

การดูซึมก๊าซด้วยเมมเบรนคอนแทคเตอร์แบบเส้นใยกลวงในด้านสมบัติทางกายภาพและตัวแปรการ
ถ่ายเทมวลสาร



นายกษิตศิ แผ่นผา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GAS ABSORPTION BY HOLLOW FIBER MEMBRANE CONTACTOR IN TERMS OF PHYSICAL
PROPERTIES AND MASS TRANSFER PARAMETERS

Mr. Kasidit Phanpa



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรนคอนแทคเตอร์แบบเส้นใย
กลวงในด้านสมบัติทางกายภาพและตัวแปรการถ่ายเทมวล
สาร

โดย

นายกษิตศ แผ่นผา

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... กรรมการ
(ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เสริมพงศ์ สายเยี่ยม)

กชิตติศ แผ่นผา : การดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรนคอนแทคเตอร์แบบเส้นใยกลวงในด้านสมบัติทางกายภาพและตัวแปรการถ่ายเทมวลสาร (GAS ABSORPTION BY HOLLOW FIBER MEMBRANE CONTACTOR IN TERMS OF PHYSICAL PROPERTIES AND MASS TRANSFER PARAMETERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 212 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปยังเฟสของเหลวในระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์แบบเส้นใยกลวง เฟสของเหลวคือน้ำประปาในการดูดซึมก๊าซออกซิเจนและน้ำปราศจากไอออนในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม เช่น ขนาดรูพรุนเฉลี่ย อัตราการไหลของเฟสก๊าซ อัตราการไหลของเฟสของเหลว จำนวนเส้นเมมเบรน ความเข้มข้นของเฟสก๊าซ และผลกระทบของเฟสของเหลวจากการปนเปื้อนความขุ่นและสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก ประจุลบ และไม่มีประจุ เพื่อนำมาสร้างโมเดลอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการเดินระบบทั้งการดูดซึมก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการศึกษาลักษณะสัณฐานของเมมเบรน พบว่า เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง Microfiltration (0.1 ถึง 3 ไมครอน) จะให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซดีกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง Ultrafiltration (0.01 ถึง 0.1 ไมครอน) ในการศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) พบว่า การดูดซึมก๊าซออกซิเจน ค่า $k_L a$ จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของเฟสของเหลวและจำนวนเส้นเมมเบรนในระบบเพิ่มขึ้น แต่ค่า $k_L a$ จะลดลงเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวและความขุ่นปนเปื้อนในเฟสของเหลว ในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ค่า $k_L a$ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของเฟสของเหลวและความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าเฟสของเหลวคือสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตจะส่งผลให้ค่า $k_L a$ เพิ่มสูงขึ้นถึง 120 เปอร์เซ็นต์

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบฟองอากาศ พบว่า ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าหอดูดซึมแบบฟองอากาศ เนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลสารมากกว่าในขนาดการติดตั้งระบบที่เท่ากัน ทำให้ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์มีความน่าสนใจที่จะนำมาทดแทนอุปกรณ์ในการดูดซึมแบบดั้งเดิมและหอดูดซึมแบบฟองอากาศ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670117221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: MEMBRANE CONTACTOR / BUBBLE COLUMN / MASS TRANSFER

KASIDIT PHANPA: GAS ABSORPTION BY HOLLOW FIBER MEMBRANE CONTACTOR IN TERMS OF PHYSICAL PROPERTIES AND MASS TRANSFER PARAMETERS. ADVISOR: ASSOC. PROF.PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 212 pp.

This research aimed to study the performance of microporous hollow fiber membranes in a gas-liquid absorption system. Tap water was used in the oxygen (O₂) absorption study while deionized water was applied in carbon dioxide (CO₂) absorption system. The experiments were conducted to determine the most effective operating conditions such as average membrane pore size, gas flow rate, liquid flow rate, the number of hollow fiber membranes, and concentration of gas phase. In addition, three types of surfactants (cationic, anionic, and nonionic) and different levels of turbidity represented by kaolin were applied to the absorption system as contaminants to investigate the effect of each parameter. Later, the mathematical models were established to estimate the expected outcome ($k_L a$) which showed the absorption efficiency in both O₂ and CO₂ systems.

As a result, membranes with microfiltration-size (0.1-3 microns) could provide higher absorption efficiency than membranes with ultrafiltration-size (0.01-0.1 microns). The overall mass transfer coefficient ($k_L a$) for O₂ absorption rose when increasing the liquid flow rate and the number of hollow fiber membranes. On the other hand, $k_L a$ decreased when surfactant and turbidity were present in the system. In addition, CO₂ absorption system reported that increasing of liquid flow rate and carbon dioxide concentration could provide higher $k_L a$ especially up to 120 percent when sodium carbonate solution was added to liquid phase.

Finally, the comparison of mass transfer between membrane contractor and bubble column indicated that membrane contactor has more efficiency than bubble column because of high surface area for mass transfer at the same size of bubble column. Thus, using the hollow fiber membrane contactor seems to be a better choice compared to using the conventional gas absorption system and bubble column.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของบุคคลหลายท่านด้วยกัน

ด้วยแรงผลักดันของ รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธ์ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆให้ถูกต้องและรัดกุม ตลอดจนถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เปรียบได้ดั่งการเจียรไนลูกศิษย์ให้เป็นเพชรน้ำงาม ทอประกาย ล้ำค่ามากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล ที่ได้มอบโอกาสอันล้ำค่าต่างๆในการเปลี่ยนแปลงสู่ประสบการณ์ที่ประเมินค่าไม่ได้ในรั้วมหาวิทยาลัย รวมถึงสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ดิชม แก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ และ อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เสริมพงศ์ สายเรียม ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปการะในการทดลอง รวมทั้งช่วยให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้เนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อบรมดูแลประสิทธิ์ประสาทความรู้วิทยาการต่างๆ และให้คำปรึกษาด้วยความรักความเมตตา ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาในมหาวิทยาลัยแห่งนี้

ขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับผู้เขียนเอกสารค้นคว้า ตำรา หนังสือ บทความ งานวิจัย ตลอดจนเอกสารต่างๆ ที่ทำให้ผู้เขียนเข้าใจในเนื้อหาที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ มูลนิธิธรรม สรเทศน์ ที่ได้มอบทุนประจำปีการศึกษา 2557 และ 2558 ที่อนุเคราะห์ทุนการศึกษา ที่ผู้เขียนใช้ในการจัดสรรลงทุนในอุปกรณ์และค่าตรวจวัดต่างๆในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ "ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตครั้งที่ 4 ปีงบประมาณ 2558" จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ครอบครัวแผ่นดิน ที่สนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดามารดา ผู้ให้ชีวิต ผู้มีพระคุณ ตลอดจนอาจารย์และทุกคนที่มีส่วนสร้างพื้นฐานการศึกษาให้แก่ผู้เขียน

การทำงานย่อมมีการผิดพลาด ดังนั้น จักเป็นพระคุณอย่างยิ่งหากผู้อ่านวิทยานิพนธ์เล่มนี้พบข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาด หรือมีข้อเสนอแนะที่ควรปรับปรุงหรือพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น ผู้เขียนยินดีน้อมรับและนำไปปรับปรุงแก้ไขต่อไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คาร์บอนไดออกไซด์.....	4
2.1.1 คาร์บอนไดออกไซด์ในระดับโลก.....	4
2.1.2 คาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย.....	5
2.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	7
2.3 กระบวนการดูดซึม (Absorption).....	10
2.3.1 ตัวแปรสำคัญในกระบวนการดูดซึมและการไล่ก๊าซ.....	11
2.3.2 ประเภทของอุปกรณ์การดูดซึม.....	12
2.4 ระบบการดูดซึม.....	14
2.4.1 ระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous Systems).....	14
2.4.2 ระบบที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Non-aqueous Systems).....	14

2.5 การดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Gas-liquid Membrane Contactor) ...	15
2.5.1 วัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Type of Membrane).....	16
2.5.2 ความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำของเมมเบรน (Hydrophilicity/ Hydrophobicity of Membrane).....	17
2.5.3 การเปียกของเมมเบรน (Membrane Wetting).....	17
2.6 การถ่ายเทมวลในระบบการดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรน (Mass Transfer in Gas Absorption Membrane).....	21
2.6.1 การถ่ายเทมวลเมื่อมีการดูดซึมก๊าซทางกายภาพ.....	21
2.6.2 Enhancement Factor (E).....	23
2.6.3 Hatta Number (M_H).....	24
2.6.4 การถ่ายเทมวลเมื่อมีการดูดซึมก๊าซทางเคมี.....	24
2.6.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล.....	25
2.7 หอดูดซึมแบบฟองอากาศ (Bubble Column).....	27
2.7.1 พลศาสตร์ของของไหล (Fluid Dynamic).....	28
2.7.2 สัดส่วนของก๊าซ (Gas Holdup).....	30
2.7.3 ลักษณะของฟองอากาศ (Bubble Characteristic).....	31
2.7.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient).....	33
2.8 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant).....	34
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.9.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงในการดูดซึม.....	36
2.9.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารลดแรงตึงผิวในการดูดซึม.....	42
2.9.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้หอดูดซึมแบบฟองอากาศในการดูดซึม.....	43
2.9.4 งานวิจัยเกี่ยวกับความขุ่นในการดูดซึม.....	48
2.10 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา.....	49

บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย	51
3.1 ภาพรวมของงานวิจัย	51
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	54
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	54
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	55
3.3 การติดตั้งระบบการทดลอง	55
3.4 ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย	57
3.4.1 ตัวแปรด้านคุณสมบัติของเส้นใยแมมเบรน.....	57
3.4.2 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลจากการดูดซึมก๊าซออกซิเจน	58
3.4.3 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลจากการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	58
3.5 วิธีการทดลอง.....	61
3.5.1 การทดลองช่วงที่ 1	61
3.5.2 การทดลองช่วงที่ 2 3 4 และ 5	63
3.5.4 การทดลองช่วงที่ 6	69
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	76
4.1 ผลการศึกษารายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแมมเบรน รวมถึงศึกษา คุณสมบัติทางกายภาพทางด้านแรงดึงผิวของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	76
4.2 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตรา การดูดซึมก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ	81
4.2.1 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยแมมเบรนชนิด A.....	81
4.2.2 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยแมมเบรนชนิด B.....	84
4.2.3 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยแมมเบรนชนิด C.....	88
4.2.4 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยแมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับ สภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM).....	91

4.3 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ	94
4.3.1 ผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด A	94
4.3.2 ผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด B	95
4.3.3 ผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด C	97
4.3.4 ผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM).....	98
4.4 ผลการศึกษาผลกระทบของจำนวนเส้นเมมเบรนที่ถูกบรรจุภายในโมดูล ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ	103
4.4.1 ผลของการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A	103
4.4.2 ผลของการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนชนิด B.....	104
4.4.3 ผลของการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนทั้งสองชนิด	106
4.4.4 ผลการเปรียบเทียบค่า k_{La} ระหว่างการใช้เมมเบรนคอนแทคเตอร์กับหอดูดซึ่มแบบฟองอากาศ.....	107
4.5 ผลการศึกษาผลกระทบของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ	111
4.5.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุลบต่อเมมเบรนชนิด A	111
4.5.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุต่อเมมเบรนชนิด A.....	112
4.5.3 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกต่อเมมเบรนชนิด A	112
4.5.4 ผลของความชุ่มต่อเมมเบรนชนิด A.....	113
4.5.5 ผลของเฟสของเหลวต่อเมมเบรนชนิด A ในรูปของค่า α	114
4.6 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ผลกระทบของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลกระทบของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	117

4.6.1 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพ และอัตราการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	117
4.6.2 ผลการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	119
4.6.3 ผลการศึกษาผลกระทบของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูด ซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	121
4.6.3.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุลบต่อการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	121
4.6.3.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุต่อการดูดซึ่มก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์	121
4.6.3.3 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกต่อการดูดซึ่มก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์	121
4.6.3.4 ผลของการดูดซึ่มทางเคมีต่อการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	122
4.6.3.5 ผลของเฟสของเหลวต่อเมมเบรนชนิด A ในรูปของค่า α	123
4.6.3.6 ผลของเฟสของเหลวต่อเมมเบรนชนิด A ในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด (%Removal)	125
4.7 การสร้างโมเดลทำนายประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซ	126
4.7.2 การสร้างโมเดลทำนายประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจน	126
4.7.3 การสร้างโมเดลทำนายประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	128
4.7.4 ตัวอย่างการใช้โมเดลในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม	130
4.7.3.1 การใช้โมเดลในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในการดูดซึ่ม ก๊าซออกซิเจน	130
4.7.3.2 การใช้โมเดลในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในการดูดซึ่ม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	131
4.7.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้โมเดล.....	131
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	133

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	133
5.2 ข้อเสนอแนะ	134
รายการอ้างอิง	136
ภาคผนวก.....	143
ภาคผนวก ก.....	144
ภาคผนวก ข.....	149
ภาคผนวก ค.....	156
ภาคผนวก ง.....	159
ภาคผนวก จ.....	188
ภาคผนวก ฉ.....	207
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	212



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรุงเทพมหานครเทียบกับเมืองอื่น.....	7
ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของเฮนรีของก๊าซต่างๆ ในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	9
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่า $-\Delta_{\text{sol}}H/R$	10
ตารางที่ 2.4 ภาวะการเปียกของเมมเบรนเมื่อใช้ตัวดูดซึมที่แตกต่างกัน.....	18
ตารางที่ 2.5 สมการทางคณิตศาสตร์ของสัดส่วนของก๊าซ (ϵ_g) ในหอดูดซึมแบบพองอากาศ	31
ตารางที่ 2.6 สมการทางคณิตศาสตร์ของขนาดของพองอากาศ (d_b) ในหอดูดซึมแบบพองอากาศ.....	32
ตารางที่ 2.7 สมการทางคณิตศาสตร์ของความเร็วในการลอยตัวของพองอากาศ (U_b) ในหอดูดซึมแบบพองอากาศ.....	32
ตารางที่ 2.8 สมการทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) ในหอดูดซึมแบบพองอากาศ	33
ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อนนุ่ม.....	36
ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบสิ่งที่ขาดหายไปของงานวิจัยที่ทำการศึกษา.....	49
ตารางที่ 3.1 รูปภาพเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางรูปแบบต่างๆ.....	55
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 2	65
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 3	65
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 4	66

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆในการทดลองครั้งที่ 5	66
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรต่างๆในการทดลองครั้งที่ 6 ของการใช้เมมเบรนในการดูดซึม.....	70
ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของเมมเบรนแต่ละชนิด.....	79
ตารางที่ 4.2 มุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน ($^{\circ}$) ทั้ง 4 ชนิด	79
ตารางที่ 4.3 ขนาดรูพรุนของเมมเบรน (ไมครอน) ทั้ง 4 ชนิด.....	80
ตารางที่ 4.4 ผลแรงดึงผิวระหว่างน้ำ Milli-Q 18 เทียบกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร.....	80
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่า $k_L a$ ของระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบ พองอากาศ.....	110
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่า pH ของสารละลายสารลดแรงดึงผิว	124
ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์สำหรับสารลดแรงดึงผิวที่ใช้ในส่วนของดูดซึมก๊าซออกซิเจน	127
ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์สำหรับสารลดแรงดึงผิวที่ใช้ในส่วนของดูดซึมก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์.....	129
ตารางที่ ข-1 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเมมเบรนชนิด A.....	150
ตารางที่ ข-2 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเมมเบรนชนิด A.....	150
ตารางที่ ข-3 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเมมเบรนชนิด B.....	151
ตารางที่ ข-4 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเมมเบรนชนิด B.....	151
ตารางที่ ข-5 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่รวมตัวซัพพอร์ตของเมมเบรนชนิด C .	151
ตารางที่ ข-6 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในรวมตัวซัพพอร์ตของเมมเบรนชนิด C	152
ตารางที่ ข-7 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเมมเบรนชนิด C.....	152
ตารางที่ ง-1 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟส ของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที.....	160

ตารางที่ ง-23 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ถึง 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 7000 ppm.....	182
ตารางที่ ง-24 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 5000 และ 9000 ppm.....	183
ตารางที่ ง-25 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 9000 ppm ปนเปื้อนสาร SLS ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC	184
ตารางที่ ง-26 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 9000 ppm ปนเปื้อนสาร Tween 80 ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC.....	185
ตารางที่ ง-27 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 9000 ppm ปนเปื้อนสาร DPC ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC	186
ตารางที่ ง-28 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 9000 ppm ปนเปื้อนสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์	187
ตารางที่ จ-1 เปรียบเทียบค่า k_La (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที.....	189
ตารางที่ จ-2 เปรียบเทียบค่า k_La (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	189
ตารางที่ จ-3 เปรียบเทียบค่า k_La (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที.....	189

ตารางที่ จ-4 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	190
ตารางที่ จ-5 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	190
ตารางที่ จ-6 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	191
ตารางที่ จ-7 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที.....	191
ตารางที่ จ-8 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	191
ตารางที่ จ-9 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	192
ตารางที่ จ-10 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	192
ตารางที่ จ-11 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที.....	193
ตารางที่ จ-12 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	193
ตารางที่ จ-13 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที.....	193
ตารางที่ จ-14 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	194
ตารางที่ จ-15 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตร ต่อนาที.....	194

ตารางที่ จ-28 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	199
ตารางที่ จ-29 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	199
ตารางที่ จ-30 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	199
ตารางที่ จ-31 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	200
ตารางที่ จ-32 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	200
ตารางที่ จ-33 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	200
ตารางที่ จ-34 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	200
ตารางที่ จ-35 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหล ของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	201
ตารางที่ จ-36 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหล ของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	201
ตารางที่ จ-37 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหล ของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	201
ตารางที่ จ-38 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหล ของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	202
ตารางที่ จ-39 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อมีสารละลาย ของสารลดแรงตึงผิวประจุลบความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC	202

ตารางที่ จ-40 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อมีสารละลายของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC.....	203
ตารางที่ จ-41 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อมีสารละลายของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC	203
ตารางที่ จ-42 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อมีความขุ่นความเข้มข้น 50 ถึง 800 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	204
ตารางที่ จ-43 สรุปผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	204
ตารางที่ จ-44 สรุปผลจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	204
ตารางที่ จ-45 สรุปผลจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุลบต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	205
ตารางที่ จ-46 สรุปผลจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	205
ตารางที่ จ-47 สรุปผลจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	205
ตารางที่ จ-48 สรุปผลจากความเข้มข้นของการดูดซึมทางเคมีโดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	206

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวประชากรทั่วโลก	5
รูปที่ 2.2 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย.....	6
รูปที่ 2.3 การดูดซึ่มก๊าซด้วยเมมเบรน	16
รูปที่ 2.4 มุมสัมผัสระหว่างของเหลวและผิวของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง.....	17
รูปที่ 2.5 การดำเนินระบบในสภาวะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก (Non-wetted Mode).....	20
รูปที่ 2.6 การดำเนินระบบในสภาวะเมมเบรนเปียก (Wetted Mode).....	21
รูปที่ 2.7 รูปแบบการไหลแบบต่างๆในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ	29
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระบบการไหลแบบต่างๆในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ ระหว่างความเร็วก๊าซกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม	30
รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระบบการไหลแบบต่างๆในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ ระหว่างสัดส่วนของก๊าซกับความเร็วก๊าซที่เข้าสู่ระบบ	31
รูปที่ 2.10 ผลของค่า k_La จากแพคเหล็กกล้าไร้สนิมและแอลกอฮอล์ในงานวิจัยของ Bhatia และ คณะ.....	46
รูปที่ 2.11 ผลของอัตราเร็วของเฟสก๊าซต่อค่า k_La ในงานวิจัยของดาวัน เจริญพิทยา.....	47
รูปที่ 2.12 ผลของความเร็วของเฟสก๊าซต่อค่า k_La ในงานวิจัยของ Sastaravet และคณะ	47
รูปที่ 2.13 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อค่า k_La เมื่อเฟสของเหลวถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว ในงานวิจัยของนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์.....	48
รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองทั้งหมด 7 การทดลอง.....	53
รูปที่ 3.2 แผนผังการเดินระบบการทดลองในช่วงที่ 2 ถึง 5.....	56
รูปที่ 3.3 แผนผังการเดินระบบเมมเบรนในการทดลองช่วงที่ 6	57

รูปที่ 3.4 การติดเมมเบรนบน Dataphysics PUR11- Tensiometry	62
รูปที่ 3.5 การตั้งค่าเบื้องต้นในการหาขนาดมุมสัมผัสของหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) โดยใช้โปรแกรม SCAT	62
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการวัดแรงดึงผิวของเฟสของเหลว	63
รูปที่ 3.7 แผนผังของระบบในการทดลองช่วงที่ 2 3 4 และ 5	64
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนละลายน้ำต่อเวลา	68
รูปที่ 3.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจน	68
รูปที่ 3.10 แผนผังของระบบในการทดลองช่วงที่ 6	69
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการลดลงของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเวลา	72
รูปที่ 3.12 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วิธีที่ 1	72
รูปที่ 3.13 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วิธีที่ 2	74
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก ESEM ของเมมเบรนชนิด A.....	77
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจาก ESEM ของเมมเบรนชนิด B	78
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจาก ESEM ของเมมเบรนชนิด C	78
รูปที่ 4.4 การดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตร ต่อนาที.....	81
รูปที่ 4.5 การดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตร ต่อนาที.....	82
รูปที่ 4.6 การดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อ นาที.....	82

รูปที่ 4.7 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตร ต่อนาที.....	83
รูปที่ 4.8 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A	84
รูปที่ 4.9 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมม เบรนชนิด A	84
รูปที่ 4.10 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที.....	85
รูปที่ 4.11 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตร ต่อนาที.....	85
รูปที่ 4.12 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตร ต่อนาที.....	86
รูปที่ 4.13 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตร ต่อนาที.....	86
รูปที่ 4.14 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด B	87
รูปที่ 4.15 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมม เบรนชนิด B	88
รูปที่ 4.16 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	88
รูปที่ 4.17 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตร ต่อนาที.....	89
รูปที่ 4.18 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตร ต่อนาที.....	89
รูปที่ 4.19 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตร ต่อนาที.....	90

รูปที่ 4.20 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด C	91
รูปที่ 4.21 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C	91
รูปที่ 4.22 การดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพ ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	92
รูปที่ 4.23 การดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพ ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	92
รูปที่ 4.24 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)	93
รูปที่ 4.25 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)	94
รูปที่ 4.26 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวของเมมเบรนชนิด A	95
รูปที่ 4.27 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A	95
รูปที่ 4.28 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวของเมมเบรนชนิด B	96
รูปที่ 4.29 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B	97
รูปที่ 4.30 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวของเมมเบรนชนิด C	98
รูปที่ 4.31 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C	98
รูปที่ 4.32 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)	99

รูปที่ 4.33 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของ เมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM).....	100
รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลเฟสก๊าซต่อค่า k_La	101
รูปที่ 4.35 ผลการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลเฟสของเหลวต่อค่า k_La	102
รูปที่ 4.36 การถ่ายเทมวลสำหรับ (ก) การเดินระบบแบบแห้ง (ข) การเดินระบบแบบเปียก บางส่วน	102
รูปที่ 4.37 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหลเฟส ของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที.....	103
รูปที่ 4.38 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟส ของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที.....	104
รูปที่ 4.39 ผลของจำนวนเส้นเมมเบรน A ต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน	104
รูปที่ 4.40 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหลเฟส ของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที.....	105
รูปที่ 4.41 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟส ของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที.....	105
รูปที่ 4.42 ผลของจำนวนเส้นเมมเบรน B ต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน	106
รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบผลของจำนวนเส้นเมมเบรนต่อค่า k_La	106
รูปที่ 4.44 อธิบายการกระจายของก๊าซและของเหลวในการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรน	107
รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบค่า k_La ระหว่างเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบฟองอากาศใน งานวิจัยของ Sastaravet P. et al. (2014).....	108
รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบค่า k_La ระหว่างเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบฟองอากาศใน งานวิจัยของ ตาวัน เจริญพิทยา (2556)	109

รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบกลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบพองอากาศ	110
รูปที่ 4.48 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อเฟสของเหลวปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวประจุลบ.....	111
รูปที่ 4.49 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อเฟสของเหลวปนเปื้อน สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ.....	112
รูปที่ 4.50 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อเฟสของเหลวปนเปื้อน สารลดแรงตึงผิวประจุบวก	113
รูปที่ 4.51 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อเฟสของเหลวปนเปื้อนความชุ่ม	114
รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบค่า α ระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ	115
รูปที่ 4.53 เปรียบเทียบค่า α ของความชุ่มที่ความเข้มข้นต่างๆ	116
รูปที่ 4.54 ผลของชั้นฟิล์มสารลดแรงตึงผิวบริเวณผิวของเฟสของเหลว	116
รูปที่ 4.55 ผลการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวจากอัตราการไหลเฟสของเหลวต่างๆ	118
รูปที่ 4.56 ผลของอัตราการไหลเฟสของเหลวต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	118
รูปที่ 4.57 ผลการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	120
รูปที่ 4.58 ผลของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	120
รูปที่ 4.59 ผลการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวจากผลกระทบของโซเดียมคาร์บอเนต	122
รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบค่า α ระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ	124
รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบค่า α ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต.....	124

รูปที่ 4.62 เปอร์เซนต์การกำจัดระหว่างการดูดซึมทางกายภาพและทางเคมี	125
รูปที่ 4.63 ความแม่นยำของโมเดลต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจน.....	128
รูปที่ 4.64 ความแม่นยำของโมเดลต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	129
รูปที่ ก-1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม (Environmental Scanning Electron Microscope, ESEM).....	145
รูปที่ ก-2 เครื่องวัดแรงตึงผิว (Tensiometer).....	145
รูปที่ ก-3 Standard Measuring Probe for The Wilhelmy Plate Method	146
รูปที่ ก-4 Dataphysics PUR11- Tensiometry	146
รูปที่ ก-5 โมดูลแก้วสำหรับบรรจุเส้นใยเมมเบรน	146
รูปที่ ก-6 บั๊มสุบจ่ายสารเคมี	147
รูปที่ ก-7 บั๊มอากาศ	147
รูปที่ ก-8 DO-meter	147
รูปที่ ก-9 CO ₂ -meter.....	148
รูปที่ ก-10 อุปกรณ์ต่อ DO-meter กับระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์	148
รูปที่ ข-1 ขนาดมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) ของเส้นใยเมมเบรนชนิด A.....	153
รูปที่ ข-2 ขนาดมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) ของเส้นใยเมมเบรนชนิด B	153
รูปที่ ข-3 ขนาดมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) ของเส้นใยเมมเบรนชนิด C	154
รูปที่ ข-4 ขนาดมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) ของเส้นใยเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)	154
รูปที่ ข-5 ขนาดแรงตึงผิวของน้ำ Milli-Q 18.....	155

รูปที่ ข-6 ขนาดแรงดึงผิวของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร 155

รูปที่ ฉ-1 ตัวอย่างการคำนวณค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ).....210

รูปที่ ฉ-2 การตั้งพารามิเตอร์ใน Solver 211



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกเป็นปัญหาหลักที่หลายๆ ประเทศเป็นกังวลและร่วมมือป้องกันบรรเทาไม่ให้อุณหภูมิร้อนเกินไปกว่าที่เป็นอยู่ ปัญหาหลักคือการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมที่เติบโตอย่างรวดเร็วทำให้มีการนำพลังงานฟอสซิล (Fossil Fuel) เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนมาใช้ การใช้พลังงานเหล่านี้ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้เพิ่มขึ้นจาก 280 ส่วนในล้านส่วนในกลางศตวรรษที่ 18 เป็น 379 ส่วนในล้านส่วน ในปี พ.ศ. 2548 (ค.ศ. 2005) และคาดว่าจะเพิ่มเป็น 2 เท่า (700 ส่วนในล้านส่วน) ภายใน พ.ศ. 2643 (ค.ศ. 2100) (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2557) โดยปัญหาภัยแล้ง พายุฝนรุนแรง น้ำท่วม คลื่นความร้อน พืชผลการเกษตรเสียหาย การระบาดของโรคภัยต่างๆ ที่รุนแรงขึ้น เป็นเพียงตัวอย่างของความเสียหายที่สืบเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก จะเห็นได้ว่าปัญหาการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปัญหาที่หวนวิตกกันทั่วโลก ซึ่งมีแนวโน้มที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น และสร้างความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของมนุษย์ทุกชาติ เพราะเป็นปัญหาใกล้ตัวมนุษย์มากที่สุด การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงนับว่าเป็นเรื่องที่น่าสนใจและมีประโยชน์อย่างมากในอนาคต

การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวิธีการแรกๆ ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอุปกรณ์ในการดูดซับแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้ได้แก่ คอลัมน์แบบแผ่นเพลทหรือถาด (Plate or Tray Column) คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางหรือแบบแพค (Media or Packed Column) หอสเปรย์ (Spray Tower) และสครับเบอร์ (Scrubber) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ได้ถูกศึกษาอย่างแพร่หลายและมีข้อจำกัดด้านการเดินระบบ เช่น การเกิดอิมัลชัน (Emulsion) การเกิดฟอง (Foaming) และการท่วม (Flooding) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง จึงมีการศึกษาวิจัยกระบวนการใหม่ๆ ที่ถูกพัฒนามาใช้ทดแทนอุปกรณ์ข้างต้น เช่น หอดูดซับแบบฟองอากาศ และการใช้กระบวนการ

เมมเบรนคอนแทคเตอร์ ซึ่งเป็นกระบวนการทดแทนที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถลดข้อจำกัดของอุปกรณ์การดูดซึมแบบดั้งเดิมข้างต้นได้

หอดูดซึมแบบฟองอากาศ เป็นถึงปฏิกรณ์ที่มีลักษณะเป็นหอทรงกระบอกแนวตั้งแบบเติมอากาศชนิดหนึ่ง มีข้อดีหลายประการระหว่างการดำเนินการ และการบำรุงรักษา เช่น มีการใช้งานและการดูแลรักษาที่ง่าย มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทมวลที่สูง มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการบำรุงรักษาที่ต่ำ เป็นต้น ส่วนกระบวนการเมมเบรนคอนแทคเตอร์ มีข้อดีในการปรับอัตราการไหลได้อย่างอิสระของเฟสก๊าซและของเหลว เนื่องจากไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงของทั้งสองเฟสจากมีเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงเป็นตัวกั้น จึงทำให้เป็นข้อได้เปรียบของกระบวนการนี้ เนื่องจากการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวล ซึ่งอุปกรณ์นี้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสูงมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์การดูดซึมก๊าซแบบอื่นๆ คืออยู่ระหว่าง $500-5000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ กับ $20-500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ตามลำดับ และขนาดของอุปกรณ์เมมเบรนในการเดินระบบยังมีขนาดกะทัดรัด ทำให้การเคลื่อนย้ายหรือขยายขนาดทำได้ง่ายไปด้วย (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2556)

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้กระบวนการเมมเบรนคอนแทคเตอร์ เช่น มีการศึกษาการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสมโดยใช้ของเหลวดูดซึมต่างชนิดกัน มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่างๆ มีการศึกษาตัวแปรด้านจลศาสตร์ของของไหลในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้านี้นี้แทบไม่พบการศึกษาผลของการวนเฟสของเหลวกลับมาใช้ในการดูดซึมก๊าซ การใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงตามท้องตลาดในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลของความเข้มข้นเฟสก๊าซในระบบ รวมถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนระหว่างการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงและหอดูดซึมแบบฟองอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้ การเดินระบบในสภาวะจริง เฟสของเหลวที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซอาจปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวหรือความขุ่น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเพิ่มหรือลดประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซ

จากเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการวนกลับเฟสของเหลวมาใช้ในการดูดซึมก๊าซ ผลของสารลดแรงตึงผิวและผลของความขุ่นในเฟสของเหลวดูดซึม ผลของความเข้มข้นเฟสก๊าซในระบบ รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนเทียบกับหอดูดซึมแบบฟองอากาศ

เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ของงานวิจัยทางด้านกระบวนการเมมเบรนคอนแทคเตอร์ให้เป็นที่เข้าใจมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในระบบการดูดซึมก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง
- 2) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนระหว่างการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงและหอดูดซึมแบบฟองอากาศ
- 3) เพื่อสร้างโมเดลทำนายประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารในการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบการดูดซึมก๊าซต่อไปในอนาคต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง
- 2) ใช้ออกซิเจนจากอากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บรรจุถังเป็นตัวถูกดูดซึม
- 3) ใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงแบบ MF 1 ชนิด
- 4) ใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงแบบ UF 2 ชนิด
- 5) ใช้โมดูลแก้ว ที่มีความยาวยังผล (Effective Length) ขนาด 20 เซนติเมตร ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 1 เซนติเมตร โดยมีความหนาอยู่ที่ 0.1 เซนติเมตร
- 6) การทดลองเป็นแบบทีละเท (Batch)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบสภาวะที่มีผลต่ออัตราการดูดซึมและประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง
- 2) ทราบประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนระหว่างการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงเปรียบเทียบกับหอดูดซึมแบบฟองอากาศ
- 3) ทราบและเข้าใจแบบจำลอง รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการถ่ายเทมวลสารในการสร้างโมเดลทำนายประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) มีสูตรเคมีคือ CO_2 เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ พบได้โดยทั่วไปในชั้นบรรยากาศของโลก ประกอบไปด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และ ออกซิเจน 2 อะตอม ต่อหนึ่งโมเลกุล โมเลกุลประกอบด้วยพันธะคู่ 2 พันธะ ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 44.01 มีจุดเดือดที่ 78.5 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นที่ 0 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.997 หรือคิดเป็นประมาณ 1.5 เท่าของอากาศ สามารถละลายได้ในน้ำ เมื่อเพิ่มความดันและลดอุณหภูมิจะอยู่ในสถานะของเหลวและของแข็งได้ ถ้าอยู่ในรูปของเหลว จะเรียกว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหลว (Liquid Carbon Dioxide) ถ้าอยู่ในรูปของแข็งเป็นผลึกเย็น เรียกว่า น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice) โดยปกติเป็นก๊าซที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี แต่สามารถทำปฏิกิริยากับออกไซด์โลหะและไฮดรอกไซด์ ได้ผลผลิตเป็นคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต

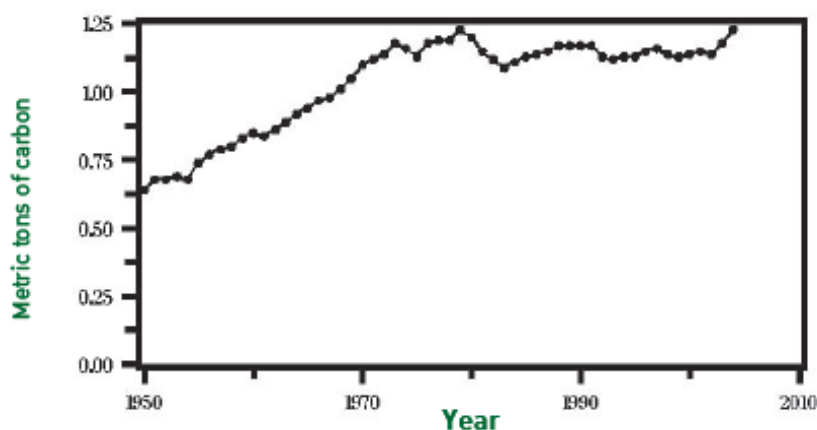
เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ร่างกายทางลมหายใจ จะเกิดอาการพิษเฉียบพลันได้เมื่อก๊าซนี้แทนที่ออกซิเจนในบริเวณที่จำกัด ทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการหายใจ ถ้าสูดดมเข้าสู่ร่างกายในปริมาณสูงมากร่างกายจะสนองโดยเริ่มจากการหายใจเร็วขึ้น หายใจติดขัด หายใจลำบาก จนถึงอาการขาดออกซิเจน คือ กตมอง ซึม สับสน ปวดศีรษะ วิงเวียน ความดันสูง อัตราการเต้นของหัวใจสูงขึ้น ถ้าความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 12 หรือมากกว่าจะหมดสติภายใน 1-2 นาที ซึ่งมักพบกรณีทำงานในที่อับอากาศ เช่น ไซโล ถังหมัก บ่อลึก เป็นต้น

2.1.1 คาร์บอนไดออกไซด์ในระดับโลก

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากข้อมูลในอดีตจนถึงปัจจุบันปัจจุบันเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มีการบันทึกความเปลี่ยนแปลงในสถานที่ต่างๆ ทั่วโลก ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณคาร์บอนหลายพันล้านตันในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับไว้โดยทะเลและชีวมวลที่มีชีวิตเพิ่มมากขึ้นทุกปี ซึ่งเป็นที่รู้กันว่าการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณมหาศาลเหล่านี้ขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศในแต่ละปีผ่านทางกระบวนการทางธรรมชาติ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์จากที่ดินและการใช้ประโยชน์จากป่าไม้จะสามารถปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และดูด

ซั้บคาร์บอนไดออกไซด์ในเวลาเดียวกัน ถ้ามีการรักษาวัฏจักรข้างต้นนี้ให้อยู่ในระดับสมดุลแล้ว การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของการถ่ายเทคาร์บอนหรือปริมาณคาร์บอนในแหล่งที่สามารถดูดซั้บและปล่อยคาร์บอนออกสู่ชั้นบรรยากาศจะอยู่ในสภาวะที่สมดุลได้

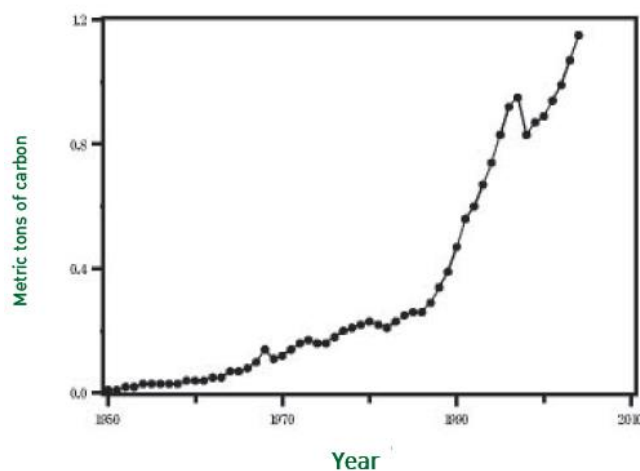
อย่างไรก็ตามนับตั้งแต่เริ่มมีการปฏิวัติอุตสาหกรรม ความสมดุลนี้ได้เริ่มเปลี่ยนแปลงไป และมีการคาดว่าสามารถฟื้นฟูสภาพกลับสู่ภาวะสมดุลได้ยากในอนาคตอันใกล้ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้เพิ่มขึ้นจาก 280 ส่วนในล้านส่วนในกลางศตวรรษที่ 18 เป็น 379 ส่วนในล้านส่วน ในปี พ.ศ. 2548 (ค.ศ. 2005) แหล่งสำคัญมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลหลายชนิดถูกปล่อยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ รูปที่ 2.1 ได้แสดงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวประชากรทั่วโลกได้เพิ่มจาก 0.63 ตันต่อปี ในปี พ.ศ. 2493 (ค.ศ. 2050) เป็น 1.23 ตัน ในปี พ.ศ. 2550 (ค.ศ. 2007) คิดเป็นอัตราการเพิ่มเฉลี่ยร้อยละ 1.14 ต่อปี



รูปที่ 2.1 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวประชากรทั่วโลก

2.1.2 คาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย

ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทยได้มีแนวโน้มในด้านการเพิ่มขึ้นจากช่วงทศวรรษที่ผ่านมาจาก 1.6 ตันต่อคนต่อปี ในปี พ.ศ. 2533 (ค.ศ. 1990) เป็น 4.3 ตันต่อคนต่อปี ในปี พ.ศ. 2547 (ค.ศ. 2004) ถึงแม้จะมีการปล่อยจะลดลงในช่วงวิกฤติเศรษฐกิจระหว่างปี พ.ศ. 2540-2541 (ค.ศ. 1997-1998) แต่ปริมาณการปล่อยก็เริ่มเพิ่มขึ้นอีกนับแต่ปี พ.ศ. 2542-2550 (ค.ศ. 1999-2007) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร, 2552)



รูปที่ 2.2 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย

ในปี พ.ศ. 2548 (ค.ศ. 2005) กระทรวงพลังงานได้ระบุว่า กิจกรรมการใช้พลังงานของผู้ใช้พลังงานรวมปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึงร้อยละ 56 ของปริมาณการปล่อยรวมทั้งหมดในปี พ.ศ. 2546 (ค.ศ. 2003) ขณะที่การปล่อยที่เป็นผลมาจากกิจกรรมการเกษตรมีเพียงร้อยละ 24 การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและป่าไม้ปล่อยเพียงร้อยละ 7 ของปริมาณการปล่อยรวมทั้งหมดของประเทศไทย ภาคอุตสาหกรรมปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็นร้อยละ 19 ของปริมาณการปล่อยรวมทั้งหมด

สำหรับในจังหวัดกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นเมืองหลวงของประเทศไทย เป็นศูนย์กลางการคมนาคม การบริหารราชการ และการทำธุรกิจ จึงเป็นแหล่งสำคัญหลักของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปี พ.ศ. 2548 (ค.ศ. 2005) มีการปล่อยก๊าซดังกล่าวมากถึง 43 ล้านตัน สูงกว่าการปล่อยรวมในเมืองโตรอนโต ประเทศแคนาดา ที่ปล่อยเพียง 24 ล้านตัน ถึงแม้จะเป็นปริมาณการปล่อยที่น้อยกว่าปริมาณการปล่อยรวมของเมืองนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ปล่อยมากถึง 58 ล้านตัน ซึ่งปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย เทียบเท่ากับปริมาณการปล่อยของลอนดอน ประเทศอังกฤษ ที่ปล่อยรวม 44 ล้านตันต่อปี นอกจากนี้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหัวประชากรเมื่อเปรียบเทียบกับ พบว่า ประชากรในกรุงเทพมหานครมีปริมาณการปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 7.1 ตันต่อคนต่อปี ในปี พ.ศ. 2548 (ค.ศ. 2005) ซึ่งเท่ากับประชากรในนิวยอร์กที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 7.1 ตันต่อคนต่อปี และเมื่อเทียบกับประชากรในลอนดอน คนในกรุงเทพมหานครปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าคนในลอนดอน

ที่ปล่อยเพียง 5.9 ตันต่อคนต่อปี ขณะที่การปล่อยก๊าซชนิดนี้ของคนกรุงเทพมหานครยังน้อยกว่าประชากรในเมืองโตรอนโต ประเทศแคนาดาที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 9.6 ตันต่อคนต่อปี ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรุงเทพมหานครเทียบกับเมืองอื่น

ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคนต่อปี ในปี พ.ศ.2548		
เมือง	ล้านตันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคน (ตันต่อคนต่อปี)
กรุงเทพมหานคร	43	7.1
โตรอนโต	24	9.6
นิวยอร์ก	58	7.1
ลอนดอน	44	5.9

ปี พ.ศ. 2550 (ค.ศ. 2007) กรุงเทพมหานครจัดการให้มีพื้นที่ประมาณ 1,187,500 ไร่ของสวนที่มีต้นไม้ประมาณสามล้านต้น ต้นไม้เหล่านี้และต้นไม้ในพื้นที่ครอบครองของเอกชนสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากถึงปีละ 100,000 ตัน

2.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไว้ในรูปแบบต่างๆ เพื่อไม่ให้ออกไปสู่บรรยากาศ โดยมีวิธีการที่ใช้โดยทั่วไป 3 วิธี ดังนี้ (ธงไทย วิฑูรย์, 2554)

การดูดซึม แบ่งเป็นการใช้การดูดซึมทางกายภาพโดยใช้กฎของเฮนรี (Henry's Law) และการดูดซึมทางเคมีที่มีการใช้สารเคมีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมเช่นสารกลุ่มเอมีน เช่น โมโนเอทานอลามีน และไดเอทานอลามีน เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้ว กฎของเฮนรีจะถูกใช้ในการประมาณปริมาณก๊าซที่สามารถละลายอยู่ในเฟสของเหลว สำหรับก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยหรือปานกลาง โดยที่ความสามารถในการละลายน้ำจะ

ขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ (Lee F.F., 2007) (Green D.W., 2008) ดังแสดงในสมการ

$$p = k_H \cdot c$$

เมื่อ	p	=	ความดันย่อยของก๊าซที่ถูกละลายในสารละลาย
	k_H	=	ค่าคงที่เฮนรี่ (Henry 's Law Constant)
			สำหรับค่า k_H ของก๊าซบางชนิด มีค่าดังนี้
			ออกซิเจน (O_2) มีค่า 769.2 L·atm/mol
			คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่า 29.4 L·atm/mol
			ไฮโดรเจน (H_2) มีค่า 1282.1 L·atm/mol
			เมื่อก๊าซข้างต้นละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน
	c	=	ความเข้มข้นของก๊าซที่ถูกละลายในสารละลาย

นอกจากนี้ ค่าคงที่ของเฮนรี่สามารถแสดงในรูปตัวแปรไร้หน่วยระหว่างความเข้มข้นเฟสก๊าซหารด้วยความเข้มข้นในเฟสของเหลว ดังนี้

$$K_H^{cc} = C_{aq} / C_{gas}$$

เมื่อ	K_H^{cc}	=	ค่าการระเหยของเฮนรี่ (Henry Volatility)
	C_{aq}	=	ความเข้มข้นของเฟสของเหลว (Aqueous-phase Concentration) (mole/l)
	C_{gas}	=	ความเข้มข้นของเฟสก๊าซ (Gas-phase Concentration) (mole/l)

Sander R. (2015) ได้สรุปค่าคงที่ของเฮนรี่ของก๊าซในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของเฮนรีของก๊าซต่างๆ ในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

สมการ	$k_H^{pc} = \frac{p_{gas}}{C_{aq}}$	$k_H^{cp} = \frac{C_{aq}}{p_{gas}}$	$k_H^{px} = \frac{p_{gas}}{x_{aq}}$	$k_H^{cc} = \frac{C_{aq}}{C_{gas}}$
หน่วย	$\frac{L \cdot atm}{mol}$	$\frac{mol}{L \cdot atm}$	atm	ไร้หน่วย
O ₂	769.23	1.3×10^{-3}	4.259×10^4	3.18×10^{-2}
H ₂	1282.05	7.8×10^{-4}	7.099×10^4	1.907×10^{-2}
CO ₂	29.41	3.4×10^{-2}	0.163×10^4	8.317×10^{-1}
N ₂	1639.34	6.1×10^{-4}	9.077×10^4	1.492×10^{-2}
He	2702.7	3.7×10^{-4}	1.497×10^5	9.051×10^{-3}
Ne	2222.22	4.5×10^{-4}	1.23×10^5	1.101×10^{-2}
Ar	714.28	1.4×10^{-3}	3.955×10^4	3.425×10^{-2}
CO	1052.63	9.5×10^{-4}	5.828×10^4	2.324×10^{-2}

Harvey A-H. et al. (2007) ได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้ค่าคงที่เฮนรีเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จากสมการของแวนตฮอฟ (Van't Hoff Equation) ดังนี้

$$\frac{d \ln H}{d(1/T)} = \frac{-\Delta_{sol}H}{R}$$

เมื่อ $\Delta_{sol}H$ คือ เอนทัลปีของการไม่ละลาย (Enthalpy of Dissolution) และ H คือ เอนทัลปีซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับเอนทัลปีจากค่าคงที่เฮนรี และเมื่อทำการปริพันธ์ (Integrate) บนพื้นฐาน $k_H^{cp, \theta}$ อ้างอิงที่ $T^\theta = 298.15$ เคลวิน จะได้

$$H(T) = k_H^{cp, \theta} \times \exp \left[\frac{-\Delta_{sol}H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^\theta} \right) \right] \quad (2.1)$$

สมการของแวนตฮอฟข้างต้นจะใช้ได้ในช่วงที่อุณหภูมิหนึ่งๆเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ $\Delta_{\text{sol}}H$ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน ตารางที่ 2.3 ได้แสดงค่า $-\Delta_{\text{sol}}H/R$ (ในหน่วยอุณหภูมิเป็นเคลวิน)

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่า $-\Delta_{\text{sol}}H/R$

O ₂	H ₂	CO ₂	N ₂	He	Ne	Ar	CO
1700	500	2400	1300	230	490	1300	1300

การละลายน้ำของก๊าซจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายมักจะมีค่าคงที่ของเฮนรีที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก และส่วนใหญ่แล้วก๊าซจะมีค่าคงที่เฮนรีต่ำสุดที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

การดูดซับ แบ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพด้วยแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ และการดูดซับทางเคมีที่มีการใช้พอลิเมอร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเช่นพอลิเมอร์ที่มีอนุพันธ์ของเอมีนโดยใช้กลไกในการดูดซับคล้ายกับการใช้สารละลายเอมีน เป็นต้น

โครโอเจนิค เป็นการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า -73.3 องศาเซลเซียส เพื่อควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในสภาพของเหลว ซึ่งทำให้สามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซอื่นๆได้

2.3 กระบวนการดูดซึม (Absorption)

การดูดซึม (Absorption) คือ ปรากฏการณ์ที่อะตอม โมเลกุล หรือไอออน ถูกถ่ายโอนเข้าไปในส่วนที่เป็นเนื้อในของวัสดุที่เป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง โดยใช้หลักการการถ่ายโอนมวลสาร (Mass Transfer) ที่เป็นก๊าซ (หรือไอ) ที่มีความสามารถในการละลาย (Soluble Gas) ออกจากกระแสะอากาศไปยังตัวทำละลายที่เป็นของเหลว (Solvent Liquid)

กระบวนการดูดซึมจะเกิดขึ้นในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่จัดให้มีการสัมผัสกันระหว่างกระแสะอากาศและตัวทำละลายโดยใช้แรงผลักดันให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร แรงผลักดันที่ใช้ในการผลักก๊าซที่ต้องการกำจัดออกมาจากกระแสะอากาศไปสู่ตัวทำละลาย ได้แก่ ความแตกต่างของความดันย่อย (Partial Pressure) ของก๊าซชนิดนั้นๆที่ต้องการให้เกิดการดูดซึม การดูด

ซึ่มจะเกิดขึ้นได้เมื่อแรงผลักเป็นบวก กล่าวคือ ก๊าซจะออกจากเฟสก๊าซไปสู่ตัวทำละลายในเฟสของเหลว แต่ถ้าแรงผลักเป็นลบจะไม่มี การดูดซึ่มเกิดขึ้น โดยอัตราการดูดซึ่มขึ้นกับชนิดทางกายภาพของก๊าซ เช่น การแพร่กระจาย อัตราการไหล ความเข้มข้น ความหนาแน่น และสภาวะของตัวทำละลาย เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของของเหลว เป็นต้น (จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ, 2552)

นอกจากนี้ ยังมีกระบวนการที่มีลักษณะตรงกันข้ามกับกระบวนการดูดซึ่มที่กล่าวก่อนไปแล้ว ซึ่งถูกเรียกว่าการไล่ก๊าซ (Desorption or Stripping) ซึ่งเป็นการถ่ายเทมวลสารจากเฟสของเหลวไปยังเฟสก๊าซ (Liquid to Gas Mass Transfer) ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มอัตราการระเหยของสารปนเปื้อนหรือของเสียอันตรายออกสู่บรรยากาศหรือแยกออกจากน้ำเสีย เช่น การกำจัดสารปนเปื้อนที่เป็นสารระเหยได้ง่าย เช่น ตัวทำละลาย (Solvent) ก๊าซที่มีกลิ่น (Odorous Gas) สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) เป็นต้น

การดูดซึ่มเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี การดูดซึ่มทางกายภาพจะมีกลไกการทำงานโดยโครงสร้างทางกายภาพที่ทำให้เกิดการดูดซึ่มด้วยแรงดึงดูดทางพันธะแบบอ่อนๆที่เกี่ยวข้อง เช่น แรง Van Der Waals หรือพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อก๊าซที่ถูกดูดซึ่มละลายอยู่ในตัวทำละลายโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ถ้าเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซที่ถูกดูดซึ่มกับตัวทำละลายก็จะเป็นการดูดซึ่มทางเคมี ซึ่งเป็นกลไกการทำงานให้เกิดการดูดซึ่มด้วยแรงดึงดูดพันธะเคมีที่แรงกว่าแบบแรก เช่น เกิดการดึงดูดด้วยไอออน หรือเกิดพันธะโควาเลนต์ เป็นต้น

ถ้าก๊าซที่ปนเปื้อนในกระแสาอากาศนั้นละลายในตัวทำละลายได้ดี การบำบัดด้วยวิธีการดูดซึ่มจะมีประสิทธิภาพสูง แต่สำหรับก๊าซปนเปื้อนที่ละลายได้ไม่ดีในตัวทำละลาย บางครั้งอาจต้องมีการเติมสารเคมีเข้าไป สารเคมีอาจช่วยให้การละลายของก๊าซดีขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของก๊าซที่ปนเปื้อนนั่น เช่น การเติมสารโซเดียมซิเตรท (Sodium Citrate, $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) ในการดูดซึ่มก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide, SO_2) หรือบางครั้งต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเคมีที่เติมเข้าไปกับก๊าซปนเปื้อน เช่น การใช้ปูนขาว (Lime, CaO) ในการพ่นจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น (สัมพันธ์ โฆษิตพล, 2538)

2.3.1 ตัวแปรสำคัญในกระบวนการดูดซึ่มและการไล่ก๊าซ

ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซึ่มและการไล่ก๊าซ สามารถสรุปได้เป็น 4 ตัวแปร ได้แก่ ตัวถูกดูดซึ่ม ตัวดูดซึ่ม ก๊าซตัวพา และพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ตัวถูกดูดซึมหรือตัวถูกละลาย (Absorbate or Solute) คือ เฟสก๊าซที่ถูกปนเปื้อนด้วยมลสาร เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซอื่นๆ เป็นต้น
- 2) ตัวดูดซึม (Absorbent) คือ เฟสของเหลว เช่น น้ำหรือสารประกอบต่างๆที่ใช้ในการดักจับเฟสก๊าซ หรือมีเฟสก๊าซละลายอยู่ภายในเฟสของเหลวนั้น

