั้นไม่สอดคล้องกันพอดี

3. เมื่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าตั้งแต่ 100 ลิตรต่อชั่วโมงขึ้นไป จะทำให้ระดับของลูกลอยในโรตاميเตอร์ที่ปรับไว้มีค่าลดลงประมาณ 2 ถึง 5 ลิตรต่อชั่วโมง

4. เมื่ออัตราการไหลของก๊าซมีค่ามากขึ้นจนทำให้ความดันลดเป็น 4,5 และ 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ พบว่าบริเวณรอยต่อของคอลัมน์มีการรั่วของก๊าซเกิดขึ้นโดยสังเกตได้จากของเหลวที่ซึมออกมาเล็กน้อย



บทที่ 7

ข้อเสนอแนะ

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลดนั้น สามารถสร้างเส้นกราฟความดันลดคงที่แต่ละค่าได้ตั้งแต่ค่าความดันลด 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ จนถึง 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ แต่ยังไม่สามารถทำการทดลองจนกระทั่งได้ค่าความดันลดต่ำสุดที่ทำให้เกิดการท่วมได้เนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ ควรทำการทดลองเพื่อพิจารณาว่า สามารถพัฒนากราฟความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลดให้สามารถนำไปใช้กับระบอื่นๆ ได้หรือไม่ ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1. โรตاميเตอร์ที่ใช้ในการทดลองควรมีสเกลสูงสุดในการปรับอัตราการไหลของของเหลวให้ มีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถปรับอัตราการไหลของของเหลวได้สูงขึ้นจนกระทั่งคอล้มันต์เกิดการท่วม (Flooding) ซึ่งจะทำได้ความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลดโดยมีเส้นกราฟความดันลดต่ำสุดที่ทำให้เกิดการท่วมรวมอยู่ด้วย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการคำนวณหาความเร็วก๊าซสูงสุดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอล้มันต์
2. ควรเปลี่ยนของเหลวในแมนอมิเตอร์ซึ่งเดิมใช้น้ำเป็นของเหลวชนิดอื่น เช่น โปรท เพื่อให้สามารถวัดค่าความดันลดได้สูงขึ้น
3. ควรเพิ่มชนิดของเหลวที่ใช้ในการทดลองให้มีค่าความหนืดของของเหลวแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น สารละลายกลีเซอรอล เป็นต้น และควรเพิ่มชนิดของก๊าซที่ใช้ในการทดลองให้มีค่าความหนาแน่นแตกต่างกัน เพื่อดูว่าเส้นกราฟของของเหลวแต่ละชนิดที่มีความหนืดแตกต่างกันและเส้นกราฟของก๊าซที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันจะมีแนวโน้มที่ลดลงเป็นไปในลักษณะเดียวกันหรือไม่ ถ้าเส้นกราฟความสัมพันธ์ทั่วไปของความดันลดที่ได้เป็นไปตามแนวโน้มเดียวกันหรือค่าของตัวแปรไร้หน่วยในแกน x และแกน y ของของเหลวในแต่ละระบบอยู่บนเส้นเดียวกันที่ค่าความดันลดค่าหนึ่ง จะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้หาสมรรถนะ (Capacity) ของหอดูดซึมสำหรับระบบอื่นๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

1. ปิยสุดา เริงทรัพย์, พนารัตน์ โทมณี, อุษา ตั้งพิทักษ์เสมอ, " การจำลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีนในน้ำ", ปรินซ์นิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541
2. Christie John Geankoplis, "Transport Processes and Separation Process Principles", 4th ed., Prentice-Hall, Inc.
3. จักรกฤษณ์ สังข์ทอง, อติศักดิ์ พัฒนภิญโญ, ชนกพร เรืองสวัสดิ์, "การดูดกลืนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์", ปรินซ์นิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542
4. Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus, "Plant Design and Economics for Chemical Engineers", 4th ed., McGraw-Hill, Inc., 1991
5. ธนศักดิ์ ไสพัส, ธเนศงามเลิศประเสริฐ, สุรศักดิ์ จันทร์ศิริ, ปรินซ์นิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546
6. Henry Z. Kister, "Distillation Design" , McGraw-Hill, Inc., 1992
7. Ralph F. Strigle, Jr., "Packed Tower Design and Applications Random and Structured Packing", 2nd ed., Gulf Publishing Company, 1994
8. David R. Lide, "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 71st ed., CRC Press, 1990-1991



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การหาค่าแพ็คกิ้ง แฟคเตอร์ (Packing factor)

แพ็คกิ้ง แฟคเตอร์ (Packing factor) เป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุบรรจุแต่ละชนิด ยกตัวอย่างเช่น แรชชิก ริง พอลริง ที่ทำจากโลหะมีค่า a_p และ ϵ ดังตาราง ก-1

ตาราง ก-1 แสดงค่าคงที่เฉพาะของวัสดุบรรจุที่ทำมาจากโลหะ [6]

ชนิดของวัสดุบรรจุ	ขนาด (inch)	a_p (ft ² /ft ³)	ϵ (ft ³ /ft ³)
พอลริง (Pall ring)	2	34.3	0.951
	1.4	47.9	0.946
	1.0	65.5	0.942
	5/8	112.3	0.933
ไฮโฟล์ ริง (Hiflow ring)	2	28.1	0.977
	1	60.5	0.962
ซี เอ็ม อาร์ (CMR)	1.5	53.3	0.974
	1.0	70.9	0.971
	5/8	103.6	0.951
แรชชิก ริง (Raschig ring)	5/8	177.5	0.917

วิธีการหาค่าแพ็คกิ้ง แฟคเตอร์ (Packing factor) นั้นไลโบ (Lobo) และคณะได้คิดค้นวิธีการทำนายค่าสำหรับวัสดุบรรจุหลายชนิดที่มีขนาดแตกต่างกันไป โดยประมาณได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการ [6]

$$F = \frac{a_p}{\epsilon^3} \quad (ก-1)$$

โดยที่ F = แพ็คกิ้ง แฟคเตอร์ (Packing factor)

a_p = พื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุต่อปริมาตรคอลัมน์ (ft²/ft³)

ϵ = สัดส่วนช่องว่างของวัสดุบรรจุ (ft³/ft³)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 แสดงคุณสมบัติของน้ำในช่วงอุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 100 กิโลปาสคาล (ยกเว้นค่าความดันไอ) [8]

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนืด (ไมโครปาสคาล วินาที)
0	0.99984	1793.0
10	0.99970	1307.0
20	0.99821	1002.0
30	0.99565	797.7
40	0.99222	653.2
50	0.98803	547.0
60	0.98320	466.5
70	0.97778	404.0
80	0.97182	354.4
90	0.96535	314.5
100	0.95840	281.8

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 เวลาในการของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันลดต่างๆ

1. ความดันลด 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัดสุบรรจุ

ความสูงของระดับน้ำในमानมิเตอร์ 10.499 มิลลิบาร์

เวลาในการไหลของน้ำขาออก 200 มิลลิลิตร (วินาที)			เวลาที่ก๊าซขาออกไหลแทนที่ น้ำ 2,000 มิลลิลิตร (วินาที)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ยอดหอ	กั้นหอ
14.39	13.90	13.90	42.34	43.98	43.10	34.00	37.00
9.81	9.79	9.91	45.99	45.49	45.61	32.00	36.00
7.71	8.09	7.74	47.71	47.46	46.84	34.00	36.50
6.01	6.15	5.94	44.04	45.38	44.40	32.00	33.00
5.65	5.15	5.50	51.02	48.84	49.00	34.00	38.00
4.65	4.71	4.65	54.93	52.43	52.77	32.00	32.00
4.32	4.43	4.57	44.80	44.47	45.58	32.00	32.00