การเลือกตัวดูดซึมที่ใช้ในการดูดซึมควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ต้องการและราคาของสารเคมี โดยทั่วไปมักใช้น้ำเป็นตัวดูดซึม เนื่องจากก๊าซปนเปื้อนส่วนใหญ่สามารถละลายในน้ำได้อีกทั้งน้ำยังสามารถหาได้ง่ายและราคาถูก โดยตัวดูดซึมที่ดีควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 2.1) สามารถละลายก๊าซที่ต้องการกำจัดออกจากกระแสอากาศได้ดี
 - 2.2) ควรมีอัตราการระเหยต่ำเพื่อลดการสูญเสียตัวทำละลาย
 - 2.3) ควรเป็นสารที่ไม่กัดกร่อนเพื่อช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องมือ
 - 2.4) ควรมีราคาไม่แพงและหาได้ง่าย
 - 2.5) ควรมีความหนืดต่ำเพื่อช่วยเพิ่มการดูดซึมและลดการเกิดท่วมขังของตัวทำละลายในอุปกรณ์ (Flooding)
 - 2.6) ควรเป็นสารที่ไม่เป็นพิษไม่ติดไฟและมีจุดเยือกแข็งต่ำ
- 3) ก๊าซตัวพา (Carrier Gas) คือ ก๊าซเฉื่อย (Inert Gas) ซึ่งทำหน้าที่นำพามลสารต่างๆ เข้าหรือออกจากเฟสของเหลวเท่านั้น โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาการดูดซึมและการไล่ก๊าซ เช่น ก๊าซไนโตรเจนที่พบในสัดส่วนประมาณร้อยละ 78 ในอากาศ เป็นต้น
 - 4) พื้นผิวสัมผัส (Interface) คือ พื้นผิวซึ่งเฟสก๊าซและเฟสของเหลวเกิดการสัมผัสซึ่งกันและกัน โดยที่การเพิ่มขึ้นและลดลงของผิวสัมผัสดังกล่าวสามารถส่งผลโดยตรงต่ออัตราเร็วในการเกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างการดูดซึมและการไล่ก๊าซ

2.3.2 ประเภทของอุปกรณ์การดูดซึม

หน้าที่ของอุปกรณ์การดูดซึม คือ การสร้างผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวให้มากที่สุด (Gas-Liquid Interface) เพื่อส่งผลต่ออัตราเร็วในการถ่ายเทมวลสารและประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ อุปกรณ์ระบบการดูดซึมที่นิยมใช้กันมากมีดังต่อไปนี้ (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2554)

1) คอลัมน์แบบแผ่นเพลทหรือถาด (Plate or Tray Column)

คอลัมน์แบบแผ่นเพลทหรือถาด (Plate or Tray Column) อาศัยหลักการการบังคับให้กระแสอากาศไหลย้อนขึ้นด้านบนผ่านรูเล็กๆ (Orifice) ของแผ่นรองรับ (Plate) ไปสัมผัสกับชั้นของน้ำหรือของเหลวที่เป็นตัวทำละลายซึ่งไหลอยู่บนแผ่นรองรับนั้นๆ โดยสามารถปรับอัตราการไหลของกระแสอากาศได้ โดยส่วนใหญ่แล้วจะใส่ของเหลวที่แผ่นรองรับบนสุดแล้วปล่อยให้ไหลผ่านแต่ละแผ่นรองรับลงมาและออกทางด้านล่างในลักษณะการไหลแบบสวนกระแส (Counter-current Flow) สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- 1.1) Sieve Tray ในถาดแบบ Sieve Tray ไอน้ำจะขึ้นเป็นฟองผ่านรูในถาดผ่านของเหลวที่กำลังไหลอยู่ รูจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3 ถึง 12 มิลลิเมตร โดยขนาดที่นิยมใช้คือ 5 มิลลิเมตร และพื้นที่ไอของรูอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 15 ของพื้นที่ถาด ของเหลวจะค้างอยู่บนพื้นผิวถาดและไม่ไหลลงผ่านรูด้วยพลังงานจลน์ของไอหรือก๊าซ ความลึกของของเหลวบนถาดจะถูกควบคุมด้วยฝายที่ทางออก ของเหลวที่ล้นจะไหลผ่าน Downspout ไปที่ถาดที่อยู่ถัดไปข้างล่าง
- 1.2) Valve Tray ประกอบด้วยช่องในถาดปิดด้วยวาล์วแบบยกตัวที่มีรางคุมให้วาล์วอยู่เหนือช่องเปิด ทำให้มีพื้นที่เปิดที่แปรเปลี่ยนด้วยกระแสไอที่ป้องกันการรั่วของของเหลวผ่านช่องที่อัตราไอน้ำ ดังนั้น ถาดประเภทนี้จึงถูกนำไปใช้ในช่วงอัตราการไหลที่กว้างกว่าแบบ Sieve Tray
- 1.3) Bubble-Cup Tray ถาดชนิดนี้ถูกแทนที่ด้วย Sieve หรือ Valve Tray เนื่องจากราคาที่สูงกว่าเกือบสองเท่า ในถาดชนิดนี้ ไอหรือก๊าซจะไหลผ่านช่องในถาดขึ้นสู่ Bubble Cap แล้วก๊าซจะไหลผ่านช่องรอบๆ Cap แล้วขึ้นผ่านชั้นของเหลวที่ไหลลงมา

2) คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางหรือแบบแพค (Media or Packed Column)

คอลัมน์แบบแพค เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ดีมาก เนื่องจากคอลัมน์ชนิดนี้บรรจุขึ้นหรือวัสดุตัวกลาง (Media or Packing Materials) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว คอลัมน์แบบแพคที่นิยมใช้มี 2 แบบ ได้แก่ แบบไหลสวนกระแส (Counter-current Flow) และแบบไหลในทิศทางเดียวกัน (Co-current Flow)

3) หอสเปรย์ (Spray Tower)

หลักการของอุปกรณ์ คือ การพ่นฝอยของเหลวลงสู่กระแสน้ำอากาศเพื่อชะล้างสารมลพิษที่ต้องการบำบัดออกจากกระแสน้ำอากาศไปสู่ของเหลว ข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ แม้ว่าจะมีอนุภาคปะปนอยู่ในกระแสน้ำอากาศก็ จะไม่เกิดการอุดตัน แต่ถ้ามีการนำของเหลวกลับมาใช้ใหม่โดยไม่ได้กำจัดอนุภาคออกเสียก่อนก็จะทำให้เกิดการอุดตันที่หัวพ่นของเหลว (Nozzle) ได้โดยง่าย

2.4 ระบบการดูดซึม

ระบบการดูดซึมแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และแบบที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย แต่เป็นการใช้สารละลายอินทรีย์ที่มีค่าการระเหยต่ำเป็นตัวทำละลายแทน กล่าวคือ

2.4.1 ระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous Systems)

ในระบบนี้ก๊าซที่ต้องการกำจัดออกไปจะต้องมีความสามารถในการละลาย (Solubility) ในน้ำที่เพียงพอ อนุกรมของกระแสน้ำอากาศเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต สำหรับก๊าซที่มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะต้องใช้น้ำในการบำบัดเป็นปริมาณมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้น้ำในการบำบัด ก๊าซที่เหมาะสมสำหรับใช้น้ำในการบำบัด ได้แก่ ก๊าซไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) และก๊าซไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric) เป็นต้น และถ้ายังใช้น้ำที่มีค่า pH สูงหรือมีความเป็นด่างก็จะมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรด ดังกล่าวให้สูงขึ้น ในบางครั้งจึงมีการใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีค่า pH สูง หรือเติมสารเคมีที่มีความเป็นด่างลงในน้ำเพื่อเพิ่มค่า pH ของน้ำสูงขึ้น เช่น การเติมโซดาไฟ (Caustic Soda, NaOH) หรือปูนขาว เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีเท่านั้น

2.4.2 ระบบที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Non-aqueous Systems)

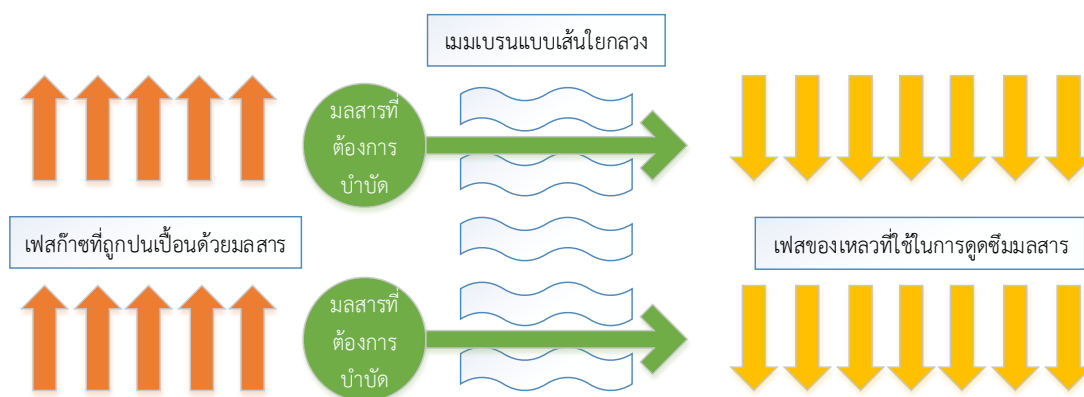
ในระบบนี้จะใช้ของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ไดเมทิลอานาลีน (Dimethylaniline) และเอมีน (Amines) เป็นตัวทำละลายแทนน้ำ ข้อจำกัดของของเหลวหรือสารละลายเหล่านี้ คือ สามารถที่จะใช้ได้เฉพาะกับกระแสน้ำอากาศเสียที่มีสารมลพิษปนเปื้อนที่เป็นก๊าซล้วนๆ ไม่มีอนุภาคเจือปน เพราะถ้าหากว่ามีอนุภาคเจือปนอยู่ในกระแสน้ำอากาศแล้วจะทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างตัวทำละลายดังกล่าวกับอนุภาคกลายเป็นกากตะกอน (Sludge) ซึ่งยากที่จะกำจัดออกไปในภายหลัง

สารละลายอินทรีย์นี้เหมาะสำหรับใช้ในการบำบัดไอของสารอินทรีย์เพราะไอของสารอินทรีย์จะละลายและผสมกันได้ดีกับสารละลายเหล่านี้ และเมื่อต้องการนำไอของสารอินทรีย์เหล่านั้นมาใช้ใหม่ก็สามารถสกัดออกมาได้ที่อุณหภูมิต่ำซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงาน พวกละอองคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากชนิดต่างๆ เช่น เฮกซะดีเคน (Hexadecane) ก็สามารถใช้ในการดูดซึมไอของสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้ดี

ในระบบการดูดซึมไม่ว่าจะเป็นระบบที่ใช้ น้ำหรือไมใช้น้ำก็ตาม หลังจากการผ่านก๊าซที่ต้องการดูดซึมผ่านตัวทำละลาย เมื่อดูดซึมแล้วก็อาจทิ้งตัวทำละลายที่ปนเปื้อนแล้วนั้นไปโดยไม่นำมาใช้อีก หรือหลังจากการดูดซึมแล้วอาจนำตัวทำละลายมาแยกก๊าซหรือไอที่ดูดซึมเอาไว้เพื่อนำสารละลายนั้นกลับมาใช้เป็นตัวทำละลายอีกครั้งเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายอีกทางหนึ่งด้วย

2.5 การดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Gas-liquid Membrane Contactor)

การดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง เป็นกระบวนการแยกก๊าซที่ไม่ต้องการออกจากก๊าซผสมผ่านรูพรุนที่ผิวเมมเบรนไปยังของเหลว โดยอาศัยคุณสมบัติการละลายน้ำของก๊าซ (Physical Absorption) หรือการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับสารละลายดูดซึม (Chemical Absorption) โดยผิวสัมผัสของเมมเบรนมีบทบาททำหน้าที่เป็นตัวกั้นระหว่างเฟสของก๊าซและของเหลว ทำให้ไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงของทั้งสองเฟส ดังรูปที่ 2.3 จึงเป็นข้อได้เปรียบในด้านการปรับอัตราส่วนการไหลของเฟสก๊าซและของเหลวได้อย่างอิสระต่อกัน ไม่เกิดปัญหาการท่วม การเกิดฟอง หรือการพาข้ามเฟสที่พบในอุปกรณ์การดูดซึมก๊าซแบบอื่นๆ ที่ใช้งานอยู่ นอกจากนี้ การใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงยังทำให้อุปกรณ์มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสูงมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์การดูดซึมก๊าซแบบอื่นๆ คืออยู่ระหว่าง $500-5000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ กับ $20-500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ตามลำดับ (รัตนจิระรัตนานนท์, 2556)



รูปที่ 2.3 การดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรน

ในระบบการดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรน (Gas Absorption Membrane, GAM) ควรพิจารณาถึงปัจจัยดังต่อไปนี้

2.5.1 วัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Type of Membrane)

เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ใช้ในกระบวนการดูดซึมก๊าซมักถูกผลิตขึ้นจากวัสดุประเภทไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ มีความพรุน (Porosity) สูง และมีเสถียรภาพทางเคมีเมื่อถูกนำไปใช้ในการใช้งานจริง เช่น โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) และพอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) เป็นต้น และเมื่อพิจารณาจากการวัดความเปียกด้วยค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) จะพบว่า คุณสมบัติไม่ชอบน้ำของ $PTFE > PE > PP > PVDF$ (Khaisri S. et al., 2009)

เนื่องจากเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ถูกผลิตจากวัสดุ PVDF เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี เนื้อวัสดุมีความบริสุทธิ์สูง มีคุณสมบัติในการต้านทานหรือรับแรงโดยปราศจากความเสียหาย (Strength) สูง มีความต้านทานต่อตัวทำละลายกรดต่าง ทนทานต่อแสง UV สามารถใช้กับน้ำที่มีค่า pH อยู่ในช่วง 1 ถึง 11 ได้ดี ให้ควันที่ต่ำเมื่อนำเกิดการติดไฟ (Sairiam S., 2013) สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาที่ถูก จึงทำให้งานวิจัยนี้มีการเลือกใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ถูกผลิตจากวัสดุ PVDF ในการทดลองร่วมกับเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงชนิดอื่น

2.5.2 ความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำของเมมเบรน (Hydrophilicity/ Hydrophobicity of Membrane)

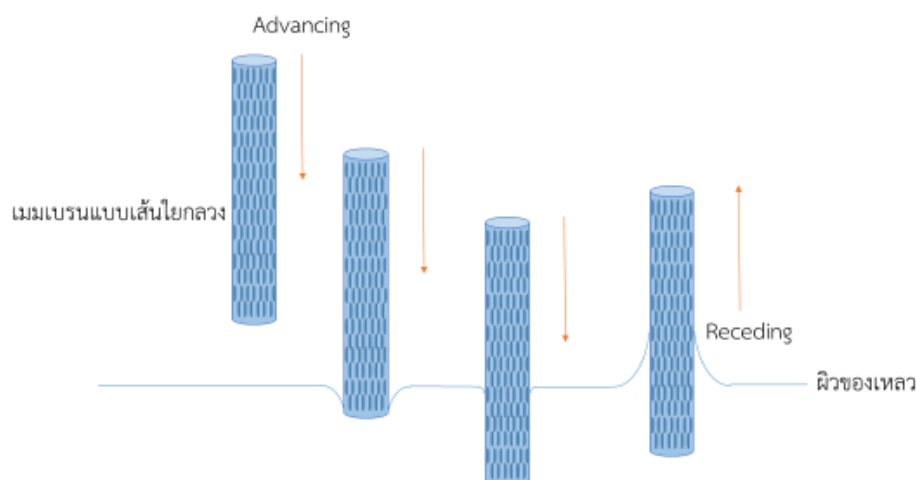
ถ้าเมมเบรนมีความไม่ชอบน้ำต่ำจะส่งผลทำให้ของเหลวซึมผ่านรูเมมเบรนได้ดี จะทำให้ค่าฟลักซ์หรืออัตราการแยกลดลงและอาจมีการเจือปนของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ในการพิจารณาความชอบน้ำ (Hydrophilicity) หรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ของเมมเบรน สามารถพิจารณาได้จากสูตรโครงสร้างทางเคมีของโพลีเมอร์ที่นำมาผลิตเมมเบรน ซึ่งการใช้เมมเบรนที่ผลิตจากโพลีเมอร์ที่มีความไม่ชอบน้ำจะทำให้มีค่าฟลักซ์สูงและลดโอกาสเกิดคราบ เมือก หรือตะกอนสะสมได้ จึงทำให้มีการผลิตเมมเบรนจากโพลีเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำเนื่องจากมีข้อได้เปรียบด้านความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีดีกว่าโพลีเมอร์ที่ชอบน้ำ

2.5.3 การเปียกของเมมเบรน (Membrane Wetting)

การเปียกของเมมเบรนสามารถพิจารณาได้หลายวิธี ดังนี้

1) มุมสัมผัสของหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน

การวัดขนาดมุมสัมผัสของของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) โดยวัดมุมระหว่างของเหลวเทียบกับผิวเมมเบรน ณ จุดที่ผิวทั้งสองสัมผัสกัน เมมเบรนจะมีแนวโน้มเปียกมากขึ้นเมื่อขนาดมุมสัมผัสมีค่าลดลง การวัดขนาดมุมสัมผัสจะอาศัยวิธีการวัดของ Wilhelmy โดยใช้เครื่อง Tensiometer ในการวัด ขนาดมุมสัมผัสสามารถแบ่งได้เป็น Advancing Contact Angles และ Receding Contact Angles ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 มุมสัมผัสระหว่างของเหลวและผิวของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

2) ของเหลวที่ถูกใช้เป็นตัวดูดซึม

ตัวทำละลายในกระบวนการดูดซึมส่วนใหญ่มักเป็นของเหลว การใช้เมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำจะส่งผลให้มุมสัมผัสระหว่างของเหลวและเมมเบรนมีค่าที่สูง ซึ่งส่งผลให้การเปียกของเมมเบรนมีค่าน้อยลง การเปียกของเมมเบรนจึงขึ้นอยู่กับชนิดของดูดซึมที่แตกต่างกัน

Li J-J. et al. (2005) ได้สรุปภาวะการเปียกของชนิดเมมเบรนที่แตกต่างกันโดยของเหลวดูดซึมที่ใช้กันโดยทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ภาวะการเปียกของเมมเบรนเมื่อใช้ตัวดูดซึมที่แตกต่างกัน

Membrane	Absorption liquid	Wettability	Cause of Wetting
PTFE	Aqueous MEA	-	Hydrophobicity of PTFE is not enough
PE	Aqueous MEA	+	Hydrophobicity of PE is not enough
PP	Aqueous NaOH solutions	+	Possible modification of pores by trace impurities and ionic species
	Aqueous amines solutions	+	
PTFE	Aqueous amines	-	
PP	Aqueous alkanolamines	-	
	Aqueous amino acid salt solutions	-	
PTFE	Aqueous MEA	+	Larger pore size of PTFE
PVDF	Aqueous MEA	-	
PP	Water, aqueous NaOH, Aqueous MEA	+ (MEA)	Not given, but possibly due to low surface tension of MEA, insufficient hydrophobicity and

Membrane	Absorption liquid	Wettability	Cause of Wetting
			chemical instability of membrane
PE		+ (MEA)	
PTFE		-	
PE +F		-	
PP	Aqueous amines solutions	+	Cause of wetting was not given; PTFE is more chemically stable
PES + PDMS		+	
PP + PDMS		+	
PTFE		-	
PP	Aqueous NaOH solutions	-	Possibly the low surface tension of aqueous MDEA
Aqueous MDEA	Aqueous MDEA	+	
PTFE	Aqueous KOH solutions	-	

+ : Wetted; -: non-wetted; F: coated with fluoropolymer; PP: polypropylene; PE: polyethylene; PES: poly(ether sulphone); PDMS: coated with polydimethylsiloxane (silicon rubber); PTFE: polytetrafluoroethylene (Teflon); PVDF: polyvinylidene fluoride; AMP: 2-amino-2-methyl-1-propanol; DEA: methyl-diethanolamine; EAE: 2-(ethylamino)-ethanol; MEA: monoethanolamine; DEA: diethanolamine; and TEA: tri-ethanolamine.

3) ความดันของของเหลวที่ใช้เป็นตัวดูดซึม

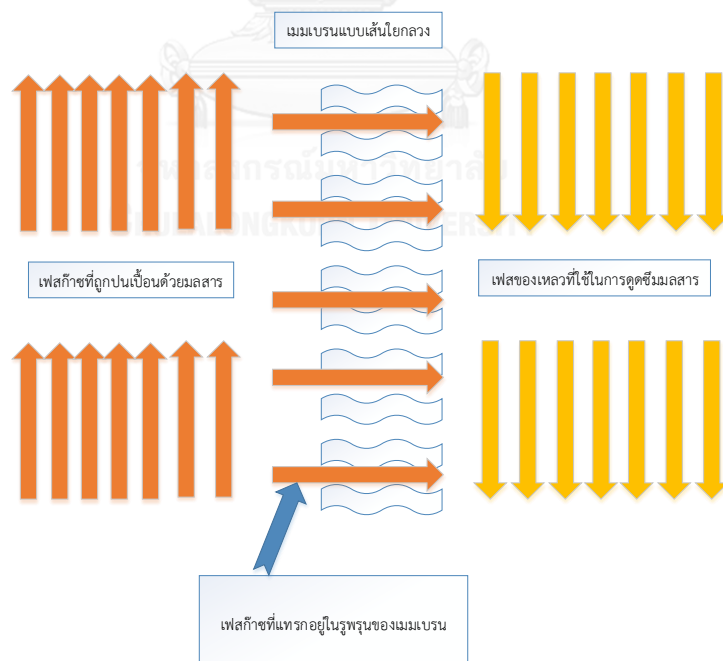
สำหรับของเหลวที่ใช้เป็นตัวดูดซึม ความดันขั้นต่ำที่ใส่ให้กับของเหลวสามารถคำนวณได้จากสมการของ Young-Laplace คือ

$$\Delta P = \frac{4\sigma_L \cos\theta}{d_{\max}}$$

เมื่อ	ΔP	คือ ความดันที่ต่ำที่สุดที่ให้กับของเหลวผ่านรูของเมมเบรน (N/m^2)
	σ_L	คือ แรงตึงผิวของของเหลว (N/m)
	θ	คือ มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับเมมเบรน ($^\circ$)
	d_{\max}	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพอร์ในเมมเบรน (m)

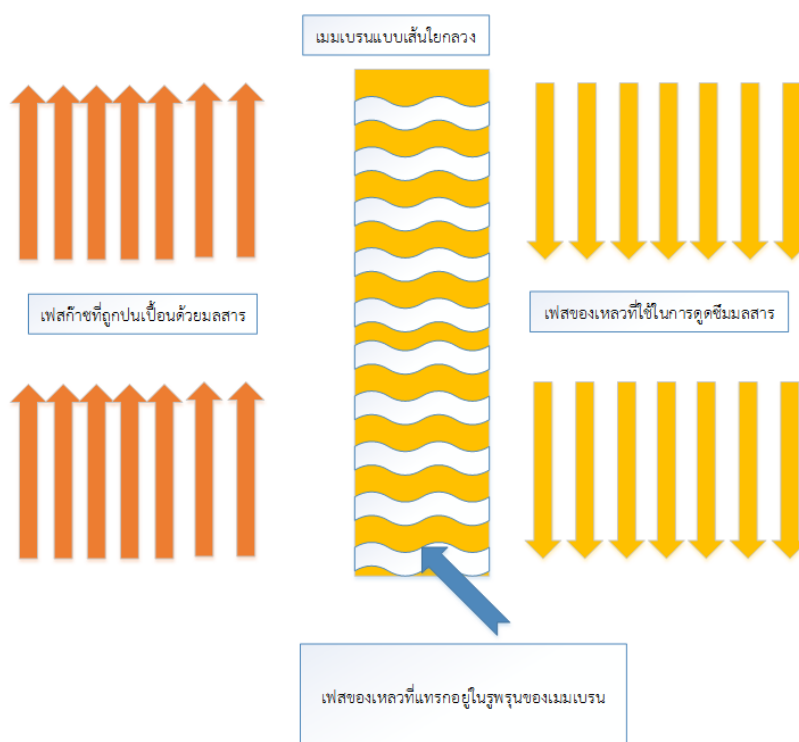
ΔP ในสมการข้างต้นมีชื่อเรียกหลายอย่าง เช่น Breakthrough Pressure, Bubble Pressure, หรือ Wetting Pressure

จากสมการของ Laplace จะพบว่า ΔP ที่ให้กับของเหลวต้องมากกว่าผลต่างของความดันด้านของเหลว-ความดันด้านก๊าซ จึงจะเกิดสภาพเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก (Non-wetted Mode) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 หรือสภาพที่ของเหลวไม่สามารถเข้าไปในรูพอร์ของเมมเบรนได้



รูปที่ 2.5 การดำเนินระบบในสภาวะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก (Non-wetted Mode)

หาก ΔP ที่ให้กับของเหลวมีค่าไม่เหมาะสม อาจเกิดสภาพเมมเบรนที่เปียกได้ (Wetted Mode) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หรือสภาพที่ของเหลวเข้าไปเต็มรูพรุนของเมมเบรน



รูปที่ 2.6 การดำเนินระบบในสถานะเมมเบรนเปียก (Wetted Mode)

2.6 การถ่ายเทมวลในระบบการดูดซึ่มก๊าซด้วยเมมเบรน (Mass Transfer in Gas Absorption Membrane)

การถ่ายเทมวลในระบบการดูดซึ่มก๊าซด้วยเมมเบรนมีการถ่ายเทมวล 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การถ่ายเทมวลจากเฟสก๊าซไปยังผิวของเมมเบรน
- 2) การถ่ายเทมวลของก๊าซผ่านรูพรุนของเมมเบรน
- 3) การถ่ายเทมวลของก๊าซไปยังเฟสของเหลว

2.6.1 การถ่ายเทมวลเมื่อมีการดูดซึ่มก๊าซทางกายภาพ

การถ่ายเทมวลเมื่อมีการดูดซึ่มก๊าซทางกายภาพ จะอาศัยคุณสมบัติการละลายน้ำของก๊าซที่มีค่าแตกต่างกัน จึงทำให้ถูกจำกัดด้วยค่าการละลายน้ำ ดังนี้

1) การถ่ายเทมวลในสถานะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก (Non-wetted Mode)

เมื่อให้ของเหลวหรือตัวดูดซึมไหลผ่านทางด้านท่อเมมเบรน (Tube) และก๊าซไหลในเชลล์ (Shell) สามารถอธิบายสมการการถ่ายเทมวลรวมเมื่อคิดจากเฟสของก๊าซเป็นหลักในสถานะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก ได้ดังนี้

$$\frac{1}{k_G d_i} = \frac{1}{k_g d_o} + \frac{1}{k_m d_{ln}} + \frac{H}{k_L d_i}$$

เมื่อ	k_G	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (m/s)
	d_i	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของเมมเบรน (m)
	d_o	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของเมมเบรน (m)
	d_{ln}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง log-mean (m) หาได้จาก

$$d_{ln} = \frac{d_o - d_i}{\ln(d_o/d_i)}$$

	k_g	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านก๊าซ (m/s)
	k_m	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านเมมเบรน (m/s)
	k_L	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านของเหลว (m/s)
	H	คือ ค่าคงที่ของเฮนรี (ไม่มีหน่วย)

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า ความต้านทานการถ่ายเทมวลรวมจะเป็นผลรวมของความต้านทานย่อย ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานด้านก๊าซ ความต้านทานด้านเมมเบรน และความต้านทานด้านของเหลว เมื่อความต้านทานการถ่ายเทมวลเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

นอกเหนือจากการพิจารณาการถ่ายเทมวลในเทอม k_G แล้ว ยังสามารถพิจารณาในเทอมของ k_L ที่เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อคิดจากเฟสของเหลวเป็นหลัก เพราะในกระบวนการดูดซึมก๊าซส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยเฟสของของเหลว สามารถอธิบาย

สมการการถ่ายเทมวลรวมเมื่อคิดจากเฟสของของเหลวเป็นหลักในสภาวะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก ได้ดังนี้

$$\frac{1}{k_L d_i} = \frac{1}{H k_g d_o} + \frac{1}{H k_m d_{ln}} + \frac{1}{k_i d_i}$$

2) การถ่ายเทมวลในสภาวะเมมเบรนเปียก (Wetted Mode)

เมื่อให้ของเหลวหรือตัวดูดซับไหลผ่านทางด้านท่อเมมเบรน (Tube) และก๊าซไหลใน เซลล์ (Shell) สามารถอธิบายสมการการถ่ายเทมวลรวมเมื่อคิดจากเฟสของก๊าซเป็นหลักในสภาวะ เมมเบรนเปียก ได้ดังนี้

$$\frac{1}{k_G d_o} = \frac{1}{k_g d_o} + \frac{H}{k'_m d_{ln}} + \frac{H}{k_i d_i}$$

เมื่อ k'_m คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเมมเบรนเปียก (m/s)

และเมื่อคิดจากเฟสของของเหลวเป็นหลักในสภาวะเมมเบรนเปียก ได้ดังนี้

$$\frac{1}{k_L d_o} = \frac{1}{H k_g d_o} + \frac{1}{k'_m d_{ln}} + \frac{1}{k_i d_i}$$

2.6.2 Enhancement Factor (E)

Enhancement Factor (E) คือ อัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทมวลเมื่อมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เทียบกับเมื่อไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเมื่อมีแรงขับเคลื่อน (Driving Force) เท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าเป็นตัว แปรที่แสดงผลของปฏิกิริยาที่ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น โดยค่า E จะมีค่ามากกว่าหรือ เท่ากับ 1 เสมอ ถ้าค่า E มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีไม่มีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวล แต่ถ้า ค่า E มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น โดยค่า E สามารถ คำนวณได้ดังนี้

$$E = \frac{\text{อัตราการถ่ายเทมวลเมื่อมีปฏิกิริยาเคมี}}{\text{อัตราการถ่ายเทมวลเมื่อไม่มีปฏิกิริยาเคมี}}$$

2.6.3 Hatta Number (M_H)

Hatta Number (M_H) คือ สัดส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดในชั้นฟิล์มของเหลวต่ออัตราการแพร่สูงสุดผ่านชั้นฟิล์ม ทำหน้าที่แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วหรือช้า ดังนี้

1. ค่า M_H มากกว่า 2 แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีขึ้นเร็วถึงเร็วมาก
2. ค่า M_H อยู่ระหว่าง 0.02 และ 2 แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีขึ้นช้าถึงค่อนข้างเร็ว
3. ค่า M_H น้อยกว่า 0.02 แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีขึ้นช้า

โดยค่า M_H สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M_H = \frac{\sqrt{kC_B D_A}}{k_l} = \frac{\sqrt{k_1 D_A}}{k_l}$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน ($1/s$)

D_A คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ A ในเฟสของเหลว (m^2/s)

2.6.4 การถ่ายเทมวลเมื่อมีการดูดซึมก๊าซทางเคมี

การถ่ายเทมวลเมื่อมีการดูดซึมก๊าซทางเคมีจะมีปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับตัวดูดซึม ส่งผลให้อัตราการดูดซึมสูงขึ้น โดยเพิ่มตัวแปร Enhancement factor (E) เข้าไปในเทอมความต้านทานของเฟสของเหลวและเมมเบรนเปียก ดังนี้

- 1) การถ่ายเทมวลในสภาวะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก (Non-wetted Mode)

เมื่อให้ของเหลวหรือตัวดูดซึมไหลผ่านทางด้านท่อเมมเบรน (Tube) และก๊าซไหลในเซลล์ (Shell) สามารถอธิบายสมการการถ่ายเทมวลรวมเมื่อคิดจากเฟสของก๊าซเป็นหลักในสภาวะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก ได้ดังนี้

$$\frac{1}{k_G d_i} = \frac{1}{k_g d_o} + \frac{1}{k_m d_{ln}} + \frac{H}{E k_l d_i}$$

สามารถอธิบายสมการการถ่ายเทมวลรวมเมื่อคิดจากเฟสของของเหลวเป็นหลักในสภาวะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก ได้ดังนี้

$$\frac{1}{k_L d_i} = \frac{1}{H k_g d_o} + \frac{1}{H k_m d_{ln}} + \frac{1}{E k_L d_i}$$

2) การถ่ายเทมวลในสภาวะเมมเบรนเปียก (Wetted Mode)

เมื่อให้ของเหลวหรือตัวดูดซึมไหลผ่านทางด้านท่อเมมเบรน (Tube) และก๊าซไหลในเชลล์ (Shell) สามารถอธิบายสมการการถ่ายเทมวลรวมเมื่อคิดจากเฟสของก๊าซเป็นหลักในสภาวะเมมเบรนเปียก ได้ดังนี้

$$\frac{1}{k_G d_o} = \frac{1}{k_g d_o} + \frac{H}{E k'_m d_{ln}} + \frac{H}{E k_L d_i}$$

เมื่อ k'_m คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเมมเบรนเปียก (m/s)

และเมื่อคิดจากเฟสของของเหลวเป็นหลักในสภาวะเมมเบรนเปียก ได้ดังนี้

$$\frac{1}{k_L d_o} = \frac{1}{H k_g d_o} + \frac{1}{E k'_m d_{ln}} + \frac{1}{E k_L d_i}$$

2.6.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

1) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านของเหลว

เมื่อมีการป้อนตัวดูดซึมเข้าผ่านทางท่อ (Tube) ของเมมเบรน และเป็นการดูดซึมก๊าซทางกายภาพ สามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านของเหลว (k_L) ได้จาก Graetz-Lévêque Solution ((Gabelmana A. et al. 1999) และ (Yang M.C. et al. 2004))

$$Sh = \frac{k_L d_i}{D_{iL}} = 1.62 \cdot \sqrt[3]{\frac{d_i^2 \cdot v_L}{L \cdot D_{iL}}}$$

เมื่อ	Sh	คือ Sherwood Number
	v_L	คือ ความเร็วของตัวดูดซึม (m/s)
	L	คือ ความยาวของเมมเบรน
	D_{iL}	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในสารละลาย (m^2/s)

2) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านก๊าซ

เมื่อมีการป้อนก๊าซผ่านทางเซลล์ (Shell) สมการที่แสดงการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านก๊าซ (k_G) ได้ถูกเสนอโดย Ming-Chien Yang และ E. L. Cussler ดังนี้

$$Sh = \frac{k_G d_h}{D_{iG}} = 1.25 \left(Re \cdot \frac{d_h}{L} \right)^{0.93} Sc^{0.33}$$

เมื่อ	Re	คือ Reynold Number ในกรณีนี้ $0.5 < Re < 500$
	Sc	คือ Schmidt Number
	d_h	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)

3) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านเมมเบรน

ในกรณีการดูดซึมก๊าซในสภาวะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก (Non-wetted Mode) สามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านเมมเบรน (k_m) จาก

$$k_m = \frac{D_{G,eff} \epsilon}{\tau \delta_m}$$

เมื่อ	ϵ	คือ ความพรุน (Porosity) ของเมมเบรน (ไม่มีหน่วย)
-------	------------	---

τ คือ ความคดเคี้ยว (Tortuosity) ของเมมเบรน (ไม่มีหน่วย)

δ_m คือ ความหนาของเมมเบรนในสถานะที่แห้ง (m)

$D_{G,eff}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่สุทธิ (Effective Diffusivity) ของก๊าซในเมมเบรน (m^2/s) หาได้จาก

$$\frac{1}{D_{G,eff}} = \frac{1}{D_{Gm}} + \frac{1}{D_{Kn}}$$

เมื่อ D_{Gm} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซตามกฎของฟิก (m^2/s) หาได้จาก

$$D_{Gm} = \frac{0.002625T^{3/2}}{P M_A^{1/2} \sigma_{AB}^2 \Omega_D}$$

D_{Kn} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่แบบนุดเซ็น (m^2/s) หาได้จาก

$$D_{Kn} = 4850 d_p \sqrt{\frac{T}{M_A}}$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ (K)

P คือ ความดัน (kPa)

M_A คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ ($kg/kg \text{ mol}$)

σ_{AB} คือ Characteristic Length (m)

Ω คือ Collision Integral (-)

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรน (m)

2.7 หอดูดซึมแบบฟองอากาศ (Bubble Column)

หอดูดซึมแบบฟองอากาศ เป็นถังปฏิกรณ์ที่มีลักษณะเป็นหอทรงกระบอกแนวตั้งแบบเติมอากาศชนิดหนึ่ง มีการเติมก๊าซด้านล่างถังโดยปล่อยก๊าซผ่านเข้าไปในหัวกำเนิดฟองอากาศที่จะช่วยทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ลอยขึ้น โดยการทำให้แบบนี้จะทำให้เกิดการผสมกันของตัวดูดซึม (Liquid

Phase) และก๊าซที่เติมเข้าไป บางครั้งอาจมีของแข็งแขวนลอยในระบบ (Liquid-solid Suspension) เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของระบบ หอดูดซึมแบบฟองอากาศมีข้อดีหลายประการระหว่างการดำเนินการ และการบำรุงรักษา เช่น การใช้งานและการดูแลรักษาที่ง่าย มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทมวลที่สูง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการบำรุงรักษาที่ต่ำ เป็นต้น

การออกแบบหอดูดซึมแบบฟองอากาศมีความจำเป็นมากที่ต้องคำนึงถึงพลศาสตร์ของของไหล (Fluid Dynamic) และการวิเคราะห์ระบบการดูดซึม เช่น สัดส่วนของก๊าซ (Gas Holdup) คุณลักษณะของฟองอากาศ (Bubble Characteristic) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient) ดังนี้

2.7.1 พลศาสตร์ของของไหล (Fluid Dynamic)

พลศาสตร์ของของไหลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของหอดูดซึมแบบฟองอากาศขึ้นอยู่กับระบบการไหล (Flow Regime) ในหอดูดซึม ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามความเร็วก๊าซที่เข้าสู่ระบบ (Superficial Gas Velocity) ได้แก่

1) Homogeneous (Bubbly Flow) Regime

ระบบการไหลแบบ Homogeneous (Bubbly Flow) Regime เป็นระบบที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของเฟสก๊าซต่ำ หรือน้อยกว่า 5 cm/s ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเป็นฟองอากาศเดี่ยวๆ (Ideal Separate Bubble Flow) ขนาดเล็ก หรือมีขนาดที่แน่นอนตามขนาดของหัวกำเนิดฟองอากาศ มีความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่แน่นอน บางครั้งฟองอากาศอาจเกิดการรวมตัวเนื่องจากการชนหรือกระทบกับฟองอากาศอื่นทั้งทางตรงและทางอ้อม ส่งผลให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น (Interacting Bubble Flow)

2) Heterogeneous (Churn-turbulent) Regime

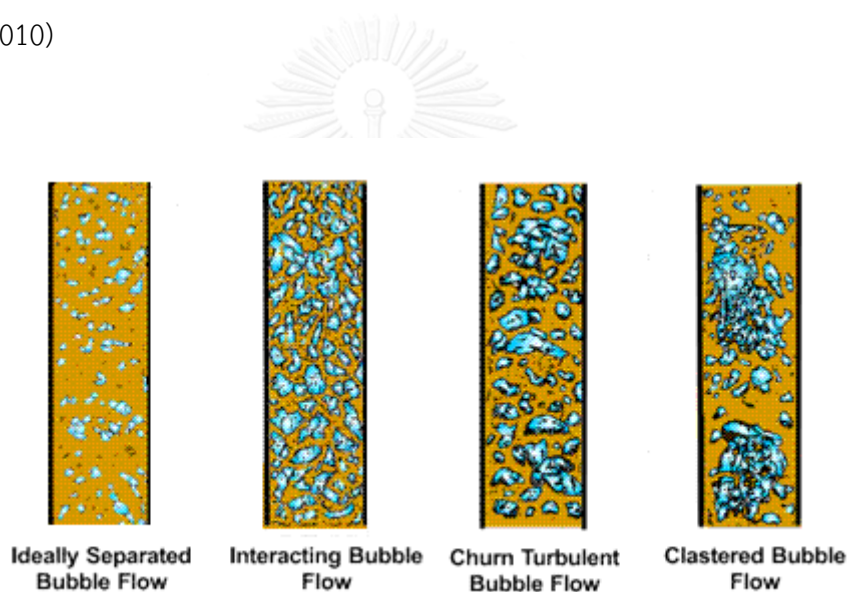
ระบบการไหลแบบ Heterogeneous (Churn-turbulent) Regime เป็นระบบที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของเฟสก๊าซสูง หรือมากกว่า 5 cm/s เกิดรูปแบบการไหลที่ไม่คงตัว (Unsteady Flow Pattern) เนื่องจากมีการเคลื่อนที่อย่างรุนแรงของฟองอากาศ และการไหลเวียนของเฟสของเหลวมีความปั่นป่วน มีการรวมตัวและแตกตัวของฟองอากาศในเวลาเดียวกันทำให้เกิดฟองอากาศมีขนาดใหญ่และฟองอากาศขนาดเล็กปนกันในระบบ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเท

มวลต่ำกว่าแบบ Homogeneous Flow Regime แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบการไหลแบบนี้มี อัตราการไหลของก๊าซสูงจึงเป็นระบบที่ใช้งานโดยทั่วไปในระดับอุตสาหกรรม

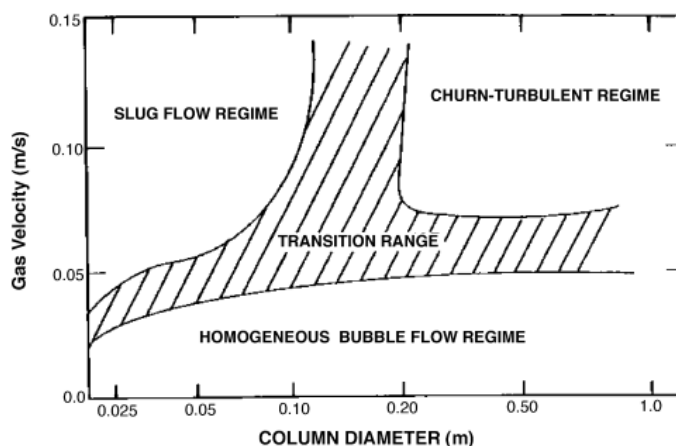
3) Slug (Clastered) Flow Regime

ระบบการไหลแบบ Slug (Clastered) Flow Regime เป็นระบบที่เกิดขึ้นเมื่อ ความเร็วของเฟสก๊าซสูง เป็นระบบการไหลในหอดูดซึมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 15 เซนติเมตร

รูปแบบการไหลทั้ง 3 แบบในหอดูดซึมแบบพองอากาศข้างต้น สามารถอธิบายได้ดัง รูปที่ 2.7 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระบบการไหลแบบต่างๆในหอดูดซึมแบบพองอากาศ ระหว่างความเร็วก๊าซกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.8 (Isao K. et al., 2010)



รูปที่ 2.7 รูปแบบการไหลแบบต่างๆในหอดูดซึมแบบพองอากาศ

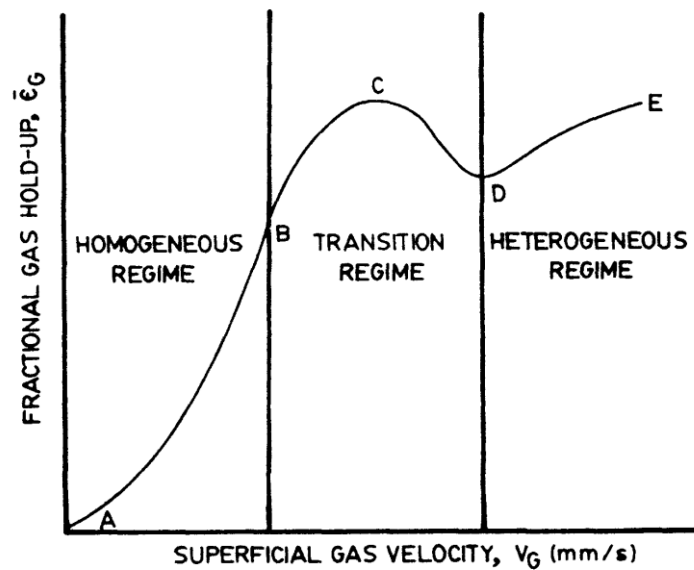


รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระบบการไหลแบบต่างๆในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ ระหว่างความเร็วก๊าซกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม

2.7.2 สัดส่วนของก๊าซ (Gas Holdup)

สัดส่วนของก๊าซ หรือ Gas Holdup คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสก๊าซในรูปฟองอากาศในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ เป็นหนึ่งในตัวแปรไร้หน่วยที่สำคัญที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบการดูดซึมก๊าซของหอดูดซึมแบบฟองอากาศ สัดส่วนของก๊าซมีผลกระทบทั้งในทางตรงและทางอ้อมต่อประสิทธิภาพของระบบ ผลกระทบทางตรงที่เห็นได้ชัดคือปริมาตรของหอดูดซึมที่ขึ้นอยู่กับปริมาตรของเฟสก๊าซที่เข้าสู่ระบบ ส่วนผลกระทบทางอ้อมคือระยะเวลาในการเดินระบบที่เร็วหรือช้า มีการรายงานที่กล่าวถึงตัวแปรพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของก๊าซ เช่น ความเร็วของก๊าซ คุณสมบัติของเฟสของเหลว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม อุณหภูมิและความดันในการเดินระบบ คุณสมบัติเชิงกายภาพของระบบ รูปแบบการเดินระบบ และรูปแบบของหัวกำเนิดฟองอากาศ เป็นต้น

ระบบการไหลในหอดูดซึมสามารถพิจารณาจากความเร็วของก๊าซที่เข้าสู่ระบบเนื่องจากส่งผลกระทบโดยตรงต่อสัดส่วนของก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระบบการไหลแบบต่างๆในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ ระหว่างสัดส่วนของก๊าซกับความเร็วก๊าซที่เข้าสู่ระบบ

Kantarci N. et al. (2005) ได้รวบรวมตัวอย่างการคำนวณหาสัดส่วนของก๊าซจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆจากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมการทางคณิตศาสตร์ของสัดส่วนของก๊าซ (ϵ_g) ในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ

งานวิจัย	สมการ
Joshi และ Sharma (1979)	$\epsilon_g = \frac{V_g}{0.3 + 2V_g}$
Koide และคณะ (1979)	$\epsilon_g = \frac{V_g}{31 + \beta(1-e)\sqrt{V_g}}$ $\beta = 4.5 - 3.5 \exp(-0.064D_T^{1.3}), e = -\frac{0.18V_g^{1.8}}{\beta}$
Lockett และ Kirkpatrick (1975)	$V_G(1-\epsilon_G) + V_L \epsilon_G = V_b \epsilon_G(1-\epsilon_G)^{2.39}(1+2.55\epsilon_G^3)$

2.7.3 ลักษณะของฟองอากาศ (Bubble Characteristic)

จำนวนฟองอากาศในระบบจะส่งผลต่อการกระจายฟองอากาศและการเพิ่มขึ้นของความเร็วลอยตัวของฟองอากาศซึ่งมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงด้านอุทกพลศาสตร์ เช่น

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและความร้อนในหอดูดซึมแบบพองอากาศ ด้วยเหตุผลข้างต้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องรู้ข้อมูลของลักษณะของพองอากาศในระบบ ได้มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาคุณลักษณะของพองอากาศในหอดูดซึมแบบพองอากาศ และพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของพองอากาศ ได้แก่ ความหนาแน่นของก๊าซ ชนิดของหัวกำเนิดพองอากาศ ความหนืดของของเหลว แรงตึงผิวของของเหลว อุณหภูมิของระบบดูดซึม ความดันของระบบดูดซึม และขนาดของหอดูดซึม

Kantarci N. et al. (2005) ได้ยกตัวอย่างสมการจากงานวิจัยต่างๆในการหาขนาดของพองอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และ Painmanakul P. et al. (2009) ได้ยกตัวอย่างสมการจากงานวิจัยต่างๆในการหาความเร็วในการลอยตัวของพองอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 สมการทางคณิตศาสตร์ของขนาดของพองอากาศ (d_b) ในหอดูดซึมแบบพองอากาศ

งานวิจัย	สมการ
Miller (1974)	$d_b = \left[\frac{6\sigma d_o}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{3}}$ เมื่ออัตราการไหลของเฟสก๊าซต่ำ
Moo-Young และ Blanch (1981)	$d_b = 0.19d_o^{0.48} Re_o^{0.32}, Re_o = \frac{4Q\rho_g}{\pi d_o \mu_g}$
Leibson และคณะ (1956)	$d_b = 0.18d_o^{1/2} Re_o^{1/3}, Re < 2000$

ตารางที่ 2.7 สมการทางคณิตศาสตร์ของความเร็วในการลอยตัวของพองอากาศ (U_b) ในหอดูดซึมแบบพองอากาศ

งานวิจัย	สมการ
Hadamard และ Ryzczynski (1911)	$U_b = \frac{g\Delta\rho d_b^2}{12\mu_l}, Re < 250, \frac{\mu_g}{\mu_l} = 0$
Frumkin และ Levich (1947)	$U_b = \frac{g\Delta\rho d_b^2}{18\mu_l}, Re < 250, \frac{\mu_g}{\mu_l} \rightarrow \infty$
Mendelson (1967)	$U_b = \left(\frac{2\sigma}{d_b\rho} + 0.5d_b g \right)^{0.5}, 0.2 \leq d_b \leq 8 \text{ cm}$

2.7.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล คือ อัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลรวมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของการกระจายฟองก๊าซในหอดูดซึมแบบฟองอากาศจะถูกควบคุมโดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในของเหลว (Liquid-side Mass Transfer Coefficient, $k_L a$) เป็นหลัก เนื่องจากมีการยอมรับกันว่าความต้านทานในเฟสก๊าซสามารถละทิ้งได้ ในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซกับเฟสของเหลวจะส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลว

ในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ การถ่ายเทมวลจากเฟสก๊าซไปยังเฟสของเหลวเป็นเป้าหมายที่สำคัญของกระบวนการ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการอธิบายลักษณะและการออกแบบระบบ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเป็นค่าที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลว (Liquid Mass Transfer Coefficient, k_L) และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซกับเฟสของเหลวต่อปริมาตรของเฟสของเหลว (Specific Interfacial Area, a) ซึ่งการแยกวิเคราะห์ตัวแปรทั้ง k_L และ a ออกจากกันจะทำให้เข้าใจกลไกของการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสก๊าซและของเหลวได้ดียิ่งขึ้น และยังทำให้เราสามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวแปรใด (k_L หรือ a) เป็นตัวแปรที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทมวลในระบบ

Kantarci N. et al. (2005) ได้ยกตัวอย่างสมการจากงานวิจัยต่างๆ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) ในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สมการทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) ในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ

งานวิจัย	สมการ
Ozturk และคณะ (1987)	$\frac{k_L a d_b^2}{D_{AB}} = 0.62 \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{AB}} \right)^{0.5} \left(\frac{g \rho_L d_b^2}{\sigma} \right)^{0.33} \left(\frac{g \rho_L^2 d_b^3}{\mu_L^2} \right) \left(\frac{V_g}{\sqrt{g d_b}} \right)^{0.68} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.04}$
Akita และคณะ	$\frac{k_L a D_T^2}{D_{AB}} = 0.6 \left(\frac{v_L}{D_{AB}} \right)^{0.5} \left(\frac{g D_T^2 \rho_L}{\sigma} \right)^{0.623} \left(\frac{g D_T^3}{v_L^2} \right)^{0.68} \epsilon_g^{1.1}$

งานวิจัย	สมการ
Yoshida (1973)	
Shah และ คณะ (1982)	$k_L a = 0.467V_g^{0.82}$

2.8 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) คือ สารที่มีลักษณะโมเลกุลประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Group) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และโพลีเมอร์สังเคราะห์ สารลดแรงตึงผิวมีลักษณะที่สำคัญคือเมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยลงในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการต่างๆ ง่ายขึ้น เช่น การเกิดฟอง การทำให้เปียก และกระบวนการทำความสะอาด เป็นต้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะพยายามหนีน้ำโดยไปเกาะกับพื้นผิวที่ว่าง เช่น อากาศ ส่วนที่ชอบน้ำจะยังคงอยู่ในน้ำ สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทซึ่งแบ่งตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Group) ได้แก่ (วิชาฯ ภูจินดา, 2549)

- 1) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic Surfactant) เช่น Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3^+Br^-$ สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกมักจะพบในผลิตภัณฑ์ยาสีฟัน ครีมนวดผม และน้ำยาปรับผ้านุ่ม เป็นต้น หรือสารอินทรีย์จำพวก Quaternary Ammonium Compounds (QACs) เช่น โดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์ (DPC) เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ส่วนหัวที่มีประจุบวกเรียกว่า ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ซึ่งมีความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับ Na^+ และ Ca^+ บนผิวของดินเบนโทไนต์ ทำให้เหลือส่วนหางที่มีคุณสมบัติไฮโดรโฟบิกที่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้

- 2) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic Surfactant) เช่น Sodium Lauryl Sulfate (SLS) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4\text{Na}^+$ สารชนิดนี้เป็นสารที่ช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้เกิดฟอง ช่วยให้สิ่งสกปรก คราบไขมันหลุดออกไปได้ง่ายขึ้น จึงนิยมใช้เป็นสารทำความสะอาด พบในวงการอุตสาหกรรมและเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น เครื่องสำอาง น้ำยาล้างจาน (โดยใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้) เครื่องสำอางที่นิยมผสมสารนี้ ได้แก่ เครื่องสำอางที่ใช้แล้วล้างออกด้วยน้ำ เช่น สบู่เหลว แชมพู ตลอดจนยาสีฟัน เป็นต้น (ศูนย์วิทยบริการ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2544)
- 3) สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant) เช่น ทวิน 80 ($\text{C}_{64}\text{H}_{124}\text{O}_{26}$) ซึ่งเป็นสารประสานน้ำมันเข้ากับน้ำ โดยมีค่า HLB 15 สามารถใช้ได้ทั้ง Oil-in-water ในเครื่องสำอางค์ และ Water-in-oil emulsion (โดยใช้ร่วมกับ Emulsifier ตัวอื่น) นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทครีมหรือโลชั่น สำหรับในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด ทวิน 80 นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทครีมหรือของเหลวที่มีส่วนผสมของแว็กซ์ต่าง ๆ เนื่องจากสามารถทำให้แว็กซ์เข้ากับน้ำได้ดี
- 4) สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Zwitterionic Surfactant) เช่น b-N-Alkylaminopropionic Acids มีสูตรโมเลกุล คือ $\text{RN}^+\text{H}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$ ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง สารป้องกันการกัดกร่อน และสารยับยั้งแบคทีเรีย เป็นต้น