2. ความดันลด 2 นิ้วน้ำต่อฟุตวัดสุบรรจุ

ความสูงของระดับน้ำในमानมิเตอร์ 20.997 มิลลิบาร์

เวลาในการไหลของน้ำ 200 มิลลิลิตร (วินาที)			เวลาที่ก๊าซไหลแทนที่น้ำ 2,000 มิลลิลิตร (วินาที)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ยอดหอ	กั้นหอ
15.35	15.20	15.52	27.24	27.56	27.86	36.00	37.50
9.61	9.86	10.02	30.79	29.88	30.16	32.00	36.00
8.02	8.05	7.99	29.95	29.85	29.81	34.00	38.00
6.08	6.18	6.38	27.89	27.89	27.02	33.00	35.00
5.35	5.50	5.31	28.08	27.37	28.23	32.00	34.00
4.59	4.75	4.97	29.10	29.03	28.09	33.00	32.00
4.23	4.15	4.12	30.22	30.54	30.67	33.00	34.00

3. ความดันลด 3 นิ้วน้ำต่อฟุตวัดดูบรจ

ความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ 31.496 มิลลิบาร์

เวลาในการไหลของน้ำ 200 มิลลิลิตร (วินาที)			เวลาที่ก๊าซไหลแทนที่น้ำ 2,000 มิลลิลิตร (วินาที)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ยอดหอ	ก้านหอ
14.56	14.49	14.04	29.97	22.65	22.78	34.00	37.00
9.57	9.61	9.54	19.68	20.16	20.29	33.00	37.00
8.31	8.01	8.33	24.22	23.51	23.410	36.00	37.00
6.25	6.27	6.30	21.85	21.09	21.54	32.00	34.00
5.96	5.82	5.84	22.07	21.23	21.74	33.00	32.00
4.70	4.64	4.68	23.02	23.59	23.40	33.00	35.00
4.22	4.20	4.12	25.99	27.84	25.20	34.00	34.50

4. ความดันลด 4 นิ้วน้ำต่อฟุตวัดดูบรจ

ความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ 41.995 มิลลิบาร์

เวลาในการไหลของน้ำ 200 มิลลิลิตร (วินาที)			เวลาที่ก๊าซไหลแทนที่น้ำ 2,000 มิลลิลิตร (วินาที)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ยอดหอ	ก้านหอ
13.69	13.51	13.81	16.99	16.37	16.45	34.00	36.00
9.99	9.82	9.88	20.47	20.00	20.29	36.00	37.00
8.16	8.01	8.03	17.48	17.05	17.55	33.00	35.00
6.92	6.59	6.82	18.38	19.02	18.38	33.00	34.50
5.53	5.53	5.64	19.63	19.58	19.88	36.00	38.00
4.94	4.85	4.66	19.62	19.58	20.73	33.00	34.50
4.11	4.12	4.11	19.79	20.33	21.44	34.00	35.00

5. ความดันลด 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

ความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ 52.49 มิลลิบาร์

เวลาในการไหลของน้ำ 200 มิลลิลิตร (วินาที)			เวลาที่ก๊าซไหลแทนที่น้ำ 2,000 มิลลิลิตร (วินาที)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ยอดหอ	ก้นหอ
15.53	15.18	14.79	16.93	17.08	17.25	34.00	34.50
10.40	10.18	10.07	17.26	16.84	17.29	34.00	36.00
8.77	8.85	8.80	16.02	16.45	16.39	31.00	31.00
6.49	6.56	6.54	17.18	17.44	17.43	34.00	37.00
6.09	6.11	6.29	18.02	17.81	18.43	32.00	34.00
4.67	4.57	4.53	19.35	18.55	18.81	34.00	36.00
4.35	4.09	4.20	17.81	17.15	17.99	36.00	38.00

6. ความดันลด 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

ความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ 62.99 มิลลิบาร์

เวลาในการไหลของน้ำ 200 มิลลิลิตร (วินาที)			เวลาที่ก๊าซไหลแทนที่น้ำ 2,000 มิลลิลิตร (วินาที)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ยอดหอ	ก้นหอ
15.58	15.85	15.49	14.83	14.71	14.16	35.00	37.00
10.66	10.63	10.96	15.92	16.06	16.13	31.00	31.00
7.91	8.02	8.19	14.88	14.94	15.22	34.00	37.00
6.44	6.47	6.49	15.86	16.11	15.90	29.00	30.00
5.30	5.28	5.37	15.93	16.18	16.07	34.00	36.00
4.60	4.46	4.45	16.96	17.41	17.18	34.00	36.00
3.95	3.67	3.75	17.77	17.36	18.00	36.00	37.00

ตารางที่ ค-2 เวลาในการไหลของน้ำและก๊าซฮีเลียมที่ความดันลดต่างๆ

ความดันลด (นิวตันต่อฟุต วัสดุบรรจุ)	เวลาในการไหลของน้ำ 200 มิลลิลิตร (วินาที)			เวลาที่ก๊าซไหลแทนที่น้ำ 2,000 มิลลิลิตร (วินาที)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ยอดหอ	ก้นหอ
1	17.76	18.17	18.26	18.00	18.70	18.54	30.00	29.00
	13.86	14.09	13.97	22.32	22.11	21.78	32.00	34.00
2	15.60	15.50	15.11	10.49	10.81	11.11	31.50	30.50
	10.43	10.39	10.25	11.34	10.86	11.14	30.00	31.00
3	15.99	15.98	15.95	8.28	8.36	8.64	32.00	32.00
	7.74	7.74	7.87	9.13	9.28	9.06	32.00	33.00
	5.57	5.37	5.47	9.20	9.56	9.45	32.00	33.00
4	16.96	16.65	16.32	7.28	7.72	7.73	32.00	33.00
	7.96	7.85	7.82	8.44	8.52	8.74	33.00	34.00
5	10.53	10.20	10.38	7.10	7.39	7.05	32.00	33.00
	14.65	13.85	14.12	6.02	6.71	6.39	29.00	30.00
6	9.72	10.02	9.86	6.44	6.28	6.24	34.00	34.00
	14.73	15.34	14.95	6.35	5.79	6.13	29.00	30.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 เวลาในการไหลของน้ำและอากาศที่ความดันลดต่างๆ

ความดันลด (น้ำน้ำต่อฟุต วัสดุบรรจุ)	เวลาในการไหลของน้ำ 200 มิลลิลิตร (วินาที)			เวลาที่ก๊าซไหลแทนที่น้ำ 2,000 มิลลิลิตร (วินาที)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ยอดหอ	ก้นหอ
1	13.78	13.95	14.08	35.41	35.13	35.12	32.00	35.00
	6.57	6.41	6.56	41.06	40.47	41.59	32.00	35.00
2	25.48	25.67	25.20	19.96	20.08	19.99	34.00	36.00
	10.13	9.94	9.95	24.62	24.82	24.58	32.00	35.00
	7.93	8.06	7.71	24.92	24.78	24.79	33.00	36.00
	6.64	6.48	6.58	25.73	25.95	26.08	33.00	36.00
3	10.39	10.22	10.42	20.11	20.30	20.05	33.00	36.00
	6.36	6.38	6.51	20.64	20.47	20.12	33.00	36.00
	4.54	4.65	4.39	21.12	21.25	21.16	34.00	36.00
4	7.81	7.63	7.76	16.72	16.59	16.59	34.00	36.00
	5.98	6.04	6.02	17.38	17.55	17.54	34.00	37.00
5	15.72	16.00	15.85	14.69	14.67	14.86	34.00	36.00
6	14.57	14.80	14.67	12.76	12.43	12.97	34.00	36.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4 แสดงผลการคำนวณสำหรับระบบของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่าความดันลดต่างๆ