สารลดแรงตึงผิวยังมีคุณสมบัติที่ทำให้เฟสสองเฟสที่ต่างกันมารวมตัวกันได้ คำว่าอยู่คนละเฟส คือ การไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น น้ำและน้ำมันไม่ละลายซึ่งกันและกันเพราะมีคุณสมบัติที่ต่างกันโดยที่น้ำเป็นสารประกอบที่มีขั้ว ส่วนน้ำมันเป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้ว เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเข้าไปเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้สองเฟสรวมกันเป็นเฟสเดียวกันได้

ตารางที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิดในการทำให้เกิดฟองความสามารถในการซักล้าง และการทำให้พื้นผิวอ่อนนุ่ม จะเห็นว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบจะมีคุณสมบัติทำให้เกิดฟองดีที่สุด ส่วนสารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและลบจะมีคุณสมบัติในการทำให้พื้นผิวอ่อนนุ่มดีที่สุด สารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ในปัจจุบันได้มีการ

นำสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การชักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อนนุ่ม

	คุณสมบัติการเกิดฟอง	ความสามารถในการชักล้าง	ความสามารถในการทำให้อ่อนนุ่ม
สารลดแรงตึงผิวประจุลบ	ดีที่สุด	ค่อนข้างดี	ไม่แน่นอน
สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ	ดี	ดี	ดี
สารลดแรงตึงผิวประจุบวก	ไม่ดี	ปานกลาง	ไม่ดี
สารลดแรงตึงผิวประจุบวกและลบ	ค่อนข้างดี	ดี	ดีที่สุด

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงในการดูดซึม

Karoort S. et al. (1993) ได้ศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) โดยใช้เป็นตัวดูดซึม พบว่า

- 1) การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำในสภาวะเมมเบรนเปียก (Wetted Mode) มีค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลมากกว่าสภาวะเมมเบรนแห้งหรือไม่เปียก (Non-wetted Mode) เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลถูกกำหนดโดยเฟสของเหลว ดังนั้นในสภาวะเมมเบรนเปียกที่มีของเหลวซึมตามรูพอร์จึงทำให้ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น

- 2) การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของเมมเบรนในโมดูลทำให้ประสิทธิภาพการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของเมมเบรนในโมดูลสามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวนเมมเบรนโดยไม่ต้องทำการขยายขนาดของเมมเบรนหรือเพิ่มขนาดโมดูล
- 3) เมื่อดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำที่ความเร็ว 1.25 cm/s ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีค่ามากกว่าการใช้คอลัมน์แบบแพคถึง 5 เท่า
- 4) เมื่อดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยน้ำที่ความเร็ว 1.5 cm/s ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีค่ามากกว่าการใช้คอลัมน์แบบแพคถึง 10 เท่า

Rangwala H.A. (1996) ได้ศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยใช้ตัวดูดซึมเป็นน้ำ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายไดเอทานอลามีน (DEA) โดยใช้เมมเบรนที่ผลิตจากพอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน กล่าวคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0254 เมตร ความยาว 0.2 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.051 เมตร ความยาว 0.61 เมตร พบว่า

- 1) เมื่อเพิ่มความเร็วของเฟสของเหลว จะเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมด้วยเช่นกัน แม้ว่าเมมเบรนจะมีขนาดที่แตกต่างกัน
- 2) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของกระบวนการดูดซึมโดยการใช้เมมเบรนมีค่ามากกว่าการดูดซึมโดยใช้หอดูดซึมแบบแพค (Packed Column) 3 ถึง 9 เท่า
- 3) การที่เมมเบรนเปียก (Wetted Mode) แม้ว่าจะปริมาณน้อยกว่า 2% ก็เป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเมมเบรนสูงถึง 60% เมื่อคิดเทียบกับความต้านทานการถ่ายเทมวลทั้งหมด

Hoff K.A. (2003) ได้ศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยใช้ตัวดูดซึมเป็นสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) และสารละลายเมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) พบว่า

- 1) ความต้านทานการถ่ายเทมวลด้านก๊าซสามารถละทิ้งได้เมื่อเทียบกับความต้านทานการถ่ายเทมวลด้านของเหลวและความต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเมมเบรน และความต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเมมเบรนเมื่อคิดเทียบกับความต้านทานการถ่ายเทมวลทั้งหมดจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 12%

- 2) ปริมาณการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวดูดซึม เนื่องจากสารละลาย MEA ที่ว่างที่สามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มีเหลืออยู่น้อยลง

Demontigny D. et al. (2006) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรน 2 ชนิด คือ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และ พอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่อัตราการไหล $31.6\text{--}439.5 \text{ kmol/m}^2\cdot\text{h}$ ใช้ตัวดูดซึมที่มีอัตราการไหล $3.1\text{--}173.2 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ เป็นสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) $1.0\text{--}3.0 \text{ kmol/m}^3$ และสารละลาย 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) 2.0 kmol/m^3 พบว่า

- 1) สารละลาย MEA มีประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าสารละลาย AMP เนื่องจากมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองมากกว่า
- 2) เมมเบรนที่ทำจาก PTFE มีประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าเมมเบรนที่ทำจาก PP ทุกรูปแบบ เนื่องจาก PP มีพื้นที่ผิวความขรุขระมากกว่า PTFE ถึง 370% ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นความพรุนและค่าการซึมผ่านของเมมเบรน PTFE ที่มีค่าความพรุน (Porosity) 50% และ PP ที่ค่าความพรุน 35%
- 3) การเดินระบบแบบไหลสวนกระแส (Counter-current Flow) ให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าแบบไหลในทิศทางเดียวกัน (Co-current Flow) 20%
- 4) การเดินระบบแบบเฟสของเหลวเข้าทางด้านท่อ (Tube) และเฟสก๊าซเข้าทางด้านเซลล์ (Shell) ของโมดูล ให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการเดินระบบแบบเฟสของเหลวเข้าทางด้านเซลล์ (Shell) และเฟสก๊าซเข้าทางด้านท่อ (Tube) ของโมดูล

Atcharyawut S. et al. (2007) ได้ศึกษาผลของการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกจากก๊าซมีเทน (CH_4) โดยใช้เมมเบรนที่ผลิตจากโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene Fluoride, PVDF) การศึกษาผลของการเดินระบบที่มีผลกระทบต่อปริมาณการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า

- 1) การดูดซึมทางกายภาพเมื่อใช้น้ำเป็นตัวดูดซึมจะดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าการดูดซึมทางเคมีเมื่อใช้สารละลาย NaOH และ MEA
- 2) ที่ความเข้มข้นของสารเคมีดูดซึมเท่ากัน สารละลาย NaOH ดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าสารละลาย MEA
- 3) เมื่อใช้สารละลาย NaOH เป็นตัวดูดซึม ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวดูดซึม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของตัวดูดซึม และการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของก๊าซที่เข้าคอลัมน์ ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเกิดการเพิ่มขึ้น
- 4) ผลของรูปแบบการไหลและความหนาแน่นของเมมเบรนต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ชี้ให้เห็นว่า รูปแบบการไหลแบบสวนทางจะดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการไหลในทางเดียวกัน และความหนาแน่นของเมมเบรน (Packing Density) มากสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าได้ดีกว่าความหนาแน่นของเมมเบรนน้อย
- 5) ในการศึกษาประสิทธิภาพในระยะยาวของเมมเบรนที่ผลิตจาก PVDF พบว่า การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงในระยะยาวเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการถ่ายเทมวลของเมมเบรน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Khaisri S. et al. (2010) ได้ศึกษาผลของการเปียกของเมมเบรนต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) ผ่านเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) โดยใช้วิธีการพลอตทางคณิตศาสตร์ของวิลสัน (The Wilson Plot Method) พบว่า

- 1) การใช้วิธีการพลอตทางคณิตศาสตร์ของวิลสันสามารถหาค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลด้านเมมเบรนได้แม่นยำกว่าการคำนวณจากสูตรทางทฤษฎี
- 2) เมื่อเดินระบบในสภาวะเมมเบรนเปียก (Wetted Mode) แบบสมบูรณ์ ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลด้านเมมเบรนจะมีค่าสูงถึง 92% ของค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลทั้งหมด

- 3) การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การเปียกของเมมเบรนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพการดูดซึมจะลดลง 56% 72% 85% และ 90% เมื่อการเปียกของเมมเบรนมีค่า 10% 20% 50% และ 100% ตามลำดับ
- 4) เปอร์เซ็นต์การเปียกของเมมเบรนที่ยอมรับได้คือ 40% ถ้ามากกว่านี้ควรทำการเปลี่ยนเมมเบรนเพื่อที่จะคงไว้ซึ่งระบบการดูดซึมตามที่ออกแบบไว้

Khaisri S. et al. (2011) ได้ศึกษาการไล่ก๊าซ (Desorption or Stripping) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกจากสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) โดยใช้เมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) พบว่า

- 1) ความเร็วที่เพิ่มขึ้นของก๊าซไนโตรเจนที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนหรือสตรีพिंग (Stripping Gas) ส่งผลเล็กน้อยมากสำหรับการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แม้ว่าจะไปเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านก๊าซ แต่ก็มีผลกระทบน้อยมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม เนื่องจากค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลด้านก๊าซมีสัดส่วนอยู่ที่ 5% ถึง 10% ของค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลรวม
- 2) การเพิ่มความเร็วของเฟสของเหลว จะส่งผลให้อัตราการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นไม่ว่าเฟสของเหลวจะมีอุณหภูมิเท่าไรก็ตาม เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของเฟสของเหลวจะไปลดความต้านทานการถ่ายเทมวลด้านของเหลวกับชั้นฟิล์มของเหลว เนื่องจากค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลด้านของเหลวมีสัดส่วนสูงถึง 90% ของค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลรวม
- 3) การเพิ่มอุณหภูมิของเฟสของเหลว จะส่งผลให้อัตราการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากไปเพิ่ม Driving Force ของการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลาย MEA
- 4) การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลาย MEA จะส่งผลให้อัตราการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากไปเพิ่มปริมาณ Carbamate (RNHCOO^-) ในสารละลาย แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย MEA เพิ่มขึ้นจาก 5 ไปถึง 7 kmol m^{-3} เนื่องจากเป็นการเพิ่มความหนืดของสารละลายซึ่งไปลดการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

- 5) เมมเบรนที่มีค่าความพรุนมากจะมีอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าเมมเบรนที่มีค่าความพรุนน้อย เนื่องจากรูพรุนของเมมเบรนในการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความพรุนมากขึ้น

พุดพิงค์ ดันติขจรโกศล et al. (2554) ได้ศึกษาการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) และอีเทน (C_2H_6) ในอัตราส่วน 20, 70 และ 10% ตามลำดับ โดยใช้เมมเบรน 2 ชนิด ได้แก่ โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) และ พอลิเททระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ตัวดูดซึมที่ใช้คือ น้ำ สารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) และ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) พบว่า

- 1) เมื่อวิเคราะห์ความต้านทานการถ่ายเทมวลหลัก โดยพิจารณาผลของอัตราการไหลของตัวดูดซึม (300-600 mL/min) และอัตราการไหลของก๊าซป้อน (200-400 mL/min) สำหรับการดูดกลืนทางกายภาพเมื่อนำน้ำเป็นตัวดูดซึม และการดูดกลืนทางเคมีเมื่อนำสารละลาย MEA เข้มข้น 1M หรือนำสารละลาย Na_2CO_3 เข้มข้น 1M เป็นตัวดูดซึม พบว่า ความต้านทานการถ่ายเทมวลหลักจะอยู่ในเฟสของของเหลวทั้งเมมเบรนชนิด PVDF และ PTFE
- 2) ประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อนำตัวดูดซึมเป็นสารละลาย MEA > สารละลาย Na_2CO_3 > น้ำ ตามลำดับเมื่อนำเมมเบรนชนิดเดียวกัน
- 3) การเพิ่มอัตราการไหลของตัวดูดซึมจะส่งผลให้อัตราการดูดซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซป้อนส่งผลต่ออัตราการดูดซึมน้อยมาก
- 4) เมื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซึมระยะยาวของเมมเบรน พบว่าเมื่อนำเมมเบรน PVDF ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซ CO_2 ลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 3 วัน ส่วนเมมเบรน PTFE ลดลงชัดเจนในช่วง 4 วัน และเมื่อผ่านไป 14 วัน เมมเบรน PVDF ลดลงเหลือ 84.3% ในขณะที่เมมเบรน PTFE ยังคงมีค่าอัตราการดูดซึมสูงถึง 95.9% นอกจากนี้ยังพบว่าเมมเบรน PTFE จะให้อัตราการดูดซึมที่สูงกว่าเมมเบรน PVDF ทั้งการดูดซึมทางกายภาพและทางเคมี

2.9.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารลดแรงตึงผิวในการดูดซึม

Painmanakul P. et al. (2005) ได้ศึกษาผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวในตัวดูดซึมที่มีผลต่อขนาดฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial Area) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (k_{La}) โดยใช้หอดูดซึมแบบฟองอากาศ พบว่า

- 1) ที่อัตราเร็วของก๊าซต่ำกว่า 1 ml/s ขนาดฟองอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านตัวดูดซึมที่มีสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกและประจุลบจะมีขนาดน้อยกว่าตัวดูดซึมที่เป็นน้ำประปา จึงทำให้สรุปได้ว่าการเพิ่มสารลดแรงตึงผิวส่งผลต่อการลดขนาดฟองอากาศ
- 2) ความถี่ของฟองอากาศที่ถูกสร้างขึ้นเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวในตัวดูดซึมมีค่าเฉลี่ยที่มากกว่าเมื่อใช้น้ำประปาเป็นตัวดูดซึม ยกเว้นเมื่อใช้ความเร็วของก๊าซต่ำจะพบว่ามีค่าความถี่ที่น้อยเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวประจุบวก
- 3) พื้นที่ผิวสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซไม่ว่าจะใช้ตัวดูดซึมชนิดใดก็ตาม แต่พื้นที่ผิวสัมผัสเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวในตัวดูดซึมมีแนวโน้มมากกว่าเมื่อใช้น้ำประปาอย่างเดียว
- 4) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวไม่ว่าจะน้อยเพียงใดก็ตามในตัวดูดซึมมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้น้ำประปาเป็นตัวดูดซึมอย่างมีนัยสำคัญ
- 5) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลวมีค่าค่อนข้างคงที่แม้ว่าใช้ความเร็วของก๊าซที่แตกต่างกันในตัวดูดซึมที่มีและไม่มีสารลดแรงตึงผิว แต่พบว่าเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวในตัวดูดซึมจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลวมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้น้ำประปาเป็นตัวดูดซึมอย่างมีนัยสำคัญ

Go´mez-Díaz D. et al. (2009) ได้ศึกษาผลของการถ่ายเทมวลระหว่างก๊าซและของเหลวในหอดูดซึมแบบฟองอากาศโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวถูกดูดซึม ส่วนตัวดูดซึมใช้สารละลายของสารลดแรงตึงผิว Decyltrimethylammonium Bromide (DTABr) ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของ DTABr ที่ต่ำ ซึ่งขัดกับงานวิจัยทั่วไปที่การมีสารลดแรงตึงผิวในตัวดูดซึมจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลลดลง

Hebrard G. et al. (2009) ได้ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านของเหลว โดยใช้ตัวดูดซึมเป็นน้ำ สารละลายของสารลดแรงตึงผิว และสารลดแรงตึงผิวบริสุทธิ์ พบว่า การเพิ่มขึ้นของสารลดแรงตึงผิวจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้านของเหลวลดลง เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะไปลดสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซ

ฐากร เสนีย์มโนมัย (2552) ได้ศึกษาการใช้แร่ดินเหนียวโซเดียมเบนโทไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้เทคโนโลยีการปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกจำพวกควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (Quaternary Ammonium Cations, QACs) ทำให้คุณสมบัติของแร่ดินเหนียวจากไฮโดรฟิลิกเป็นไฮโดรโฟบิก ซึ่งมีความสามารถดูดซับสารอินทรีย์ เช่น สารไตรฮาโลมีเทน ออกจากน้ำได้

2.9.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้หอดูดซึมแบบฟองอากาศในการดูดซึม

Saxena A.C. et al. (1990) ได้ศึกษาการกระจายขนาดของฟองอากาศในหอดูดซึมแบบฟองอากาศของระบบที่ใช้อากาศกับน้ำที่อุณหภูมิห้อง ใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงและเทคนิคตรวจวัดโดยใช้เส้นใยไฟเบอร์ในการหาขนาดฟองอากาศ พบว่า ขนาดของฟองอากาศขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึมโดยขนาดฟองอากาศที่เล็กกว่าจะเกิดในหอดูดซึมที่แคบกว่า และจะปรากฏขนาดของฟองอากาศขนาดเล็กที่ผนังของหอดูดซึมมากกว่าระยะทางที่ห่างจากผนังของหอดูดซึม

Ruzicka M.C. et al. (2001) ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดของหอดูดซึมแบบฟองอากาศในด้านความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยการทดลองได้ใช้ระบบการไหลแบบ Homogeneous (Bubbly Flow) Regime เสถียรภาพของระบบได้แสดงในรูปของค่าสัดส่วนของก๊าซที่สภาวะวิกฤตและอัตราการไหลวิกฤตของก๊าซ พบว่า ขนาดของหอดูดซึมแบบฟองอากาศมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบการไหลแบบ Homogeneous (Bubbly Flow) Regime ที่สามารถเปลี่ยนไปสู่ระบบการไหลแบบอื่นได้ สัดส่วนของก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ และค่าข้างต้นจะขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึมด้วย

Moustiri S. et al. (2002) ได้ศึกษาผลของการมีและไม่มีแพคเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Packing) และชนิดของหัวกำเนิดฟองอากาศ 2 ชนิด คือ แบบแผ่นที่ถูกเจาะเป็นรู (Perforated Plate) และแบบแผ่นเมมเบรนที่ยืดหดตัวได้ (Flexible Membrane Discs) ในหอดูดซึมแบบฟองอากาศ 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 และ 20 เซนติเมตร และสูง 4.25 และ 4.5 เมตร ตามลำดับ ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเฟสของเหลวและใช้อากาศเป็นเฟสก๊าซในการเดินระบบ โดยเฟสก๊าซใช้ความเร็ว 0.52-5.5 cm/s และเฟสของเหลวใช้ความเร็ว 0.62-2.16 cm/s ขนาดของฟองอากาศถูกวัดโดยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ได้ผลการทดลองดังนี้

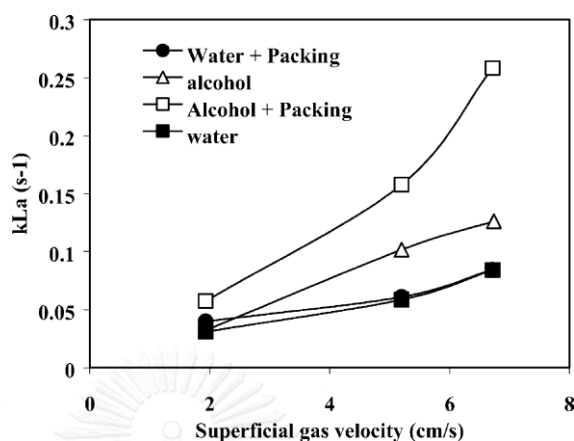
- 1) ผลของความเร็วของเฟสก๊าซ : การเพิ่มความเร็วของเฟสก๊าซจะเพิ่มสัดส่วนของก๊าซในคอลัมน์แม้ว่าจะมีหรือไม่มีแพคเหล็กกล้าไร้สนิมก็ตาม ในช่วงที่ความเร็วของเฟสก๊าซต่ำ (ต่ำกว่า 1 cm/s) การมีแพคเหล็กกล้าไร้สนิมจะลดสัดส่วนของก๊าซในคอลัมน์ เนื่องจากแพคเหล็กกล้าไร้สนิมจะสร้างช่องทางในการกระจายฟองอากาศซึ่งช่วยเพิ่มความเร็วของก๊าซที่ลอยขึ้นข้างบนจึงส่งผลเล็กน้อยในการลดสัดส่วนของก๊าซในระบบ แต่ในช่วงที่ความเร็วของเฟสก๊าซสูง (มากกว่า 1 cm/s) การมีแพคเหล็กกล้าไร้สนิมจะเป็นอุปสรรคในการลอยขึ้นของฟองอากาศ ซึ่งฟองอากาศต้องใช้เวลาอย่างมากในการลอยออกจากคอลัมน์ จึงมีส่วนช่วยในการเพิ่มสัดส่วนของก๊าซในคอลัมน์
- 2) ผลของความเร็วของเฟสของเหลว : การเพิ่มขึ้นของความเร็วของเฟสของเหลวในกรณีที่ไม่มีแพคเหล็กกล้าไร้สนิมจะส่งผลเล็กน้อยมากต่อการลดลงของสัดส่วนของก๊าซไม่ว่าหอดูดซึมแบบฟองอากาศจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าไรก็ตาม แต่ในกรณีที่มีแพคเหล็กกล้าไร้สนิม สัดส่วนของก๊าซจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วของเฟสของเหลว เนื่องจากแพคเหล็กกล้าไร้สนิมจะไปลดความเร็วของเฟสของเหลวที่เคลื่อนที่ผ่าน
- 3) ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึมแบบฟองอากาศ : สัดส่วนของก๊าซจะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึมแบบฟองอากาศ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำจะส่งผลให้การไหลของเฟสของเหลวบริเวณผนังลดต่ำลงซึ่งไปขัดขวางการลอยขึ้นของฟองอากาศ จึงทำให้สัดส่วนของก๊าซเพิ่มขึ้น

- 4) ระบบการไหลของก๊าซ : การมีแพคเหล็กกล้าไร้สนิม ระบบการไหลแบบ Homogeneous (Bubbly Flow) Regime สามารถถูกคงเอาไว้ตลอดการเปลี่ยนแปลงช่วงของความเร็วของเฟสก๊าซ
- 5) ผลของหัวกำเนิดฟองอากาศ : การไม่มีแพคเหล็กกล้าไร้สนิม ระบบการไหลแบบ Homogeneous (Bubbly Flow) Regime ของหัวกำเนิดฟองอากาศแบบแผ่นที่ถูกเจาะเป็นรู (ความเร็วเฟสก๊าซ 4.1 cm/s) เกิดขึ้นก่อนแบบแผ่นเมมเบรนที่ยึดหัดตัวได้ (ความเร็วเฟสก๊าซ 4.7 cm/s)
- 6) ขนาดของฟองอากาศ : หัวกำเนิดฟองอากาศแบบแผ่นเมมเบรนที่ยึดหัดตัวได้จะให้นขนาดฟองอากาศเล็กกว่าแบบแผ่นที่ถูกเจาะเป็นรูแม้ว่าจะมีหรือไม่มีแพคเหล็กกล้าไร้สนิมก็ตาม

Bhatia B. et al. (2004) ได้ศึกษาผลของแพคเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Packing) ในหอดูดซึมแบบฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร และสูง 4.5 เมตร เดินระบบโดยใช้น้ำกับอากาศ หรือน้ำผสมแอลกอฮอล์ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร กับอากาศ แบบไหลในทิศทางเดียวกัน (Co-current Flow) ทิศขึ้น (Upflow) โดยเฟสก๊าซใช้ความเร็ว 5.0-7.58 cm/s จากหัวกำเนิดฟองอากาศแบบแผ่นที่ถูกเจาะเป็นรู (Perforated Plate) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และเฟสของเหลวใช้ความเร็ว 0-2.15 cm/s ที่อุณหภูมิประมาณ 20-25°C พบว่า

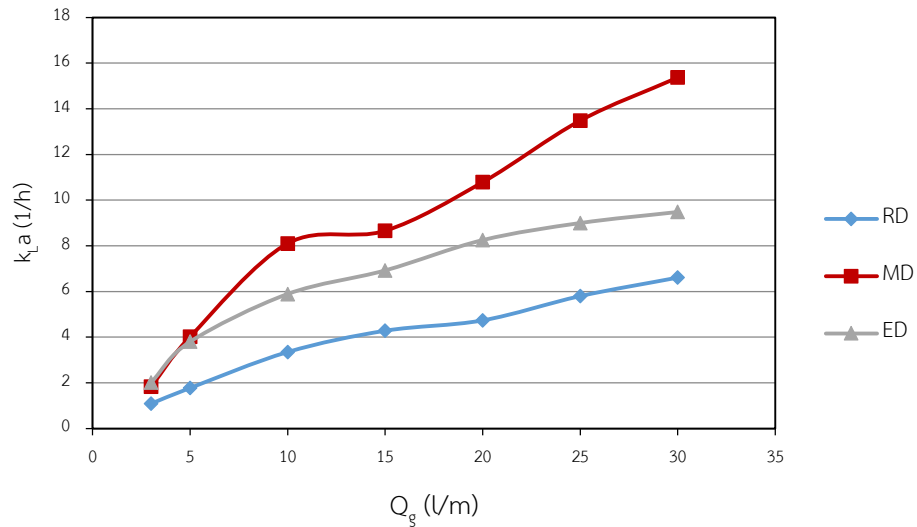
- 1) เมื่อเดินระบบแบบปราศจากแพคเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดระบบการไหลแบบ Heterogeneous Regime เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเดินระบบแบบมีแพคเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดระบบการไหลแบบ Homogeneous Regime ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน
- 2) เมื่อเดินระบบแบบมีแพคเหล็กกล้าไร้สนิมจะพบขนาดฟองอากาศเล็กกว่า 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการเดินระบบแบบปราศจากแพคเหล็กกล้าไร้สนิม อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะเกิดค่าคงที่การถ่ายเทมวลด้านของเหลวเมื่อใช้ความเร็วก๊าซที่สูง และเกิดพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูง
- 3) การมีแพคเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ส่งผลต่อค่า $k_L a$ เมื่อเฟสของเหลวเป็นน้ำ

- 4) สารละลายแอลกอฮอล์ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า k_La ที่ความเร็วเฟสก๊าซต่ำ แต่เมื่อความเร็วของเฟสก๊าซสูงขึ้น ค่า k_La ของสารละลายแอลกอฮอล์จะสูงกว่าน้ำ



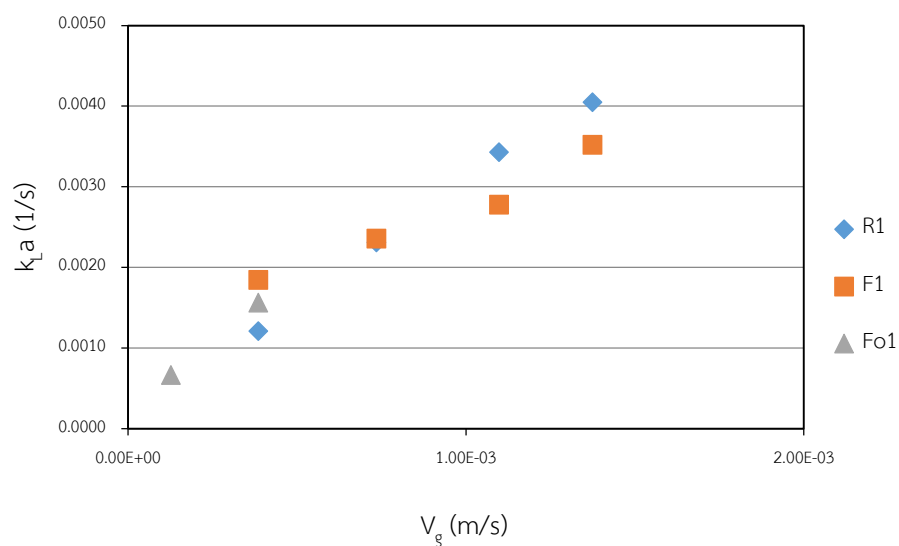
รูปที่ 2.10 ผลของค่า k_La จากแพคเหล็กกล้าไร้สนิมและแอลกอฮอล์ในงานวิจัยของ Bhatia และคณะ

ดาวัน เจริญพิทยา (2556) ได้ศึกษาค่า k_La จากหวักระจ่ายฟองอากาศสามชนิด ได้แก่ แบบแข็ง แบบท่อยาง และแบบเมมเบรน โดยใช้เฟสของเหลวเป็นน้ำประปาที่ถูกลดก๊าซออกซิเจน มีการเปลี่ยนอัตราการไหลของเฟสก๊าซตั้งแต่ 3 ถึง 30 ลิตรต่อนาที ในถังทดสอบขนาด 190 ลิตร พบว่า ค่า k_La มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศ โดยหวักระจ่ายอากาศแบบเมมเบรนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ส่วนหวักระจ่ายอากาศแบบท่อยางและแบบแข็งจะให้ค่าที่ลดหลั่นลงมาตามลำดับ โดยหวักระจ่ายอากาศแบบเมมเบรนนั้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในช่วงระหว่าง 1.8 – 15.4 ต่อชั่วโมง หวักระจ่ายอากาศแบบท่อยางจะให้ค่าระหว่าง 2.0 – 9.5 ต่อชั่วโมง และหวักระจ่ายอากาศแบบแข็งจะให้ค่าระหว่าง 1.1 – 6.6 ต่อชั่วโมง



รูปที่ 2.11 ผลของอัตราเร็วของเฟสก๊าซต่อค่า k_{La} ในงานวิจัยของดาวัน เจริญพิทยา

Sastaravet P. et al. (2014) ได้ศึกษาผลของขนาดของหลอดซีมแบบพองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร กับหัวกระจายพองอากาศ-3 ชนิด คือ หัวกระจายพองอากาศแบบแข็ง (R1) แบบยืดหยุ่น 2 ชนิด (Fo1 และ F1) พบว่า ค่า k_{La} จะเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนความเร็วของเฟสก๊าซที่ผ่านหัวกระจายพองอากาศ แต่ค่า k_{La} จากหัวกระจายพองอากาศทั้ง 3 ชนิดข้างต้น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

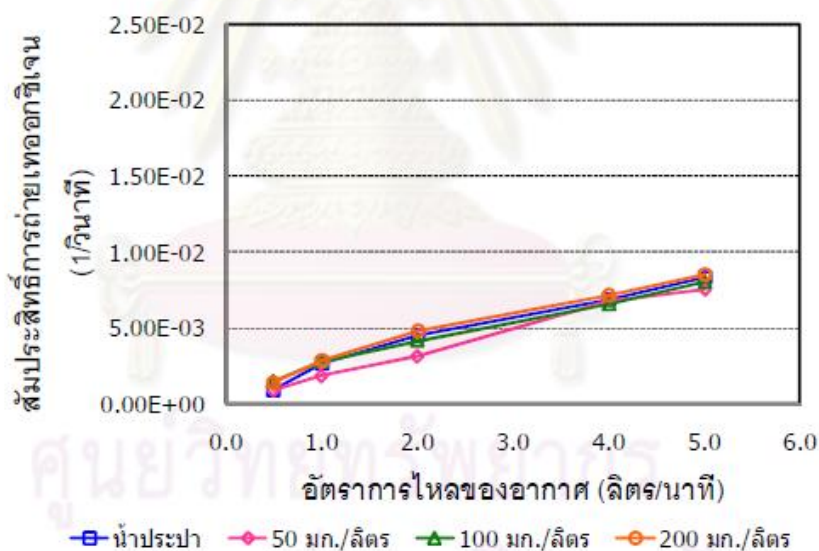


รูปที่ 2.12 ผลของความเร็วของเฟสก๊าซต่อค่า k_{La} ในงานวิจัยของ Sastaravet และคณะ

2.9.4 งานวิจัยเกี่ยวกับความขุ่นในการดูดซึม

นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ (2553) ได้ศึกษาการใช้ท่อยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์ในการเติมอากาศ โดยได้เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) ของออกซิเจนจากสารเจือปนที่อยู่ในน้ำ คือ ดินขาว เกลือ และเซลล์จุลชีพ พบว่า

- 1) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อน้ำปนเปื้อนดินขาวความเข้มข้น 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่ามีความใกล้เคียงกับการที่น้ำไม่มีการปนเปื้อนดินขาว เนื่องจากความเข้มข้นของดินขาวอยู่ในช่วงการทดลองที่ต่ำ ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำให้แตกต่างจากเดิมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12
- 2) การมีเกลือในน้ำทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่ามากกว่าในน้ำประปา
- 3) การมีเซลล์จุลชีพทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลผิของเหลว (k_L) ลดลง เนื่องจากไปรบกวนการซึมของออกซิเจนผ่านชั้นกลางของเหลว



รูปที่ 2.13 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อค่า $k_L a$ เมื่อเฟสของเหลวถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวในงานวิจัยของนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์

2.10 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่า กระบวนการดูดซึมก๊าซโดยการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมีการศึกษาค้นคว้ากันในช่วงจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย ซึ่งงานวิจัยหลายๆชิ้นได้ชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซที่สูง ในขณะที่มีการใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบที่น้อยกว่าระบบการดูดซึมแบบอื่นๆ มีการเดินระบบที่ไม่สลับซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนมากได้มีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมโดยการเพิ่มความยาวของโมดูลที่ใช้บรรจุเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง เพิ่มความหนาแน่นของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงในขนาดโมดูลเท่าเดิม และใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ผลิตมาเฉพาะวิจัยในเรื่องใดเรื่องหนึ่งเท่านั้นซึ่งมีราคาสูงและหาได้ยากในประเทศไทย ส่วนหอดูดซึมแบบฟองอากาศนั้น ให้ประสิทธิภาพการดูดซึมที่สูงเช่นกัน และยังเป็นระบบที่มีแนวโน้มที่จะมาแทนที่ระบบการดูดซึมแบบอื่นๆในอนาคต จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมจากสิ่งที่ยังงานวิจัยก่อนหน้านี้ยังไม่ได้ทำการศึกษา ซึ่งสามารถสรุปออกมาได้ดังตารางที่ 2.10 ดังนี้

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบสิ่งที่ขาดหายไปของงานวิจัยที่ทำการศึกษา

ประเภทของงานวิจัย	นักวิจัย	สิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติม
การใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงในการดูดซึม	1. Atchariyawut และคณะ 2. deMontigny และคณะ 3. Hoff และคณะ 4. Karoort และคณะ 5. Khaisri และคณะ 6. Rangwala 7. พุฒิพงศ์ ตันติขจรโกศล และคณะ	1. ใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด 2. เปรียบเทียบการใช้เมมเบรนที่มีมุมสัมผัสของหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนจากเมมเบรนชนิดต่างๆ 3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซระหว่างการใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงกับการใช้หอดูดซึมแบบฟองอากาศ 4. การวนกลับซ้ำของเฟสของเหลวดูดซึม 5. การมีความชุ่มในเฟสของเหลว
การใช้สารลดแรงตึงผิวในการดูดซึม	1. Gómez-Díaz และคณะ 2. Hebrard และคณะ 3. Painmanakul และคณะ	1. ใช้สารลดแรงตึงผิวกับระบบเมมเบรนคอนแทรคเตอร์

ประเภทของงานวิจัย	นักวิจัย	สิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติม
การใช้หอดูดซึมแบบ ฟองอากาศในการดูดซึม	1. Bhatia และคณะ 2. Moustiri และคณะ 3. Ruzicka และคณะ 4. Saxena และคณะ	1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึม ก๊าซระหว่างการใช้เมมเบรนแบบเส้นใย กลวงกับการใช้หอดูดซึมแบบฟองอากาศ

ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ออกแบบการทดลองมาเพื่อศึกษาสิ่งทีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ยังไม่ได้
ทำการศึกษา จึงเป็นแรงบันดาลใจให้งานวิจัยชิ้นนี้เลือกศึกษาการวนกลับซ้ำของเฟสของเหลวดูดซึม มี
การใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดมาทำการทดลอง ซึ่งแทบไม่มี
งานวิจัยในประเทศไทยนำเมมเบรนเหล่านี้มาใช้ในการดูดซึมก๊าซในระบบการดูดซึมก๊าซด้วยเมมเบรน
แบบเส้นใยกลวงมาก่อน และยังทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของ
การใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงเปรียบเทียบกับการใช้หอดูดซึมแบบฟองอากาศด้วย

บทที่ 3

แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย

3.1 ภาพรวมของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบเพื่อศึกษาผลของการเดินระบบในรูปแบบต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่ออัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซึ่มก๊าซ ซึ่งการทดลองได้ถูกแบ่งออกเป็น 7 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 คือ การศึกษารายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเมมเบรนชนิด A B C และ A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) รวมถึงศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพทางด้านแรงดึงผิวของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

การทดลองช่วงที่ 2 คือ การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด A B C และ A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) ใช้อากาศเป็นเฟสก๊าซ และน้ำประปาที่ถูกลดก๊าซออกซิเจนเป็นเฟสของเหลว ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

การทดลองช่วงที่ 3 คือ การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด A B C และ A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) ใช้อากาศเป็นเฟสก๊าซ และน้ำประปาที่ถูกลดก๊าซออกซิเจนเป็นเฟสของเหลว ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

การทดลองช่วงที่ 4 คือ การศึกษาผลกระทบของจำนวนเส้นใยเมมเบรน โดยใช้เส้นใยเมมเบรนที่ให้ค่าการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนสูงที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 ใช้อากาศเป็นเฟสก๊าซ และน้ำประปาที่ถูกลดก๊าซออกซิเจนเป็นเฟสของเหลว ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

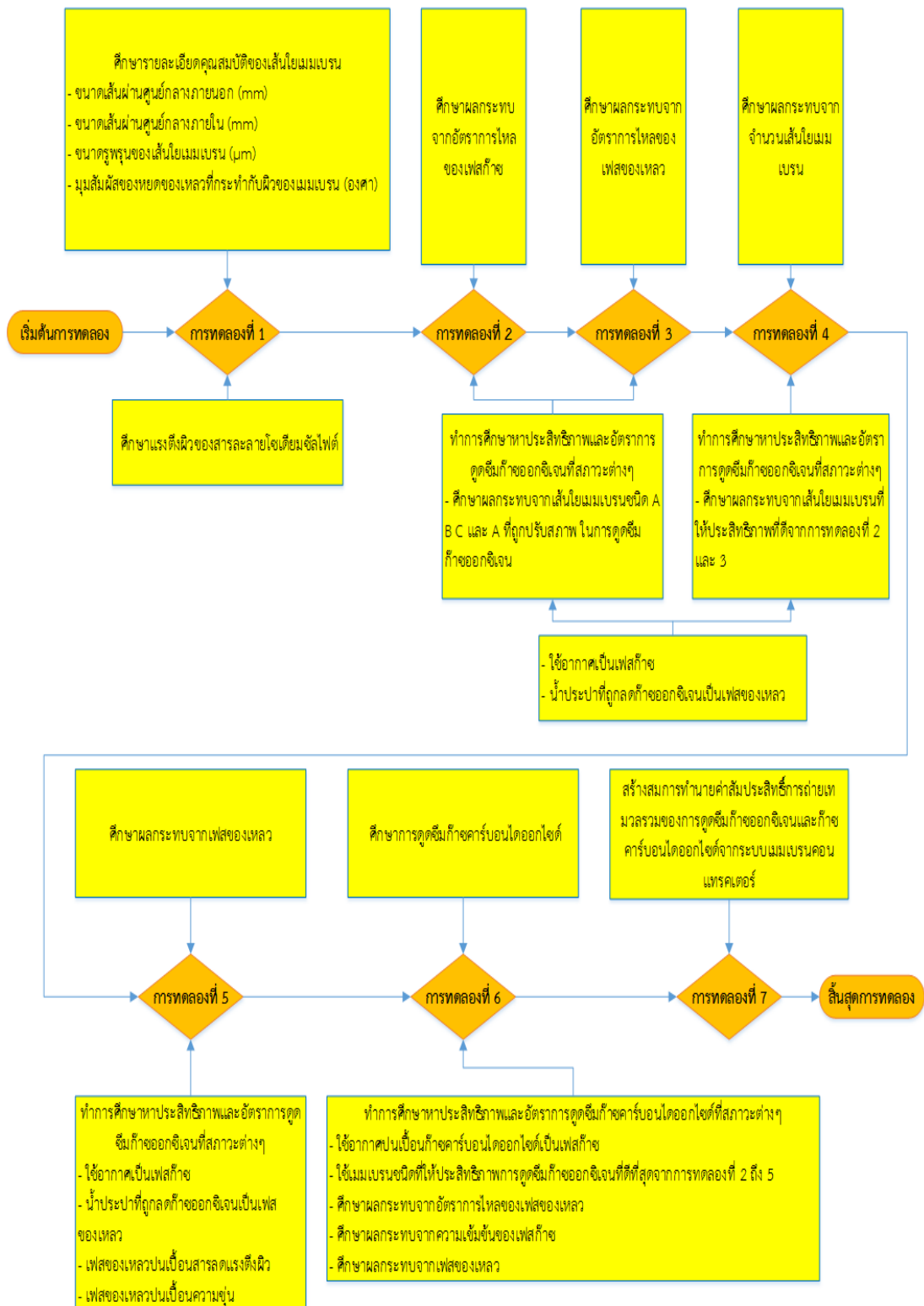
การทดลองช่วงที่ 5 คือ การศึกษาผลกระทบของเฟสของเหลว ใช้เส้นใยเมมเบรนที่ให้ค่าการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนสูงที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 4 ใช้อากาศเป็นเฟสก๊าซ และสารละลายของสารลดแรงดึงผิวหรือสารละลายปนเปื้อนความขุ่นเป็นเฟสของเหลว ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

การทดลองช่วงที่ 6 คือ การศึกษาการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ผลกระทบของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลกระทบของเฟสของเหลว โดยใช้เมมเบรนและจำนวนเมมเบรนที่ให้อัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 5 ของเหลวดูดซึ่มเป็นน้ำปราศจากไอออน สารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ หรือสารละลายปนเปื้อนความขุ่น ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การทดลองช่วงที่ 7 คือ การสร้างโมเดลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเมมเบรนคอนแทคเตอร์

จะเห็นได้ว่า การทดลองทั้ง 7 ช่วง จะแสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซในสภาวะต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปโดยรวมได้ดังรูปที่ 3.1 ทำให้สามารถนำมาประมวลผลหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบการดูดซึ่มก๊าซต่อไปได้





รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองทั้งหมด 7 การทดลอง

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. โมดูลที่ผลิตจากแก้ว ที่มีความยาวยังผล (Effective Length) ขนาด 20 เซนติเมตร ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 1 เซนติเมตร โดยมีความหนาอยู่ที่ 0.1 เซนติเมตร
2. เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงชนิด A ที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง MF และผลิตจาก PVDF
3. เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงชนิด B ที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง UF ชนิดที่ 1
4. เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงชนิด C ที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง UF ชนิดที่ 2
5. เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงชนิด A ที่ถูกปรับสภาพด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)
6. เครื่องอัดอากาศ ใช้อี่ห้อ Atmam High-Class Air Pump รุ่น HP-12000
7. ปั๊มสูบล้างสารเคมี (Solenoid Dosing Pump) ใช้อี่ห้อ ProMinent รุ่น CNPA 1002 PVT
8. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ ใช้อี่ห้อ Dwyer รุ่น RMB-52D-SSV
9. เครื่องวัดก๊าซออกซิเจนละลาย ใช้อี่ห้อ Horiba รุ่น OM-51
10. เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้อี่ห้อ Testo รุ่น CO₂ 535
11. อุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซ ใช้อี่ห้อ Harris
12. เครื่องวัดแรงตึงผิว (Tensiometer) ใช้อี่ห้อ Dataphysics รุ่น DCAT11
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม (Environmental Scanning Electron Microscope, ESEM) ใช้อี่ห้อ FEI รุ่น XL-30 ESEM
14. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
15. อุปกรณ์กวนในท่อ (Static Mixer)
16. เครื่องซั่งติจิตอลแบบละเอียด

ตารางที่ 3.1 รูปภาพเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงรูปแบบต่างๆ



3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. น้ำประปา (Tap Water)
2. น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)
3. โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium Sulphite Anhydrous, Na_2SO_3) ใช้อี่ห้อ Ajax Finechem
4. โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium Lauryl Sulfate (SLS), $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$) ใช้อี่ห้อ Sigma - Aldrich
5. โดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์ไฮเดรต (1-Dodecylpyridiniumchloride hydrate) ($\text{C}_{17}\text{H}_{30}\text{ClN} \cdot x\text{H}_2\text{O}$) ใช้อี่ห้อ Sigma - Aldrich
6. ทวิน 80 (Tween 80, $\text{C}_{64}\text{H}_{124}\text{O}_{26}$) ใช้อี่ห้อ Sigma - Aldrich
7. ดินขาว (Kaolin) (Stockalite)
8. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate, Na_2CO_3) ใช้อี่ห้อ Ajax Finechem
9. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้อี่ห้อ Praxair

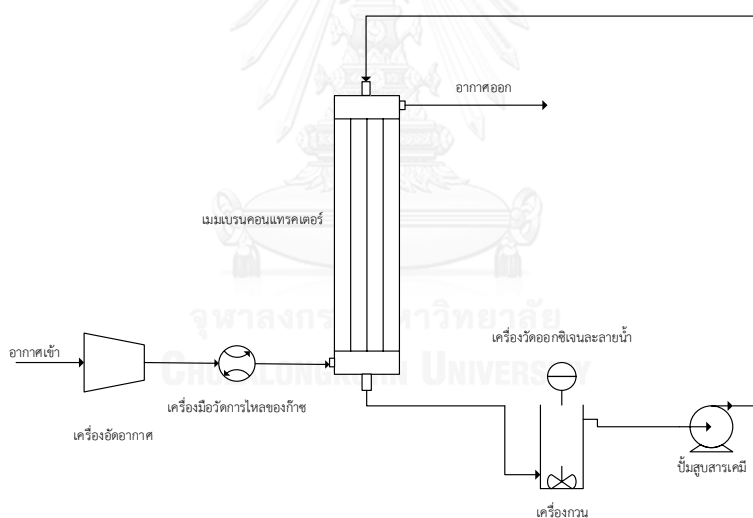
3.3 การติดตั้งระบบการทดลอง

การติดตั้งระบบการทดลองจะแบ่งได้ตามชนิดของก๊าซที่ถูกดูดซึมและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดูดซึม โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 จะทำการศึกษารายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเมมเบรนชนิด A B C และ A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิว ในด้านของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm) ขนาดรูพรุนของเส้นใยเมมเบรน (μm) และมุมสัมผัสของหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน ($^{\circ}$) รวมถึงศึกษาแรงตึงผิวของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (mN/m)

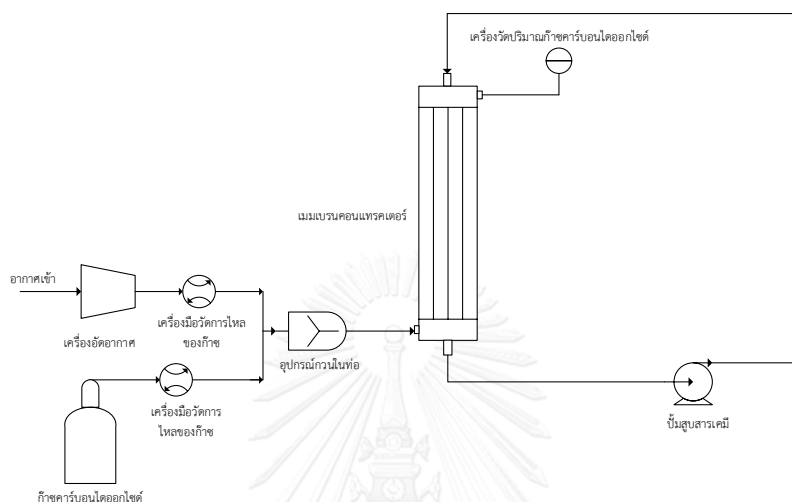
การติดตั้งระบบในการทดลองช่วงที่ 2 ถึง 5 อธิบายได้โดยรูปที่ 3.2 เริ่มจากใช้เครื่องอัดอากาศอัดอากาศผ่านทางท่อลมและปรับอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหล อากาศจะเข้าสู่โมดูลทางด้าน Shell ส่วนของเหลวดูดซึมได้ถูกสูบเข้าโมดูลทางด้าน Tube ซึ่งวัดความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในอากาศก่อนเข้าโมดูลและออกซิเจนละลายในเฟสของเหลวดูดซึมขณะทำการทดลอง โดยการไหลของอากาศและของเหลวดูดซึมจะเป็นการไหลแบบสวนทางกัน การทดลองช่วงนี้ได้ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของเฟสของเหลว อัตราการไหลของเฟสก๊าซ และจำนวนเส้นเมมเบรนในโมดูล เพื่อวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนในสภาวะต่างๆ



รูปที่ 3.2 แผนผังการเดินระบบการทดลองในช่วงที่ 2 ถึง 5

การติดตั้งระบบในการทดลองช่วงที่ 6 สามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 3.3 เริ่มจากเปิดเครื่องอัดอากาศซึ่งทำหน้าที่จ่ายอากาศเข้าสู่ระบบผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหล จากนั้นเปิดวาล์วถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อปล่อยก๊าซผ่านทางท่อลมและปรับอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหล อากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกผสมเข้ากันที่อุปกรณ์กวนในท่อ จากนั้นจะเข้าสู่โมดูลทางด้าน Shell และทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซขณะออกจากโมดูลด้วยเครื่องวัดก๊าซคาร์บอนได

ออกไซด์แบบพหุภาพ เมื่อได้ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการแล้วจึงทำการปิดโมดูลทางด้าน Shell ทั้งขาเข้าและขาออก ส่วนของเหลวดูดซึมได้ถูกสูบเวียนเข้าโมดูลทางด้าน Tube เพื่อดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายในโมดูล



รูปที่ 3.3 แผนผังการเดินระบบเมมเบรนในการทดลองช่วงที่ 6

3.4 ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย

3.4.1 ตัวแปรด้านคุณสมบัติของเส้นใยเมมเบรน

ในการทดลองช่วงที่ 1 การศึกษารายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเมมเบรนชนิด A B C และ A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิว จะแบ่งออกเป็นตัวแปรที่ต้องการศึกษาดังนี้

การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm) และขนาดรูพรุนของเส้นใยเมมเบรน (μm) ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม (Environmental Scanning Electron Microscope, ESEM)

การหาขนาดมุมสัมผัสของหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน ($^{\circ}$) ใช้เครื่องวัดแรงตึงผิว (Tensiometer)

การหาความหนืดของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ใช้เครื่องวัดแรงตึงผิว (Tensiometer)

3.4.2 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลจากการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจน

ในการทดลองช่วงที่ 2 ถึง 5 การหาอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจน สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนละลายที่วัดได้ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการที่ (3.2) ซึ่งเป็นการใช้กระบวนการย้อนกลับของการทำ Differential จากสมการที่ (3.1) มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) และถ้ารู้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ก็จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) ได้อีกด้วย

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^* - C_L) \quad (3.1)$$

เมื่อ	$\frac{dC_L}{dt}$	= อัตราการดูดซึ่ม, mg/l.s หรือ mol/l.s
	k_L	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย, m/s
	a	= พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซกับเฟสของเหลวต่อปริมาตรของเฟสของเหลว, m^2/m^3
	C_L^*	= ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่สภาวะสมดุล, mg/l หรือ mol/l
	C_L	= ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่สภาวะใดๆ, mg/l หรือ mol/l

และเมื่อทำการย้อนกลับ (Integrated) ของการทำ Differential สมการที่ 3.1 ข้างต้น จะได้

$$\ln(C_L^* - C_L) = \ln(C_L^*) - k_L a t \quad (3.2)$$

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม สามารถหาได้จากความชันของการพลอตกราฟระหว่าง $\ln(C_L^* - C_L)$ กับ t

3.4.3 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลจากการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการทดลองช่วงที่ 6 การหาอัตราการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ) ในกรณีที่ไม่มีเติมโซเดียมคาร์บอเนต สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta C_g V_g = \Delta C_l V_l$$

$$(C_{g,in} - C_{g,t})V_g = (C_{l,t} - C_{l,i})V_l$$

เมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ จะได้

$$C_{g,t} = C_{g,in} - \frac{C_{l,t}V_l}{V_g} \quad (3.3)$$

จากสมการการถ่ายเทมวล

$$\frac{dC_l}{dt} = k_L a (C_l^* - C_{l,t}) \quad (3.4)$$

$$\frac{dC_l}{dt} = k_L a (k_H C_{g,t} - C_{l,t})$$

$$\frac{dC_l}{dt} = k_L a \left[k_H \left(C_{g,in} - \frac{C_{l,t}V_l}{V_g} \right) - C_{l,t} \right]$$

$$\frac{dC_l}{dt} = k_L a \left[k_H C_{g,in} - \frac{k_H C_{l,t} V_l}{V_g} - C_{l,t} \right]$$

$$\frac{dC_l}{dt} = k_L a \left[k_H C_{g,in} - C_{l,t} \left(\frac{k_H V_l}{V_g} + 1 \right) \right]$$

กำหนดให้ $\theta = \frac{k_H V_l}{V_g} + 1$

$$\frac{1}{k_H C_{g,in} - C_{l,t} \theta} dC_l = k_L a \cdot dt$$

ให้ $U = k_H C_{g,in} - C_{l,t} \theta$

$$\frac{dU}{dC_l} = -\theta$$

$$dU = -\theta dC_l$$

$$\frac{dC_l}{U} = k_L a \cdot dt$$

$$\frac{-dU}{\theta U} = k_L a \cdot dt$$

$$\int_{C_{l,i}}^{C_{l,t}} \frac{dU}{U} = -\theta k_L a \cdot dt$$

$$\ln \frac{k_H C_{g,in} - C_{l,t} \theta}{k_H C_{g,in} - C_{l,i} \theta} = -k_L a \theta t \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม สามารถหาได้จากความชันของการพลอตกราฟระหว่าง $\ln \frac{k_H C_{g,in} - C_{l,t} \theta}{k_H C_{g,in} - C_{l,i} \theta}$ กับ θt

การหาอัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ) ในกรณีที่มีเติมโซเดียมคาร์บอเนต สามารถคำนวณได้ดังนี้

จากทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Two Film Theory) ซึ่งเป็นแบบจำลองการถ่ายเทมวลจากเฟสก๊าซผ่านฟิล์มบางๆ สองชั้นระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว ก่อนเข้าสู่เฟสของเหลว และสำหรับการเดินระบบแบบทีละเท (Batch) จะพบว่า ขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate Limiting Step) คือ ชั้นฟิล์มของเฟสของเหลว (Liquid Film)

$$\text{Transfer Rate} = k_L a (C^* - C_l) V_l \quad \text{หน่วย mass/time}$$

พิจารณา Transfer Rate จากเฟสก๊าซ

$$-\frac{dN_g}{dt} = k_L a (C^* - C_l) V_l$$

หาร V_g (ปริมาตรเฟสก๊าซ)

$$-\frac{1}{V_g} \frac{dN_g}{dt} = k_L a (C^* - C_l) \frac{V_l}{V_g}$$

$$-\frac{dC_g}{dt} = k_L a (C^* - C_l) \frac{V_l}{V_g}$$

เนื่องจาก c_l (ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ) มีค่าน้อยมาก
 เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น $c^* - c_l = c^*$

$$-\frac{dC_g}{dt} = k_L a C^* \frac{V_L}{V_g}$$

$$-\frac{dC_g}{dt} = k_L a k_H C_g \frac{V_L}{V_g}$$

$$\int_{C_{g,0}}^{C_g} -\frac{1}{C_g} dC_g = \int_0^t k_L a k_H \frac{V_L}{V_g} dt$$

$$\ln \frac{C_{g,0}}{C_g} = k_L a k_H \frac{V_L}{V_g} t \quad (3.6)$$

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การทดลองช่วงที่ 1

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ คือ ศึกษารายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแมมเบรนชนิด A B C และ A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิว

ในหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm) และขนาดรูพรุนของเส้นใยแมมเบรน (μm) ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม (Environmental Scanning Electron Microscope, ESEM)

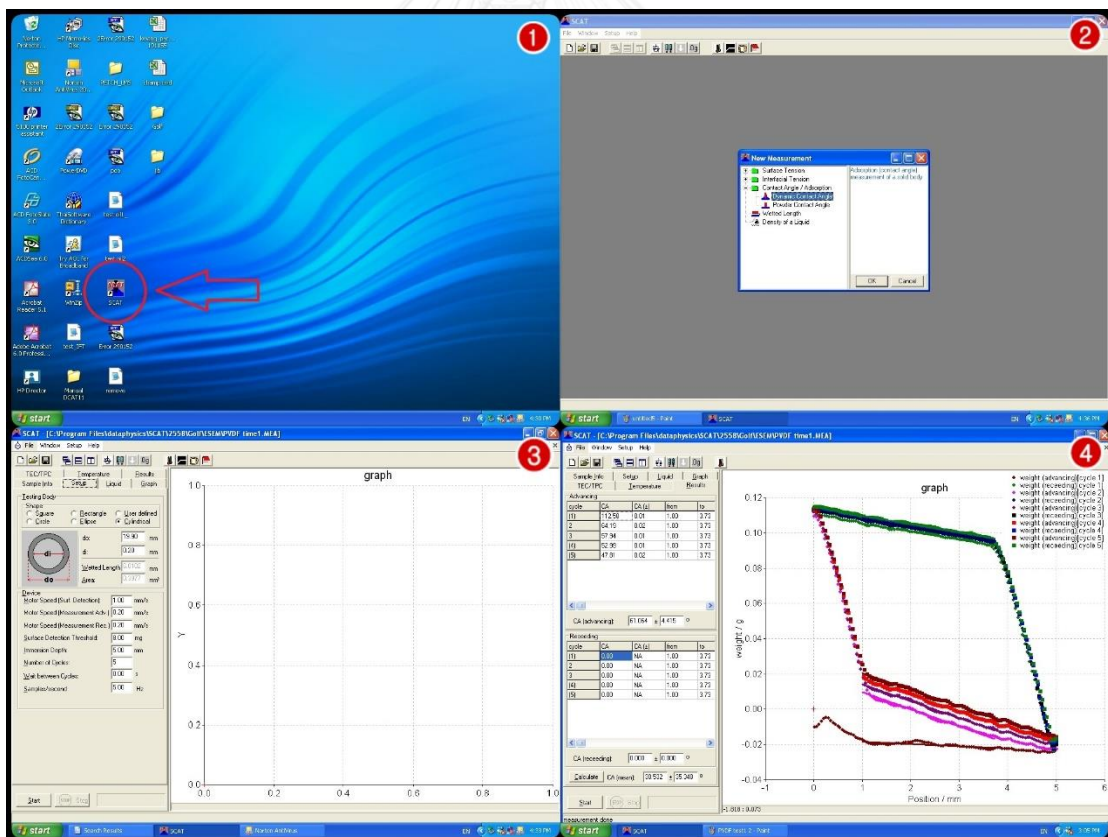
ในการวัดขนาดมุมสัมผัสของหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของแมมเบรน ($^\circ$) โดยใช้หลักการของ Wilhelmy จะนำแมมเบรนมาตัดเป็นเส้นเล็กๆ ความยาว 1 เซนติเมตร มาติดรอบ Dataphysics PUR11- Tensiometry ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากนั้นนำเข้าสู่เครื่องวัดแรงตึงผิว ใช้โปรแกรม SCAT ในการวิเคราะห์ผล ดังนี้

1. ในฟอร์มเริ่มต้น New Measurement เลือก Contact Angle/Adsorption แบบ Dynamic Contact Angle
2. ในแถบ Ribbon เลือก Setup
3. เลือก Shape เป็น Cylindrical แล้วกรอกค่าที่ทราบ จากนั้นกด Start

จากขั้นตอนข้างต้นสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.5 ดังนี้



รูปที่ 3.4 การติดเมมเบรนบน Dataphysics PUR11- Tensiometry



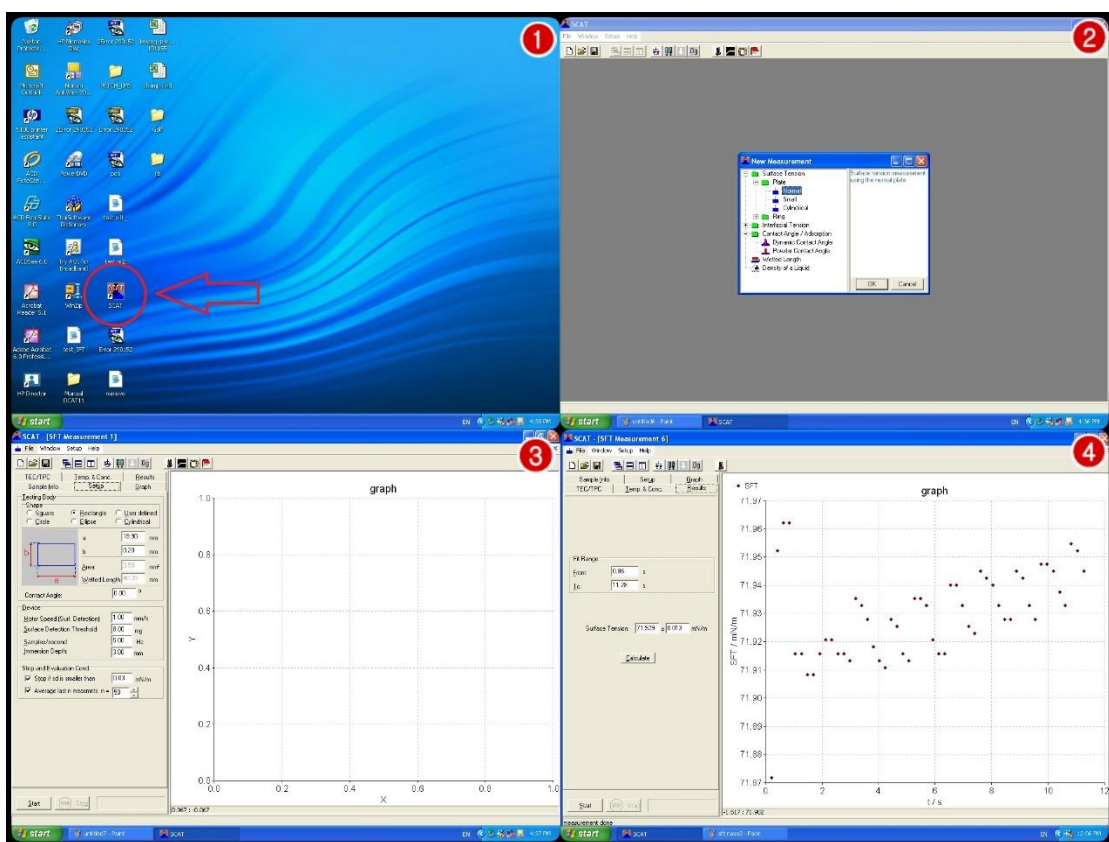
รูปที่ 3.5 การตั้งค่าเบื้องต้นในการหาขนาดมุมสัมผัสของหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน

(^o) โดยใช้โปรแกรม SCAT

ในการหาขนาดแรงตึงผิวของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ ใช้เครื่องวัดแรงตึงผิว (Tensiometer) ร่วมกับอุปกรณ์ Wilhelmy Plate ใช้โปรแกรม SCAT ในการวิเคราะห์ผล ดังนี้

1. ในฟอร์มเริ่มต้น New Measurement เลือก Surface Tension แบบ Plate Normal

2. ในแถบ Ribbon เลือก Setup แล้วกรอกค่าที่ทราบ จากนั้นกด Start จากขั้นตอนข้างต้นสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.6 ดังนี้

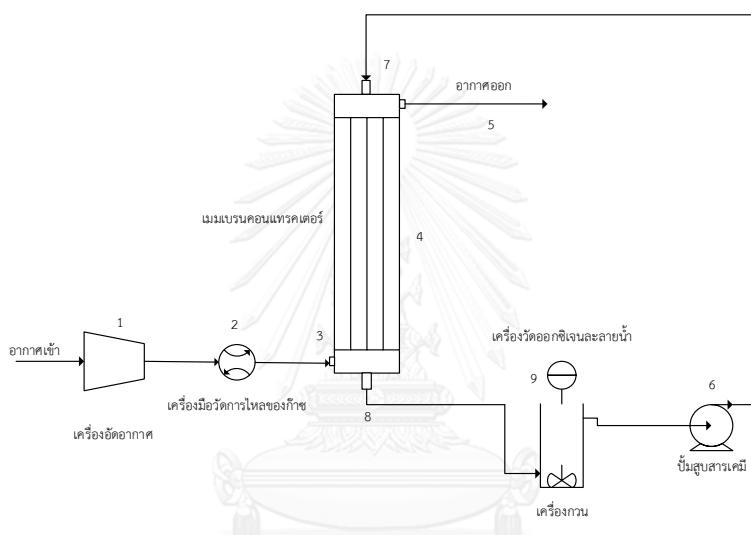


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการวัดแรงตึงผิวของเฟสของเหลว

3.5.2 การทดลองช่วงที่ 2 3 4 และ 5

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ คือ ศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ อัตราการไหลของเฟสของเหลว จำนวนของเส้นเมมเบรนที่ถูกบรรจุภายในโมดูล ผลกระทบของเฟสของเหลว โดยใช้อากาศเป็นตัวถูกดูดซึม และน้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจนโดยใช้โซเดียมซัลไฟต์เป็น

ของเหลวดูดซึม ซึ่งการติดตั้งระบบได้แสดงดังรูปที่ 3.7 กล่าวคือ เครื่องอัดอากาศ (1) อัดอากาศเข้าสู่ระบบที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (2) และเข้าสู่โมดูลทางด้าน Shell (3) ผ่านเส้นใยเมมเบรนที่ถูกบรรจุอยู่ในโมดูล (4) เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของก๊าซออกซิเจน และออกจากโมดูลในทิศทางตรงกันข้าม (5) ส่วนของเหลวดูดซึมจะถูกสูบโดยปั๊มสุบจ่ายสารเคมี (6) เข้าโมดูลทางด้าน Tube (7) และออกจากโมดูลในทิศตรงกันข้าม (8) ผ่านเครื่องวัดก๊าซออกซิเจนละลาย (9) สำหรับบันทึกค่าออกซิเจนละลายหลังผ่านการดูดซึมก๊าซออกซิเจนจากอากาศก่อนถูกปั๊มสุบจ่ายสารเคมีสูบเวียนเข้าสู่ระบบอีกครั้ง



รูปที่ 3.7 แผนผังของระบบในการทดลองช่วงที่ 2 3 4 และ 5

การทดลองช่วงที่ 2 3 4 และ 5 นี้ จะศึกษาถึงระบบการดูดซึมของก๊าซออกซิเจนด้วยน้ำประปาที่ผ่านการลดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในน้ำด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ใช้อากาศที่อัตราการไหล 1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที เป็นตัวให้ก๊าซออกซิเจนกับระบบ แล้ววัดค่าก๊าซออกซิเจนละลายที่เวลาต่างๆในน้ำประปาหลังจากออกจากโมดูล จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2 ถึง 3.5

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 2

ตัวแปรควบคุม	รายละเอียด
ชนิดของเมมเบรน	A B C และ Aที่ถูกปรับสภาพ
ชนิดของตัวถูกละลายที่วิเคราะห์	ก๊าซออกซิเจน
ชนิดของของเหลวที่เติม	น้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจน
อัตราการไหลของของไหล	0.025 0.05 0.1 และ 0.15 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรต้น	รายละเอียด
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ	1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	รายละเอียด
อัตราการดูดซึม	ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน
	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 3

ตัวแปรควบคุม	รายละเอียด
ชนิดของเมมเบรน	A B C และ Aที่ถูกปรับสภาพ
ชนิดของตัวถูกละลายที่วิเคราะห์	ก๊าซออกซิเจน
ชนิดของของเหลวที่เติม	น้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจน
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ	1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรต้น	รายละเอียด
อัตราการไหลของของไหล	0.025 0.05 0.1 และ 0.15 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	รายละเอียด
อัตราการดูดซึม	ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน
	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 4

ตัวแปรควบคุม	รายละเอียด
ชนิดของเมมเบรน	เมมเบรนที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 2 และ 3
ชนิดของตัวถูกดูดซึมที่วิเคราะห์	ก๊าซออกซิเจน
ชนิดของของเหลวดูดซึม	น้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจน
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ	1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของของเฟสเหลว	อัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 และ 3
ตัวแปรต้น	รายละเอียด
จำนวนเส้นใยเมมเบรน	10 และ 20 เส้น
ตัวแปรตาม	รายละเอียด
อัตราการดูดซึม	ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน
	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 5

ตัวแปรควบคุม	รายละเอียด
ชนิดของเมมเบรน	เมมเบรนที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 2 และ 3
ชนิดของตัวถูกดูดซึมที่วิเคราะห์	ก๊าซออกซิเจน
ชนิดของของเหลวดูดซึม	น้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจน
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ	1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของของเฟสเหลว	อัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 และ 3
จำนวนเส้นใยเมมเบรน	จำนวนเส้นที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 4

ตัวแปรต้น	รายละเอียด
ชนิดของของเหลวดูดซึม	น้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจนผสมโซเดียมล อริซัลเฟต ความเข้มข้น 0.2 0.7 1 1.5 2 และ 3 CMC
	น้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจนผสมทวิน 80 ความเข้มข้น 0.2 0.7 1 1.5 2 และ 3 CMC
	น้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจนผสมโตเดซิลไฟ ริดิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.2 0.7 1 1.5 2 และ 3 CMC
	น้ำประปาที่ผ่านการลดก๊าซออกซิเจนผสมเคโอลิน ความเข้มข้น 50 100 200 400 และ 800 มิลลิกรัม ต่อลิตร
ตัวแปรตาม	รายละเอียด
อัตราการดูดซึม	ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน
	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

ตัวอย่างการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

- วัดค่าก๊าซออกซิเจนละลายน้ำทุกๆ 10 วินาที จนกระทั่งค่าก๊าซออกซิเจนละลายน้ำคงที่ ดังรูปที่ 3.8
- บันทึกอุณหภูมิของน้ำ แล้วนำมาคำนวณหาค่าก๊าซออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะสมดุล โดยใช้สมการที่ 2.1 เช่น เมื่ออุณหภูมิ 24.4 องศาเซลเซียส จะได้

$$H(T) = k_H^{cp,\theta} \times \exp \left[\frac{-\Delta_{sol}H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T\theta} \right) \right]$$

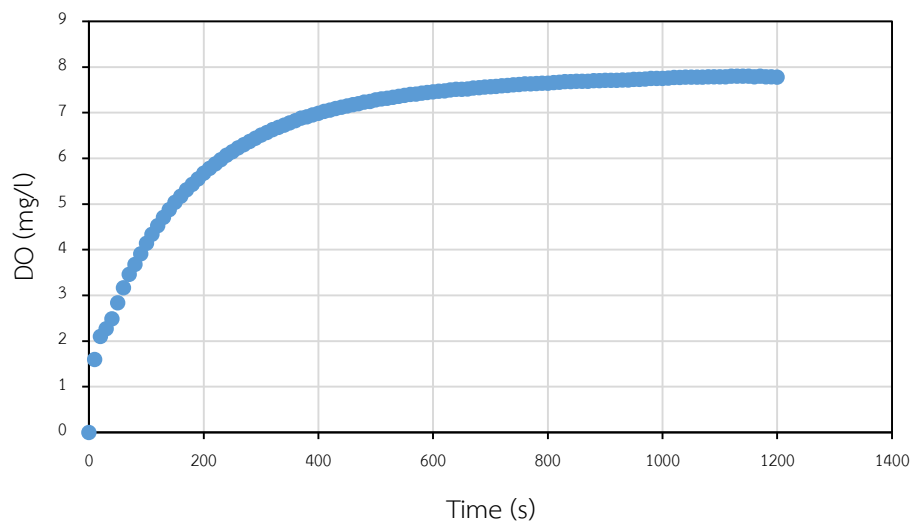
$$H(T) = \frac{1.3}{1000} \times \exp \left[1700 \left(\frac{1}{273+24.4} - \frac{1}{298} \right) \right]$$

$$H(T) = 0.00132 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$$

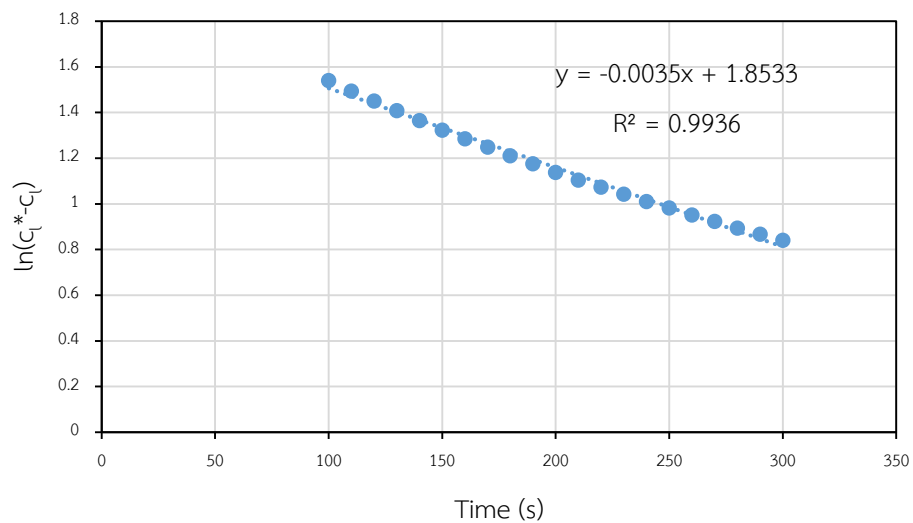
ดังนั้น

$$C^* = 0.00132 \times 0.21 \times 32 \times 1000 = 8.83712 \text{ mg/l}$$

3. พล็อตกราฟระหว่าง $\ln(C_L^* - C_L)$ กับ t แล้วทำการหาความชันของกราฟ ความชันคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ดังรูปที่ 3.9 จะได้ค่า $k_L a$ คือ 0.0035 s^{-1}



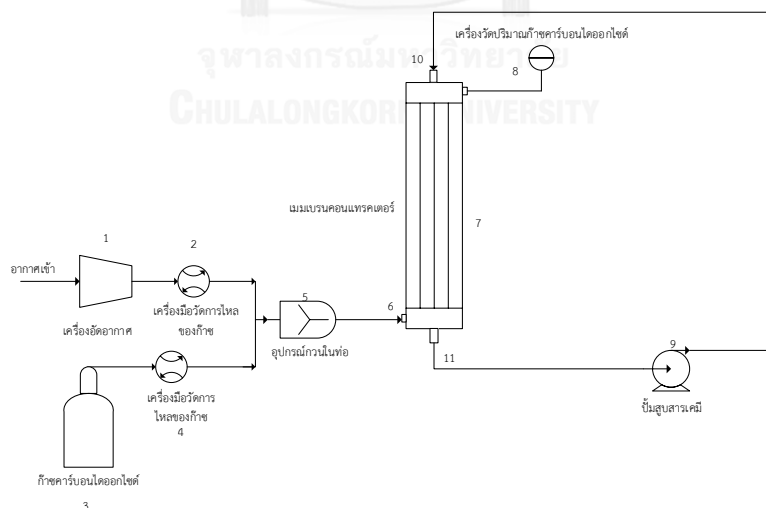
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนละลายน้ำต่อเวลา



รูปที่ 3.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

3.5.4 การทดลองช่วงที่ 6

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ คือ การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลกระทบของเฟสของเหลวและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ส่งผลต่ออัตราการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้อากาศผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวถูกดูดซึ่ม น้ำปราศจากไอออนหรือน้ำที่ปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวและความขุ่นเป็นของเหลวดูดซึ่ม ซึ่งการติดตั้งระบบเมมเบรนได้แสดงดังรูปที่ 3.10 กล่าวคือ อากาศถูกจ่ายเข้าสู่ระบบโดยเครื่องอัดอากาศ (1) ผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (2) ปล่องก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกบรรจุอยู่ในถัง (3) ผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (4) จากนั้นอากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาผสมกันที่อุปกรณ์กวนในท่อ (5) ก่อนเข้าสู่โมดูลทางด้าน Shell (6) ผ่านเส้นใยเมมเบรนที่ถูกบรรจุอยู่ในโมดูล (7) เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และออกจากโมดูลในทิศทางตรงกันข้ามผ่านการบันทึกความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (8) ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ เมื่อได้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นที่ต้องการแล้วจึงทำการปิดโมดูลทางด้าน Shell ทั้งขาเข้าและขาออก ส่วนของเหลวดูดซึ่มจะถูกสูบโดยปั๊มสุบจ่ายสารเคมี (9) เข้าโมดูลทางด้าน Tube (10) และออกจากโมดูลในทิศตรงกันข้าม (11) ก่อนถูกปั๊มสุบจ่ายสารเคมีสูบเวียนเข้าสู่ระบบอีกครั้ง



รูปที่ 3.10 แผนผังของระบบในการทดลองช่วงที่ 6

การทดลองช่วงที่ 6 นี้ จะเลือกระบบที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่ดีที่สุดจากการทดลองก่อนหน้านี้ และนำมาดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับเมมเบรนจะใช้อัตราการไหลของเฟสก๊าซและเฟสของเหลวที่ดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2 3 4 และ 5 แล้ววัดค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ ในเฟสก๊าซภายในโมดูล จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 6 ของการใช้เมมเบรนในการดูดซึ่ม

ตัวแปรควบคุม	รายละเอียด
ชนิดของตัวถูกละลายที่วิเคราะห์	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของเมมเบรน	เมมเบรนที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 2 และ 3
ตัวแปรต้น	รายละเอียด
อัตราการไหลของเฟสของเหลว	0.05 0.1 และ 0.15 ลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	5000 7000 และ 9000 ppm
ชนิดของของเหลวดูดซึ่ม	สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นอัตราร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนัก
	สารละลายโซเดียมลอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC
	สารละลายทวิน 80 ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC
	สารละลายโตะเดซิลไพริดิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC
ตัวแปรตาม	รายละเอียด
อัตราการดูดซึ่ม	ประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

การหาค่า $C_{L,t}$ (ค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ)) ในกรณีที่ไม่เติมโซเดียมคาร์บอเนต

1. พิจารณาสมดุลมวลสาร (Mass Balance) พบว่า $C_L' = \frac{V_g}{V_L} (C_{g,in} - C_g)$

2. นำค่า C_L' ไปหา $C_{L,t}$ (ค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ)) จากฟังก์ชัน Solver โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel (ภาคผนวก ฉ)

3. $C_{L,t}$ ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังที่จะกล่าวต่อไป

ตัวอย่างการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเทอมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ) ในกรณีที่ไม่เติมโซเดียมคาร์บอเนต

วิธีที่ 1

1. วัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโมดูลที่ลดลงทุกๆ 10 วินาที จนกระทั่งค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ ดังรูปที่ 3.11

2. บันทึกอุณหภูมิของอากาศภายในโมดูลหลังจบการทดลอง เช่น อุณหภูมิ 22.5 องศาเซลเซียสจะได้ 1 โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ = $22.4/273.15 \times 295.65 = 24.25$ ลิตร

3. ใช้สมการที่ 3.4 คือ $\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^* - C_{L,t})$ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

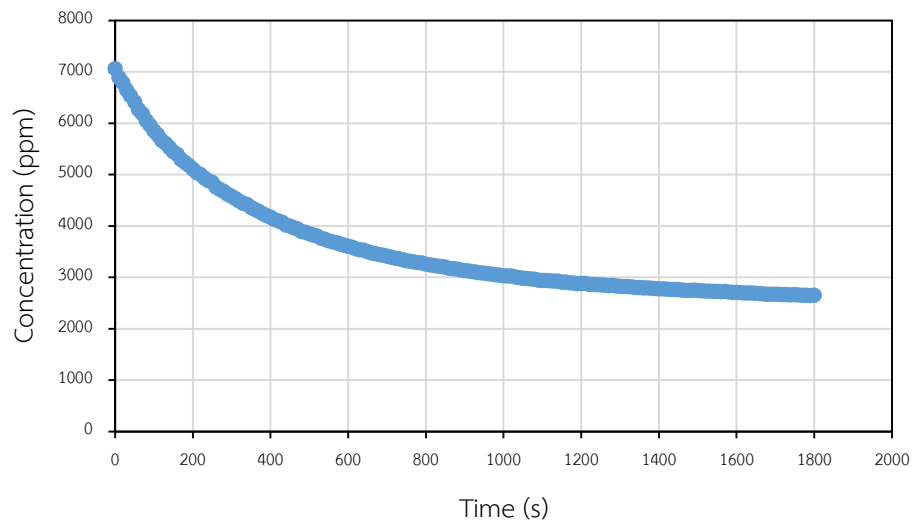
$$\text{ใช้ } k_H = 0.8317 \text{ (จากตารางที่ 2.2)}$$

$$V_L = 0.027 \text{ l}$$

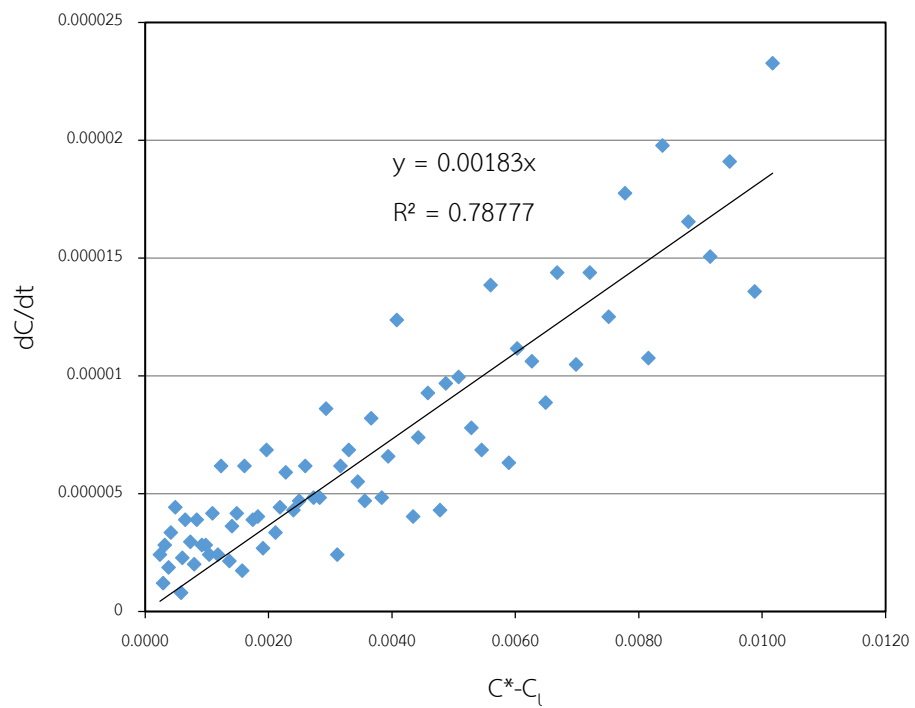
$$V_g = 0.0200175 \text{ l}$$

3. ทำการหาค่า $\frac{dC_L}{dt}$ และ $k_L a (C_L^* - C_{L,t})$

4. พล็อตกราฟระหว่าง $\frac{dC_L}{dt}$ กับ $k_L a (C_L^* - C_{L,t})$ แล้วทำการหาความชันของกราฟ ความชันคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ดังรูปที่ 3.12 จะได้ค่า $k_L a$ คือ 0.00183 s^{-1}



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการลดลงของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเวลา



รูปที่ 3.12 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วิธีที่ 1

วิธีที่ 2

1. วัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโมดูลทุกๆ 10 วินาที จนกระทั่งค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ที่แสดงไปก่อนหน้านี้แล้ว

2. บันทึกอุณหภูมิของอากาศภายในโมดูลหลังจบการทดลอง เช่น อุณหภูมิ 22.5 องศาเซลเซียสจะได้ 1 โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ = $22.4/273.15 \times 295.65 = 24.25$ ลิตร

3. ใช้สมการที่ 3.5 คือ $\ln \frac{k_H C_{g,in} - C_{l,t} \theta}{k_H C_{g,in} - C_{l,i} \theta} = -k_L a \theta t$ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การ

ถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

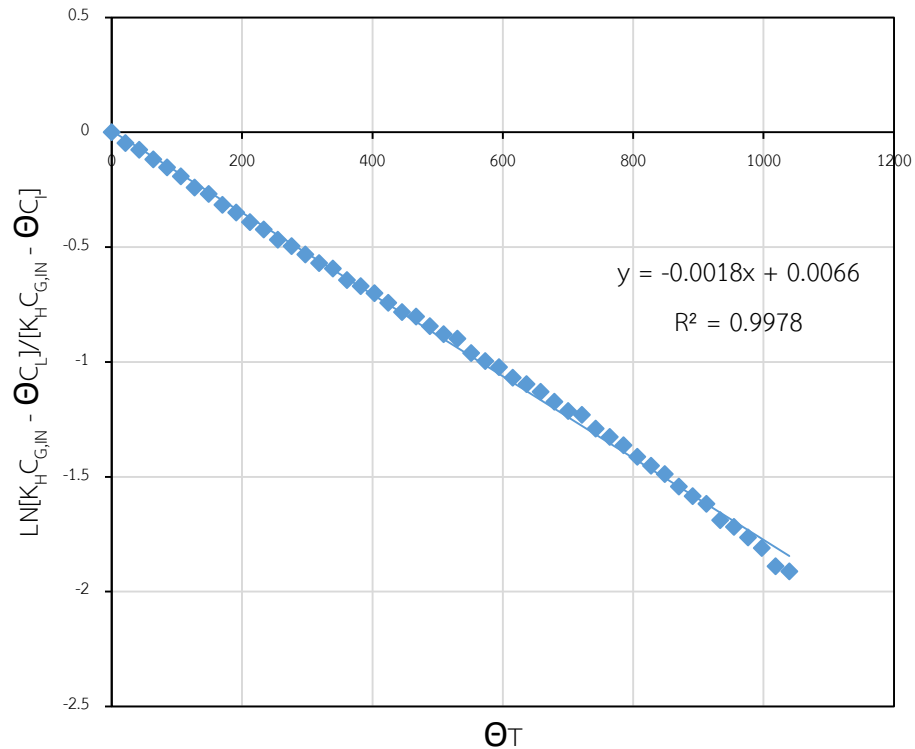
$$\text{ใช้ } k_H = 0.8317 \text{ (จากตารางที่ 2.2)}$$

$$V_l = 0.027 \text{ l}$$

$$V_g = 0.0200175 \text{ l}$$

3. ทำการหาค่า $\ln[k_H C_{g,in} - \theta C_{l,t}] / [k_H C_{g,in} - \theta C_{l,i}]$ และ θt

4. พล็อตกราฟระหว่าง $\ln[k_H C_{g,in} - \theta C_{l,t}] / [k_H C_{g,in} - \theta C_{l,i}]$ กับ θt แล้วทำการหาความชันของกราฟ ความชันคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ดังรูปที่ 3.13 จะได้ค่า $k_L a$ คือ 0.0018 s^{-1}



รูปที่ 3.13 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วิธีที่ 2

จะเห็นได้ว่า การใช้วิธีที่ 1 และ 2 ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก คือ 0.0018 s^{-1} และ 0.00183 s^{-1} ตามลำดับ ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่าให้ผลลัพธ์ที่เท่ากัน ดังนั้น การคำนวณในส่วนการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถใช้ได้ทั้งสองวิธีข้างต้นในการคำนวณ

ตัวอย่างการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเทอมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ) ในกรณีที่เติมโซเดียมคาร์บอเนต

1. วัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโมดูลทุกๆ 10 วินาที จนกระทั่งค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คงที่

2. บันทึกอุณหภูมิของอากาศภายในโมดูลหลังจบการทดลอง เช่น อุณหภูมิ 22.5 องศาเซลเซียสจะได้ 1 โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ = $22.4/273.15 \times 295.65 = 24.24514003$ ลิตร

3. ใช้สมการที่ 3.6 คือ $\ln \frac{C_{g,0}}{C_g} = k_L a k_H \frac{V_L}{V_g} t$ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ใช้ $k_H = 0.7776$ (โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1%), 0.5832 (โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 5%), 0.3888 (โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 10%)

$$V_L = 0.027 \text{ l}$$

$$V_g = 0.0200175 \text{ l}$$

4. ทำการหาค่า $\ln[C_{g,0}/C_g]$ และ $k_H V_L/V_g t$

5. พล็อตกราฟระหว่าง $\ln[C_{g,0}/C_g]$ และ $k_H V_L/V_g t$ แล้วทำการหาความชันของกราฟ ความชันคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 7 การทดลอง ตามวิธีการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 กล่าวคือ

(1) ผลการศึกษารายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเมมเบรนชนิด A B C และ A ที่ถูกปรับสภาพด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) และคุณสมบัติทางกายภาพทางด้านแรงดึงผิวของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

(2) ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

(3) ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

(4) ผลการศึกษาผลกระทบของจำนวนเส้นใยเมมเบรนที่บรรจุอยู่ในโมดูล ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

(5) ผลการศึกษาผลกระทบของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

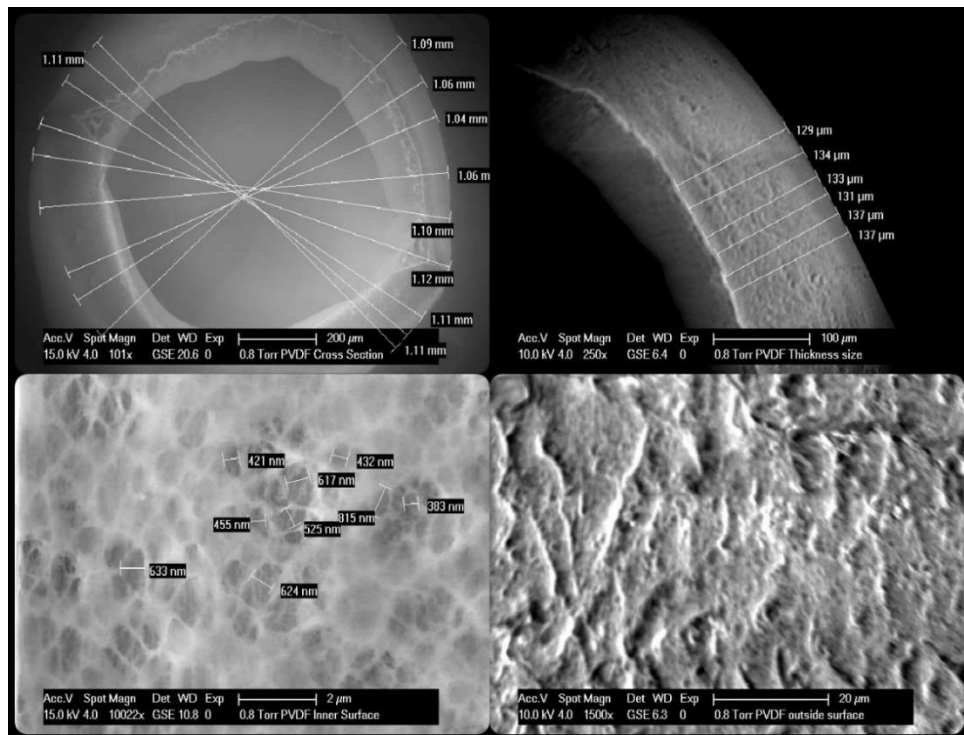
(6) ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโมดูล และเฟสของเหลวปนเปื้อนสารลดแรงดึงผิว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

(7) การสร้างโมเดลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจากการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

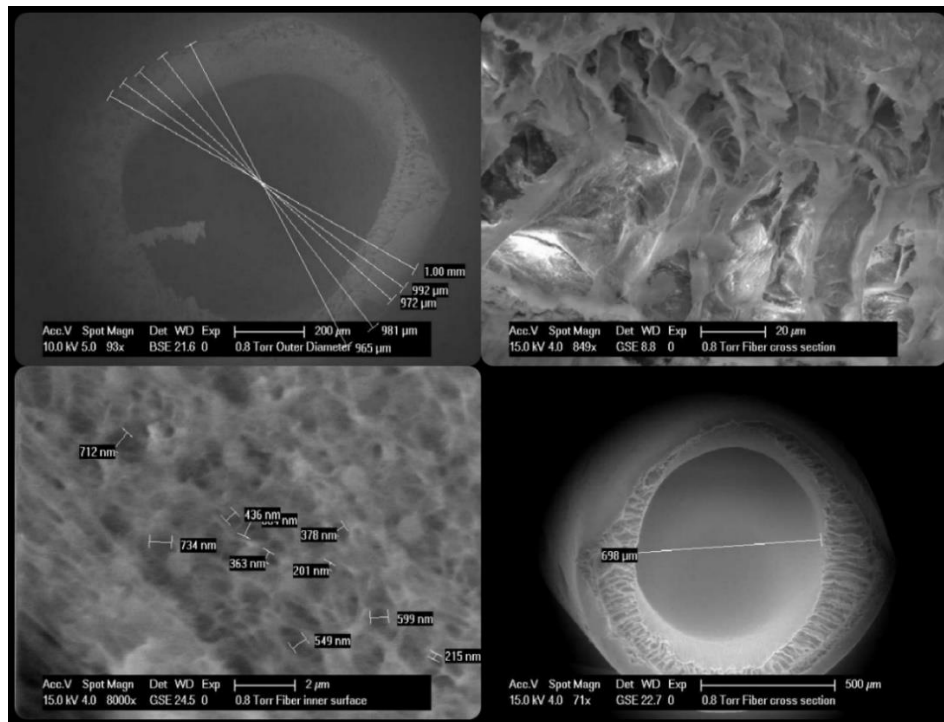
4.1 ผลการศึกษารายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเมมเบรน รวมถึงศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพทางด้านแรงดึงผิวของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

จากการศึกษาสัณฐานของเมมเบรนในด้านลักษณะพื้นผิว รูปร่าง ของเมมเบรนชนิด A B C โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม (Environmental Scanning Electron

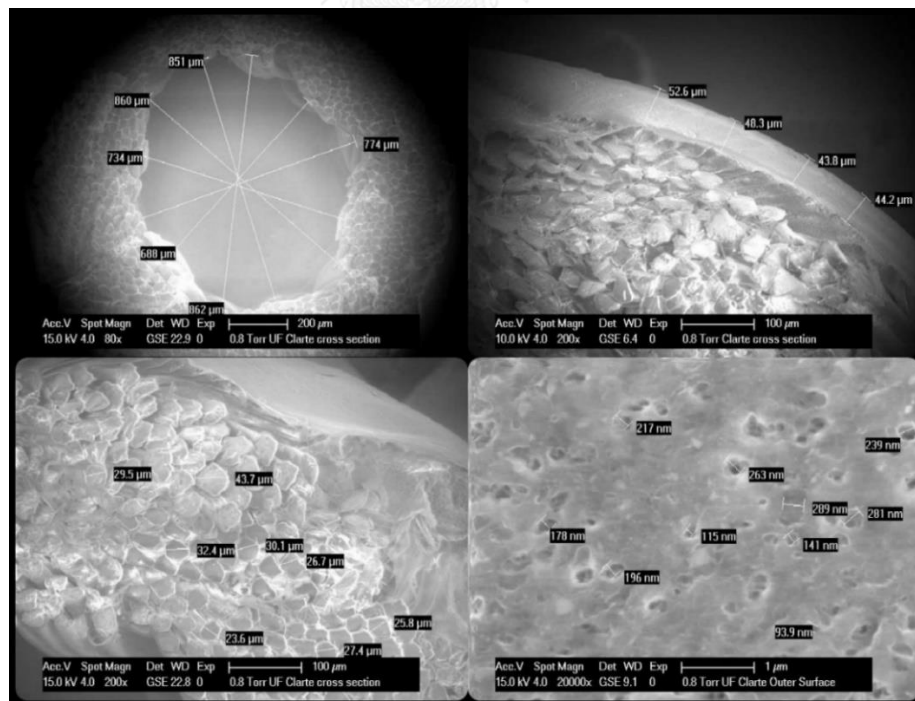
Microscope, ESEM) พบว่า พื้นผิวภายนอกของเมมเบรนชนิด A B และ C มีลักษณะขรุขระ ประกอบไปด้วยรูพรุนเล็กๆกระจายทั่วพื้นผิวด้านนอก โดยที่ลักษณะภาพตัดขวางของเมมเบรนชนิด A มีพื้นผิวเรียบ แต่เมมเบรนชนิด B มีลักษณะพื้นผิวภาพตัดขวางเป็นโพรงกระจายตามแนวรัศมี ส่วนเมมเบรนชนิด C มีลักษณะที่เป็นเส้นใยทรงกระบอกสานไปมาตามแนวรัศมี ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.3



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก ESEM ของเมมเบรนชนิด A



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจาก ESEM ของเมมเบรนชนิด B



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจาก ESEM ของเมมเบรนชนิด C

ในการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม พบว่า เมมเบรนชนิด B มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเล็กที่สุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเมมเบรนชนิด C ใหญ่กว่าชนิด A แต่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเมมเบรนชนิด A มีขนาดใหญ่กว่าชนิด C ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของเมมเบรนแต่ละชนิด

ชนิดเส้นใยเมมเบรน	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)
A และ A ที่ถูกปรับสภาพ	0.8242	1.0889	0.2647
B	0.7102	0.982	0.2718
C	0.7948	1.7478	0.953

ในส่วนของมุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับพื้นผิวของเส้นใยเมมเบรนจะถูกวัดโดยเครื่องวัดแรงตึงผิว (Tensiometer) โดยใช้หลักการของ Wilhelmy พบว่า มุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน ($^{\circ}$) ของเส้นใยเมมเบรนชนิด A ที่ถูกปรับสภาพด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) มีค่ามากกว่าชนิด B A และ C ตามลำดับ กล่าวคือ เมมเบรนชนิด A ที่ถูกปรับสภาพด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูงสุด และเมมเบรนชนิด C มีคุณสมบัติชอบน้ำสูงสุดดังแสดงได้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 มุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน ($^{\circ}$) ทั้ง 4 ชนิด

ชนิดเส้นใยเมมเบรน	มุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน ($^{\circ}$)
A	61.064
B	136.003
C	0
A ที่ถูกปรับสภาพ	180

สำหรับการหาขนาดรูพรุนของเมมเบรนจะอาศัยวิธีการแทนที่ของเฟสก๊าซกับของเหลว ซึ่งอาศัยหลักการที่ว่าความดันจะอัดของเหลวให้ผ่านรูพรุนของเมมเบรน และสามารถคำนวณกลับมาเป็นขนาดของรูพรุน พบว่า เมมเบรนชนิด A มีขนาดรูพรุนมากกว่าชนิด C และ B ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดรูพรุนของเมมเบรน (ไมครอน) ทั้ง 4 ชนิด

ชนิดเส้นใยเมมเบรน	ขนาดรูพรุน (ไมครอน)
A และ A ที่ถูกปรับสภาพ	0.1600
B	0.0238
C	0.1086

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังศึกษาผลของแรงตึงผิวระหว่างน้ำ Milli-Q 18 เทียบกับสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร พบว่าแรงตึงผิวของน้ำ Milli-Q 18 กับสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร มีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้งานวิจัยนี้อนุมานว่าสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร มีแรงตึงผิวเท่ากับน้ำ Milli-Q 18 ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลแรงตึงผิวระหว่างน้ำ Milli-Q 18 เทียบกับสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร

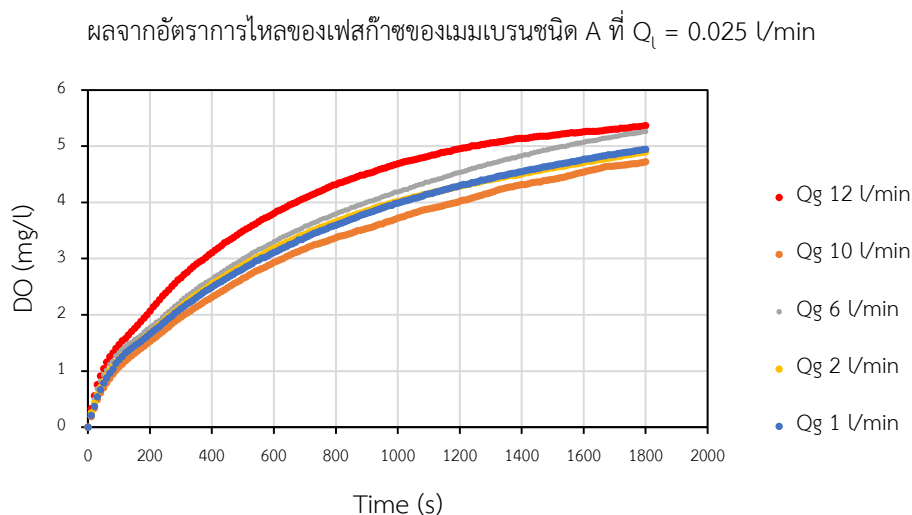
สาร	แรงตึงผิว (mN/m)
น้ำ Milli-Q 18	72.025 ± 0.013
สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร	72.021 ± 0.008

4.2 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ จะทำการเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซจาก 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที โดยทดลองที่อัตราการไหลของเฟสของเหลวแตกต่างกัน การศึกษาในส่วนนี้จะแบ่งย่อยออกเป็น 4 ส่วนตามชนิดของเมมเบรนที่นำมาทดลอง ดังนี้

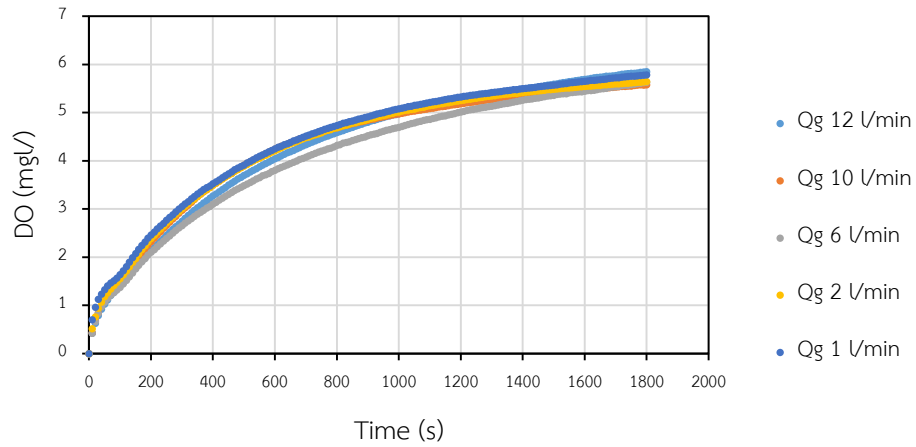
4.2.1 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด A

ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 0.05 0.1 และ 0.15 ลิตรต่อนาที ได้ผลการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 และแปลผลออกมาเป็นค่า $k_L a$ (s^{-1}) ในตารางที่ จ-1 ถึง จ-4



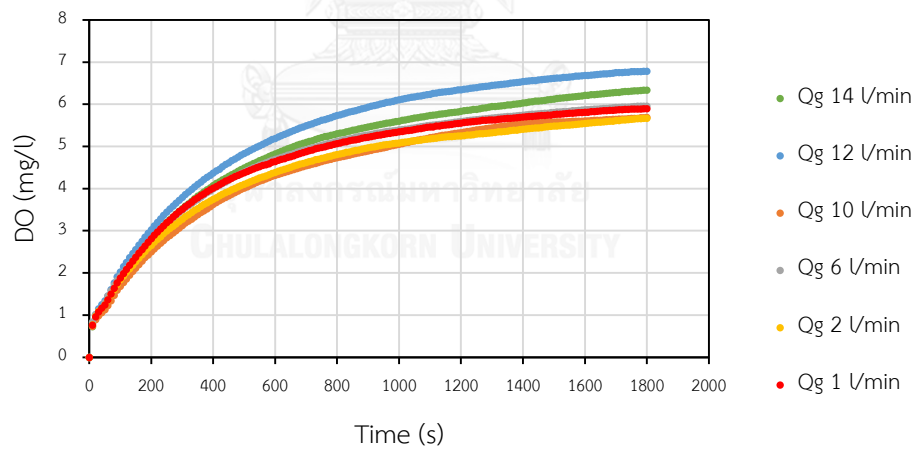
รูปที่ 4.4 การดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที

ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A ที่ $Q_l = 0.05$ l/min

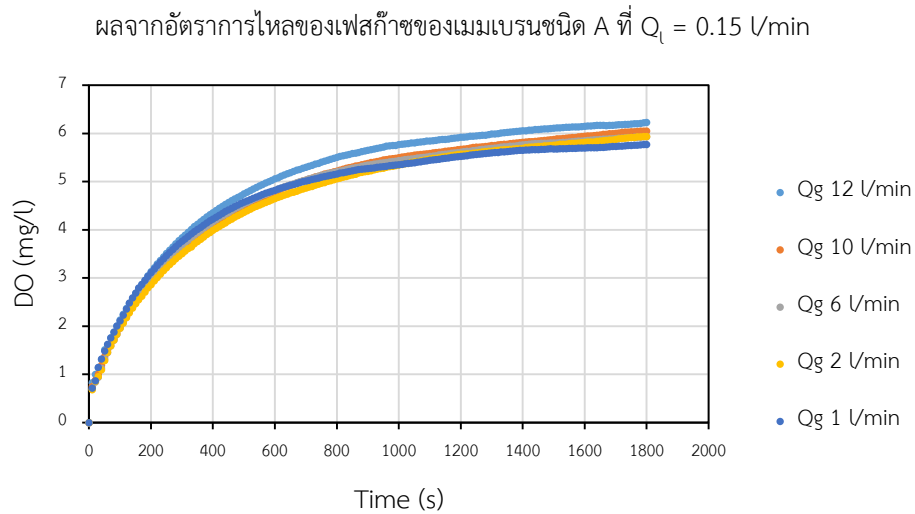


รูปที่ 4.5 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อ
นาที

ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A ที่ $Q_l = 0.1$ l/min



รูปที่ 4.6 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

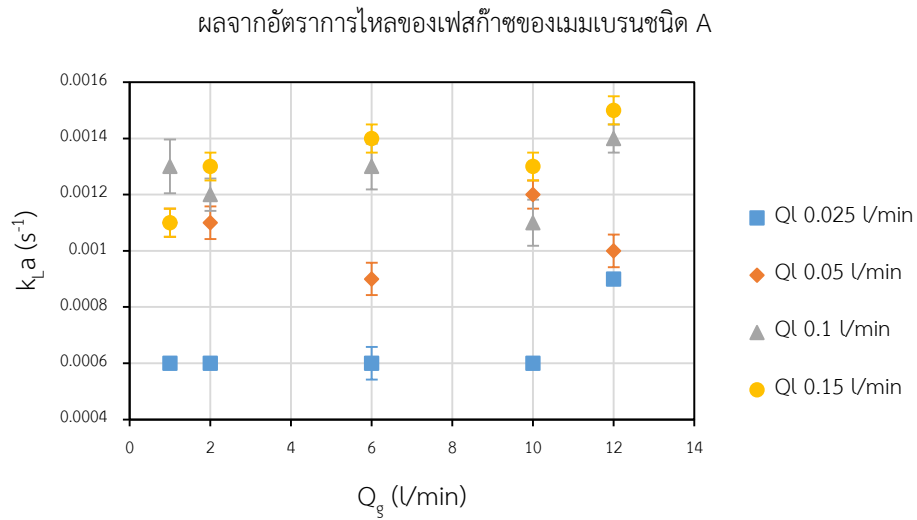


รูปที่ 4.7 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อ นาที

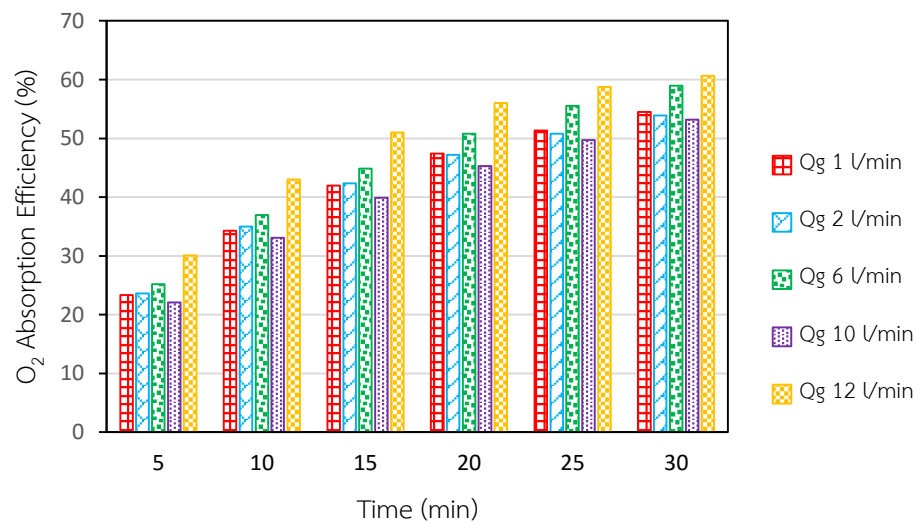
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A สามารถสรุปได้ว่า