1. ความดันลด 1 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

L (lb/s ft ²)	G (lb/s ft ²)	μ (cP)	ρ_G (lb/ft ³)	ρ_L (lb/ft ³)	$\frac{G^2 F \psi \mu^{0.2}}{\rho_G \rho_L g_c} \times 10^5$	$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$
0.32465	0.00518	0.71823	0.10841	62.034	4.589	2.623
0.46438	0.00491	0.73990	0.10895	62.065	4.133	3.961
0.58193	0.00473	0.72184	0.10870	62.041	3.825	5.149
0.75797	0.00506	0.76158	0.10948	62.100	4.381	6.295
0.84020	0.00449	0.71100	0.10824	62.022	3.457	7.811
0.97885	0.00423	0.76880	0.10966	62.109	3.070	9.718
1.02956	0.00503	0.76880	0.10966	62.109	4.329	8.608

2. ความดันลด 2 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

L (lb/s ft ²)	G (lb/s ft ²)	μ (cP)	ρ_G (lb/ft ³)	ρ_L (lb/ft ³)	$\frac{G^2 F \psi \mu^{0.2}}{\rho_G \rho_L g_c} \times 10^4$	$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$
0.29717	0.00807	0.70013	0.10798	62.003	1.115	1.536
0.46470	0.00742	0.73990	0.10904	62.065	0.942	2.624
0.56918	0.00747	0.71100	0.10824	62.022	0.954	3.185
0.73520	0.00817	0.73990	0.10895	62.065	1.145	3.769
0.84836	0.00807	0.75435	0.10930	62.091	1.117	4.409
0.95819	0.00785	0.76158	0.10948	62.100	1.042	5.127
1.09656	0.00739	0.74713	0.10913	62.078	0.936	6.219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความดันลด 3 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

L (lb/s ft ²)	G (lb/s ft ²)	μ (cP)	ρ_G (lb/ft ³)	ρ_L (lb/ft ³)	$\frac{G^2 F \psi \mu^{0.2}}{\rho_G \rho_L g_c} \times 10^3$	$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$
0.31787	0.01555	0.71823	0.10841	62.034	0.414	0.85465
0.47702	0.02336	0.24500	0.10856	62.047	0.935	0.85415
0.55545	0.02709	0.70368	0.10807	62.010	1.256	0.85583
0.72847	0.03589	0.75435	0.10930	62.091	2.208	0.85156
0.77819	0.03840	0.76158	0.10948	62.100	2.527	0.85092
0.97746	0.04803	0.73990	0.10895	62.065	2.693	0.85275
1.09274	0.05365	0.73629	0.10886	62.061	4.931	0.85307

4. ความดันลด 4 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

L (lb/s ft ²)	G (lb/s ft ²)	μ (cP)	ρ_G (lb/ft ³)	ρ_L (lb/ft ³)	$\frac{G^2 F \psi \mu^{0.2}}{\rho_G \rho_L g_c} \times 10^4$	$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$
0.33406	0.01347	0.72545	0.10856	62.047	3.109	1.037
0.46116	0.01103	0.70368	0.10807	62.010	2.082	1.746
0.56633	0.01293	0.73990	0.10895	62.065	2.864	1.835
0.67415	0.01208	0.74351	0.10904	62.071	2.501	2.339
0.81971	0.01127	0.69635	0.10780	61.997	2.177	3.032
0.94848	0.01124	0.74351	0.10904	62.071	2.166	3.535
1.11038	0.01092	0.73268	0.10877	62.056	2.043	4.257

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความดันลด 5 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

L (lb/s ft ²)	G (lb/s ft ²)	μ (cP)	ρ_G (lb/ft ³)	ρ_L (lb/ft ³)	$\frac{G^2 F \psi \mu^{0.2}}{\rho_G \rho_L g_c} \times 10^4$	$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$
0.30118	0.01312	0.73629	0.10886	62.061	2.951	0.961
0.44698	0.01306	0.72545	0.10856	62.047	2.920	1.432
0.51927	0.01392	0.78325	0.11002	62.134	3.319	1.570
0.69919	0.01287	0.71823	0.10841	62.034	2.837	2.271
0.74147	0.01245	0.75435	0.10930	62.091	2.656	2.499
0.99492	0.01182	0.72545	0.10856	62.047	2.394	3.521
1.08299	0.01258	0.69635	0.10780	61.997	2.711	3.590