1. จากตารางที่ จ-1 ถึง จ-4 ที่สรุปออกมาในรูปของกราฟแสดงอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อค่า k_{La} พร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 4.8 สามารถกล่าวได้ว่า เมื่อใช้เมมเบรนชนิด A การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซจาก 1 ลิตรต่อนาที ถึง 12 ลิตรต่อนาที ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลวต่ำ (0.025 ลิตรต่อนาที) การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซแทบจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า k_{La} แต่เมื่ออัตราการไหลของเฟสของเหลวสูงขึ้น (0.15 ลิตรต่อนาที) การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซมีแนวโน้มต่อการเพิ่มค่า k_{La}

2. ในช่วงเวลาการเดินระบบที่เท่ากัน การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซที่ช่วงอัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ถึง 10 ลิตรต่อนาที แทบไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน แต่ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลวเท่ากันคือ 0.025 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.8 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A

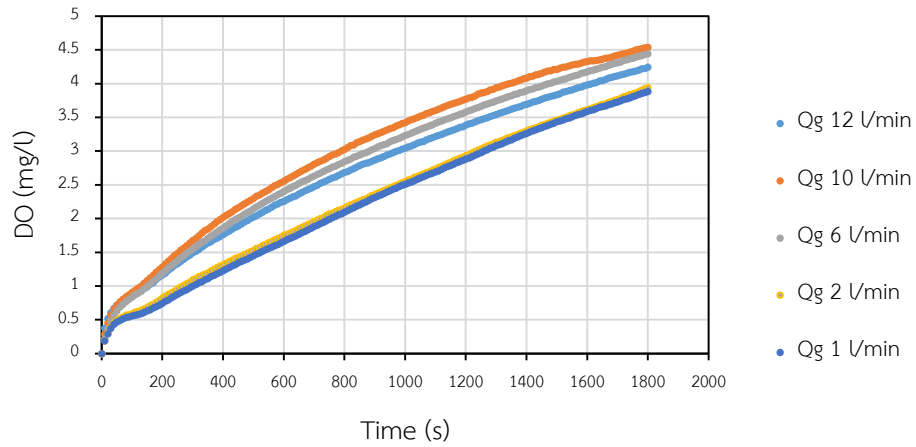


รูปที่ 4.9 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A

4.2.2 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด B

ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 0.05 0.1 และ 0.15 ได้ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 และแปลผลออกมาเป็นค่า k_{La} (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-5 ถึง จ-8

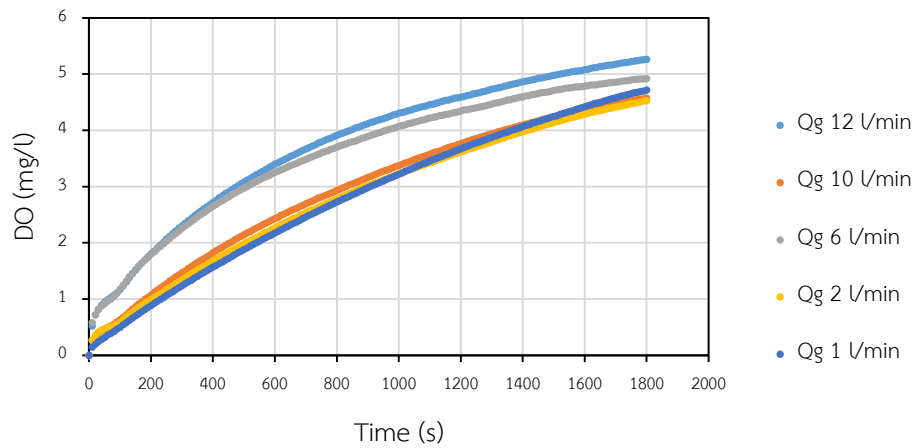
ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด B ที่ $Q_l = 0.025$ l/min



รูปที่ 4.10 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อ

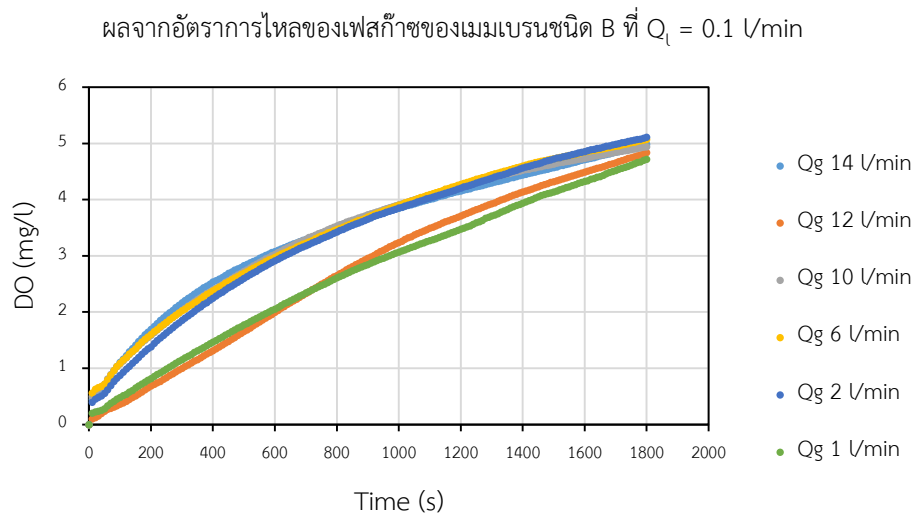
นาที

ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด B ที่ $Q_l = 0.05$ l/min



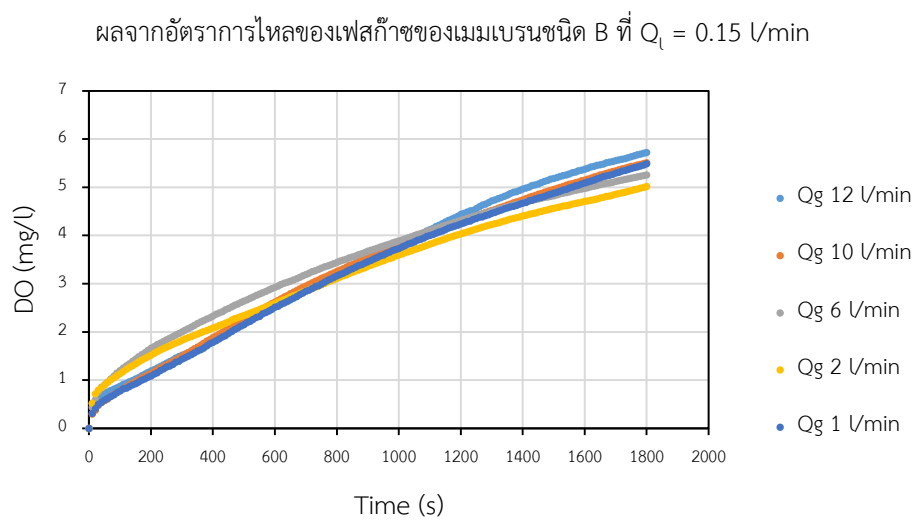
รูปที่ 4.11 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อ

นาที



รูปที่ 4.12 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อ

นาที



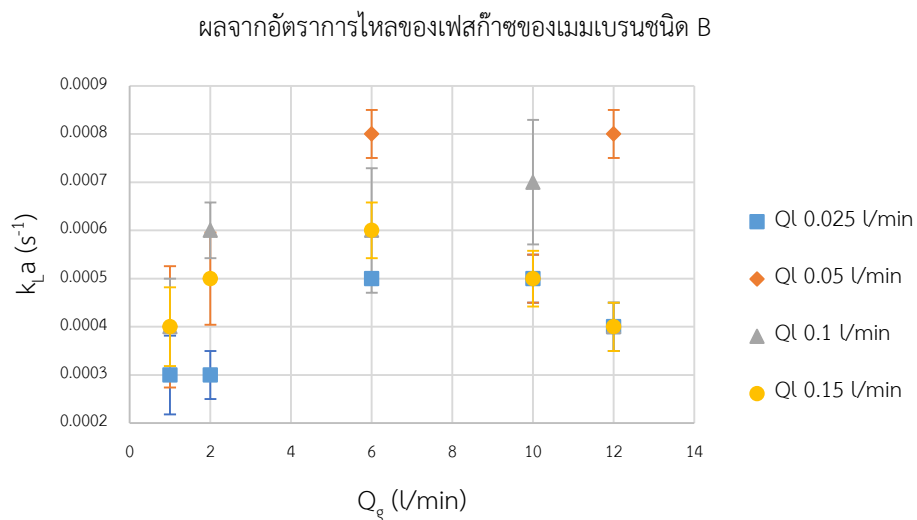
รูปที่ 4.13 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อ

นาที

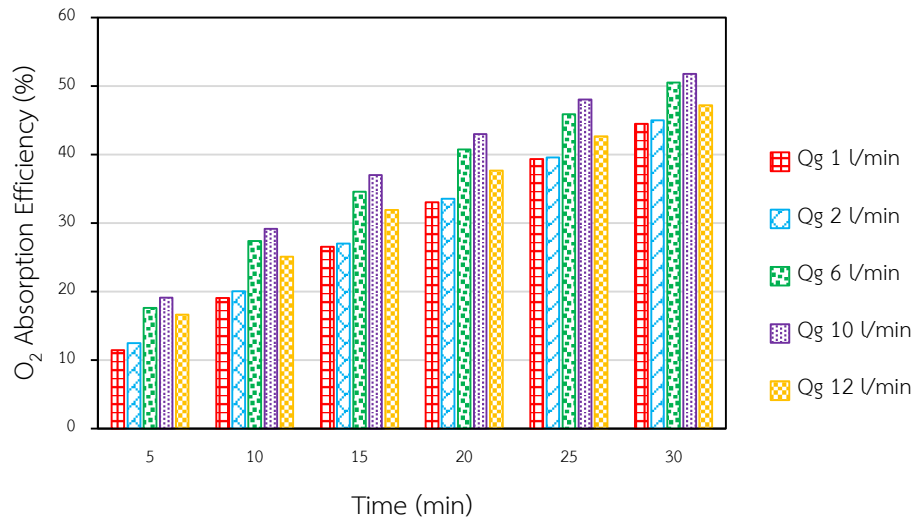
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B สามารถสรุปได้ว่า

1. จากตารางที่ จ-5 ถึง จ-8 ที่สรุปออกมาในรูปแบบของกราฟแสดงอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อค่า k_{La} พร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปแบบที่ 4.14 พบว่า ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลวต่ำ (0.025 ลิตรต่อนาที และ 0.05 ลิตรต่อนาที) การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซส่งผลให้ค่า k_{La} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหลของเฟสของเหลวสูงขึ้น (0.1 และ 0.15 ลิตรต่อนาที) การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซแทบจะไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

2. การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซมีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.15 ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.14 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด B

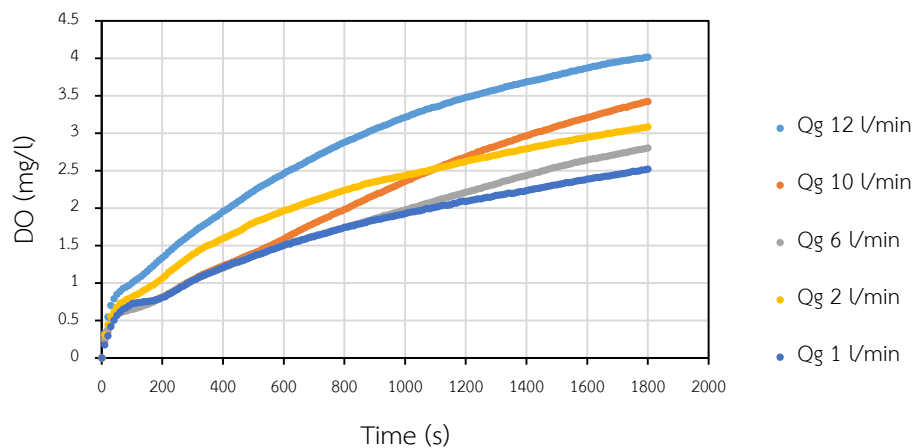


รูปที่ 4.15 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรน
ชนิด B

4.2.3 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด C

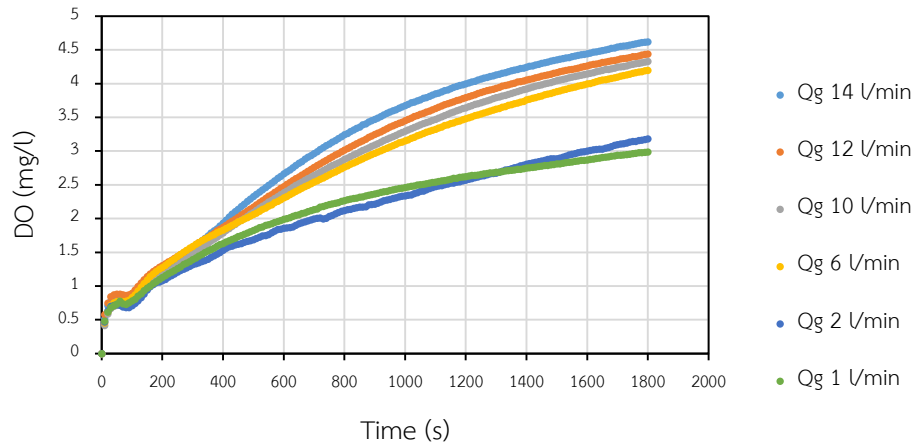
ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 0.05 0.1 และ 0.15 ลิตรต่อนาที ได้ผลการดูดซึ่ม
ก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ถึง 4.19 และแปลผลออกมาเป็นค่า $k_L a$ (s^{-1}) ในตารางที่ จ-9 ถึง
จ-12

ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด C ที่ $Q_L = 0.025$ L/min



รูปที่ 4.16 การดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อ
นาที

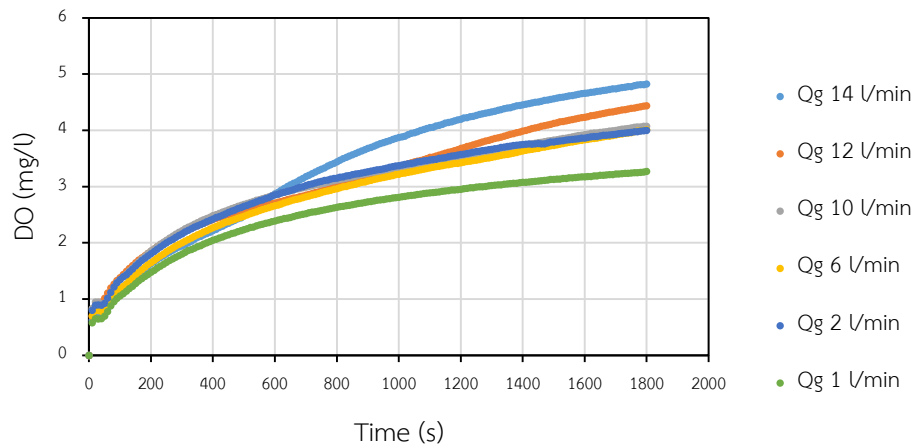
ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด C ที่ $Q_l = 0.05$ l/min



รูปที่ 4.17 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อ

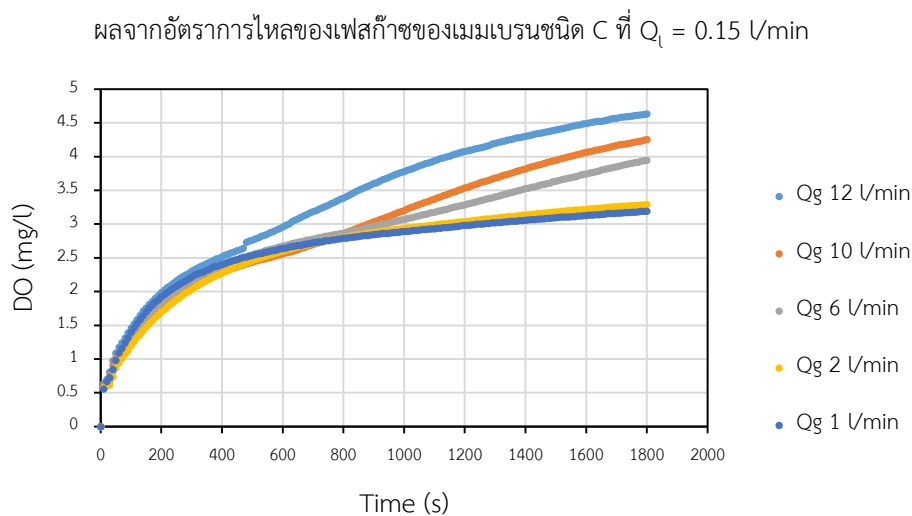
นาที

ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด C ที่ $Q_l = 0.1$ l/min



รูปที่ 4.18 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อ

นาที

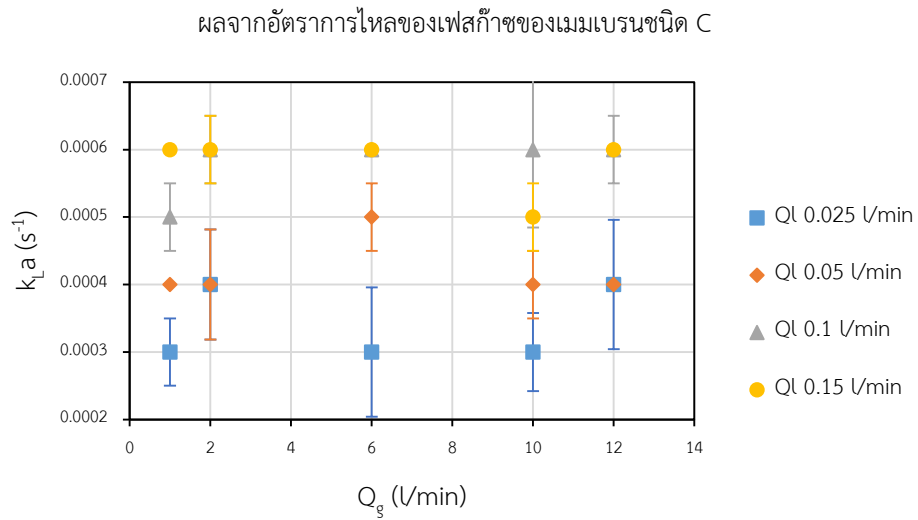


รูปที่ 4.19 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที

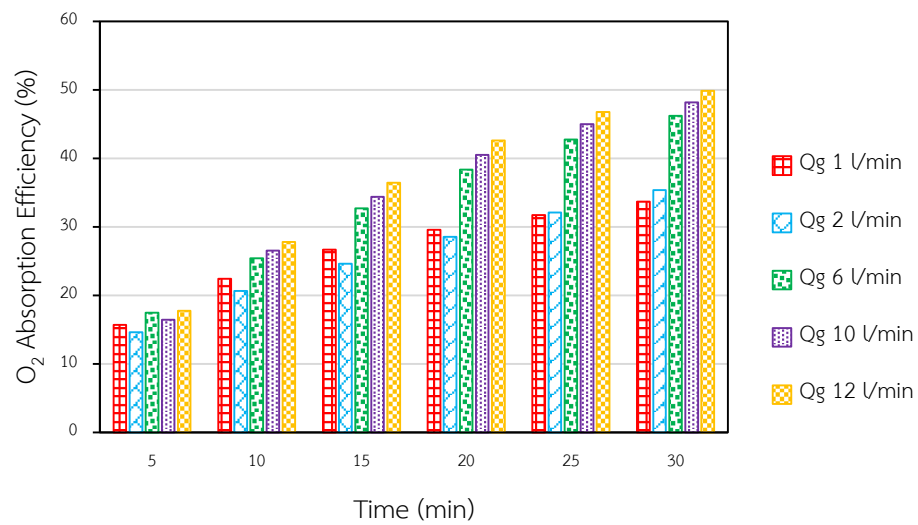
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C สามารถสรุปได้ว่า

1. จากตารางที่ จ-9 ถึง จ-12 ที่สรุปออกมาในรูปแบบของกราฟแสดงอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อค่า $k_L a$ พร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 4.20 พบว่า ค่า $k_L a$ มีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซจาก 1 ลิตรต่อนาที ถึง 12 ลิตรต่อนาที ที่ทุกอัตราการไหลของเฟสของเหลว (0.025 ลิตรต่อนาที ถึง 0.15 ลิตรต่อนาที)

2. ที่เวลามากขึ้น อัตราการไหลของเฟสก๊าซต่ำ (1 และ 2 ลิตรต่อนาที) ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่ออัตราการไหลของเฟสก๊าซสูง (6 ถึง 12 ลิตรต่อนาที) มีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.20 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด C

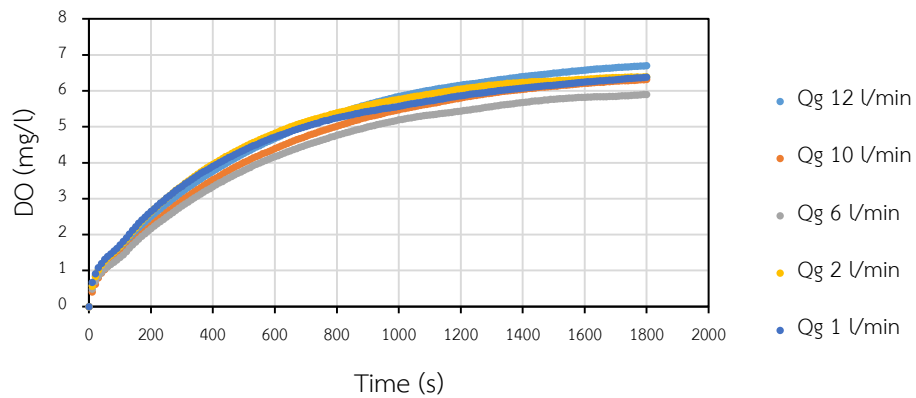


รูปที่ 4.21 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C

4.2.4 ผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซ โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสติก (PVDF-PAM)

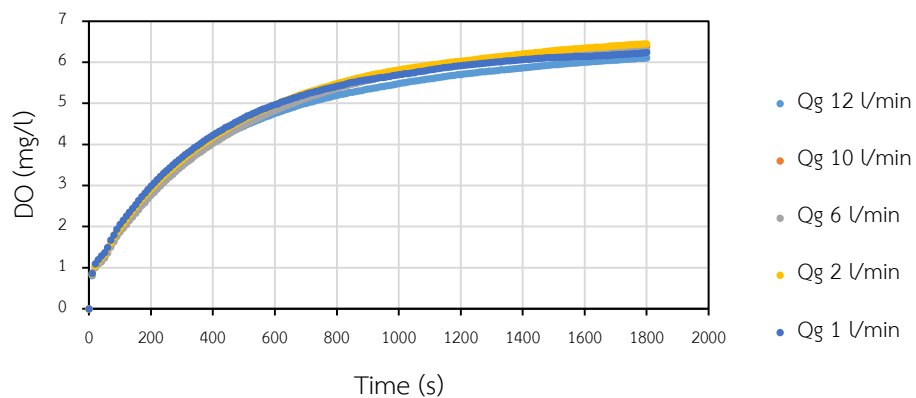
ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที ได้ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 และแปลผลออกมาเป็นค่า k_{La} (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-13 และ จ-14

ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A ถูกปรับสภาพ ที่ $Q_L = 0.05$ l/min



รูปที่ 4.22 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพ ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที

ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A ถูกปรับสภาพ ที่ $Q_L = 0.1$ l/min

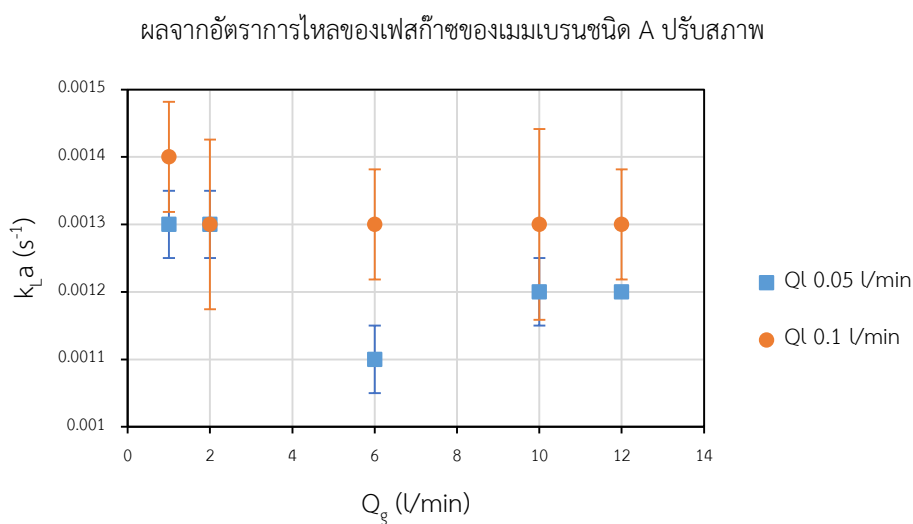


รูปที่ 4.23 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพ ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

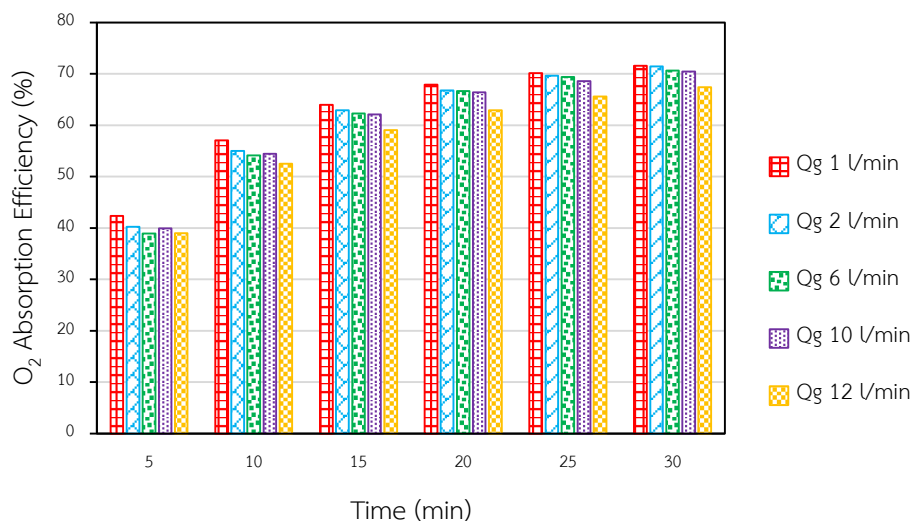
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของเฟสก๊าซต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) สามารถสรุปได้ว่า

1. จากตารางที่ จ-13 และ จ-14 ที่สรุปออกมาในรูปแบบของกราฟแสดงอัตราการไหลของเฟส ก๊าซต่อค่า k_{La} พร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปแบบที่ 4.24 พบว่า ค่า k_{La} มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซจาก 1 ลิตรต่อนาที ถึง 12 ลิตรต่อนาที ที่ทุกอัตราการไหลของเฟสของเหลว (0.05 ลิตรต่อนาที และ 0.1 ลิตรต่อนาที)

2. การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสก๊าซมีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.25 ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.24 ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสติก (PVDF-PAM)



รูปที่ 4.25 ผลจากอัตราการไหลของพลาสมาต่อประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)

4.3 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

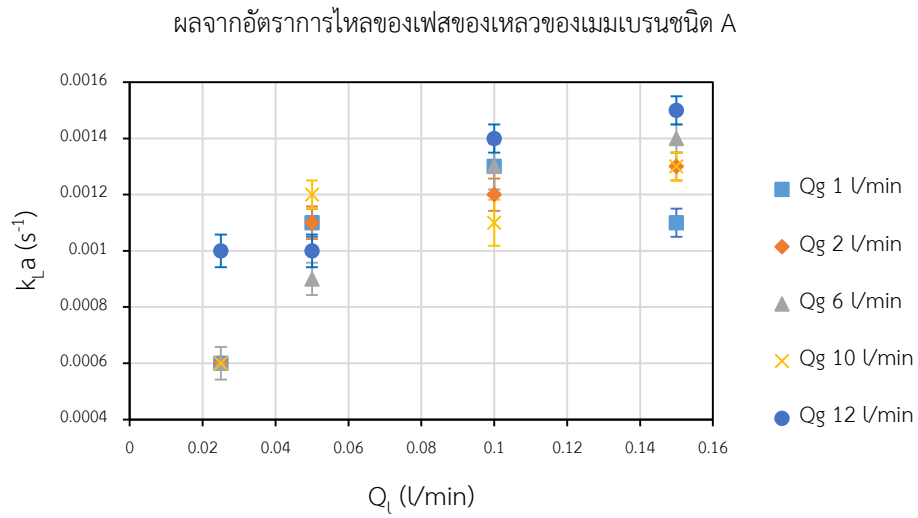
ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว จะทำการเพิ่มอัตราการไหลของเฟสของเหลวจาก 0.025 ถึง 1.5 ลิตรต่อนาที โดยทดลองที่อัตราการไหลของพลาสมาแตกต่างกัน การศึกษาในส่วนนี้จะแบ่งย่อยออกเป็น 4 ส่วนตามชนิดของเมมเบรนที่นำมาทดลอง ดังนี้

4.3.1 ผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด A

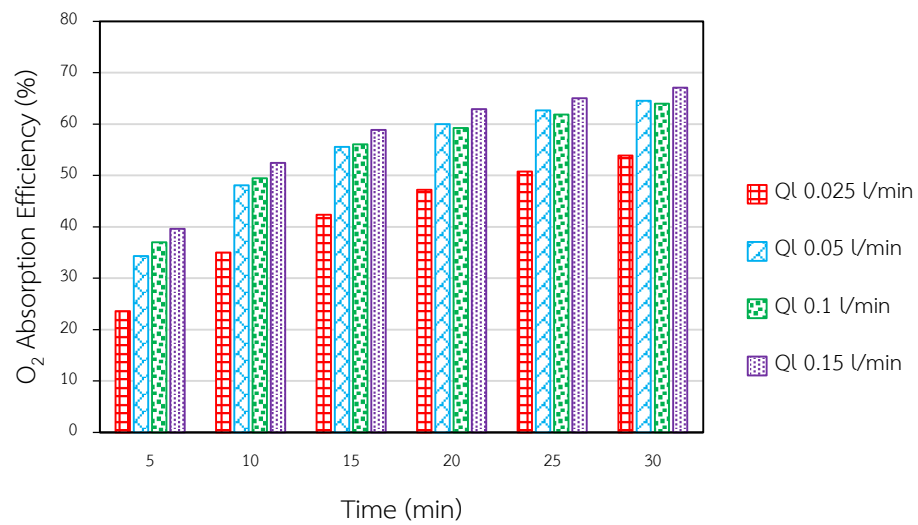
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A สามารถสรุปได้ว่า

1. ที่อัตราการไหลของพลาสมา 1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ได้ผล k_{La} (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-15 ถึง จ-19 ซึ่งสามารถสรุปเป็นกราฟพร้อมแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ดังรูปที่ 4.26 พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสของเหลวส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า k_{La} (ประมาณ 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์) ในการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจน

2. ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลวในช่วง 0.05 ถึง 0.15 ลิตรต่อนาที การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสของเหลวมีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ที่อัตราการไหลของพลาสมา 2 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.26 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวของเมมเบรนชนิด A



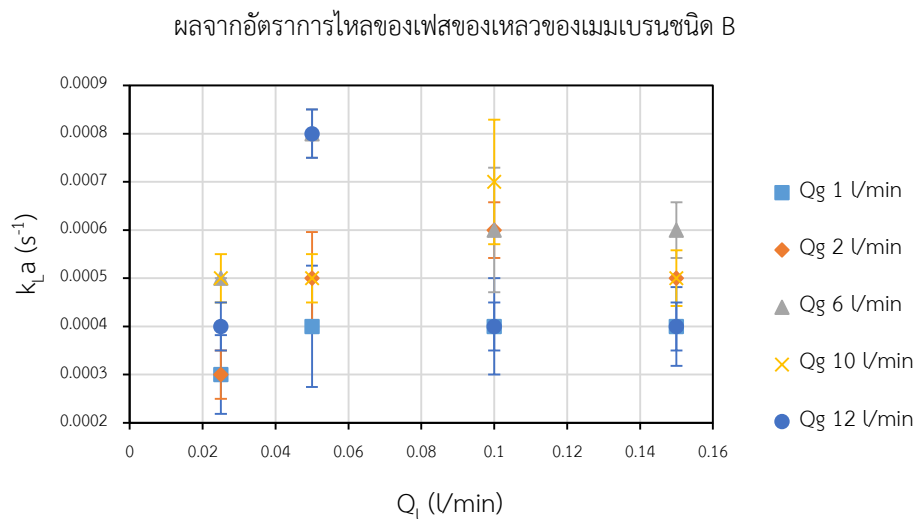
รูปที่ 4.27 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อประสิทธิภาพการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A

4.3.2 ผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด B

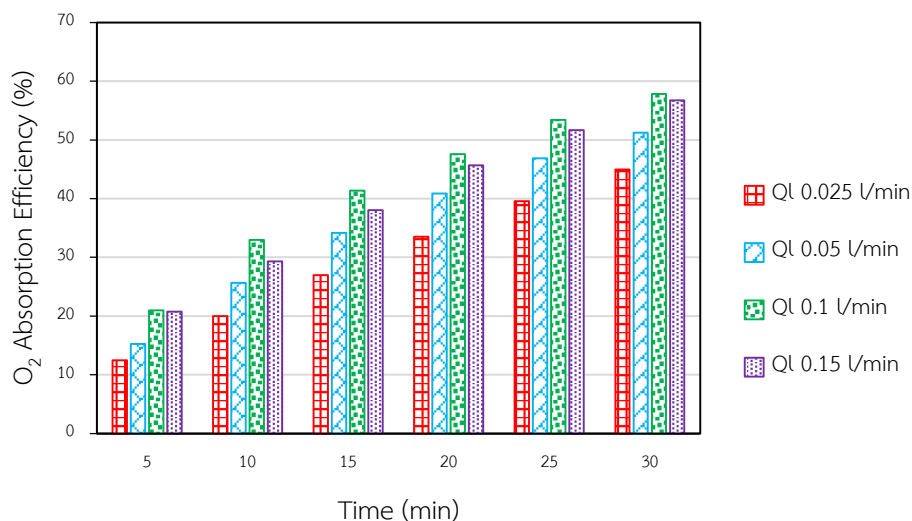
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อการดูดซึ่มก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B สามารถสรุปได้ว่า

1. ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ได้ผล k_{La} (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-20 ถึง จ-24 ซึ่งสามารถสรุปเป็นกราฟพร้อมแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ดังรูปที่ 4.28 พบว่า เมื่อใช้เมมเบรนชนิด B การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสของเหลวจาก 0.025 ถึง 0.15 ลิตรต่อนาที ค่า k_{La} ในการดูดซึมก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มที่จะคงที่

2. การเพิ่มอัตราการไหลเฟสของเหลวจากต่ำไปสูง (0.025 ถึง 0.1 ลิตรต่อนาที) มีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลเฟสของเหลวเท่ากับ 0.15 ลิตรต่อนาที ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.28 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวของเมมเบรนชนิด B



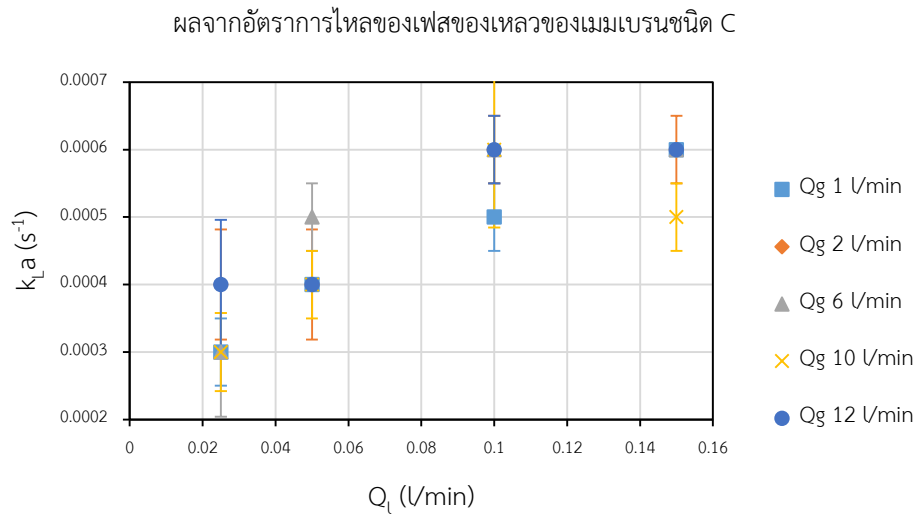
รูปที่ 4.29 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B

4.3.3 ผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด C

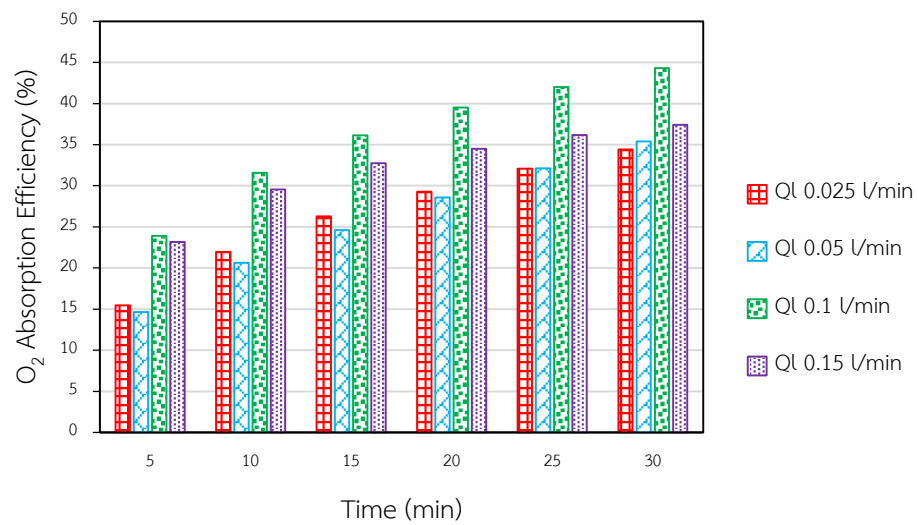
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C สามารถสรุปได้ว่า

1. ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ได้ผล $k_L a$ (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-25 ถึง จ-29 ซึ่งสามารถสรุปเป็นกราฟพร้อมแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ดังรูปที่ 4.28 พบว่า เมื่อใช้เมมเบรนชนิด C การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสของเหลวส่งผลต่อการเพิ่มขึ้น (ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์) ของค่า $k_L a$ ในการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

2. ที่อัตราการไหลเฟสของเหลวจากต่ำ (0.025 และ 0.5 ลิตรต่อนาที) ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเฟสของเหลวให้มากขึ้นไปอีก (0.1 ลิตรต่อนาที) ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อเพิ่มอัตราไหลของเฟสของเหลวไปที่ 0.15 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.30 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวของเมมเบรนชนิด C



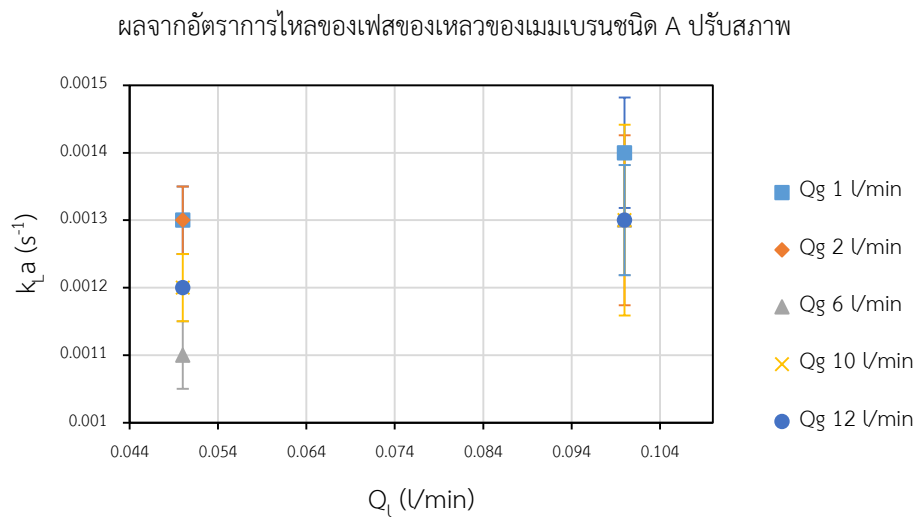
รูปที่ 4.31 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C

4.3.4 ผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลว โดยใช้เส้นใยเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)

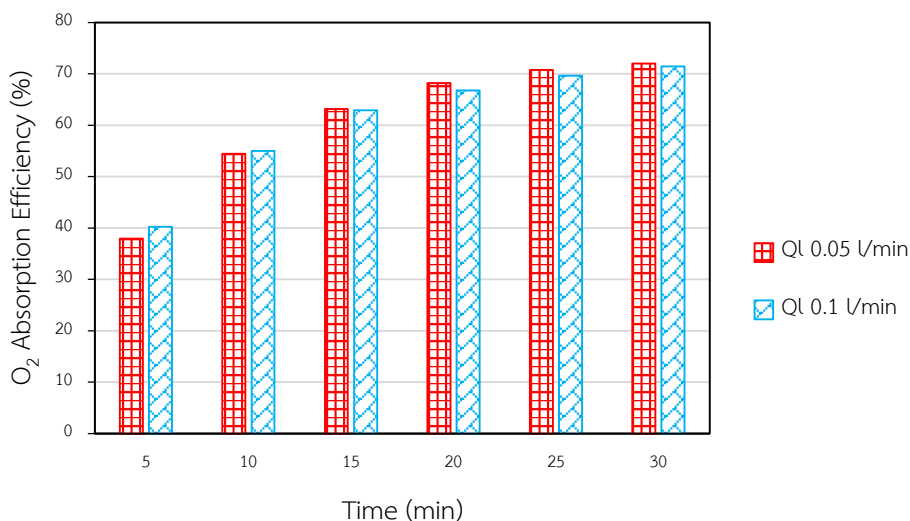
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) สามารถสรุปได้ว่า

1. ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 2 6 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ลิตรต่อนาที ได้ผล k_{La} (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-30 ถึง จ-34 สามารถสรุปเป็นกราฟพร้อมแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ดังรูปที่ 4.32 พบว่า เมื่อใช้เมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM) การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสของเหลวส่งผลต่อการเพิ่มขึ้น (ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์) ต่อค่า k_{La} ในการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

2. การเพิ่มอัตราการไหลเฟสของเหลวแทบไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.33 ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.32 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)



รูปที่ 4.33 ผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)

จากผลการทดลองที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที พบว่า เมมเบรนชนิด A มีประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุด หรือให้ค่า k_{La} สูงที่สุด ส่วนเมมเบรนชนิด B และ C มีค่า k_{La} ที่ใกล้เคียงกัน แต่แนวโน้มของค่า k_{La} ในช่วงอัตราไหลเฟสก๊าซสูง (6 ถึง 14 ลิตรต่อนาที) เมมเบรนชนิด B มีแนวโน้มที่ค่า k_{La} จะมากกว่าค่า k_{La} จากเมมเบรนชนิด C ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และเมื่อเปรียบเทียบค่า k_{La} ระหว่างเมมเบรนชนิด A B และ C จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในระบบเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า k_{La} เพิ่มขึ้นตาม แต่จากการทดลองพบว่าเพิ่มขึ้นในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลจากงานวิจัยของ Wang R. et al. (2005) ที่ได้อธิบายว่า เฟสของเหลวน่าจะเป็นเฟสที่ควบคุมกลไกการถ่ายเทมวลรวมสำหรับเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้

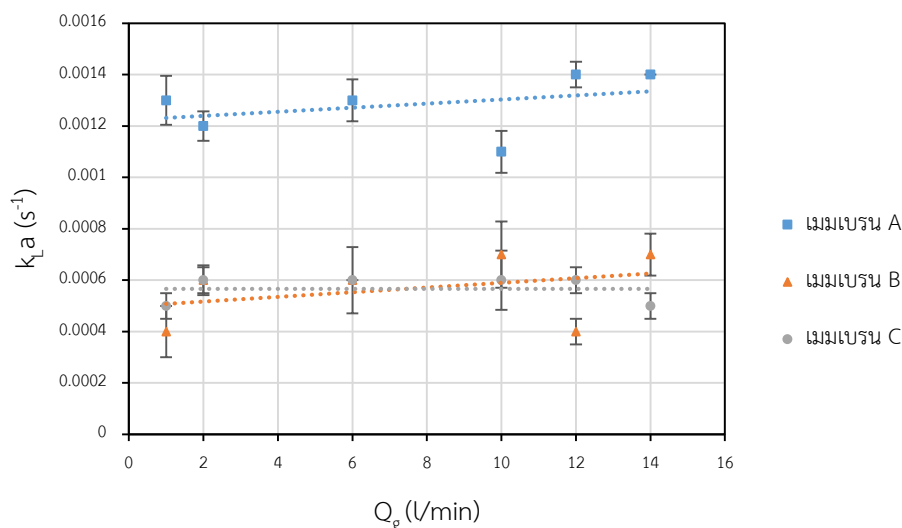
จากรูปที่ 4.35 ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที จะเห็นได้ว่า ค่า k_{La} ของเมมเบรนชนิด A ยังคงสูงกว่าค่า k_{La} ที่ได้จากเมมเบรนชนิด B และ C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับเมมเบรนชนิด A จะเห็นได้ชัดว่า การเพิ่มอัตราการไหลเฟสของเหลวส่งผลต่อค่า k_{La} ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการ Graetz-Lévéque ที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 2.6.4 ก่อนหน้านี้แล้ว ดังนี้

$$Sh = \frac{k_L d_i}{D_{iL}} = 1.62 \cdot \sqrt[3]{\frac{d_i^2 \cdot v_L}{L \cdot D_{iL}}}$$

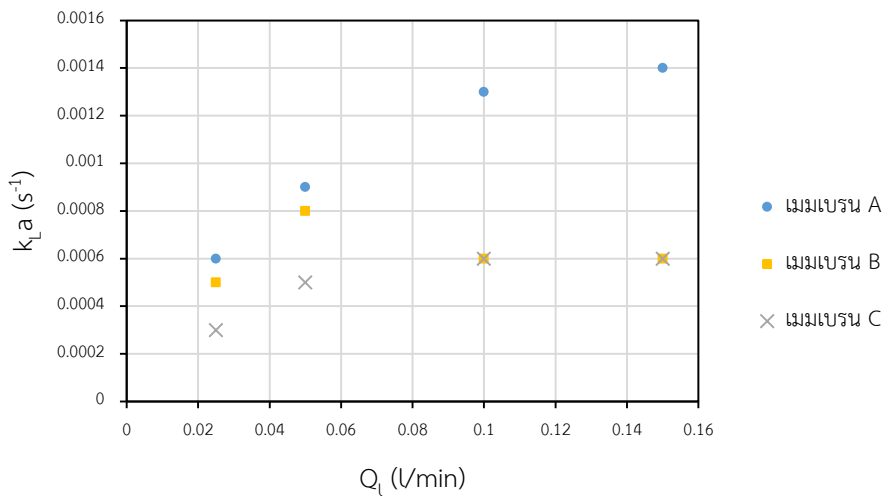
จะเห็นได้ว่า ค่า k_L จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของเฟสของเหลวเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม สำหรับเมมเบรนชนิด B และ C ที่การเพิ่มความเร็วเฟสของเหลวแต่ค่า k_{La} ยังคงคงที่ น่าจะเกิดจาก ขนาดรูพรุนที่เล็กทำให้จำกัดการสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวภายในเส้นเมมเบรน

เนื่องจาก เมมเบรนชนิด B และ C ให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งเมมเบรนชนิด B มีราคา 250 บาท แต่เมมเบรนชนิด C มีราคาสูงถึง 1800 บาท ดังนั้น เมมเบรนชนิด C จึงไม่มีความคุ้มค่าที่จะถูกใช้ในการทดลองส่วนต่อไป

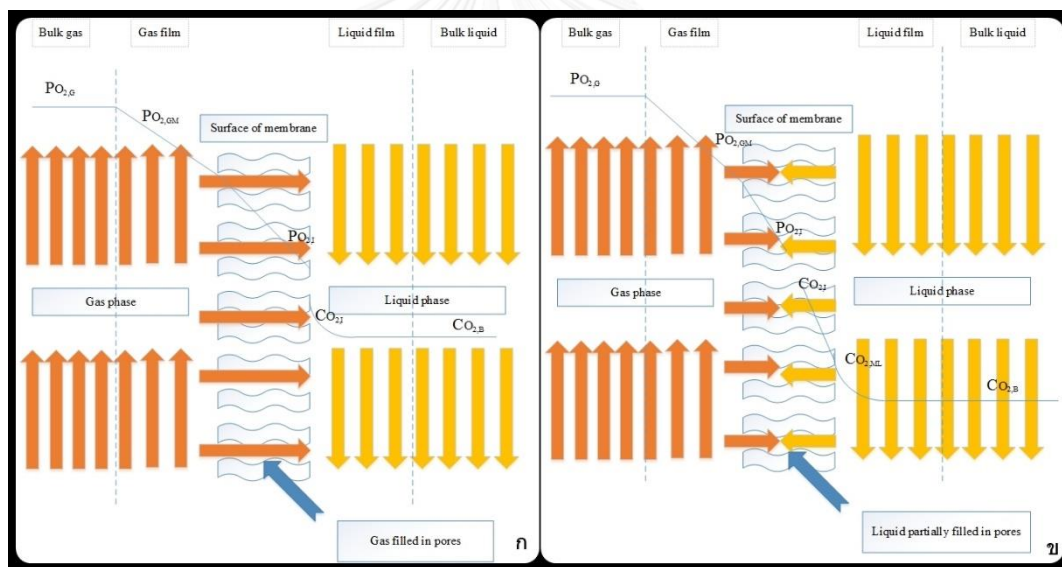
จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 จะเห็นได้ว่า ค่า k_{La} ของเมมเบรนชนิด A สูงกว่าเมมเบรนชนิด B ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าแปลกใจ เนื่องจากเมมเบรนชนิด B ควรจะถูกเดินระบบในสภาวะแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.36(ก) ดังนั้น สิ่งที่น่าจะเกิดขึ้นคือ น่าจะเกิดการเปียกบางส่วนในเมมเบรนชนิด B ดังแสดงในรูปที่ 4.36(ข) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนลดลง



รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลเฟสก๊าซต่อค่า k_{La}



รูปที่ 4.35 ผลการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลเฟสของเหลวต่อค่า $k_L a$



รูปที่ 4.36 การถ่ายเทมวลสำหรับ (ก) การเดินระบบแบบแห้ง (ข) การเดินระบบแบบเปียกบางส่วน

นอกจากนี้ ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที ในรูปที่ 4.35 ทั้งเมมเบรนชนิด A และ B ยังให้ค่า $k_L a$ ที่ไม่แตกต่างจากค่า $k_L a$ ที่ได้จากอัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาทีมากนัก จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องสิ้นเปลืองค่าไฟในการเพิ่มอัตราการไหลของเฟสของเหลวให้สูงขึ้น การทดลองในส่วนต่อไปจึงใช้อัตราการไหลของเฟสของเหลวที่ 0.1 ลิตรต่อนาที และทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของเฟสก๊าซตั้งแต่ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของจำนวนเส้นเมมเบรนที่ถูกบรรจุอยู่ในโมดูล

4.4 ผลการศึกษาผลกระทบของจำนวนเส้นเมมเบรนที่ถูกบรรจุภายในโมดูล ที่มีผลต่อประสิทธิภาพ และอัตราการดูดซึมก๊าซออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

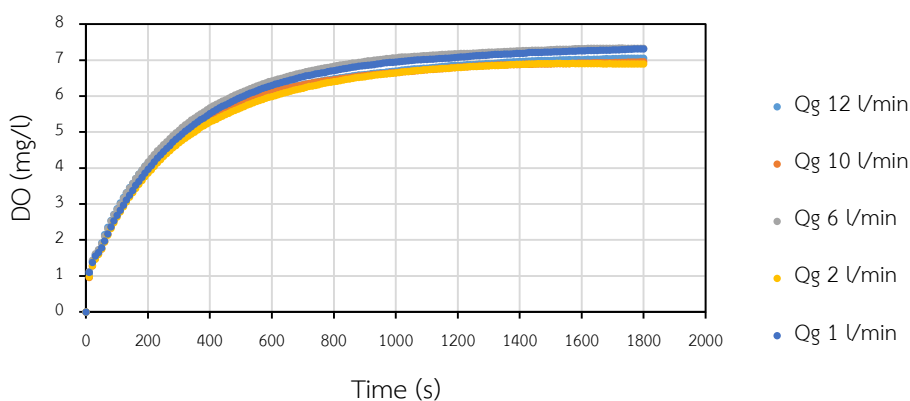
จากผลการทดลองที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า เมมเบรนชนิด A และ B มีแนวโน้มที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้น การทดลองในส่วนนี้จึงนำเมมเบรนทั้งสองชนิดข้างต้นมาเพิ่มจำนวนเป็น 10 และ 20 เส้นตามลำดับ โดยใช้อัตราการไหลของเฟสของเหลวคงที่ที่ 0.1 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนอัตราการไหลของเฟสก๊าซตั้งแต่ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

4.4.1 ผลของการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A

ในการบรรจุจำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 10 เส้น และ 20 เส้น ภายในโมดูล ได้ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ และแปลผลออกมาเป็นค่า $k_L a$ (s^{-1}) ในตารางที่ จ-35 และ จ-36 พบว่า การเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนในโมดูลจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งได้ว่า ที่เวลาเท่ากัน การมีจำนวนเส้นเมมเบรนมากกว่าจะทำให้ระบบสามารถรับโหลดได้สูงขึ้น และทำให้ระบบเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้เร็วยิ่งขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.39 ที่อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

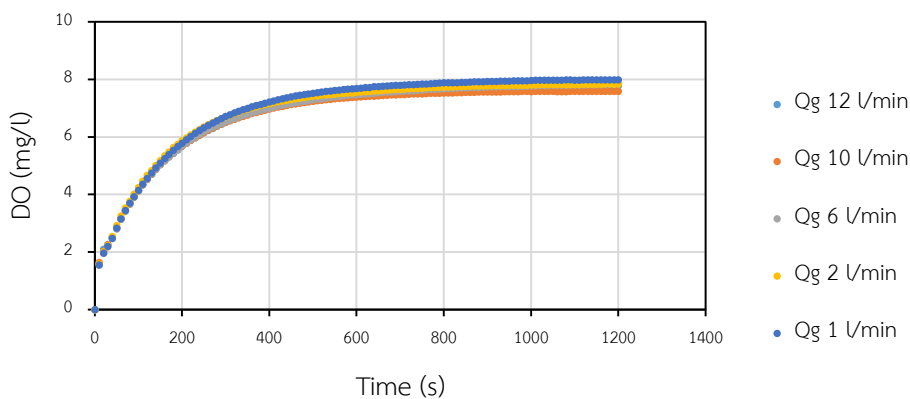
ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A 10 เส้น

ที่ $Q_L = 0.1$ l/min

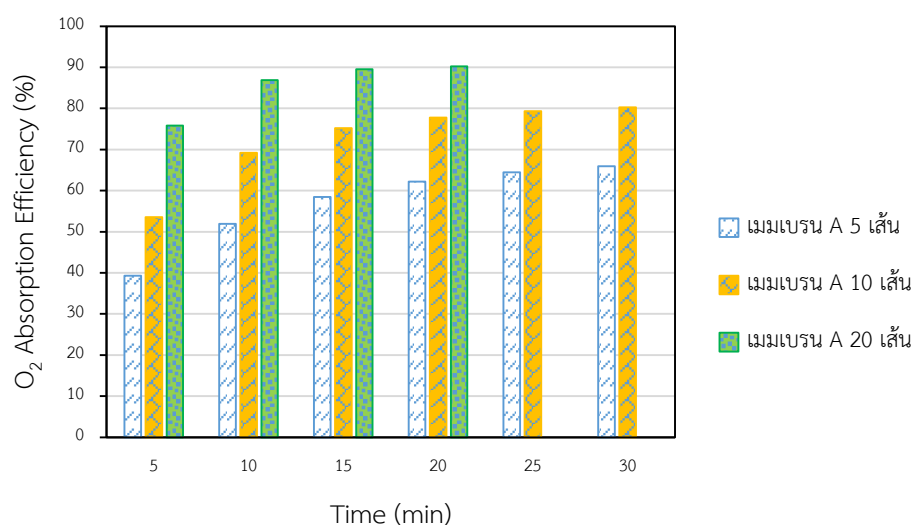


รูปที่ 4.37 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

ผลจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซของเมมเบรนชนิด A 20 เส้น
ที่ $Q_l = 0.1 \text{ l/min}$



รูปที่ 4.38 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟส
ของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

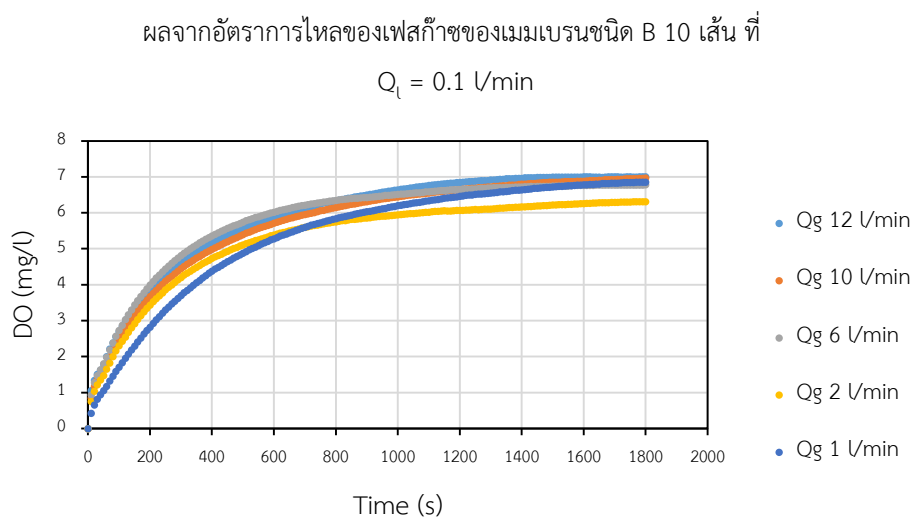


รูปที่ 4.39 ผลของจำนวนเส้นเมมเบรน A ต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

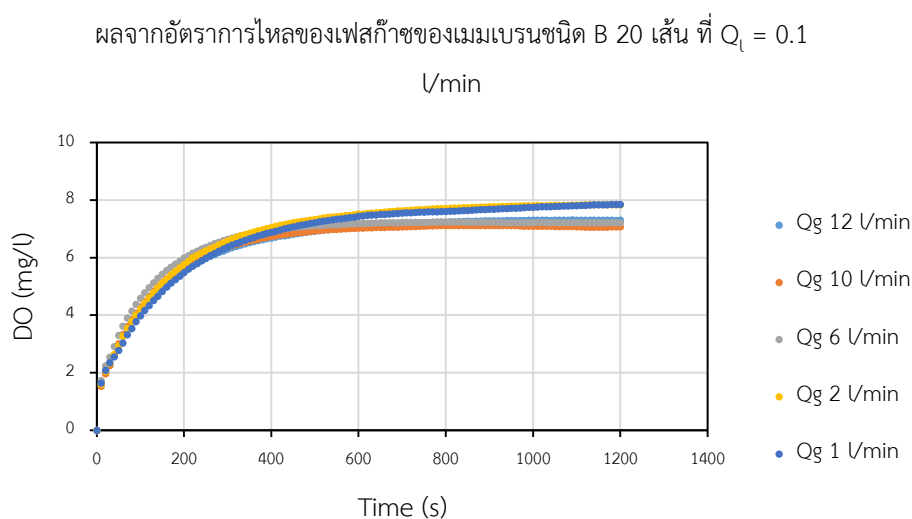
4.4.2 ผลของการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนชนิด B

ในการบรรจุจำนวนเส้นเมมเบรนชนิด B 10 และ 20 เส้น ภายในโมดูล ได้ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.40 และ 4.41 ตามลำดับ และแปลผลออกมาเป็นค่า $k_L a$ (s^{-1}) ในตารางที่ จ-37 และ จ-38 พบว่า การเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนชนิด B จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซึม

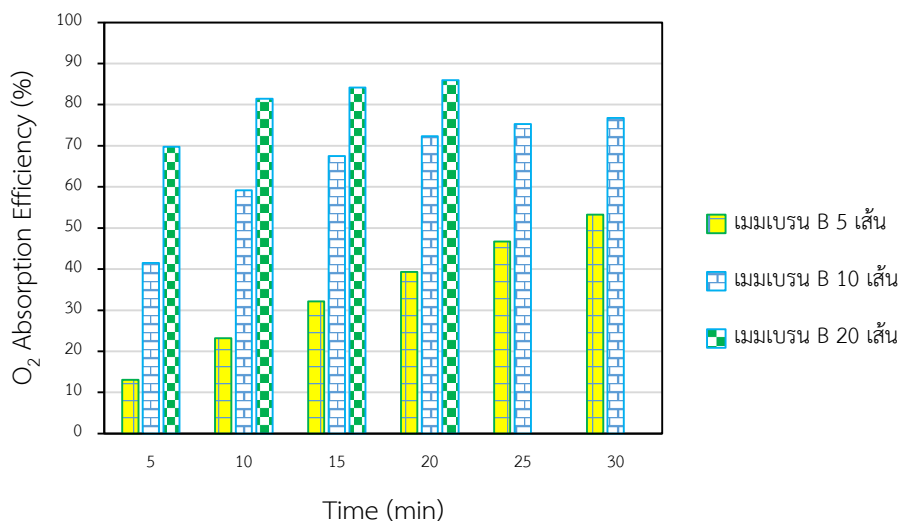
ก๊าซออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นและเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้เร็วขึ้น ซึ่งได้แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.42 ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.40 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.41 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

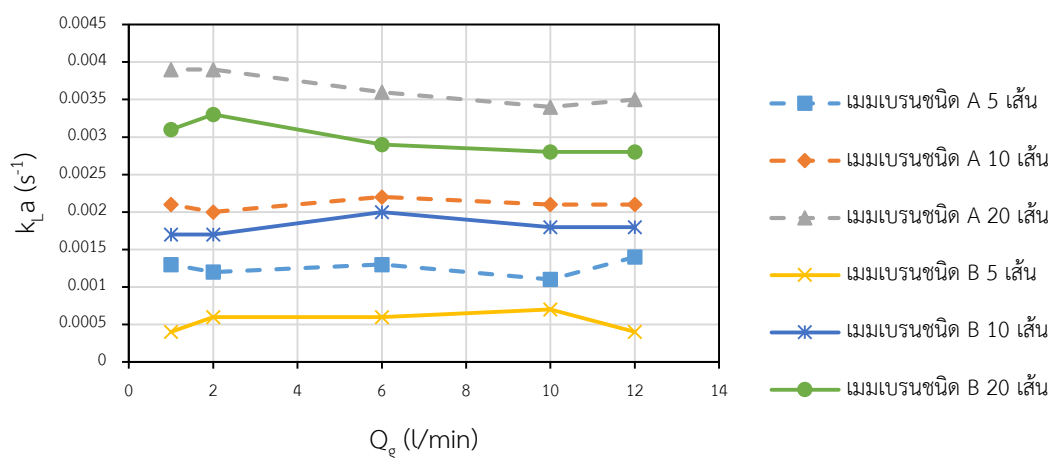


รูปที่ 4.42 ผลของจำนวนเส้นเมมเบรน B ต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

4.4.3 ผลของการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนทั้งสองชนิด

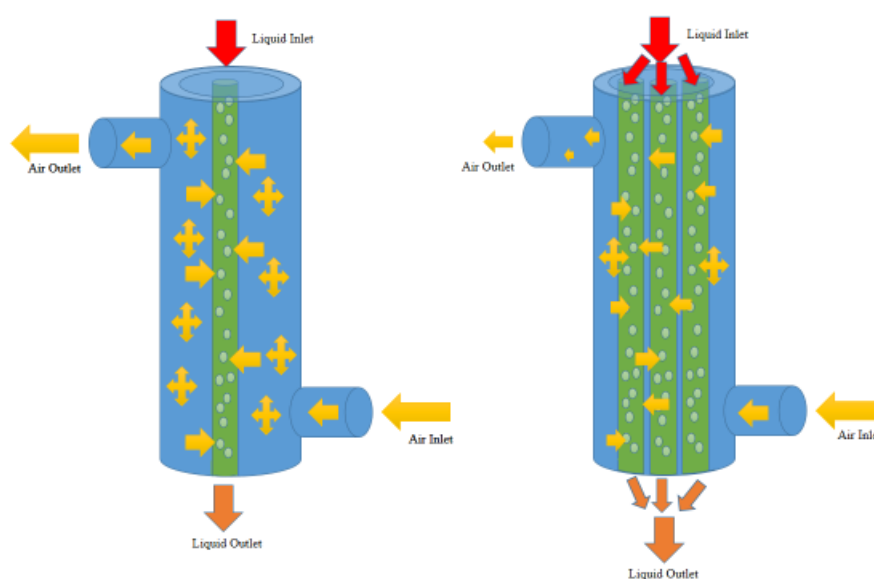
จากผลการทดลองการเพิ่มจำนวนเมมเบรนชนิด A และ B สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.43 พบว่า การเพิ่มจำนวนเมมเบรนชนิด A จาก 5 เป็น 10 และ 20 เส้น ตามลำดับ มีค่า k_La เพิ่มขึ้น 61 และ 175 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มจำนวนเมมเบรนชนิด B จาก 5 เป็น 10 และ 20 เส้น ตามลำดับ มีค่า k_La เพิ่มขึ้น 260 และ 460 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เปรียบเทียบจำนวนเส้นเมมเบรนต่อค่า k_La



รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบผลของจำนวนเส้นเมมเบรนต่อค่า k_La

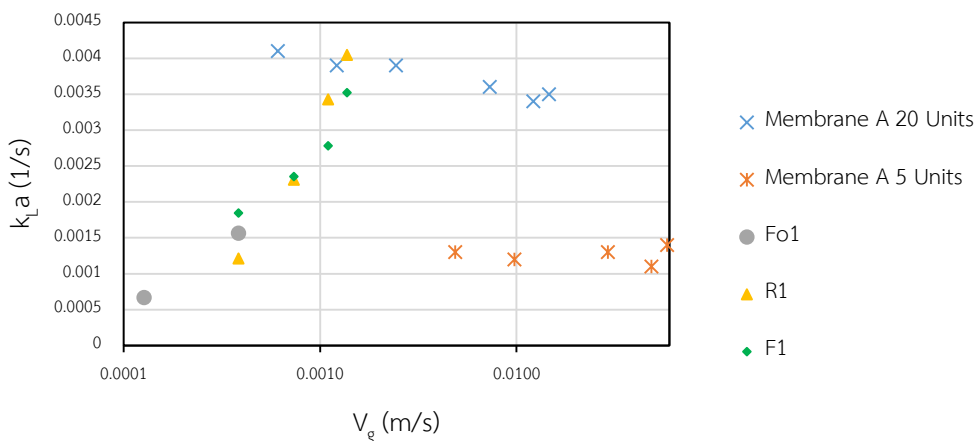
จากผลการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด สามารถสรุปได้ว่า ค่า k_La เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเส้นเมมเบรนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.44 กล่าวคือ การเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนในโมดูลจะทำให้เส้นเมมเบรนมีระเบียบและส่งผลทำให้ระบบการไหลทั้งเฟสของเหลวและเฟสก๊าซไร้ความเป็นอิสระมากขึ้น (Wu J. et al. 2000) นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนยังทำให้เฟสของเหลวที่เวลาใด ๆ มีปริมาณมากขึ้น และเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสาร ทำให้เฟสของเหลวมีโอกาสในการสัมผัสกับเฟสก๊าซเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.44 อธิบายการกระจายของก๊าซและของเหลวในการเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรน

4.4.4 ผลการเปรียบเทียบค่า k_La ระหว่างการใช้เมมเบรนคอนแทคเตอร์กับหอดูดซึมแบบพองอากาศ

เมื่อนำผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (k_La) ของก๊าซออกซิเจนในระบบหอดูดซึมแบบพองอากาศจากงานวิจัยของ Sastaravet P. et al. (2014) มาเปรียบเทียบกับ การใช้ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์ ได้ผลดังรูปที่ 4.45 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วของเฟสก๊าซต่ำ ค่า k_La ของเมมเบรนชนิด A จะมีค่าสูงกว่าระบบหอดูดซึมแบบพองอากาศ ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าพอใจ เนื่องจากสามารถประหยัดค่าไฟในการเติมก๊าซออกซิเจนได้

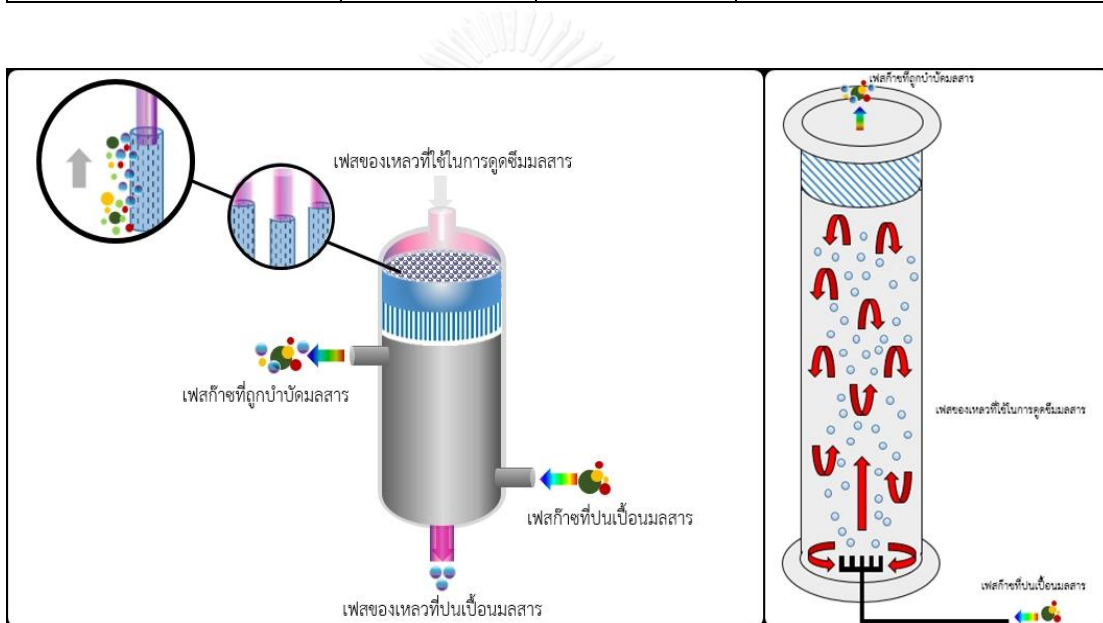


รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบค่า k_{La} ระหว่างเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบฟองอากาศในงานวิจัยของ Sastaravet P. et al. (2014)

เมื่อนำผลการทดลองการหาประสิทธิภาพการดูดซึม (k_{La}) ก๊าซออกซิเจนในระบบหอดูดซึมแบบฟองอากาศจากงานวิจัยของดาวัน เจริญพิทยา (2556) มาเปรียบเทียบกับการใช้ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์ ได้ผลดังรูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วของเฟสก๊าซต่ำ ค่า k_{La} ของระบบหอดูดซึมแบบฟองอากาศจะมีค่าสูงกว่าเมมเบรนชนิด A แต่อย่างไรก็ตาม หอดูดซึมแบบฟองอากาศที่นำมาเปรียบเทียบมีพื้นที่หน้าตัดสูงถึง 0.36 ตารางเมตร แต่เมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ถูกบรรจุอยู่ในโมดูลขนาดหน้าตัด 0.00785 ตารางเมตร ซึ่งมีค่าแตกต่างกันมาก ดังนั้น ถ้าเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนลงไปในคอลัมน์หรือขยายสัดส่วนจำนวนเส้นเมมเบรนต่อพื้นที่หน้าตัดคอลัมน์น่าจะสามารถทำให้ค่า k_{La} ใกล้เคียงกับหอดูดซึมแบบฟองอากาศได้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่า k_{La} ของระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบฟองอากาศ

ระบบ	พื้นที่หน้าตัด ของระบบ (m^2)	ค่า k_{La} (s^{-1}) ที่ V_g 0.001 m/s	พื้นที่หน้าตัดของระบบ (m^2) ถ้าต้องการค่า k_{La} (s^{-1}) 0.0041
เมมเบรนคอนแทคเตอร์	0.0000785	0.0041	0.0000785
หอดูดซึมแบบฟองอากาศ (ประจักษ์ ศาสตร์เวช) R1	0.0019625	0.0034	0.1025
หอดูดซึมแบบฟองอากาศ (ดาวัน เจริญพิทยา) (MD)	0.36	0.007	18.80254777



รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบกลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบฟองอากาศ

เนื่องจากเมมเบรนชนิด B ที่จำนวนเส้นเมมเบรน 20 เส้น ยังคงมีค่า k_{La} น้อยกว่าจากเมมเบรนชนิด A ดังนั้น เมมเบรนชนิด B จึงไม่ถูกใช้ในการทดลองช่วงต่อไป การทดลองในช่วงต่อไปจึงใช้เมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของเฟสก๊าซที่ 1 ลิตรต่อนาที เนื่องจากอัตราการไหลของเฟสก๊าซช่วงนี้ให้ค่า k_{La} ที่สูงกว่าค่า k_{La} จากอัตราการไหลของเฟสก๊าซที่ 2 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

4.5 ผลการศึกษาผลกระทบของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึมก๊าซ ออกซิเจนที่สภาวะต่างๆ

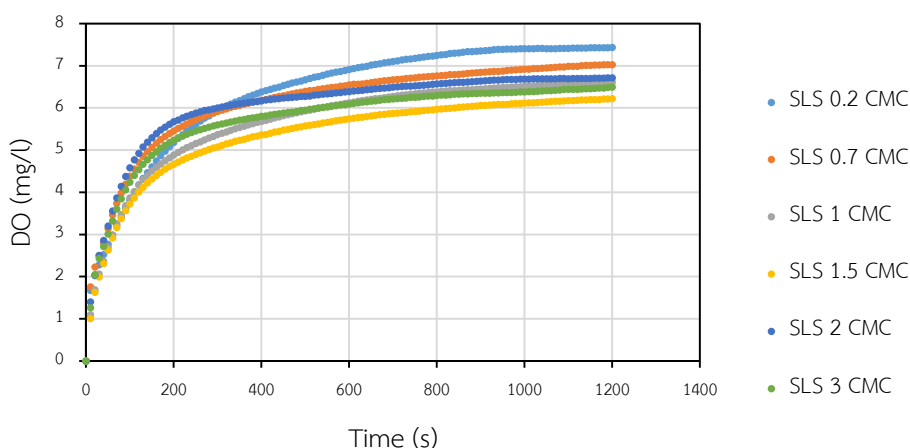
ในการเดินระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์ในสภาวะความเป็นจริงนั้น เฟสของเหลวที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซอาจปนเปื้อนด้วยสารลดแรงตึงผิวหรือมีความขุ่นผสมอยู่ ดังนั้น ในการทดลองส่วนนี้จึงสังเคราะห์เฟสของเหลวเป็นสารละลายปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวทั้งชนิดประจุลบ ไม่มีประจุ และประจุบวก ตลอดจนเติมความขุ่นจากดินขาว (เคโอลิน) ลงไป เพื่อศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงการดูดซึมก๊าซออกซิเจนและค่า k_La ดังนี้

4.5.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุลบต่อเมมเบรนชนิด A

ใช้โซเดียมลอริลซัลเฟตเป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ

ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่ออนาที และเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่ออนาที โดยใช้จำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 20 เส้น ได้ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจนดังรูปที่ 4.48 และแปลผลออกมาเป็นค่า k_La (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-39 พบว่า เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบจะทำให้ค่าการละลายน้ำของออกซิเจนสูงสุดลดลง และจะอยู่ในช่วงที่คงที่เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากกว่า 1 CMC

ผลจากสารลดแรงตึงผิวประจุลบต่อเมมเบรนชนิด A 20 เส้น



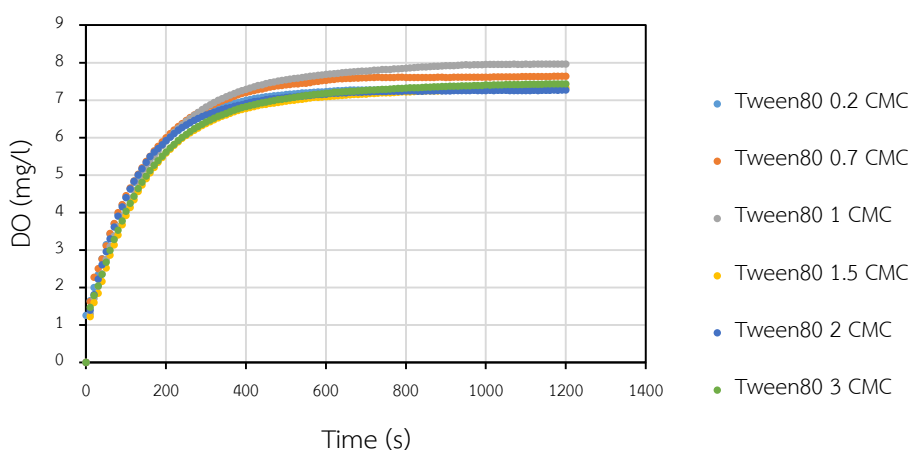
รูปที่ 4.48 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อเฟสของเหลวปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวประจุลบ

4.5.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุต่อเมมเบรนชนิด A

ใช้ทวิน 80 เป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ

ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที และเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที โดยใช้จำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 20 เส้น ได้ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจนดังรูปที่ 4.49 และแปลผลออกมาเป็นค่า $k_L a$ (s^{-1}) (ตารางที่ จ-40) พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุในปริมาณเล็กน้อยถึงมาก (0.2 ถึง 3 CMC) ส่งผลให้ค่าการละลายน้ำสูงสุดแทบไม่เปลี่ยนแปลง (7.2 ถึง 8 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ผลจากสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุต่อเมมเบรนชนิด A 20 เส้น



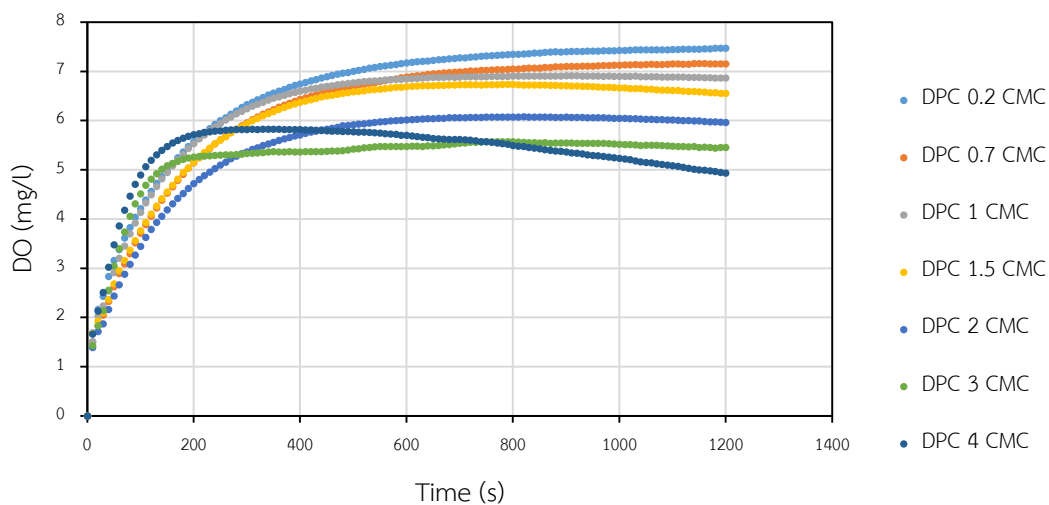
รูปที่ 4.49 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อเฟสของเหลวปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ

4.5.3 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกต่อเมมเบรนชนิด A

ใช้โดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์เป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที และเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที โดยใช้จำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 20 เส้น ได้ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจนดังรูปที่ 4.50 ที่แปลผลออกมาเป็นค่า $k_L a$ (s^{-1}) (ตารางที่ จ-41) พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวประจุบวกทำให้ค่าการละลายน้ำสูงสุดของก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 0.2 ถึง 3 CMC และจะทำให้ค่าการละลายน้ำสูงสุดอยู่ในช่วง 5 ถึง 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลจากสารลดแรงตึงผิวประจุบวกต่อเมมเบรนชนิด A 20 เส้น

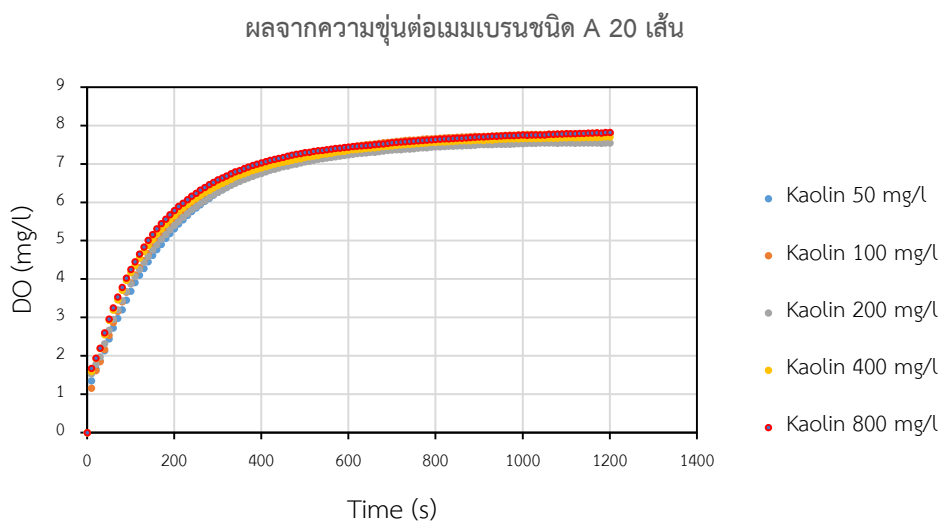


รูปที่ 4.50 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อเฟสของเหลวปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

4.5.4 ผลของความชุ่มต่อเมมเบรนชนิด A

ใช้เคโอลินเป็นตัวแทนของความชุ่ม

ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที และเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที โดยใช้จำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 20 เส้น ได้ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจนดังรูปที่ 4.51 และแปลผลออกมาเป็นค่า k_{La} (s^{-1}) (ตารางที่ จ-42) พบว่า ค่าการละลายน้ำสูงสุดของออกซิเจนไม่มีความเปลี่ยนแปลง แสดงว่าความชุ่มไม่มีผลในการทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนละลายน้ำลดลง



รูปที่ 4.51 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อเฟสของเหลวปั่นเป็นความขุ่น

4.5.5 ผลของเฟสของเหลวต่อเมมเบรนชนิด A ในรูปของค่า α

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า k_{La} ของเฟสของเหลวที่ปั่นเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆหรือความขุ่นเทียบกับ k_{La} จากน้ำประปา ในรูปของค่าคงที่ไร้หน่วย (α) จากสมการ

$$\alpha = \frac{k_{La \text{ ของเหลวที่ศึกษา}}}{k_{La \text{ น้ำ}}}$$

และได้ผลออกมาดังรูปที่ 4.52 และ 4.53 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

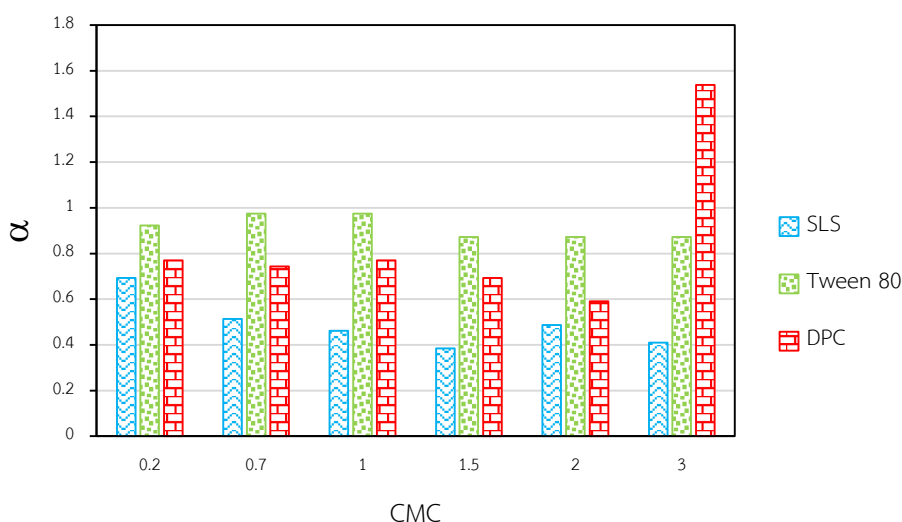
สำหรับการเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (โซเดียมลอริลซัลเฟต) จะทำให้ค่า k_{La} ลดลงจนมีแนวโน้มคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากกว่า 1 CMC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vasconcelos J.M.T. et al. (2003) ที่กล่าวว่า เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากกว่า 1 CMC แล้ว การเติมสารลดแรงตึงผิวจะไปเพิ่มจำนวนไมเซลล์เหนือสารละลายแทน ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายไม่เปลี่ยนแปลง

สำหรับการเติมสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ (ทวิน 80) มีผลทำให้ค่า k_{La} แทบจะคงที่ (ลดลงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเทียบกับการเดินระบบสถานะเดียวกันโดยใช้น้ำประปา แต่เมื่อความเข้มข้นของทวิน 80 มีค่ามากกว่า 1 CMC จะทำให้ค่า k_{La} ลดลง 15 เปอร์เซ็นต์

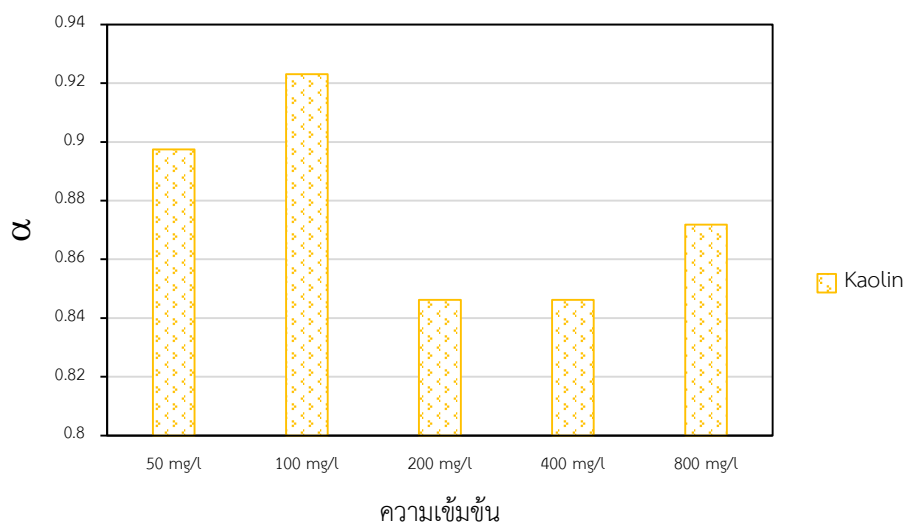
สำหรับการเติมสารลดแรงตึงผิวประจุบวก (โดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์) ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 CMC มีผลทำให้ค่า k_{La} ลดลงประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ และจะลดลงสูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไปจนถึง 2 CMC แต่ที่ความเข้มข้น 3 CMC กลับทำให้ค่า k_{La} เพิ่มขึ้นสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำประปา ดังนั้น สารลดแรงตึงผิวประจุบวกที่ความเข้มข้นสูงน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

การอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นจากการเติมสารลดแรงตึงผิวในเฟสของเหลวข้างต้น สามารถอธิบายโดยอาศัยเหตุผลที่ว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบและบวกซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่เล็ก ทำให้เกิดชั้นฟิล์มที่มีความหนาแน่นสูง จึงขัดขวางการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซมายังเฟสของเหลว ส่วนสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ ทำให้เกิดชั้นฟิล์มที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้ลดการขัดขวางการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซมายังเฟสของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.54

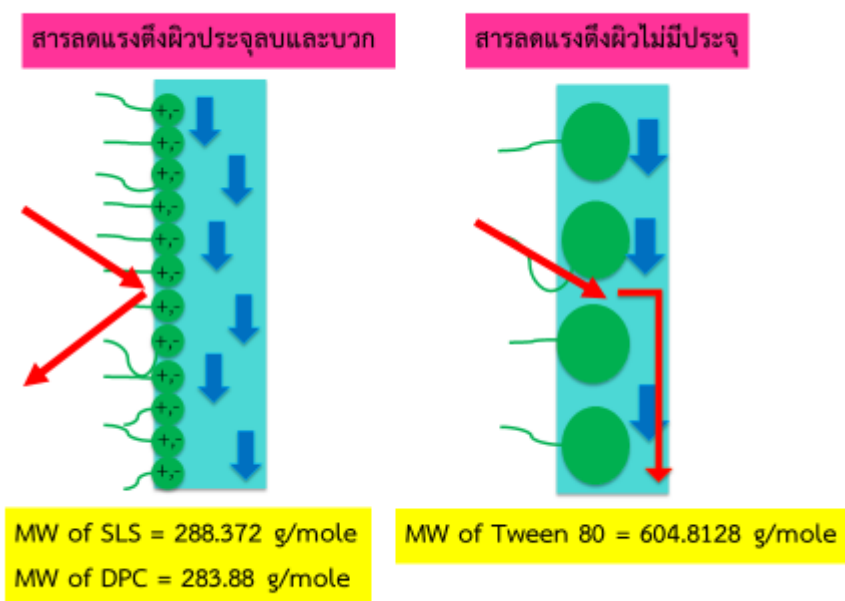
สำหรับการเติมความขุ่น (เคโอลิน) ในเฟสของเหลวจะทำให้ค่า k_{La} ลดลงประมาณ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่อเติมเคโอลินลงไปในระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์ เคโอลินน่าจะไปสัมผัสหรืออุดตันรูพรุนภายในของเมมเบรน ทำให้เกิดการขัดขวางการถ่ายเทมวล



รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบค่า α ระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.53 เปรียบเทียบค่า α ของความชุ่มที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.54 ผลของชั้นฟิล์มสารลดแรงตึงผิวบริเวณผิวของเฟสของเหลว

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนจากหัวข้อที่ 4.2 ถึง 4.5 ทำให้ทราบว่า การใช้ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซมายังเฟสของเหลว จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะนำระบบนี้มาทดลองกับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสิ่งที่ต้องถูกกำจัดออกในกระบวนการต่างๆ เช่น การผลิตก๊าซ

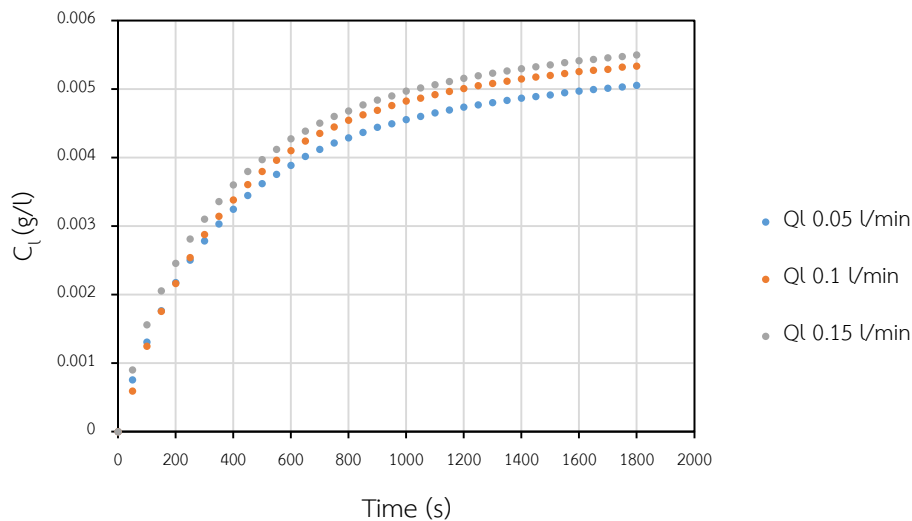
ธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ หรือแม้กระทั่งในบรรยากาศทั่วไป ดังนั้น จึงเป็นความคาดหวังของงานวิจัยชิ้นนี้ที่ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์สามารถนำมาทดแทนระบบบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระบบอื่นๆได้ และให้ประสิทธิภาพที่เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้น การทดลองในส่วนต่อไปจึงใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเฟสก๊าซในระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์ โดยใช้เมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เนื่องจากให้อัตราการดูดซึมก๊าซออกซิเจนที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา

4.6 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ผลกระทบของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลกระทบของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

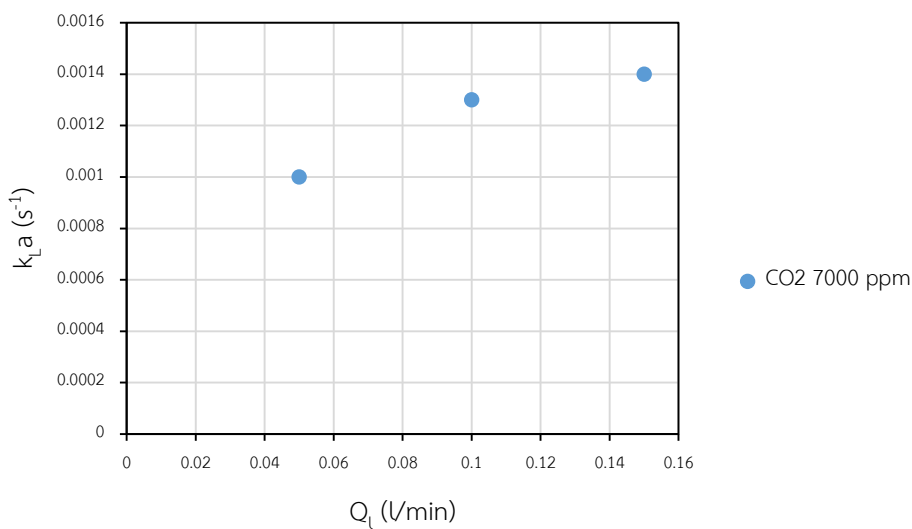
เฟสของเหลวในการทดลองในส่วนนี้จะป้อนน้ำปราศจากไอออน สารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ และสารละลายความขุ่น ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

4.6.1 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การทดลองในส่วนนี้จะใช้เฟสของเหลวเป็นน้ำปราศจากไอออน ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 0.1 และ 0.15 ลิตรต่อนาที ในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 7000 ppm ได้ผลการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตารางที่ จ-43) และสามารถสรุปเป็นกราฟการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวได้ดังรูปที่ 4.55 และ 4.56 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเฟสของเหลวจาก 0.05 เป็น 0.15 ลิตรต่อนาที จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเพิ่มขึ้นประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้นประมาณ 10%



รูปที่ 4.55 ผลการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวจากอัตราการไหลเฟสของเหลวต่างๆ



รูปที่ 4.56 ผลของอัตราการไหลเฟสของเหลวต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

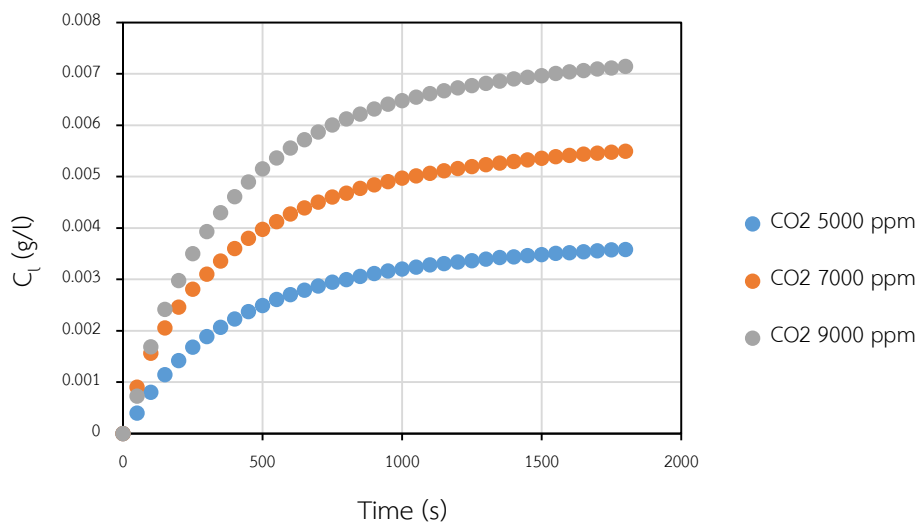
จะเห็นว่าอัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด ดังนั้น ในการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนต่อไปจึงเลือกใช้อัตราการไหลของเฟสของเหลวที่ 0.15 ลิตรต่อนาที ในการศึกษาถึงวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.6.2 ผลการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

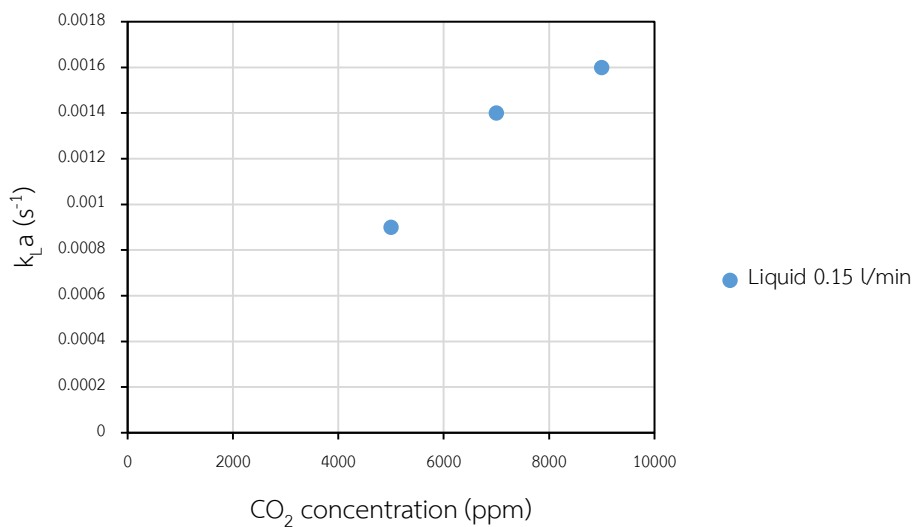
การทดลองนี้จะศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5000 7000 และ 9000 ppm ตามลำดับ และได้ผลการทดลองที่แปลผลออกมาเป็นค่า $k_L a$ (s^{-1}) (ตารางที่ จ-44) และสามารถสรุปเป็นกราฟการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวได้ดังรูปที่ 4.57 และ 4.58 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 5000 เป็น 9000 ppm จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเพิ่มขึ้นประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ทำให้เมื่อความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นสูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วขึ้น จึงทำให้ค่า $k_L a$ สูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้ควรมีการศึกษาต่อไปในภายภาคหน้า เพื่อความเข้าใจกลไกการถ่ายเทมวลที่ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้นประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่กล่าวว่า เมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำสูงสุดจะมากขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถอธิบายได้ตามกฎของเฮนรี ที่กล่าวว่า ความสามารถในการละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ ดังสมการ

$$p = k_H \cdot c$$

จะเห็นได้ว่า ถ้า p เพิ่ม จะส่งผลให้ c เพิ่มขึ้นด้วย หรือกล่าวได้ว่า การเพิ่มความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ (p) จะทำให้การละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (c) เพิ่มขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.57 ผลการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.58 ผลของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการทดลองในการเพิ่มความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9000 ppm จะให้ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจึงใช้ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9000 ppm ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อวินาที เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของเฟสของเหลวรูปแบบต่างๆ

4.6.3 ผลการศึกษาผลกระทบของเฟสของเหลว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.6.3.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุลบต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โซเดียมลอริลซัลเฟตเป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ

ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที เฟสของเหลวที่ใช้คือโซเดียมลอริลซัลเฟต 0.2 และ 3 CMC และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9000 ppm โดยใช้จำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 20 เส้น สามารถสรุปและแปลผลออกมาเป็นค่า k_{La} (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-45 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (SLS) จะส่งผลให้ค่า k_{La} ของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่า pH เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มายังเฟสของเหลวได้มากขึ้น

4.6.3.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ใช้ทวิน 80 เป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ

ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที เฟสของเหลวที่ใช้คือทวิน 80 ความเข้มข้น 0.2 CMC และ 3 CMC และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9000 ppm โดยใช้จำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 20 เส้น สามารถสรุปและแปลผลออกมาเป็นค่า k_{La} (s^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ จ-46 พบว่า ค่า k_{La} ลดลงและมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ (Tween 80) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Belo I. et al. (2011) ที่กล่าวว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลลดลง และจะลดลงจนกระทั่งถึงจุดที่ค่า k_{La} ไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งจะทำให้ค่า k_{La} มีค่าคงที่

4.6.3.3 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ใช้โดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์เป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

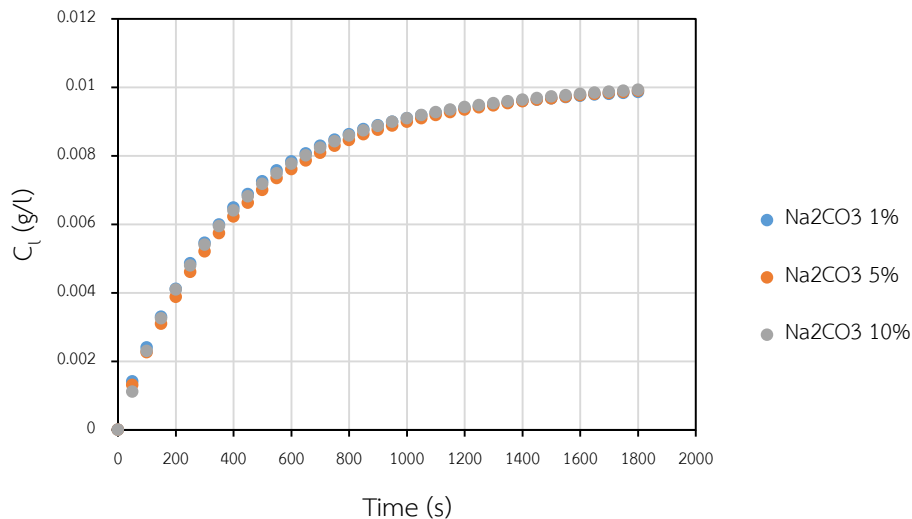
ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที เฟสของเหลวที่ใช้คือโดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.2 CMC และ 3 CMC และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9000 ppm โดยใช้จำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 20 เส้น สามารถสรุปและแปลผลออกมาเป็นค่า k_{La} (s^{-1}) ดังแสดง

ในตารางที่ จ-47 พบว่า ที่ความเข้มข้นต่ำ (0.2 CMC) ค่า $k_L a$ จะลดลงประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ แต่กลับเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าค่า $k_L a$ จากน้ำบริสุทธิ์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจนกระทั่งถึง 3 CMC

4.6.3.4 ผลของการดูดซึมทางเคมีต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวแทนของการดูดซึมทางเคมี

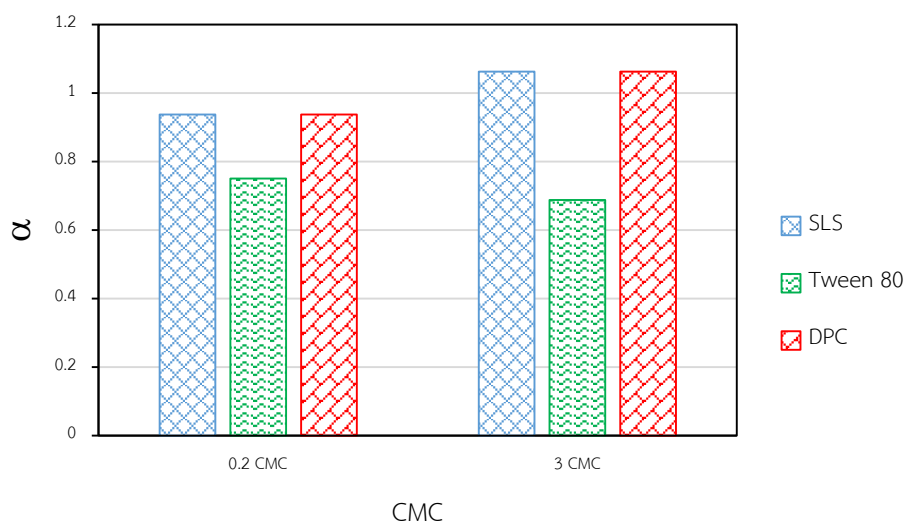
ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที เฟสของเหลวที่ใช้คือโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1% 5% และ 10% และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9000 ppm โดยใช้จำนวนเส้นเมมเบรนชนิด A 20 เส้น สามารถสรุปและแปลผลออกมาเป็นค่า $k_L a$ (s^{-1}) (ตารางที่ จ-48) และรูปที่ 4.59 พบว่า การดูดซึมทางเคมีจะทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลต่อปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำสูงสุด ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตจะทำให้ค่า $k_L a$ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



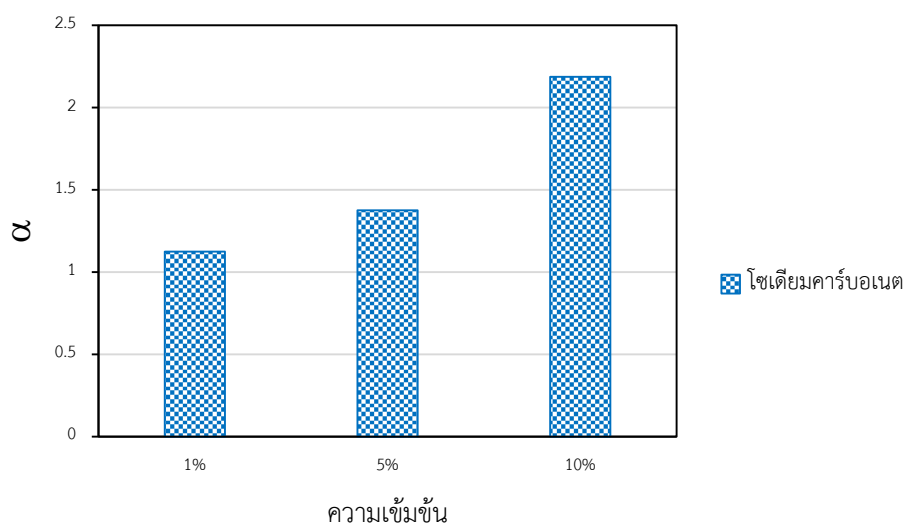
รูปที่ 4.59 ผลการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวจากผลกระทบของโซเดียมคาร์บอเนต