6. ความดันลด 6 นิ้วน้ำต่อฟุตวัสดุบรรจุ

L (lb/s ft ²)	G (lb/s ft ²)	μ (cP)	ρ_G (lb/ft ³)	ρ_L (lb/ft ³)	$\frac{G^2 F \psi \mu^{0.2}}{\rho_G \rho_L g_c} \times 10^4$	$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$
0.29100	0.01530	0.71100	0.10824	62.022	4.011	0.797
0.42500	0.01410	0.78325	0.11002	62.134	3.424	1.267
0.56700	0.01490	0.71823	0.10841	62.034	3.789	1.596
0.70700	0.01430	0.80790	0.11058	62.164	3.496	2.091
0.86000	0.01390	0.72545	0.10856	62.047	3.322	2.583
1.01400	0.01300	0.72545	0.10856	62.047	2.902	3.259
1.20400	0.01250	0.70368	0.10807	62.010	2.705	3.972

ตารางที่ ค-5 แสดงผลการคำนวณสำหรับระบบของน้ำและก๊าซฮีเลียมที่ค่าความดันลดต่างๆ

ความดันลด (in H ₂ O/ft packing)	L (lb/s ft ²)	G (lb/s ft ²)	μ (cP)	ρ_G (lb/ft ³)	ρ_L (lb/ft ³)	$\frac{G^2 F \psi \mu^{0.2}}{\rho_G \rho_L g_c} \times 10^5$	$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$
1	0.253	0.00113	0.808	0.01005	62.164	2.386	2.864
	0.327	0.00093	0.754	0.00994	62.091	1.623	4.465
2	0.297	0.00191	0.783	0.01000	62.134	6.859	1.975
	0.442	0.00186	0.790	0.01002	62.145	6.503	3.019
3	0.289	0.00244	0.769	0.00997	62.109	11.199	1.500
	0.587	0.00224	0.762	0.00995	62.100	9.452	3.320
	0.836	0.00218	0.762	0.00995	62.100	8.963	4.851
4	0.279	0.00271	0.762	0.00995	62.999	13.609	1.303
	0.580	0.00239	0.747	0.00992	62.078	10.744	3.071
5	0.441	0.00286	0.762	0.00995	62.100	15.373	1.954
	0.322	0.00325	0.808	0.01005	62.164	19.940	1.260
6	0.463	0.00323	0.740	0.00990	62.065	19.642	1.811
	0.305	0.00340	0.808	0.01005	62.164	21.815	1.140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 แสดงผลการคำนวณสำหรับระบบของน้ำและอากาศที่ค่าความดันลดต่างๆ

ความดันลด (in H ₂ O/ft packing)	L (lb/s ft ²)	G (lb/s ft ²)	μ (cP)	ρ _G (lb/ft ³)	ρ _L (lb/ft ³)	$\frac{G^2 F \psi \mu^{0.2}}{\rho_G \rho_L g_c} \times 10^4$	$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$
1	0.328	0.00421	0.7471	0.07192	62.078	0.460	2.653
	0.701	0.00361	0.7471	0.07192	62.078	0.339	6.614
2	0.179	0.00737	0.7255	0.07157	62.047	1.411	0.827
	0.457	0.00601	0.7471	0.07192	62.078	0.938	2.588
	0.578	0.00595	0.7327	0.07169	62.056	0.920	3.304
	0.696	0.00570	0.7327	0.07169	62.056	0.844	4.149
3	0.442	0.00733	0.7327	0.07169	62.056	1.396	2.048
	0.712	0.00724	0.7327	0.07169	62.056	1.361	3.344
	1.009	0.00696	0.7255	0.07157	62.047	1.260	4.921
4	0.591	0.00886	0.7255	0.07157	62.047	2.042	2.263
	0.759	0.00842	0.7182	0.07146	62.034	1.840	3.062
5	0.288	0.01000	0.7255	0.07157	62.047	2.600	0.978
6	0.311	0.01159	0.7255	0.07157	62.047	3.491	0.912

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้