4.6.3.5 ผลของเฟสของเหลวต่อเมมเบรนชนิด A ในรูปของค่า α

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า k_{La} ของเฟสของเหลวที่ปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆหรือ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเทียบกับค่า k_{La} จากน้ำปราศจากไอออน ได้ผลออกมาดังรูปที่ 4.60 และ 4.61 พบว่า การมีสารลดแรงตึงผิวประจุบวกและประจุลบที่ความเข้มข้น 0.2 CMC จะทำให้ค่า k_{La} ลดลงประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 3 CMC ส่วนสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุจะทำให้ค่า k_{La} ลดลงมากยิ่งขึ้น เมื่อความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นจาก 0.2 ถึง 3 CMC ซึ่งผลของสารลดแรงตึงผิวสามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 4.6 กล่าวคือ สารลดแรงตึงผิวประจุบวกและประจุลบ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว จะทำให้ค่าเฉลี่ย pH เพิ่มขึ้นหลังสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งค่า pH ที่เพิ่มขึ้นย่อมแสดงถึงสถานะของสารละลายที่เป็นเบสมากขึ้น ทำให้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสถานะเป็นกรดได้มากขึ้น ส่วนสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจะทำให้ค่าเฉลี่ย pH ลดลงหลังสิ้นสุดการทดลอง จึงทำให้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยลง แต่การดูดซับโดยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตจะทำให้ทั้งค่า k_{La} และ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำสูงสุดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยพื้นฐานที่ว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีสภาพเป็นก๊าซกรด ดังนั้นจึงทำให้เฟสของเหลวหลังการดูดซับมีสภาพเป็นสารละลายกรด แต่ถ้าเฟสของเหลวดูดซับมีสภาพเป็นเบสมาก่อนจะสามารถดูดซับก๊าซกรดได้มากขึ้น เป็นเหตุผลให้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตซึ่งมีสภาพเป็นเบสสามารถรับโพลดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น



รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบค่า α ระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบค่า α ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่า pH ของสารละลายสารลดแรงตึงผิว

สารละลาย	pH	
	ความเข้มข้น 0.2 CMC	ความเข้มข้น 3 CMC
SLS	7.32	7.43
Tween 80	7.11	6.96

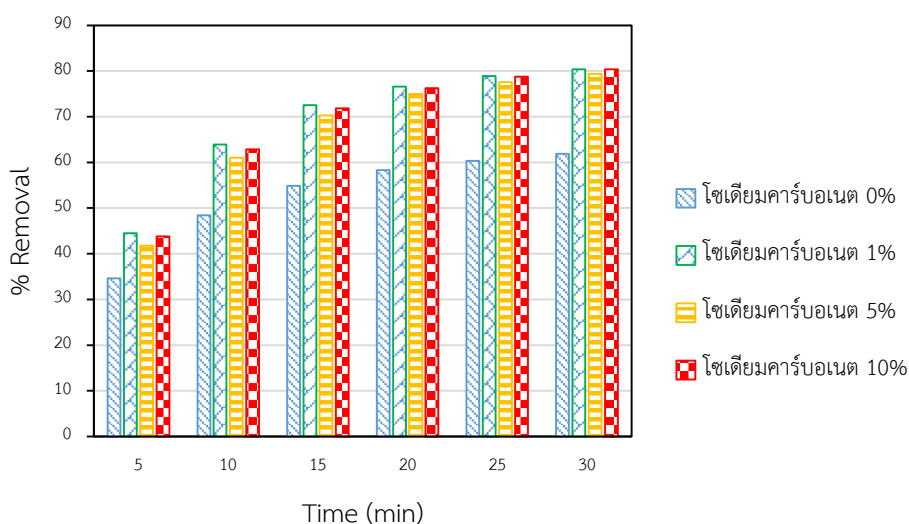
สารละลาย	pH	
	ความเข้มข้น 0.2 CMC	ความเข้มข้น 3 CMC
DPC	6.68	7.05

4.6.3.6 ผลของเฟสของเหลวต่อเมมเบรนชนิด A ในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด (%Removal)

หาเปอร์เซ็นต์การกำจัดจากสมการ

$$\% \text{Removal} = \frac{\text{ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น} - \text{ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ}}{\text{ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น}} \times 100$$

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดระหว่างการดูดซึมทางกายภาพและทางเคมี ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.62



รูปที่ 4.62 เปอร์เซ็นต์การกำจัดระหว่างการดูดซึมทางกายภาพและทางเคมี

จากผลการทดลองในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องใช้อัตราการไหลของเฟสของเหลวที่สูง ความเข้มข้นของก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง รวมถึงเฟสของเหลวต้องทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้น (เป็นเบส) โดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต

4.7 การสร้างโมเดลทำนายประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซ

จากการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อค่า $k_L a$ พบว่า ค่า $k_L a$ ในระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์มีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับค่า ความเร็วของเฟสของเหลว (V_L) จำนวนของเส้นเมมเบรนในโมดูล (\emptyset) มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับพื้นผิวของเส้นใยเมมเบรน (θ) และชนิดของเส้นเมมเบรน ในงานวิจัยนี้ได้พบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรข้างต้นที่จัดรูปออกมาในเทอมของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย เนื่องจาก กลุ่มของตัวแปรไร้หน่วยมีข้อได้เปรียบในการอธิบายสถานะที่เกิดขึ้นในระบบ จึงได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎี Buckingham Pi มาใช้กับงานวิจัยนี้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.7.1 ขั้นตอนการหากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในการใช้ทฤษฎี Buckingham Pi

1. กำหนดตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องในการนำมาสร้างโมเดล
2. กำหนดตัวแปรตาม คือ ค่า $k_L a$
3. กำหนดตัวแปรต้น คือ ความหนาแน่นของเฟสของเหลว ความหนืดของเฟสของเหลว เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเมมเบรน ความเร็วของเฟสของเหลวภายในเมมเบรน มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับพื้นผิวของเส้นใยเมมเบรน จำนวนของเส้นเมมเบรนในโมดูล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโมดูล

ได้ผลสรุปออกมาดังนี้

4.7.2 การสร้างโมเดลทำนายประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

$$\frac{k_L a V_L}{g} = [\text{Normal Condition}] - [\text{Clay Added}] - [\text{Surfactant Added}]$$

$$\frac{k_L a V_L}{g} = \left[\frac{9.38 \times 10^{-7} \left[2.31 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 - 2.86 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right) + 1 \right] Re_L^{1.29+0.62 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)} \emptyset^{2.45+1.79 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2}}{Re_L^{0.43 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2} \emptyset^{3.26 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)}} \right] - \left[\frac{9.56 \times 10^6 C_{Clay}}{1 + C_{Clay}} \right] - \left[\frac{k C_{Surfactant}}{K_s + j C_{Surfactant}} \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ	k_{La}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (s^{-1})
	v_L	=	ความเร็วเฟสของเหลว (m/s)
	g	=	ค่านิจโน้มถ่วงสากล (Gravity Constant) (m/s^2)
	θ	=	มุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน ($^{\circ}$)
	Re_L	=	ตัวเลขเรย์โนลด์ของเฟสของเหลว
	\emptyset	=	Packing Density
	C_{Clay}	=	ความเข้มข้นของความชุ่ม (mg/l)
	$C_{surfactant}$	=	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในหน่วย CMC
	π	=	180

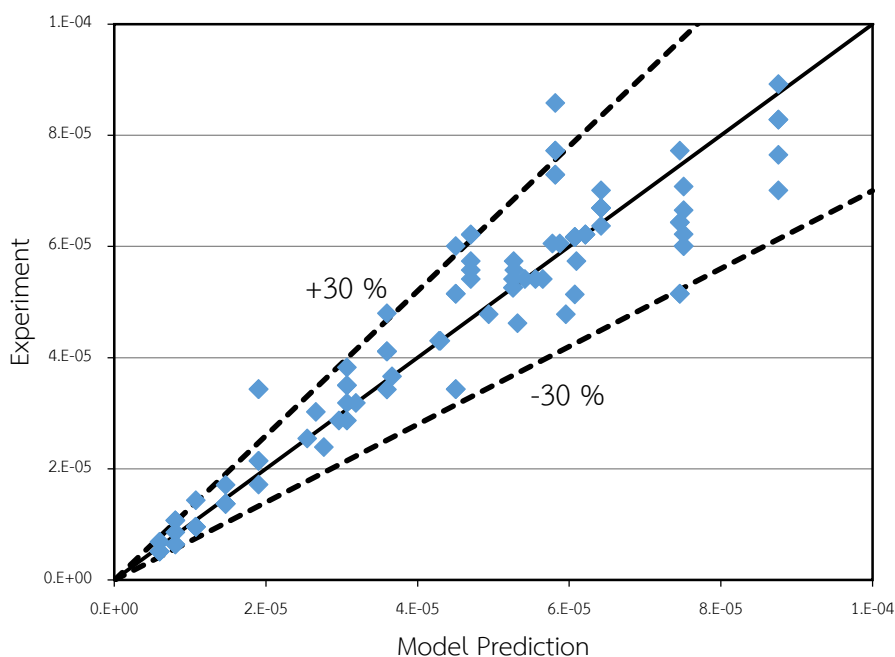
ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในส่วนการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

ค่าพารามิเตอร์	DPC	Tween 80	SLS
K	1.27×10^{-5}	7.96×10^{-6}	3.66×10^{-5}
K_s	1.00	1.25	0.19
j	0	0.58	0.93

ความแม่นยำของโมเดลต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจน (Accuracy)

$$\text{Absolute Average Relative Deviation (AARD)} = 13.26 \%$$

$$R^2 = 0.88$$



รูปที่ 4.63 ความแม่นยำของโมเดลต่อการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

4.7.3 การสร้างโมเดลทำนายประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$\frac{k_L a v_L}{g} = [\text{Normal Condition}] - [\text{Surfactant Added}] + [\text{Chemical absorption}]$$

$$\frac{k_L a v_L}{g} = 1.03 \times 10^{-11} C_{\text{gas,initial}}^{-0.92} \text{Re}_L^{1.26} - \left[\frac{K C_{\text{surfactant}}}{K_s + j C_{\text{surfactant}}} + f C_{\text{surfactant}}^h \right] + 4.21 \times 10^{-6} C_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \quad (4.2)$$

เมื่อ	$k_L a$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (s^{-1})
	v_L	=	ความเร็วเฟสของเหลว (m/s)
	g	=	ค่านิจโน้มถ่วงสากล (Gravity Constant) (m/s^2)
	Re_L	=	ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ของเฟสของเหลว
	$C_{\text{gas,initial}}$	=	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น (ppm)
	$C_{\text{surfactant}}$	=	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในหน่วย CMC
	$C_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$	=	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (%W/W)

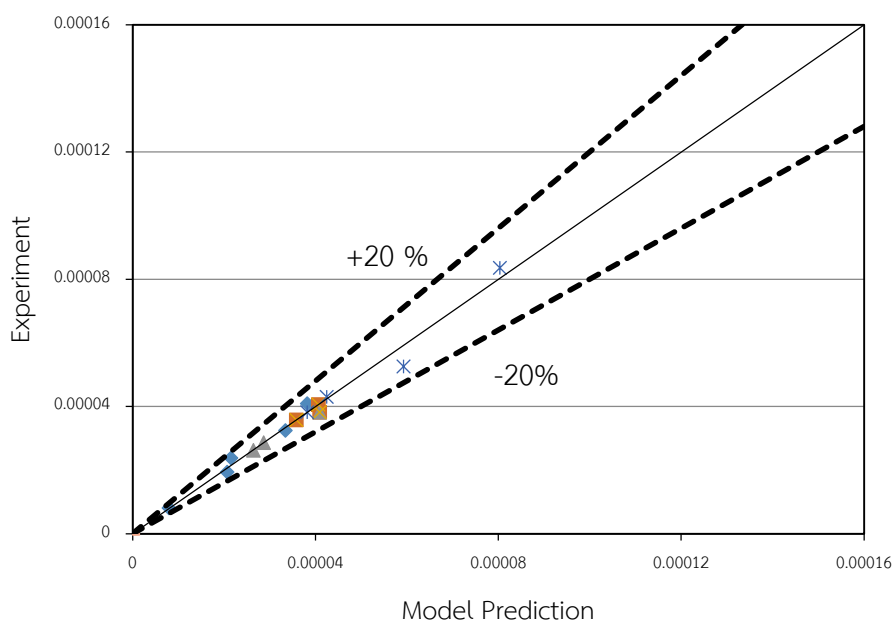
ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในส่วนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Parameter	DPC	Tween80	SLS
K	5.16×10^{-6}	1.47×10^{-5}	5.19×10^{-6}
K_s	0.01	0.04	0.01
j	0.95	1.00	0.95
f	1.05×10^{-6}	0	1.06×10^{-6}
h	1.44	0	1.44

ความแม่นยำของโมเดลต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Accuracy)

Absolute Average Relative Deviation (AARD) = 3.77 %

$R^2 = 0.982$



รูปที่ 4.64 ความแม่นยำของโมเดลต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.7.4 ตัวอย่างการใช้โมเดลในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

4.7.3.1 การใช้โมเดลในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

เมื่อเลือกใช้เมมเบรนที่มีความยาว 20 เซนติเมตรที่มีความพรุน 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1 มิลลิเมตร จำนวน 20 เส้น มาทำการเติมอากาศเพื่อเพิ่มก๊าซออกซิเจนให้กับระบบ โดยใช้อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที และเฟสของเหลวเป็นน้ำ ที่ปริมาณการเติมอากาศ 6 ลิตรต่อนาที อยากรทราบว่าระบบนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเท่าไร

วิธีทำ คำนวณตัวแปรที่ใช้ในสมการที่ 4.1

$$\Theta = 61^\circ$$

$$v_L = \left(\frac{0.1}{1000 \times 60} \right) \div \left(\frac{\pi \times 0.0008^2}{4} \times 20 \right) = 0.1659 \text{ m/s}$$

$$Re_L = \frac{0.0008 \times 0.1659 \times 997.0479}{0.000894} = 148$$

$$\emptyset = 20 \times \left(\frac{0.001}{0.01} \right)^2 = 0.2$$

เมื่อใช้สมการที่ 4.1 ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม จะได้

$$k_L a = \left[\frac{9.38 \times 10^{-7} \left[2.31 \left(\frac{2 \times 61}{\pi} \right)^2 - 2.86 \left(\frac{2 \times 61}{\pi} \right) + 1 \right] 148^{1.29 + 0.62 \left(\frac{2 \times 61}{\pi} \right)} 0.2^{2.45 + 1.79 \left(\frac{2 \times 61}{\pi} \right)^2}}{148^{0.43 \left(\frac{2 \times 61}{\pi} \right)^2} 0.2^{3.26 \left(\frac{2 \times 61}{\pi} \right)}} \right] \times \frac{9.81}{0.1659}$$

$$= 0.0024 \text{ s}^{-1}$$

4.7.3.2 การใช้ไมเดลในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อเลือกใช้เมมเบรนที่มีความยาว 20 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 มิลลิเมตร จำนวน 20 เส้นมาบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 7000 ppm โดยใช้อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที และเฟสของเหลวเป็นน้ำ อยากรบว่าระบบนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเท่าไร

วิธีทำ คำนวณตัวแปรที่ใช้ในสมการที่ 4.2

$$V_L = \left(\frac{0.1}{1000 \times 60} \right) \div \left(\frac{\pi \times 0.0008^2}{4} \times 20 \right) = 0.1659 \text{ m/s}$$

$$Re_L = \frac{0.0008 \times 0.1659 \times 997.0479}{0.000894} = 148$$

เมื่อใช้สมการที่ 4.2 ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม จะได้

$$k_{La} = \frac{1.03 \times 10^{-11} \times 7000^{0.92} \times 148^{1.26} \times 9.81}{0.1659} = 0.0011 \text{ s}^{-1}$$

4.7.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ไมเดล

ในปัจจุบัน ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 400 ppm ซึ่งมีการทำนายไว้ว่าเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับ 450 ppm จะทำให้อุณหภูมิของโลกโดยเฉลี่ยสูงขึ้น 2°C และจะส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศของโลก (Willard B. 2014) ดังนั้นถ้าต้องการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 450 ppm โดยกำหนดให้อัตราเร็วเฟสของเหลวคือ 0.15 ลิตรต่อนาที ให้ออกแบบระบบที่บำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ข้างต้น

วิธีทำ กำหนดคุณสมบัติพื้นฐานของระบบ

1. ใช้ไมเดลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.01 เมตร สูง 0.2 เมตร
2. เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเมมเบรน 0.001 เมตร

3. ให้ค่า $k_L a = 0.0255 \text{ s}^{-1}$ (เป็นค่าที่ได้จากการใช้หอดูดซึมแบบฟองอากาศดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 1 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14 เซนติเมตร)

4. เฟสของเหลวใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 1 เปอร์เซ็นต์

คำนวณตัวแปรที่ใช้ในสมการที่ 4.2

$$v_L = \left(\frac{0.15}{1000 \times 60} \right) \div \left(\frac{\pi \times 0.001^2}{4} \times N \right) = \frac{3.1847}{N} \text{ m/s}$$

$$Re_L = \frac{0.001 \times 3.1847 \times 997.0479}{0.000894 \times N} = \frac{3551.803}{N}$$

เมื่อใช้สมการที่ 4.2 และแทนค่าตัวแปรต่างๆที่ทราบค่า จะได้

$$\frac{0.0255 \times 3.1847}{9.81 \times N} = \left(1.03 \times 10^{-11} \times 450^{0.92} \times \left(\frac{3551.803}{N} \right)^{1.26} \right) + (4.21 \times 10^{-6})$$

$$N = 1964 \text{ เส้น}$$

$$\text{และคำนวณย้อนกลับได้ขนาดโมดูลขั้นต่ำ} = \frac{\pi \times 0.001^2}{4} \times 1964 = 0.001542 \text{ m}^2$$

หรือ 15.42 cm^2 หรือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโมดูลอย่างต่ำ 4.43 เซนติเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการดูดซึมก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (k_La) และประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซ โดยใช้อุปกรณ์ในการดูดซึมเป็นระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์แบบเส้นใยกลวง เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่นำมาศึกษามีมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรนที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด 3 ชนิด แบ่งเป็นการทดลองกับเฟสก๊าซที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ

ระบบการดูดซึมก๊าซออกซิเจน

ในการทดลองได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของเฟสก๊าซ อัตราการไหลของเฟสของเหลว ผลของจำนวนเส้นเมมเบรน และผลของเฟสของเหลวจากสารลดแรงตึงผิวและความชุ่ม พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของเฟสของเหลวและเฟสก๊าซจะทำให้ค่า k_La คงที่ เพิ่มขึ้น หรือลดลง จะขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรน แต่การเพิ่มจำนวนเส้นเมมเบรนจะทำให้ค่า k_La มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ถ้าในระบบการดูดซึมมีสารลดแรงตึงผิวปนเปื้อน จะส่งผลให้ค่า k_La ลดลง โดยสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ (ทวิน 80) ทำให้ค่า k_La ลดลงน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประจุบวก (โดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์) และสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (โซเดียมลอริลซัลเฟต) ตามลำดับ ส่วนการมีความชุ่ม (เคโอลิน) ในเฟสของเหลว จะทำให้ค่า k_La ลดลงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ตลอดทุกความเข้มข้นของความชุ่ม

ระบบการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการทดลองได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของเฟสของเหลว ผลของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลของเฟสของเหลวจากสารลดแรงตึงผิว พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลเฟสของเหลวให้สูงขึ้น ส่งผลให้ค่า k_La เพิ่มขึ้นประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 5000 ถึง 9000 ppm มีแนวโน้มที่ทำให้ค่า k_La เพิ่มขึ้นถึง 78 เปอร์เซ็นต์ ถ้าในระบบปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวประจุลบและบวกจะส่งผลให้ค่า k_La ลดลงเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มจะทำให้ค่า k_La เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งตรงข้ามกับสารลดแรงตึงผิวไม่มี

ประจุที่จะทำให้ค่า k_{La} ลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ส่วนการดูดซึมโดยใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายจะทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำค้างที่ แต่ค่า k_{La} มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซออกซิเจนระหว่างระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์และหอดูดซึมแบบฟองอากาศ

ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์เป็นระบบที่มีเมมเบรนกั้นระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว โดยผิวของเมมเบรนจะมีรูพรุนกระจายทั่วเส้นเมมเบรนทำหน้าที่ในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสาร ส่วนหอดูดซึมแบบฟองอากาศเป็นระบบที่ผลิตฟองก๊าซจำนวนมากจากหัวกระจายฟองอากาศ ทำให้เฟสก๊าซและเฟสของเหลวสัมผัสกันโดยตรง ซึ่งจากการทดลองพบว่า ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับหอดูดซึมแบบฟองอากาศ ซึ่งเป็นข้อดีของระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์ เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่า กล่าวคือ ระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร ความสูงของเมมเบรน 20 เซนติเมตร แต่หอดูดซึมแบบฟองอากาศที่นำมาเปรียบเทียบ (Sastaravet P. et al. (2014)) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับหอดูดซึมที่มีขนาดใหญ่(ดาววัน เจริญพิทยา (2556)) ซึ่งมีขนาดความกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร พบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซใกล้เคียงกัน หอดูดซึมแบบฟองอากาศต้องใช้จำนวนเส้นเมมเบรนที่สูงจึงสามารถให้ค่า k_{La} ที่ใกล้เคียงกันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการทดลองมีการใช้เส้นเมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุที่แตกต่างกันในการศึกษาผลกระทบของการเดินระบบในด้านต่างๆ ถ้ามีการศึกษาเพิ่มเติมควรใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน ความพรุน และความหนา ที่ใกล้เคียงกัน มาเปรียบเทียบกับในส่วนของการเป็นตัวแทนของเมมเบรนชนิดชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ

2) ในการศึกษาต่อไป ควรมีการผลิตเส้นเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการผลิต สารเติมแต่ง และทำให้ได้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงตามที่ต้องการได้

3) ช่วงการไหลของเฟสของเหลวและเฟสก๊าซอาจจะยังไม่กว้างพอที่จะครอบคลุมถึงช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้อีก ซึ่งควรมีการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือให้มากขึ้นเพื่อความสมบูรณ์ของการทดลอง

4) สารลดแรงตึงผิวที่เป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุต่างๆยังน้อยเกินไป ควรเพิ่มจำนวนสารลดแรงตึงผิวเพื่อยืนยันถึงผลกระทบของสารลดแรงตึงผิว

5) ควรมีการนำระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์ไปทดสอบกับสิ่งแวดล้อมจริง เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของระบบได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น



รายการอ้างอิง

Atchariyawut S., Jiraratananon R. and Wang R. 2007. Separation of CO₂ from CH₄ by using gas-liquid membrane contacting process. Journal of Membrane Science 304(1-2): 163-172.

Belo I., Alicia G.A., Diego G.D., Navaza J.M. and Isabel V.T. 2011. Effect of tween 80 on bubble size and mass transfer in a bubble contactor. Chemical Engineering & Technology 34(11): 1790-1796.

Bhatia B., Nigam K.D.P., Auban D. and Hebrard G. 2004. Effect of a new high porosity packing on hydrodynamics and mass transfer in bubble columns. Chemical Engineering and Processing 43(11): 1371-1380.

Demontigny D., Tontiwachwuthikul P. and Chakma A. 2006. Using polypropylene and polytetrafluoroethylene membranes in a membrane contactor for CO₂ absorption. Journal of Membrane Science 277(1-2): 99-107.

Gabelmana A. and Hwang S.T. 1999. Hollow fiber membrane contactors. Journal of Membrane Science 159: 61-106.

Go´mez-Díaz D., Navaza J.M. and Sanjurjo B. 2009. Mass-transfer enhancement or reduction by surfactant presence at a gas-liquid interface. Industrial & Engineering Chemistry Research 48: 2671-2677.

Green D.W. Perry's chemical engineers' handbook, eighth edition. New York: McGraw-Hill, 2008

Harvey A-H. and Smith F-L. 2007. Avoid common pitfalls when using Henry's Law. Chemical Engineering Progress 103(9): 33-39.

Hebrard G., Zeng J. and Loubiere K. 2009. Effect of surfactants on liquid side mass transfer coefficients: A new insight. Chemical Engineering Journal 148(1): 132-138.

Hoff K.A. Modeling and experimental study of carbon dioxide absorption in a membrane contactor. Doctor's Thesis, Department of Chemical Engineering. Norwegian University of Science and Technology, 2003.

Isao K. and Akimi S. (2010). Bubble flow, [Online]. Available http://www.thermopedia.com/content/2018/#BUBBLE_FLOW_FIG2011.

Kantarci N., Borak F. and Ulgen K.O. 2005. Review bubble column reactors. Process Biochemistry 40(7): 2263-2283.

Karoort S. and Sirkar K.K. 1993. Gas absorption studies in microporous hollow fiber membrane modules. Industrial & Engineering Chemistry Research 32: 674-681.

Khaisri S., deMontigny D., Tontiwachwuthikul P. and Jiraratananon R. 2010. A mathematical model for gas absorption membrane contactors that studies the effect of partially wetted membranes. Journal of Membrane Science 347(1-2): 228-239.

Khaisri S., deMontigny D., Tontiwachwuthikul P. and Jiraratananon R. 2011. CO₂ stripping from monoethanolamine using a membrane contactor. Journal of Membrane Science 376(1-2): 110-118.

Khaisri S., deMontigny D., Tontiwachwuthikul P. and Jiratananon R., 2009. Comparing membrane resistance and absorption performance of three different membranes in a gas absorption membrane contactor.

Lee F.F. Comprehensive analysis, Henry's law constant determination, and photocatalytic degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) and/or other persistent organic pollutants (POPs). Doctor's Thesis, Department of Environmental Health Sciences. State University of New York at Albany, 2007.

Li J-J. and Chen B-H. 2005. Review of CO₂ absorption using chemical solvents in hollow fiber membrane contactors. Separation and Purification Technology 41(2): 109-122.

Moustiri S., Hebrard G. and Roustan M. 2002. Effect of a new high porosity packing on hydrodynamics of bubble columns. Chemical Engineering and Processing 41: 419-426.

Painmanakul P., Loubière K., Hébrard G., Mietton-Peuchot M. and Roustan M. 2005. Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients. Chemical Engineering Science 60(22): 6480-6491.

Painmanakul P., Wachirasak J., Jarnongwong M. and Hebrard G. 2009. Theoretical prediction of volumetric mass transfer coefficient (k_La) for designing an aeration tank. Engineering Journal 13(3): 13-28.

Rangwala H.A. 1996. Absorption of carbon dioxide into aqueous solutions using hollow fiber membrane contactors. Journal of Membrane Science 112: 229-240.

Ruzicka M.C., Drahos J., Fialova M. and Thomas N.H. 2001. Effect of bubble column dimensions on flow regime transition. Chemical Engineering Science 56: 6117–6124.

Sairiam S. Ozonation of dye wastewater by membrane contacting process using modified PVDF membranes. Doctor's Thesis, Department of Science. Chulalongkorn University, 2013.

Sander R. 2015. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. Atmospheric Chemistry and Physics 15: 4399-4981.

Sastaravet P., Chuenchaem C., Thaphet N., Chawaloesphonsiya N. and Painmanakul P. 2014. Comparative study of mass transfer and bubble hydrodynamic parameters in bubble column reactor: Physical configurations and operating conditions. Environmental Engineering Research 19(4): 345-354.

Saxena A.C., Rao N.S. and Saxena S.C. 1990. Bubble size distribution in bubble columns. The Canadian Journal of Chemical Engineering 68: 159-161.

Vasconcelos J.M.T., Rodrigues J.M.L., Orvalho S.C.P., Alves S.S., Mendes R.L. and Reis A. 2003. Effect of contaminants on mass transfer coefficients in bubble column and airlift contactors. Chemical Engineering Science 58: 1431-1440.

Wang R., Zhang H.Y., Feron P.H.M. and Liang D.T. 2005. Influence of membrane wetting on CO₂ capture in microporous hollow fiber membrane contactors. Separation and Purification Technology 46: 33-40.

Willard B. (2014). CO₂12 - Why 2450 ppm is Dangerous and 2350 ppm is Safe, [Online]. Available: <http://sustainabilityadvantage.com/2014/2001/2007/co2012-why-2450-ppm-is-dangerous-and-2350-ppm-is-safe/>.

Wu J. and Chen V. 2000. Shell-side mass transfer performance of randomly packed hollow fiber modules. Journal of Membrane Science 72: 59-74.

Yang M.C. and Cussler E.L. 2004. Designing hollow-fiber contactors. AIChE Journal 32(11): 1910-1916.

จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ. อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ. 1-12. กรุงเทพมหานคร, : 2552

ฐากร เสนีย์มโนมัย. การใช้ออร์แกนอเคลย์ดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำดิบเพื่อลดโอกาสการเกิดไตรฮาโลมีเทน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

ดาวัน เจริญพิทยา. การวิเคราะห์ระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ธงไทย วิชुरย์. เทคโนโลยีการกักเก็บและการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล. วิศวกรรมสาร มข. 38, 34(2554): 2453-2467.

นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์. การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

พิสุทธิ์ เพียรมนกุล. กระบวนการถ่ายเทมวลสารและการแยกทางกายภาพในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
กรุงเทพมหานคร: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554

พุดพิงศ์ ตันติขจรโกศล and รัตนา จิระรัตนานนท์. การดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซ
ธรรมชาติสังเคราะห์โดยเมมเบรนคอนแทคเตอร์แบบเส้นใยกลวง. ใน การประชุมวิชาการนานาชาติ
วิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, สงขลา, 2554.

รัตนา จิระรัตนานนท์. เมมเบรนคอนแทคเตอร์ Membrane Contactors. กรุงเทพมหานคร:
สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.), 2556

วิชาชา ภูจินดา (2549). มารู้จักสารลดแรงตึงผิวกันดีกว่า, [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://dwb2544.unl.edu/Chem/CHEM2869J/CHEM2869JLinks/www.chem.ualberta.ca/courses/plambeck/p2101/p01182.htm>.

ศูนย์วิทยบริการ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (2544). ความปลอดภัยของสาร SLS
(Sodium Lauryl Sulfate) ในเครื่องสำอาง, [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://elib.fda.moph.go.th/library/default.asp?page2542=subdetail&id_L2541=2527&id_L2542=15755&id_L15753=13113.

สัมพันธ์ โฆษิตพล. การศึกษาเครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบ Cyclonic Spray Tower.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี, 2538.

สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร. รายงานการประเมินกรุงเทพมหานครว่าด้วยการเปลี่ยนแปลง
ภูมิอากาศ พ.ศ.2552. ใน รายงานการประเมินกรุงเทพมหานครว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ
พ.ศ.2552, 36-41. กรุงเทพมหานคร, 2552.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2557). กลไกการพัฒนาที่สะอาด (Clean Development Mechanism: CDM, [ออนไลน์] . แหล่งที่มา : http://www.tgo.or.th/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=2536&Itemid=2550.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

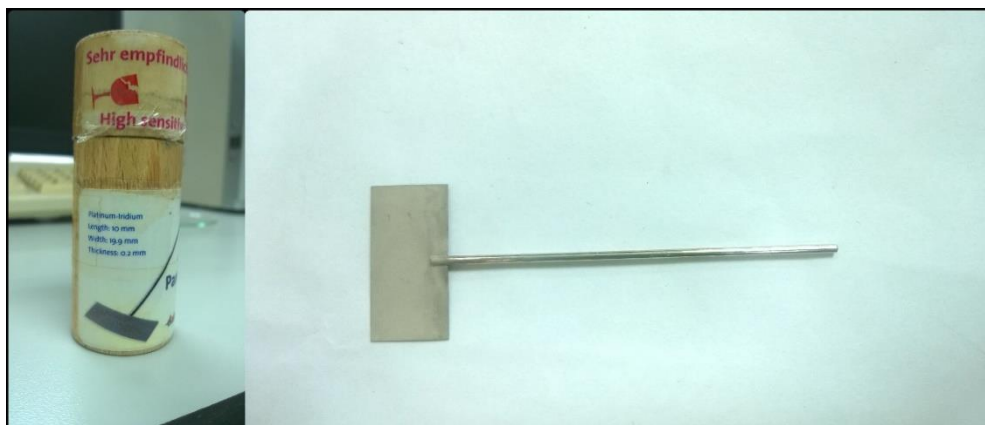
ภาคผนวก ก



รูปที่ ก-1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม (Environmental Scanning Electron Microscope, ESEM)



รูปที่ ก-2 เครื่องวัดแรงดึงผิว (Tensiometer)



รูปที่ ก-3 Standard Measuring Probe for The Wilhelmy Plate Method



รูปที่ ก-4 Dataphysics PUR11- Tensiometry



รูปที่ ก-5 โมเดลแก้วสำหรับบรรจุเส้นใยเมมเบรน



รูปที่ ก-6 ป้อนสูบล้างสารเคมี



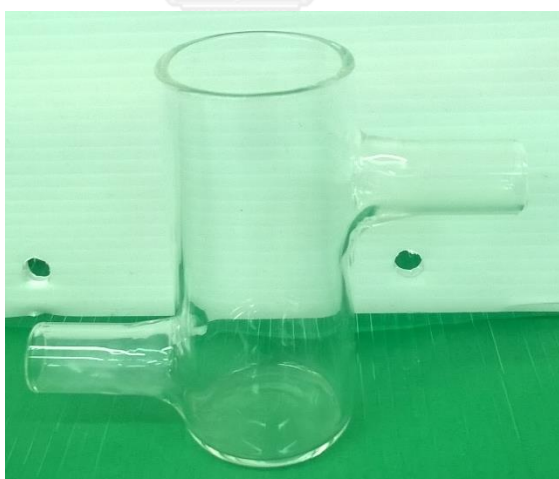
รูปที่ ก-7 ป้อนอากาศ




รูปที่ ก-8 DO-meter



รูปที่ ก-9 CO₂-meter



รูปที่ ก-10 อุปกรณ์ต่อ DO-meter กับระบบเมมเบรนคอนแทคเตอร์

The logo of Chulalongkorn University is centered on the page. It features a central emblem with a sunburst at the top, a crown-like structure in the middle, and a base with two lions. The text 'CHULALONGKORN UNIVERSITY' is written in a light blue font below the emblem.

ภาคผนวก ข

รายงานผลการทดลอง

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนชนิด A B และ C และแรงตึงผิวของ
สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ 0.2 กรัมต่อลิตร

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเมมเบรนชนิด A

วัดครั้งที่	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)
1	1.09
2	1.06
3	1.11
4	1.04
5	1.06
6	1.10
7	1.12
8	1.11
9	1.11
ค่าเฉลี่ย	1.088889
SD	0.02848

ตารางที่ ข-2 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเมมเบรนชนิด A

ความหนาที่วัดได้ (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)
0.13	0.828889
0.131	0.826889
0.133	0.822889
0.135	0.818889
0.133	0.822889
0.132	0.824889
ค่าเฉลี่ย	0.824222
SD	0.003502

ตารางที่ ข-3 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเมมเบรนชนิด B

วัดครั้งที่	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)
1	1
2	0.992
3	0.972
4	0.981
5	0.965
ค่าเฉลี่ย	0.982
SD	0.014265343

ตารางที่ ข-4 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเมมเบรนชนิด B

วัดครั้งที่	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)
1	0.718
2	0.753
3	0.676
4	0.691
5	0.713
ค่าเฉลี่ย	0.7102
SD	0.029320641

ตารางที่ ข-5 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่รวมตัวซัพพอร์ตของเมมเบรนชนิด C

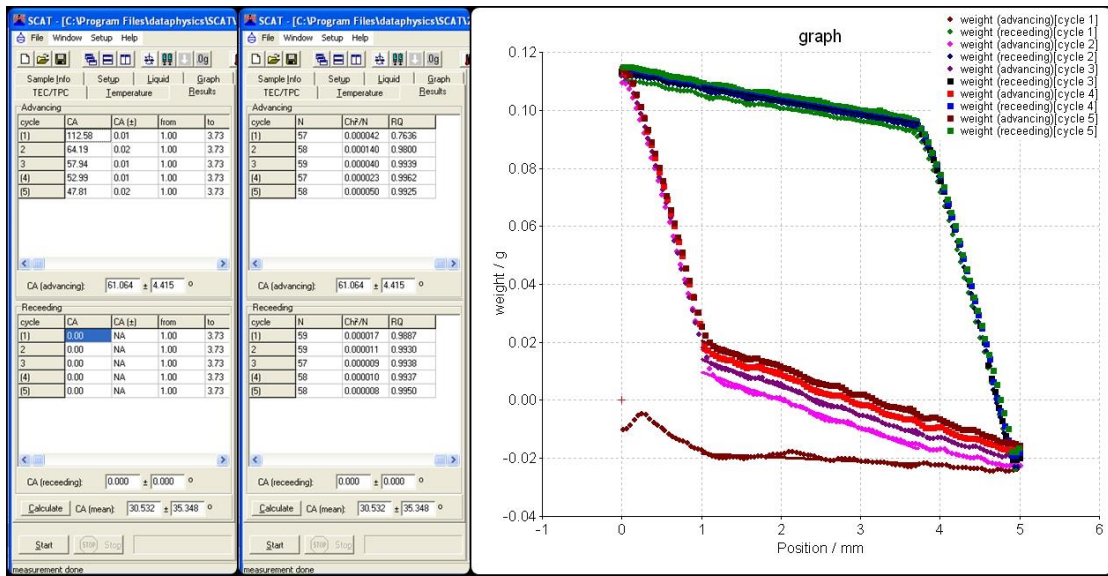
วัดครั้งที่	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)
1	0.851
2	0.86
3	0.734
4	0.688
5	0.774
6	0.862
ค่าเฉลี่ย	0.794833
SD	0.074109

ตารางที่ ข-6 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในรวมตัวซัพพอร์ทของเมมเบรนชนิด C

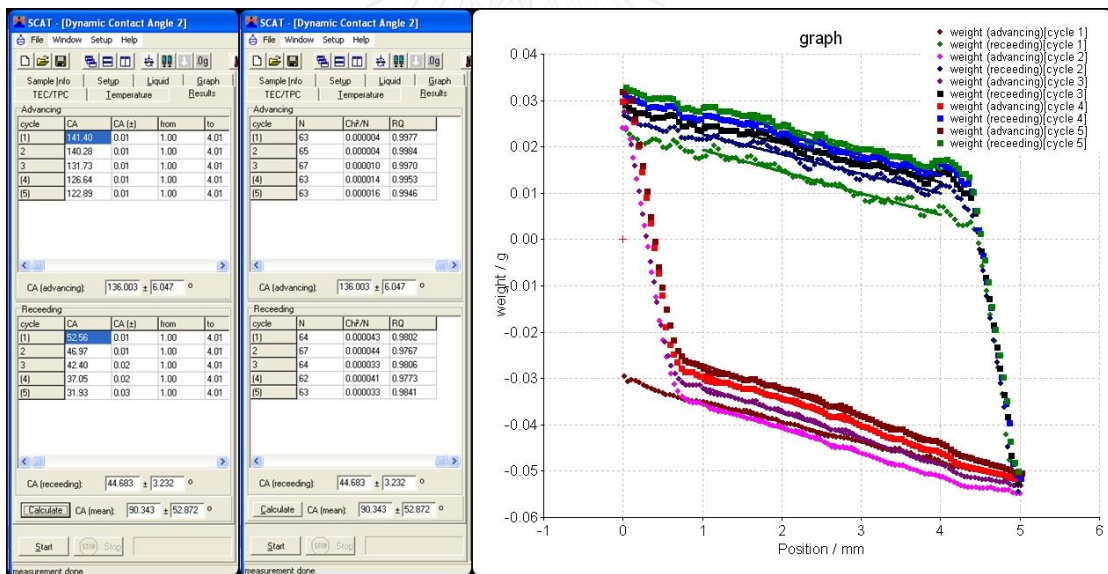
ความหนาที่วัดได้ (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)
0.285	1.364833
0.334	1.462833
0.292	1.378833
ค่าเฉลี่ย	1.402167
SD	0.053003

ตารางที่ ข-7 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเมมเบรนชนิด C

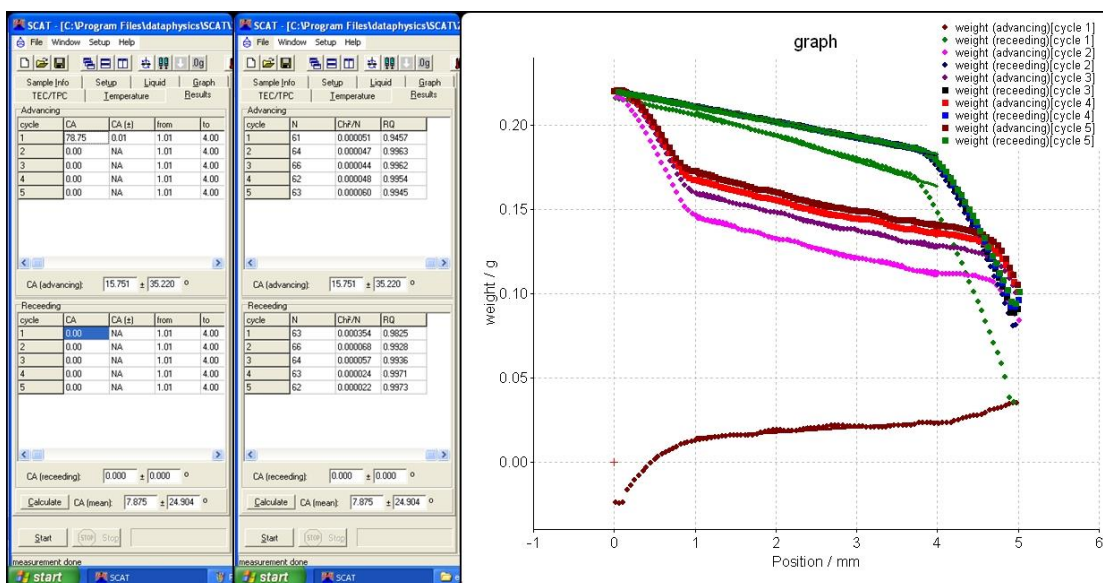
ความหนาที่วัดได้ (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)
0.164	1.730167
0.15	1.702167
0.166	1.734167
0.183	1.768167
0.194	1.790167
0.18	1.762167
ค่าเฉลี่ย	1.747833
SD	0.031608



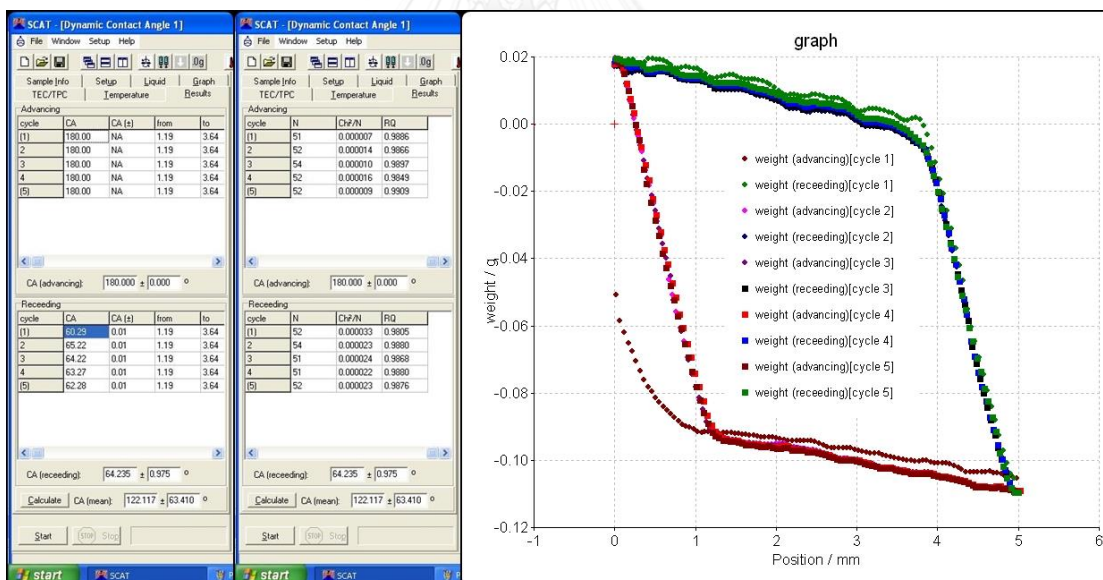
รูปที่ ข-1 ขนาดมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) ของเส้นใยเมมเบรน ชนิด A



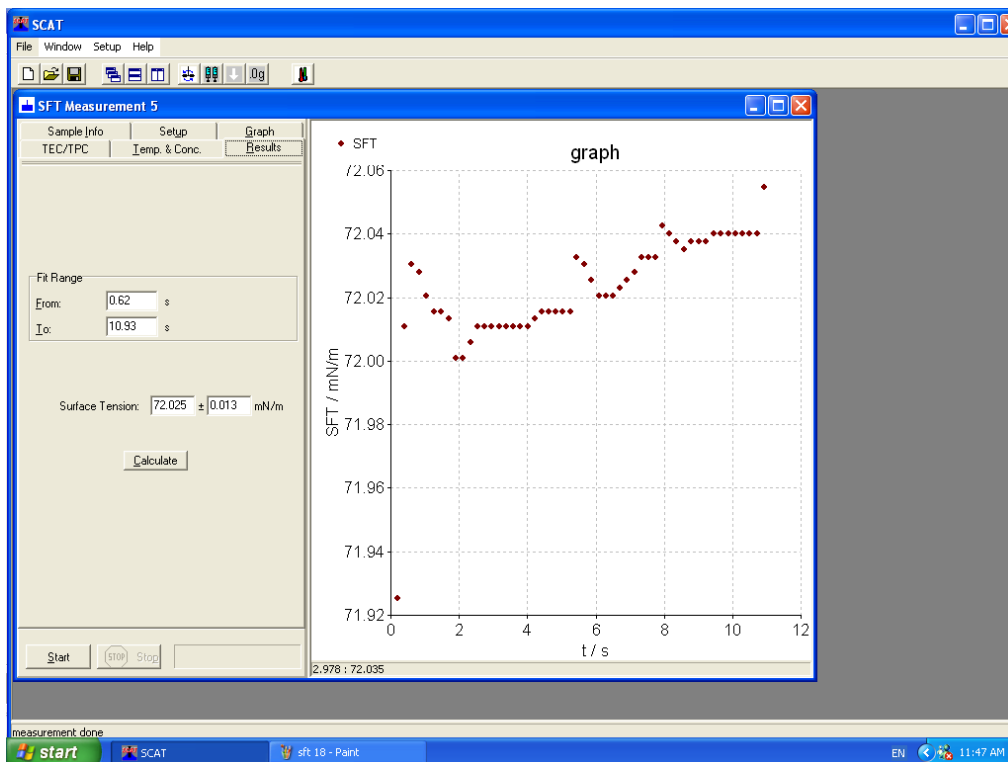
รูปที่ ข-2 ขนาดมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) ของเส้นใยเมมเบรน ชนิด B



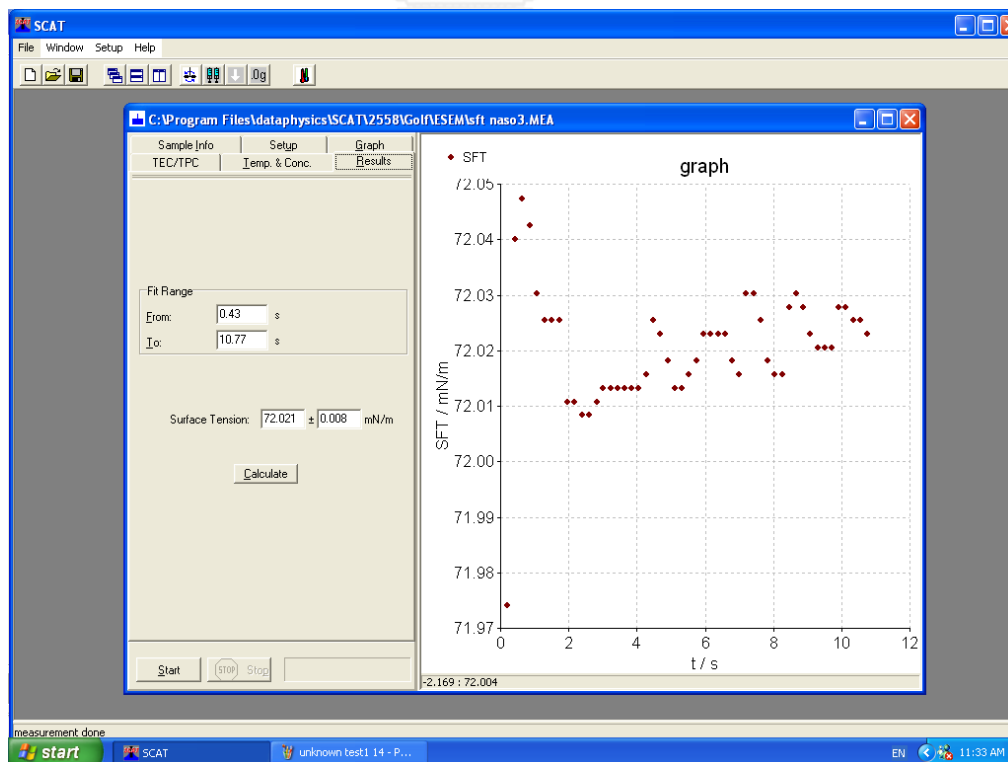
รูปที่ ข-3 ขนาดมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) ของเส้นใยเมมเบรน ชนิด C



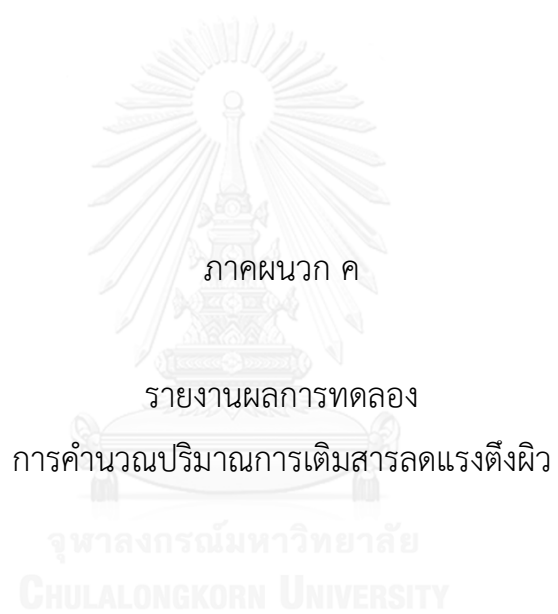
รูปที่ ข-4 ขนาดมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวที่กระทำกับผิวของเมมเบรน (°) ของเส้นใยเมมเบรน ชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (PVDF-PAM)



รูปที่ ข-5 ขนาดแรงตึงผิวของน้ำ Milli-Q 18



รูปที่ ข-6 ขนาดแรงตึงผิวของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร



ภาคผนวก ค

รายงานผลการทดลอง

การคำนวณปริมาณการเติมสารลดแรงตึงผิว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค

สารลดแรงตึงผิวประจุลบ

โซเดียมลอริลซัลเฟตเป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ

MW = 288.372 g/mol

The critical micelle concentration (CMC) ในน้ำที่ 25 °C คือ 8.2 mM

$$\text{CMC} = 0.0082 \frac{\text{mol}}{1 \text{ l}} = 0.0082 \text{ mol} \times 288.372 \frac{\text{g}}{\text{mol} \cdot \text{l}} = 2.36465 \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

ดังนั้น	0.2 CMC	=	0.47293008 g/l
	0.7 CMC	=	1.65525528 g/l
	1 CMC	=	2.3646504 g/l
	1.5 CMC	=	3.546976 g/l
	2 CMC	=	4.7293008 g/l
	3 CMC	=	7.0939512 g/l

สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ

โซทวิน 80 เป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ

MW = 604.8128 g/mol

The critical micelle concentration (CMC) ในน้ำที่ 25 °C คือ 0.015 g/l

ดังนั้น	0.2 CMC	=	0.003 g/l
	0.7 CMC	=	0.0105 g/l
	1 CMC	=	0.015 g/l
	1.5 CMC	=	0.0225 g/l
	2 CMC	=	0.03 g/l
	3 CMC	=	0.045 g/l

สารลดแรงตึงผิวประจุลบ

โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเป็นตัวแทนของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ

MW= 283.88 g/mole

The critical micelle concentration (CMC) ในน้ำที่ 25 °C คือ 1.62 mM

$$\text{CMC} = 0.00162 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} = 0.00162 \frac{\text{mol}}{1 \text{ l}} = 0.00162 \text{ mol} \times 283.88 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0.4599 \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

$$\text{ดังนั้น } 0.2 \text{ CMC} = 0.0920 \text{ g/l}$$

$$0.7 \text{ CMC} = 0.3219 \text{ g/l}$$

$$1 \text{ CMC} = 0.4599 \text{ g/l}$$

$$1.5 \text{ CMC} = 0.6898 \text{ g/l}$$

$$2 \text{ CMC} = 0.9198 \text{ g/l}$$

$$3 \text{ CMC} = 1.3797 \text{ g/l}$$



ภาคผนวก ง

รายงานผลการทดลอง

ผลการดูดซึมก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง-1 การดูดซับก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 12 V/min		Air 10 V/min		Air 6 V/min		Air 2 V/min		Air 1 V/min	
	DO (mg/l)		DO (mg/l)		DO (mg/l)		DO (mg/l)		DO (mg/l)	
	ครั้งที่1 (t=24.7°C)	ครั้งที่2 (t=24°C)	ครั้งที่1 (t=24°C)	ครั้งที่2 (t=24.4°C)	ครั้งที่1 (t=23.5°C)	ครั้งที่2 (t=24.2°C)	ครั้งที่1 (t=22.6°C)	ครั้งที่2 (t=23.3°C)	ครั้งที่1 (t=23.1°C)	ครั้งที่2 (t=23°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.63	1.53	1.13	1.23	1.43	1.44	1.38	1.26	1.32	1.33
240	2.38	2.29	1.64	1.76	1.93	1.99	1.93	1.80	1.82	1.87
360	2.97	2.92	2.12	2.23	2.46	2.55	2.49	2.30	2.27	2.42
480	3.44	3.40	2.56	2.60	2.87	2.98	2.94	2.69	2.65	2.88
600	3.83	3.78	2.91	2.96	3.24	3.36	3.33	3.03	2.96	3.26
720	4.17	4.09	3.15	3.30	3.53	3.70	3.68	3.29	3.24	3.61
840	4.40	4.40	3.35	3.52	3.78	3.97	3.97	3.51	3.46	3.90
960	4.60	4.63	3.57	3.72	4.02	4.22	4.20	3.70	3.69	4.15
1080	4.77	4.82	3.82	3.91	4.22	4.44	4.40	3.87	3.86	4.37
1200	4.93	4.98	3.92	4.12	4.42	4.65	4.58	4.00	4.03	4.57
1320	5.05	5.09	4.04	4.39	4.59	4.84	4.73	4.12	4.19	4.73
1440	5.14	5.19	4.16	4.55	4.76	5.01	4.87	4.24	4.31	4.87
1560	5.18	5.30	4.32	4.64	4.91	5.15	5.01	4.34	4.44	5.00
1680	5.19	5.39	4.53	4.75	5.03	5.27	5.13	4.44	4.57	5.12
1800	5.26	5.47	4.58	4.86	5.15	5.38	5.26	4.54	4.67	5.22

ตารางที่ ง-2 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 12 V/min			Air 10 V/min			Air 6 V/min			Air 2 V/min			Air 1 V/min		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
	ครั้งที่1 (t=23.3°C)	ครั้งที่2 (t=23.9°C)	ครั้งที่3 (t=23.6°C)	ครั้งที่1 (t=25.5°C)	ครั้งที่2 (t=25.9°C)	ครั้งที่3 (t=25.3°C)	ครั้งที่1 (t=24.9°C)	ครั้งที่2 (t=24.4°C)	ครั้งที่3 (t=24.2°C)	ครั้งที่1 (t=25.1°C)	ครั้งที่2 (t=24.4°C)	ครั้งที่3 (t=25.2°C)	ครั้งที่1 (t=23.2°C)	ครั้งที่2 (t=22.9°C)	ครั้งที่3 (t=22.9°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.61	1.60	1.46	1.45	1.75	1.76	1.51	1.56	1.48	1.58	1.81	1.75	1.75	1.72	1.95
240	2.41	2.48	2.28	2.42	2.66	2.72	2.34	2.35	2.32	2.47	2.76	2.66	2.66	2.62	2.83
360	3.13	3.17	2.93	3.18	3.32	3.43	2.97	2.92	2.91	3.08	3.45	3.40	3.31	3.26	3.50
480	3.70	3.73	3.45	3.73	3.81	3.96	3.45	3.38	3.42	3.56	3.98	3.91	3.83	3.75	3.97
600	4.11	4.16	3.86	4.13	4.21	4.39	3.84	3.77	3.81	3.93	4.40	4.30	4.24	4.13	4.38
720	4.46	4.50	4.20	4.38	4.54	4.70	4.16	4.08	4.16	4.22	4.74	4.61	4.57	4.41	4.71
840	4.76	4.80	4.47	4.52	4.81	4.93	4.42	4.33	4.44	4.44	4.99	4.86	4.83	4.63	4.98
960	5.03	5.03	4.70	4.67	5.02	5.09	4.65	4.55	4.70	4.62	5.20	5.05	5.04	4.81	5.21
1080	5.23	5.20	4.89	4.81	5.21	5.19	4.84	4.76	4.92	4.77	5.36	5.21	5.23	4.94	5.39
1200	5.41	5.36	5.05	4.94	5.36	5.25	5.02	4.92	5.10	4.90	5.50	5.35	5.40	5.03	5.54
1320	5.55	5.48	5.20	5.04	5.48	5.34	5.17	5.07	5.24	5.02	5.61	5.46	5.53	5.09	5.68
1440	5.65	5.57	5.36	5.12	5.58	5.43	5.30	5.20	5.40	5.11	5.68	5.55	5.65	5.14	5.79
1560	5.77	5.70	5.49	5.17	5.68	5.51	5.42	5.32	5.51	5.20	5.71	5.65	5.77	5.21	5.89
1680	5.86	5.80	5.61	5.22	5.76	5.58	5.55	5.41	5.62	5.28	5.74	5.74	5.86	5.29	5.98
1800	5.95	5.91	5.69	5.28	5.82	5.64	5.66	5.52	5.71	5.34	5.79	5.81	5.93	5.36	6.06

ตารางที่ ง-3 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 14 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 14 U/min			Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min		
	DO (mg/L)			DO (mg/L)			DO (mg/L)			DO (mg/L)			DO (mg/L)			DO (mg/L)		
	ครั้งที่1 (t=25.1°C)	ครั้งที่2 (t=23.9°C)	ครั้งที่3 (t=25°C)	ครั้งที่1 (t=22.7°C)	ครั้งที่2 (t=23°C)	ครั้งที่3 (t=23.6°C)	ครั้งที่1 (t=24°C)	ครั้งที่2 (t=24.3°C)	ครั้งที่3 (t=24.5°C)	ครั้งที่1 (t=25.1°C)	ครั้งที่2 (t=23.6°C)	ครั้งที่3 (t=24.9°C)	ครั้งที่1 (t=23.8°C)	ครั้งที่2 (t=25°C)	ครั้งที่3 (t=23.9°C)	ครั้งที่1 (t=23.9°C)	ครั้งที่2 (t=23°C)	ครั้งที่3 (t=24.6°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
120	2.12	2.04	2.02	2.21	2.26	2.29	1.86	1.79	1.93	2.12	2.05	2.16	2.06	2.07	1.92	2.15	2.16	
240	3.15	3.14	3.06	3.31	3.41	3.38	2.68	2.70	2.93	3.09	3.00	3.21	2.97	3.02	2.81	3.21	3.23	
360	3.90	3.93	3.78	4.11	4.20	4.17	3.29	3.38	3.63	3.81	3.66	3.94	3.62	3.70	3.42	3.93	4.00	
480	4.41	4.51	4.32	4.68	4.80	4.76	3.80	3.87	4.16	4.36	4.16	4.44	4.08	4.18	3.86	4.45	4.46	
600	4.79	4.98	4.71	5.10	5.24	5.24	4.16	4.25	4.54	4.79	4.53	4.76	4.43	4.54	4.19	4.82	4.77	
720	5.05	5.34	5.03	5.41	5.59	5.62	4.41	4.53	4.81	5.11	4.83	4.96	4.69	4.83	4.45	5.10	5.04	
840	5.23	5.59	5.28	5.67	5.88	5.91	4.63	4.73	5.03	5.32	5.07	5.16	4.89	5.04	4.69	5.25	5.28	
960	5.39	5.79	5.49	5.87	6.11	6.16	4.83	4.92	5.21	5.46	5.27	5.33	5.07	5.19	4.87	5.38	5.47	
1080	5.53	5.94	5.65	6.01	6.29	6.35	5.07	5.08	5.38	5.54	5.42	5.47	5.22	5.28	5.00	5.50	5.60	
1200	5.63	6.08	5.79	6.13	6.40	6.51	5.27	5.21	5.51	5.64	5.57	5.57	5.30	5.36	5.09	5.64	5.70	
1320	5.78	6.19	5.90	6.23	6.53	6.63	5.45	5.32	5.62	5.75	5.66	5.67	5.39	5.43	5.22	5.74	5.77	
1440	5.90	6.33	6.00	6.33	6.63	6.74	5.54	5.43	5.71	5.83	5.72	5.75	5.49	5.49	5.33	5.82	5.87	
1560	5.99	6.46	6.09	6.42	6.72	6.83	5.58	5.47	5.74	5.90	5.82	5.82	5.58	5.56	5.42	5.89	5.94	
1680	6.08	6.56	6.16	6.52	6.78	6.90	5.64	5.50	5.77	5.96	5.91	5.87	5.65	5.63	5.52	5.94	6.00	
1800	6.14	6.65	6.22	6.61	6.81	6.94	5.72	5.55	5.81	6.00	5.96	5.91	5.70	5.70	5.61	6.00	5.98	

ตารางที่ ง-4 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 12 V/min			Air 10 V/min			Air 6 V/min			Air 2 V/min			Air 1 V/min		
	ครั้งที่1 (t=24.8°C)	ครั้งที่2 (t=24.5°C)	ครั้งที่3 (t=23.6°C)	ครั้งที่1 (t=23.8°C)	ครั้งที่2 (t=23.9°C)	ครั้งที่3 (t=24.1°C)	ครั้งที่1 (t=24°C)	ครั้งที่2 (t=23.7°C)	ครั้งที่3 (t=24.2°C)	ครั้งที่1 (t=24.7°C)	ครั้งที่2 (t=23.5°C)	ครั้งที่3 (t=24.7°C)	ครั้งที่1 (t=25°C)	ครั้งที่2 (t=25.7°C)	ครั้งที่3 (t=24.4°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.37	2.45	2.29	2.14	2.17	2.31	2.53	1.96	2.08	2.09	2.27	2.17	2.53	2.39	2.14
240	3.46	3.52	3.34	3.12	3.28	3.33	3.66	3.08	3.15	3.07	3.31	3.09	3.54	3.40	3.26
360	4.18	4.26	4.06	3.85	4.00	3.96	4.34	3.79	3.85	3.78	3.91	3.72	4.20	4.00	3.96
480	4.67	4.75	4.61	4.37	4.49	4.43	4.82	4.25	4.34	4.32	4.36	4.21	4.69	4.45	4.41
600	5.04	5.12	5.02	4.76	4.84	4.79	5.15	4.61	4.69	4.72	4.66	4.56	4.98	4.74	4.74
720	5.32	5.37	5.33	5.08	5.09	5.06	5.42	4.86	4.95	5.00	4.90	4.81	5.15	5.00	5.00
840	5.52	5.59	5.59	5.31	5.28	5.28	5.56	5.07	5.16	5.25	5.11	5.01	5.24	5.20	5.20
960	5.64	5.76	5.81	5.50	5.41	5.46	5.62	5.26	5.32	5.45	5.23	5.21	5.30	5.32	5.34
1080	5.71	5.83	5.96	5.66	5.46	5.60	5.65	5.41	5.46	5.61	5.36	5.37	5.41	5.43	5.43
1200	5.82	5.90	6.05	5.78	5.52	5.71	5.74	5.53	5.57	5.74	5.48	5.49	5.49	5.54	5.55
1320	5.89	5.97	6.13	5.88	5.59	5.82	5.82	5.62	5.67	5.80	5.58	5.58	5.53	5.65	5.64
1440	5.95	6.07	6.23	5.97	5.66	5.89	5.90	5.73	5.74	5.89	5.64	5.65	5.57	5.74	5.69
1560	5.97	6.14	6.29	6.09	5.70	5.97	5.92	5.78	5.79	5.99	5.68	5.73	5.60	5.79	5.69
1680	6.01	6.19	6.30	6.21	5.74	6.04	5.98	5.84	5.86	6.06	5.75	5.79	5.65	5.85	5.67
1800	6.10	6.25	6.34	6.28	5.78	6.09	6.03	5.86	5.91	6.12	5.86	5.84	5.68	5.92	5.71

ตารางที่ ง-5 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min		
	ครั้งที่1 (t=23.5°C)	ครั้งที่2 (t=24.6°C)	ครั้งที่3 (t=23.3°C)	ครั้งที่1 (t=23.7°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=23.7°C)	ครั้งที่1 (t=24.1°C)	ครั้งที่2 (t=23.1°C)	ครั้งที่3 (t=23.5°C)	ครั้งที่1 (t=23.5°C)	ครั้งที่2 (t=24.2°C)	ครั้งที่3 (t=24°C)	ครั้งที่1 (t=23.5°C)	ครั้งที่2 (t=21.6°C)	ครั้งที่3 (t=23.3°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.98	3.51	3.06	2.94	3.27	2.80	3.23	3.18	3.08	3.02	3.02	2.75	3.02	2.93	2.98
240	4.31	4.78	4.46	4.30	4.69	4.16	4.63	4.58	4.50	4.39	4.24	4.08	4.45	4.33	4.33
360	5.16	5.43	5.38	5.21	5.45	5.06	5.51	5.45	5.41	5.28	4.95	4.97	5.39	5.26	5.21
480	5.70	5.78	5.95	5.81	5.87	5.68	6.04	6.03	6.03	5.85	5.39	5.58	6.00	5.88	5.80
600	6.11	6.00	6.31	6.20	6.10	6.11	6.39	6.40	6.49	6.27	5.73	5.98	6.41	6.32	6.19
720	6.34	6.15	6.59	6.47	6.21	6.39	6.61	6.68	6.81	6.57	5.98	6.27	6.70	6.63	6.42
840	6.54	6.27	6.81	6.68	6.29	6.56	6.77	6.87	7.04	6.77	6.16	6.48	6.88	6.85	6.61
960	6.66	6.36	6.97	6.87	6.37	6.65	6.89	7.01	7.21	6.92	6.29	6.63	6.96	7.04	6.77
1080	6.80	6.44	7.10	7.01	6.43	6.73	6.96	7.10	7.30	7.04	6.40	6.74	7.01	7.16	6.89
1200	6.90	6.52	7.18	7.08	6.50	6.85	7.03	7.17	7.36	7.12	6.44	6.84	7.04	7.24	6.99
1320	6.95	6.56	7.24	7.10	6.58	6.92	7.07	7.23	7.40	7.18	6.49	6.90	7.10	7.34	7.06
1440	7.02	6.62	7.33	7.08	6.62	6.98	7.16	7.26	7.42	7.24	6.53	6.93	7.15	7.39	7.11
1560	7.03	6.67	7.37	7.07	6.64	7.03	7.17	7.32	7.45	7.26	6.57	6.91	7.20	7.42	7.16
1680	7.04	6.71	7.40	7.07	6.68	7.07	7.16	7.37	7.48	7.22	6.61	6.88	7.23	7.48	7.15
1800	7.03	6.74	7.41	7.07	6.71	7.10	7.11	7.39	7.50	7.17	6.64	6.88	7.26	7.52	7.18

ตารางที่ ง-6 การดูซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min			Air 0.5 U/min		
	ครั้งที่1 (t=24.2°C)	ครั้งที่2 (t=24°C)	ครั้งที่3 (t=24.3°C)	ครั้งที่1 (t=23.9°C)	ครั้งที่2 (t=24.2°C)	ครั้งที่3 (t=24°C)	ครั้งที่1 (t=24.3°C)	ครั้งที่2 (t=24.5°C)	ครั้งที่3 (t=24.5°C)	ครั้งที่1 (t=24.5°C)	ครั้งที่2 (t=24.4°C)	ครั้งที่3 (t=24.6°C)	ครั้งที่1 (t=24.8°C)	ครั้งที่2 (t=24.2°C)	ครั้งที่3 (t=24.3°C)	ครั้งที่1 (t=24.7°C)	ครั้งที่2 (t=24.7°C)	ครั้งที่3 (t=24.6°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	4.53	4.72	4.58	4.50	4.58	4.51	4.68	4.08	4.79	4.66	4.56	4.52	4.59	4.56	4.65	4.73	4.66	4.66
240	6.07	6.23	6.09	6.00	6.11	6.09	6.20	5.67	6.38	6.27	6.15	6.19	6.32	6.17	6.28	6.39	6.33	6.33
360	6.83	6.89	6.85	6.75	6.83	6.87	6.95	6.45	7.12	6.99	6.94	7.04	7.15	6.96	7.10	7.22	7.16	7.16
480	7.23	7.20	7.24	7.15	7.18	7.27	7.33	6.86	7.50	7.31	7.32	7.49	7.59	7.35	7.53	7.64	7.59	7.59
600	7.46	7.35	7.45	7.37	7.33	7.47	7.56	7.13	7.72	7.43	7.50	7.75	7.78	7.55	7.80	7.86	7.81	7.81
720	7.59	7.42	7.55	7.50	7.43	7.54	7.65	7.30	7.85	7.56	7.62	7.89	7.90	7.67	7.94	7.99	7.94	7.94
840	7.68	7.50	7.60	7.58	7.49	7.56	7.76	7.42	7.92	7.65	7.71	7.98	7.97	7.75	8.01	8.06	8.01	8.01
960	7.73	7.53	7.62	7.63	7.54	7.57	7.79	7.49	7.94	7.71	7.75	8.04	8.05	7.76	8.07	8.09	8.07	8.07
1080	7.79	7.57	7.63	7.65	7.55	7.54	7.84	8.03	7.95	7.73	7.77	8.09	8.09	7.77	8.08	8.13	8.10	8.10
1200	7.78	7.59	7.62	7.69	7.59	7.49	7.87	8.07	7.94	7.77	7.81	8.11	8.10	7.76	8.10	8.16	8.12	8.12



ตารางที่ 7-7 การดูดซับก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตร ต่อนาที ปนเปื้อนสาร SLS ความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 1 U/min																	
	0.2 CMC			0.7 CMC			1 CMC			1.5 CMC			2 CMC			3 CMC		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
	ครั้งที่1 (t=24.0°C)	ครั้งที่2 (t=24.3°C)	ครั้งที่3 (t=24.2°C)	ครั้งที่1 (t=23.3°C)	ครั้งที่2 (t=24°C)	ครั้งที่3 (t=25°C)	ครั้งที่1 (t=25°C)	ครั้งที่2 (t=25.1°C)	ครั้งที่3 (t=25°C)	ครั้งที่1 (t=24.6°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=24.3°C)	ครั้งที่1 (t=24°C)	ครั้งที่2 (t=23.4°C)	ครั้งที่3 (t=24°C)	ครั้งที่1 (t=23.6°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=24.2°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
120	4.92	3.76	3.86	4.84	4.68	4.61	4.63	4.63	3.65	4.05	4.31	4.93	4.83	5.01	4.71	4.21	4.70	
240	6.13	5.22	5.25	5.71	5.68	5.63	5.49	4.78	4.50	4.88	5.20	5.77	5.84	5.93	5.62	5.14	5.49	
360	6.54	6.07	6.06	6.05	6.21	6.02	5.80	5.49	5.01	5.27	5.50	5.98	6.15	6.22	5.93	5.52	5.75	
480	6.72	6.62	6.51	6.25	6.55	6.27	6.03	5.96	5.37	5.56	5.68	6.11	6.28	6.40	6.11	5.75	5.91	
600	6.91	6.98	6.85	6.38	6.81	6.46	6.20	6.30	5.63	5.79	5.82	6.22	6.38	6.58	6.25	5.98	6.05	
720	7.05	7.28	7.09	6.48	6.99	6.60	6.35	6.53	5.79	5.96	5.92	6.36	6.44	6.73	6.34	6.19	6.16	
840	7.18	7.46	7.27	6.57	7.11	6.70	6.46	6.63	5.94	6.10	5.98	6.48	6.47	6.85	6.42	6.32	6.24	
960	7.26	7.60	7.34	6.69	7.20	6.78	6.56	6.66	6.05	6.18	6.04	6.57	6.49	6.97	6.46	6.36	6.28	
1080	7.25	7.63	7.36	6.78	7.30	6.84	6.64	6.70	6.13	6.26	6.10	6.62	6.46	7.02	6.53	6.43	6.33	
1200	7.28	7.64	7.39	6.82	7.36	6.91	6.70	6.75	6.20	6.33	6.13	6.65	6.42	7.08	6.59	6.52	6.37	

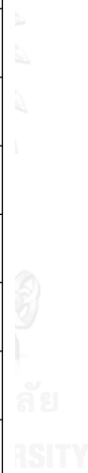
ตารางที่ ๗-8 การดูดซับก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตร ต่อนาที ปนเปื้อนสาร Tween 80 ความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 1 l/min																	
	0.2 CMC			0.7 CMC			1 CMC			1.5 CMC			2 CMC			3 CMC		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
	ครั้งที่1 (t=24.9°C)	ครั้งที่2 (t=24.6°C)	ครั้งที่3 (t=23.7°C)	ครั้งที่1 (t=23.4°C)	ครั้งที่2 (t=24°C)	ครั้งที่3 (t=25.8°C)	ครั้งที่1 (t=23.4°C)	ครั้งที่2 (t=22.9°C)	ครั้งที่3 (t=22.3°C)	ครั้งที่1 (t=24.7°C)	ครั้งที่2 (t=25°C)	ครั้งที่3 (t=23.2°C)	ครั้งที่1 (t=24.4°C)	ครั้งที่2 (t=25°C)	ครั้งที่3 (t=23.1°C)	ครั้งที่1 (t=24.5°C)	ครั้งที่2 (t=24.6°C)	ครั้งที่3 (t=24°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
120	4.74	4.87	4.28	5.22	4.64	4.68	4.22	4.42	5.13	4.43	4.48	4.57	4.94	4.99	4.65	3.79	4.87	
240	6.26	6.35	5.94	6.72	6.13	6.13	6.01	6.33	6.67	6.00	6.16	6.30	6.15	6.37	6.22	5.39	6.40	
360	6.93	6.94	6.68	7.40	7.08	6.70	6.91	7.33	7.17	6.65	6.75	7.10	6.48	6.83	6.92	6.23	6.92	
480	7.16	7.18	7.00	7.74	7.45	6.95	7.38	7.84	7.32	6.96	6.95	7.51	6.64	7.00	7.27	6.68	7.09	
600	7.24	7.29	7.13	7.85	7.64	7.10	7.59	8.12	7.35	7.11	7.09	7.70	6.72	7.07	7.45	6.95	7.17	
720	7.30	7.31	7.20	7.87	7.71	7.23	7.72	8.29	7.38	7.18	7.16	7.76	6.80	7.11	7.53	7.07	7.22	
840	7.28	7.30	7.24	7.88	7.71	7.21	7.79	8.39	7.47	7.22	7.23	7.72	6.85	7.15	7.56	7.17	7.28	
960	7.25	7.27	7.28	7.90	7.71	7.22	7.85	8.45	7.52	7.26	7.28	7.70	6.88	7.19	7.58	7.24	7.33	
1080	7.25	7.26	7.30	7.90	7.72	7.24	7.85	8.47	7.55	7.28	7.31	7.68	6.87	7.22	7.60	7.29	7.36	
1200	7.24	7.26	7.33	7.89	7.73	7.29	7.85	8.49	7.55	7.28	7.33	7.68	6.88	7.24	7.61	7.33	7.37	



ตารางที่ ง-9 การวัดค่าออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที ปนเปื้อนสาร DPC ความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air-L/min																				
	0.2			0.7			1			1.5			2			3			4		
	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	ค่าเฉลี่ย (n=23) (t=23.3°C)	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	4.83	4.47	4.39	4.35	3.89	3.94	4.84	4.24	4.41	4.17	4.11	4.04	3.86	3.96	4.92	4.74	4.77	5.09	5.10	5.00	5.00
240	6.05	5.84	5.88	5.77	5.37	5.44	6.10	5.73	5.79	5.62	5.52	5.41	5.11	5.15	4.82	5.11	5.29	6.38	5.59	5.39	5.39
360	6.62	6.55	6.64	6.68	6.14	6.21	6.60	6.66	6.40	6.28	6.23	6.18	5.68	5.72	5.39	5.55	5.27	6.51	5.63	5.34	5.34
480	6.91	6.93	7.06	6.81	6.53	6.62	6.84	6.83	6.56	6.54	6.57	6.56	5.97	6.02	5.70	5.58	5.26	6.44	5.59	5.31	5.31
600	7.08	7.16	7.28	6.96	6.79	6.92	6.97	6.99	6.59	6.66	6.70	6.72	6.09	6.16	5.79	5.61	5.31	6.31	5.51	5.29	5.29
720	7.20	7.27	7.41	7.05	6.92	7.06	7.03	7.07	6.58	6.68	6.75	6.77	6.16	6.22	5.83	5.61	5.42	6.11	5.47	5.24	5.24
840	7.27	7.34	7.51	7.09	6.97	7.15	7.06	7.10	6.56	6.66	6.77	6.74	6.17	6.23	5.83	5.57	5.42	5.91	5.35	5.07	5.07
960	7.30	7.38	7.57	7.13	7.01	7.21	7.08	7.09	6.55	6.64	6.72	6.69	6.15	6.22	5.81	5.60	5.34	5.81	5.22	4.83	4.83
1080	7.33	7.38	7.61	7.16	7.02	7.25	7.08	7.06	6.53	6.60	6.64	6.63	6.11	6.19	5.77	5.64	5.17	5.68	5.06	4.55	4.55
1200	7.35	7.43	7.64	7.16	7.02	7.29	7.07	7.03	6.50	6.53	6.57	6.56	6.03	6.14	5.72	5.68	5.03	5.64	4.87	4.30	4.30



ตารางที่ ง-10 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที ปนเป็นความชุ่ม 50 ถึง 800 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

time(s)	Air 1 L/min														
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l			400 mg/l			800 mg/l		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
0	ครั้งที่1 (t=24.7°C)	ครั้งที่2 (t=25.3°C)	ครั้งที่3 (t=24.7°C)	ครั้งที่1 (t=23.9°C)	ครั้งที่2 (t=24.7°C)	ครั้งที่3 (t=24.2°C)	ครั้งที่1 (t=23.9°C)	ครั้งที่2 (t=25°C)	ครั้งที่3 (t=25.4°C)	ครั้งที่1 (t=24.2°C)	ครั้งที่2 (t=24.4°C)	ครั้งที่3 (t=24.4°C)	ครั้งที่1 (t=23.8°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=24°C)
120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	4.22	4.24	3.84	4.14	4.16	4.62	4.04	4.13	4.60	4.36	4.66	4.62	4.81	4.33	4.82
360	5.79	5.89	5.60	5.87	5.80	6.18	5.64	5.74	6.05	6.00	6.09	5.99	6.25	5.92	6.31
480	6.62	6.69	6.58	6.73	6.65	6.91	6.48	6.56	6.75	6.87	6.76	6.61	6.94	6.73	6.97
600	7.06	7.11	7.13	7.20	7.12	7.25	6.94	6.95	7.11	7.36	7.10	6.92	7.30	7.16	7.31
720	7.34	7.34	7.45	7.48	7.39	7.44	7.24	7.15	7.33	7.66	7.30	7.10	7.49	7.33	7.51
840	7.49	7.49	7.65	7.68	7.55	7.57	7.40	7.27	7.46	7.83	7.44	7.22	7.62	7.49	7.60
960	7.59	7.58	7.77	7.80	7.67	7.61	7.50	7.34	7.56	7.94	7.52	7.32	7.74	7.57	7.68
1080	7.64	7.65	7.85	7.88	7.73	7.64	7.54	7.38	7.62	7.99	7.55	7.40	7.81	7.64	7.76
1200	7.69	7.65	7.92	7.93	7.77	7.65	7.61	7.35	7.67	8.04	7.54	7.45	7.85	7.71	7.79
	7.73	7.67	7.99	7.99	7.77	7.65	7.62	7.31	7.71	8.08	7.53	7.51	7.86	7.80	7.80

ตารางที่ ง-11 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 V/min			Air 10 V/min			Air 6 V/min			Air 2 V/min			Air 1 V/min		
	DO (mg/L)			DO (mg/L)			DO (mg/L)			DO (mg/L)			DO (mg/L)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	(t=23.7°C)	(t=21.9°C)	(t=24.9°C)	(t=24.6°C)	(t=24.7°C)	(t=25.1°C)	(t=25°C)	(t=24.7°C)	(t=24.2°C)	(t=24.9°C)	(t=24.6°C)	(t=25.1°C)	(t=24.7°C)	(t=25.3°C)	(t=25°C)
120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
240	0.77	0.83	1.13	0.86	1.12	0.93	0.79	0.95	0.95	0.46	0.73	0.69	0.39	0.75	
360	1.11	1.18	1.63	1.34	1.62	1.40	1.21	1.41	1.40	0.71	1.10	0.98	0.60	1.06	
480	1.43	1.53	2.02	1.77	2.07	1.81	1.57	1.82	1.84	0.95	1.45	1.28	0.82	1.41	
600	1.73	1.84	2.35	2.14	2.44	2.17	1.91	2.18	2.20	1.17	1.76	1.54	1.05	1.71	
720	2.02	2.12	2.63	2.45	2.75	2.47	2.20	2.51	2.51	1.42	2.04	1.80	1.28	1.99	
840	2.31	2.39	2.87	2.74	3.05	2.76	2.45	2.79	2.79	1.67	2.30	2.04	1.55	2.24	
960	2.55	2.65	3.09	3.02	3.32	3.03	2.68	3.04	3.06	1.92	2.55	2.26	1.82	2.50	
1080	2.77	2.88	3.28	3.26	3.54	3.25	2.89	3.28	3.30	2.16	2.78	2.49	2.07	2.76	
1200	2.98	3.12	3.46	3.48	3.76	3.47	3.10	3.50	3.53	2.39	3.00	2.71	2.32	2.96	
1320	3.20	3.32	3.64	3.68	3.96	3.67	3.30	3.70	3.75	2.64	3.23	2.94	2.57	3.15	
1440	3.41	3.52	3.80	3.90	4.14	3.87	3.49	3.89	3.95	2.89	0.78	0.73	2.84	3.33	
1560	3.60	3.70	3.96	4.09	4.29	4.05	3.68	4.05	4.12	3.10	0.84	0.78	3.10	3.53	
1680	3.79	3.89	4.10	4.23	4.43	4.20	3.87	4.23	4.26	3.29	0.90	0.83	3.30	3.73	
1800	3.97	4.06	4.25	4.36	4.50	4.32	4.07	4.40	4.40	3.48	0.97	0.89	3.50	3.87	
1800	4.13	4.22	4.38	4.51	4.64	4.47	4.23	4.56	4.54	3.71	1.04	0.95	3.72	4.01	

ตารางที่ ง-12 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
	ครั้งที่1 (t=23.3°C)	ครั้งที่2 (t=24.4°C)	ครั้งที่3 (t=24.6°C)	ครั้งที่1 (t=24.6°C)	ครั้งที่2 (t=23°C)	ครั้งที่3 (t=25.1°C)	ครั้งที่1 (t=25.3°C)	ครั้งที่2 (t=24.5°C)	ครั้งที่3 (t=24.5°C)	ครั้งที่1 (t=24.5°C)	ครั้งที่2 (t=25.1°C)	ครั้งที่3 (t=23.5°C)	ครั้งที่1 (t=22.8°C)	ครั้งที่2 (t=22.6°C)	ครั้งที่3 (t=22.9°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
120	1.18	1.49	1.26	0.42	0.72	1.03	1.47	1.39	1.10	0.39	0.99	0.66	0.43	0.35	
240	1.85	2.22	1.97	0.88	1.26	1.58	2.12	2.06	1.78	0.79	1.53	1.08	0.84	0.71	
360	2.39	2.79	2.51	1.31	1.73	2.03	2.62	2.57	2.32	1.20	2.00	1.46	1.25	1.06	
480	2.84	3.27	2.94	1.72	2.14	2.40	3.01	2.99	2.75	1.57	2.38	1.82	1.64	1.41	
600	3.23	3.66	3.31	2.10	2.51	2.70	3.33	3.32	3.12	1.92	2.72	2.17	2.00	1.74	
720	3.57	3.98	3.62	2.43	2.83	2.96	3.58	3.58	3.44	2.24	3.02	2.50	2.35	2.07	
840	3.86	4.26	3.87	2.77	3.13	3.19	3.80	3.83	3.72	2.55	3.27	2.82	2.67	2.37	
960	4.12	4.50	4.07	3.08	3.39	3.41	3.98	4.06	3.98	2.83	3.48	3.12	2.98	2.67	
1080	4.36	4.71	4.22	3.35	3.63	3.64	4.14	4.23	4.19	3.10	3.65	3.40	3.27	2.95	
1200	4.57	4.90	4.31	3.60	3.85	3.85	4.29	4.38	4.37	3.35	3.83	3.67	3.52	3.21	
1320	4.77	5.06	4.44	3.84	4.05	4.04	4.43	4.52	4.53	3.58	4.01	3.92	3.76	3.45	
1440	4.94	5.21	4.58	4.04	4.23	4.19	4.56	4.68	4.70	3.79	4.18	4.15	3.98	3.68	
1560	5.12	5.34	4.68	4.21	4.39	4.35	4.68	4.79	4.82	3.99	4.34	4.36	4.17	3.88	
1680	5.28	5.42	4.79	4.37	4.51	4.49	4.78	4.86	4.90	4.14	4.47	4.57	4.37	4.08	
1800	5.43	5.47	4.90	4.53	4.60	4.60	4.87	4.94	4.96	4.21	4.61	4.77	4.51	4.25	

ตารางที่ ง-13 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 14 V/min			Air 12 V/min			Air 10 V/min			Air 6 V/min			Air 2 V/min			Air 1 V/min		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
	ครั้งที่ 1 (t=23.6°C)	ครั้งที่ 2 (t=25°C)	ครั้งที่ 3 (t=23.8°C)	ครั้งที่ 1 (t=24.5°C)	ครั้งที่ 2 (t=24.5°C)	ครั้งที่ 3 (t=23.8°C)	ครั้งที่ 1 (t=24.5°C)	ครั้งที่ 2 (t=24.8°C)	ครั้งที่ 3 (t=24.6°C)	ครั้งที่ 1 (t=24.4°C)	ครั้งที่ 2 (t=23.3°C)	ครั้งที่ 3 (t=25.2°C)	ครั้งที่ 1 (t=24.1°C)	ครั้งที่ 2 (t=25.2°C)	ครั้งที่ 3 (t=23.8°C)	ครั้งที่ 1 (t=24.4°C)	ครั้งที่ 2 (t=24°C)	ครั้งที่ 3 (t=24.4°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
120	1.10	1.12	1.46	0.26	0.38	0.61	0.86	1.10	1.60	0.76	1.45	1.10	1.36	0.50	0.28	1.07	0.27	
240	1.70	1.80	2.20	0.62	0.77	1.03	1.35	1.69	2.29	1.23	2.05	1.63	2.01	1.13	0.64	1.61	0.62	
360	2.19	2.29	2.71	0.93	1.19	1.45	1.81	2.17	2.80	1.61	2.51	2.06	2.48	1.75	0.99	2.02	1.02	
480	2.55	2.69	3.07	1.26	1.61	1.89	2.21	2.59	3.19	2.01	2.86	2.44	2.84	2.32	1.36	2.38	1.41	
600	2.85	3.00	3.39	1.64	2.02	2.33	2.64	2.95	3.50	2.39	3.14	2.77	3.15	2.82	1.69	2.68	1.80	
720	3.12	3.26	3.63	2.03	2.41	2.76	3.01	3.26	3.77	2.73	3.38	3.02	3.43	3.25	2.03	2.96	2.20	
840	3.40	3.48	3.85	2.39	2.80	3.16	3.32	3.55	3.99	3.06	3.63	3.29	3.66	3.62	2.35	3.21	2.57	
960	3.63	3.68	4.05	2.71	3.14	3.54	3.55	3.80	4.17	3.39	3.83	3.54	3.86	3.93	2.65	3.45	2.85	
1080	3.83	3.87	4.23	3.02	3.45	3.86	3.79	4.02	4.33	3.69	4.02	3.75	4.01	4.22	2.92	3.67	3.10	
1200	4.02	4.03	4.42	3.30	3.69	4.15	4.05	4.20	4.49	4.66	4.20	3.97	4.17	4.48	3.16	3.88	3.40	
1320	4.19	4.19	4.60	3.55	3.95	4.41	4.28	4.37	4.61	4.85	4.21	4.37	4.21	4.35	3.33	4.06	3.87	
1440	4.37	4.34	4.76	3.77	4.19	4.68	4.48	4.49	4.73	5.02	4.44	4.52	4.42	4.52	3.49	4.25	4.35	
1560	4.51	4.52	4.93	3.96	4.41	4.89	4.64	4.61	4.84	5.17	4.57	4.66	4.59	4.66	3.59	4.42	4.74	
1680	4.64	4.72	5.09	4.19	4.60	5.09	4.80	4.73	4.94	5.29	4.71	4.78	4.75	4.76	3.72	4.58	5.15	
1800	4.83	4.89	5.24	4.48	4.77	5.26	4.95	4.85	5.03	5.38	4.92	4.91	4.87	4.87	3.99	4.72	5.44	

ตารางที่ ง-14 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 V/min			Air 10 V/min			Air 6 V/min			Air 2 V/min			Air 1 V/min		
	ครั้งที่1 (t=23.9°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=24.3°C)	ครั้งที่1 (t=25°C)	ครั้งที่2 (t=24.8°C)	ครั้งที่3 (t=24.5°C)	ครั้งที่1 (t=24.4°C)	ครั้งที่2 (t=24°C)	ครั้งที่3 (t=24.3°C)	ครั้งที่1 (t=24°C)	ครั้งที่2 (t=24.6°C)	ครั้งที่3 (t=24.5°C)	ครั้งที่1 (t=24.5°C)	ครั้งที่2 (t=24°C)	ครั้งที่3 (t=24.4°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.71	1.18	0.92	0.86	1.18	0.55	1.22	1.48	1.19	1.53	1.33	1.09	0.50	0.92	
240	1.05	1.63	1.28	1.23	1.58	1.04	1.72	2.02	1.67	1.97	1.75	1.55	0.82	1.32	
360	1.43	2.07	1.63	1.67	1.93	1.58	2.12	2.43	2.08	2.31	2.03	1.96	1.24	1.70	
480	1.86	2.51	1.97	2.15	2.31	2.10	2.52	2.78	2.45	2.64	2.34	2.37	1.75	2.13	
600	2.31	2.93	2.37	2.60	2.68	2.59	2.90	3.10	2.79	2.97	2.62	2.76	2.25	2.53	
720	2.72	3.28	2.74	2.98	3.03	3.04	3.23	3.40	3.12	3.30	2.92	3.11	2.70	2.90	
840	3.13	3.59	3.12	3.31	3.35	3.47	3.51	3.69	3.42	3.61	3.21	3.44	3.15	3.27	
960	3.52	3.93	3.49	3.60	3.65	3.87	3.74	3.96	3.71	3.91	3.49	3.74	3.55	3.60	
1080	3.90	4.40	3.88	3.87	3.95	4.23	3.98	4.22	3.99	4.18	3.75	4.02	3.91	3.91	
1200	4.22	4.90	4.20	4.12	4.22	4.56	4.24	4.45	4.25	4.45	4.00	4.29	4.24	4.19	
1320	4.50	5.34	4.47	4.41	4.46	4.84	4.48	4.68	4.48	4.69	4.22	4.54	4.53	4.45	
1440	4.76	5.70	4.70	4.77	4.68	5.06	4.69	4.85	4.70	4.91	4.43	4.76	4.82	4.70	
1560	5.01	6.00	4.90	5.10	4.85	5.29	4.87	5.01	4.89	5.12	4.61	4.97	5.12	4.93	
1680	5.25	6.25	5.07	5.39	5.03	5.51	5.04	5.17	5.07	5.31	4.77	5.17	5.43	5.16	
1800	5.48	6.45	5.25	5.62	5.23	5.69	5.21	5.33	5.23	5.48	4.91	5.37	5.72	5.38	

ตารางที่ ง-15 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 V/min			Air 10 V/min			Air 6 V/min			Air 2 V/min			Air 1 V/min		
	ครั้งที่1 (t=23.4°C)	ครั้งที่2 (t=24.7°C)	ครั้งที่3 (t=23.4°C)	ครั้งที่1 (t=23.8°C)	ครั้งที่2 (t=24.6°C)	ครั้งที่3 (t=24.6°C)	ครั้งที่1 (t=24°C)	ครั้งที่2 (t=23.9°C)	ครั้งที่3 (t=23.6°C)	ครั้งที่1 (t=25°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=24.4°C)	ครั้งที่1 (t=24.1°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=23.3°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	3.31	2.77	2.84	2.51	2.79	3.06	3.00	3.34	2.76	2.73	2.48	2.44	1.03	2.02	2.82
240	4.47	3.99	4.13	3.66	4.10	4.28	4.26	4.70	4.14	3.93	3.74	3.66	2.18	3.27	4.18
360	5.16	4.81	4.96	4.42	5.00	4.95	5.06	5.43	5.02	4.64	4.54	4.45	3.16	4.16	5.06
480	5.58	5.40	5.52	4.95	5.60	5.40	5.56	5.86	5.60	5.08	5.09	4.96	3.92	4.80	5.66
600	5.88	5.85	5.93	5.33	6.08	5.74	5.95	6.12	5.99	5.39	5.47	5.30	4.50	5.25	6.10
720	6.10	6.20	6.22	5.60	6.40	5.99	6.21	6.27	6.27	5.63	5.74	5.54	4.96	5.62	6.40
840	6.29	6.44	6.49	5.85	6.64	6.17	6.39	6.35	6.44	5.82	5.91	5.69	5.26	5.90	6.61
960	6.45	6.66	6.66	6.03	6.85	6.33	6.53	6.41	6.52	5.95	5.99	5.80	5.53	6.11	6.75
1080	6.59	6.85	6.78	6.17	6.99	6.44	6.61	6.49	6.62	6.05	6.06	5.93	5.78	6.30	6.86
1200	6.67	7.00	6.88	6.28	7.12	6.56	6.67	6.56	6.72	6.12	6.08	6.01	5.95	6.46	6.97
1320	6.76	7.08	6.94	6.37	7.22	6.64	6.70	6.62	6.80	6.19	6.11	6.08	6.11	6.57	7.04
1440	6.83	7.13	6.99	6.44	7.30	6.72	6.65	6.67	6.88	6.23	6.21	6.13	6.24	6.68	7.13
1560	6.88	7.09	7.03	6.48	7.36	6.79	6.62	6.71	6.94	6.27	6.29	6.17	6.34	6.76	7.18
1680	6.93	7.07	7.02	6.52	7.41	6.84	6.63	6.72	6.97	6.31	6.34	6.22	6.43	6.82	7.22
1800	6.97	7.09	6.95	6.56	7.45	6.90	6.65	6.75	6.95	6.33	6.37	6.25	6.51	6.82	7.25

ตารางที่ ง-16 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด B จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min		
	ครั้งที่1 (t=23°C)	ครั้งที่2 (t=22.8°C)	ครั้งที่3 (t=21.9°C)	ครั้งที่1 (t=21.8°C)	ครั้งที่2 (t=22.9°C)	ครั้งที่3 (t=23°C)	ครั้งที่1 (t=21.2°C)	ครั้งที่2 (t=23.1°C)	ครั้งที่3 (t=23.1°C)	ครั้งที่1 (t=23.3°C)	ครั้งที่2 (t=22.7°C)	ครั้งที่3 (t=23.2°C)	ครั้งที่1 (t=22.8°C)	ครั้งที่2 (t=21.9°C)	ครั้งที่3 (t=23.3°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	4.67	4.18	4.66	4.85	4.34	4.81	4.76	5.31	4.83	5.22	4.20	4.41	4.16	4.46	4.40
240	6.08	5.68	5.96	6.19	5.74	6.14	6.22	6.49	6.21	6.67	5.77	6.04	5.70	6.06	5.93
360	6.75	6.44	6.51	6.70	6.35	6.80	6.88	6.90	6.79	7.29	6.57	6.85	6.56	6.93	6.65
480	7.03	6.87	6.77	6.94	6.66	7.11	7.21	7.01	7.06	7.58	7.00	7.30	7.04	7.45	7.02
600	7.19	7.14	6.89	7.00	6.80	7.29	7.40	7.02	7.17	7.73	7.25	7.58	7.33	7.75	7.24
720	7.27	7.34	6.99	7.00	6.88	7.37	7.51	6.99	7.19	7.79	7.42	7.75	7.53	7.84	7.34
840	7.33	7.44	7.03	7.07	6.88	7.41	7.60	6.97	7.16	7.84	7.51	7.88	7.55	7.94	7.43
960	7.34	7.47	7.09	7.12	6.81	7.42	7.67	6.89	7.11	7.87	7.56	7.97	7.61	8.07	7.50
1080	7.34	7.47	7.13	7.16	6.72	7.37	7.71	6.84	7.13	7.89	7.56	8.03	7.69	8.16	7.55
1200	7.34	7.42	7.16	7.19	6.73	7.30	7.75	6.82	7.09	7.91	7.54	8.09	7.74	8.24	7.59

ตารางที่ ง-17 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min		
	ครั้งที่1 (t=23.6°C)	ครั้งที่2 (t=23.8°C)	ครั้งที่3 (t=24°C)	ครั้งที่1 (t=23.9°C)	ครั้งที่2 (t=24.7°C)	ครั้งที่3 (t=24.2°C)	ครั้งที่1 (t=23.6°C)	ครั้งที่2 (t=23.5°C)	ครั้งที่3 (t=23.8°C)	ครั้งที่1 (t=23.6°C)	ครั้งที่2 (t=23.5°C)	ครั้งที่3 (t=24°C)	ครั้งที่1 (t=25°C)	ครั้งที่2 (t=23.5°C)	ครั้งที่3 (t=23.5°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.11	0.90	1.17	0.72	0.62	0.72	0.84	0.59	0.59	0.73	0.87	0.97	0.52	0.93	0.77
240	1.58	1.16	1.71	0.82	0.76	1.13	1.13	0.72	0.85	0.92	1.20	1.48	0.60	1.12	0.96
360	1.98	1.45	2.10	1.07	1.00	1.42	1.45	0.93	1.04	1.13	1.57	1.85	0.79	1.42	1.22
480	2.35	1.74	2.43	1.28	1.17	1.65	1.73	1.08	1.18	1.29	1.85	2.15	0.93	1.64	1.41
600	2.67	2.01	2.71	1.54	1.35	1.88	2.02	1.21	1.29	1.47	2.12	2.31	1.06	1.85	1.60
720	2.92	2.30	2.95	1.79	1.59	2.13	2.25	1.33	1.37	1.63	2.33	2.44	1.17	2.02	1.75
840	3.12	2.56	3.17	2.03	1.82	2.34	2.47	1.45	1.44	1.75	2.52	2.58	1.28	2.18	1.89
960	3.29	2.80	3.37	2.27	2.03	2.55	2.67	1.63	1.50	1.86	2.66	2.69	1.34	2.31	2.02
1080	3.43	3.02	3.54	2.49	2.23	2.77	2.81	1.83	1.58	1.97	2.77	2.78	1.41	2.43	2.14
1200	3.54	3.19	3.70	2.68	2.41	2.96	2.97	1.98	1.69	2.09	2.89	2.89	1.48	2.54	2.25
1320	3.64	3.34	3.83	2.84	2.60	3.14	3.13	2.14	1.79	2.20	3.00	2.99	1.54	2.64	2.36
1440	3.72	3.48	3.95	2.97	2.79	3.30	3.27	2.29	1.88	2.29	3.11	3.08	1.59	2.75	2.46
1560	3.80	3.64	4.06	3.11	2.94	3.45	3.38	2.47	1.98	2.37	3.22	3.16	1.63	2.87	2.57
1680	3.89	3.77	4.15	3.26	3.06	3.58	3.46	2.59	2.07	2.45	3.31	3.24	1.68	2.97	2.66
1800	3.95	3.85	4.25	3.38	3.18	3.71	3.55	2.70	2.16	2.56	3.37	3.32	1.72	3.08	2.76

ตารางที่ ง-19 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 14 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 14 U/min			Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
	ครั้งที่ 1 (t=23.7°C)	ครั้งที่ 2 (t=24.1°C)	ครั้งที่ 3 (t=24°C)	ครั้งที่ 1 (t=24.2°C)	ครั้งที่ 2 (t=23.4°C)	ครั้งที่ 3 (t=24°C)	ครั้งที่ 1 (t=24.8°C)	ครั้งที่ 2 (t=28.5°C)	ครั้งที่ 3 (t=26°C)	ครั้งที่ 1 (t=25.6°C)	ครั้งที่ 2 (t=25.6°C)	ครั้งที่ 3 (t=22.8°C)	ครั้งที่ 1 (t=23.3°C)	ครั้งที่ 2 (t=23.7°C)	ครั้งที่ 3 (t=22.7°C)	ครั้งที่ 1 (t=24.6°C)	ครั้งที่ 2 (t=24.6°C)	ครั้งที่ 3 (t=24.6°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
120	1.23	1.19	1.38	1.62	1.34	1.53	1.38	1.44	1.52	1.21	1.29	1.31	1.47	1.44	1.07	1.15	1.21	
240	1.69	1.70	1.93	2.14	1.84	2.03	1.93	2.06	2.05	1.73	1.80	1.88	2.01	1.98	1.59	1.64	1.64	
360	2.02	2.04	2.29	2.47	2.14	2.38	2.33	2.46	2.38	2.08	2.18	2.25	2.38	2.33	1.93	1.98	1.95	
480	2.32	2.37	2.59	2.70	2.35	2.63	2.62	2.72	2.61	2.34	2.47	2.51	2.68	2.63	2.19	2.22	2.19	
600	2.83	2.81	2.98	2.84	2.49	2.80	2.84	2.96	2.78	2.55	2.71	2.73	2.96	2.88	2.38	2.42	2.37	
720	3.21	3.20	3.28	2.95	2.70	2.99	3.01	3.14	2.90	2.73	2.90	2.92	3.19	3.08	2.54	2.59	2.51	
840	3.52	3.54	3.57	3.05	2.95	3.23	3.14	3.33	3.02	2.90	3.07	3.10	3.32	3.26	2.67	2.72	2.62	
960	3.76	3.84	3.81	3.16	3.21	3.49	3.24	3.49	3.15	3.04	3.21	3.27	3.45	3.42	2.78	2.84	2.73	
1080	3.95	4.10	4.00	3.24	3.45	3.76	3.32	3.64	3.29	3.19	3.34	3.41	3.59	3.57	2.88	2.94	2.81	
1200	4.11	4.32	4.17	3.38	3.67	3.99	3.40	3.78	3.44	3.32	3.45	3.51	3.73	3.69	2.96	3.01	2.89	
1320	4.25	4.50	4.32	3.58	3.86	4.17	3.50	3.89	3.56	3.44	3.58	3.62	3.88	3.79	3.04	3.10	2.96	
1440	4.39	4.67	4.45	3.78	4.03	4.32	3.63	4.00	3.69	3.56	3.71	3.76	3.96	3.87	3.11	3.16	3.02	
1560	4.50	4.81	4.56	3.95	4.17	4.46	3.76	4.10	3.80	3.66	3.84	3.89	3.99	3.98	3.17	3.22	3.08	
1680	4.60	4.93	4.66	4.08	4.29	4.60	3.89	4.18	3.89	3.75	3.96	3.99	4.05	4.08	3.24	3.28	3.13	
1800	4.69	5.04	4.75	4.17	4.41	4.74	4.01	4.25	3.97	3.84	4.08	4.12	4.13	4.15	3.30	3.33	3.18	

ตารางที่ ง-20 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด C จำนวน 5 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min		
	ครั้งที่1 (t=24.2°C)	ครั้งที่2 (t=23.1°C)	ครั้งที่3 (t=23.6°C)	ครั้งที่1 (t=24.1°C)	ครั้งที่2 (t=23.9°C)	ครั้งที่3 (t=24.3°C)	ครั้งที่1 (t=23.8°C)	ครั้งที่2 (t=25.2°C)	ครั้งที่3 (t=25.4°C)	ครั้งที่1 (t=24.8°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=25°C)	ครั้งที่1 (t=24.4°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=24.2°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.83	1.66	1.26	1.53	1.35	1.44	1.21	1.75	1.38	1.39	1.51	1.06	1.46	1.29	1.83
240	2.38	2.18	1.82	1.99	1.90	1.89	1.75	2.29	1.91	1.95	2.06	1.53	1.98	1.82	2.36
360	2.70	2.50	2.12	2.25	2.22	2.15	2.07	2.61	2.24	2.32	2.41	1.84	2.26	2.18	2.57
480	2.94	2.93	2.32	2.44	2.44	2.36	2.28	2.81	2.46	2.58	2.64	2.06	2.43	2.41	2.70
600	3.19	3.15	2.54	2.57	2.60	2.51	2.44	2.97	2.62	2.77	2.81	2.22	2.56	2.56	2.80
720	3.49	3.39	2.79	2.74	2.75	2.69	2.58	3.08	2.75	2.93	2.93	2.34	2.65	2.67	2.89
840	3.72	3.67	3.05	2.92	2.95	2.92	2.69	3.17	2.86	3.06	3.04	2.42	2.73	2.76	2.95
960	3.91	3.94	3.29	3.11	3.14	3.15	2.78	3.30	3.01	3.14	3.12	2.48	2.79	2.83	3.00
1080	4.06	4.19	3.48	3.30	3.34	3.38	2.87	3.44	3.17	3.21	3.20	2.53	2.85	2.87	3.06
1200	4.20	4.40	3.64	3.47	3.55	3.59	2.99	3.54	3.33	3.27	3.26	2.58	2.90	2.94	3.11
1320	4.30	4.57	3.80	3.61	3.74	3.79	3.14	3.65	3.50	3.34	3.33	2.63	2.94	2.99	3.15
1440	4.38	4.72	3.93	3.76	3.91	3.96	3.27	3.75	3.68	3.41	3.38	2.68	2.99	3.04	3.19
1560	4.47	4.85	4.05	3.88	4.06	4.12	3.41	3.85	3.84	3.46	3.44	2.72	3.02	3.09	3.23
1680	4.54	4.97	4.16	3.99	4.20	4.25	3.55	3.96	3.99	3.51	3.49	2.76	3.06	3.14	3.27
1800	4.57	5.07	4.26	4.08	4.31	4.37	3.68	4.04	4.12	3.55	3.53	2.80	3.09	3.19	3.30

ตารางที่ ง-21 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกปรับสภาพพื้นผิว จำนวน 5 เส้น ที่ อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 V/min			Air 10 V/min			Air 6 V/min			Air 2 V/min			Air 1 V/min		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
	ครั้งที่1 (t=23.2°C)	ครั้งที่2 (t=24.3°C)	ครั้งที่3 (t=23.8°C)	ครั้งที่1 (t=23°C)	ครั้งที่2 (t=24.9°C)	ครั้งที่3 (t=24.5°C)	ครั้งที่1 (t=25°C)	ครั้งที่2 (t=25.5°C)	ครั้งที่3 (t=24.1°C)	ครั้งที่1 (t=23.9°C)	ครั้งที่2 (t=24.8°C)	ครั้งที่3 (t=23.9°C)	ครั้งที่1 (t=23.3°C)	ครั้งที่2 (t=23.4°C)	ครั้งที่3 (t=24.4°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
120	1.63	1.82	1.91	1.58	1.52	1.61	1.42	1.67	1.51	1.91	1.85	1.96	1.88	1.90	
240	2.62	2.81	2.90	2.56	2.48	2.60	2.28	2.57	2.44	2.97	2.94	3.03	2.93	2.88	
360	3.39	3.57	3.67	3.34	3.25	3.35	2.95	3.29	3.16	3.79	3.75	3.80	3.71	3.61	
480	4.02	4.19	4.29	3.97	3.86	3.94	3.52	3.88	3.72	4.40	4.37	4.35	4.29	4.17	
600	4.53	4.71	4.80	4.46	4.30	4.43	4.01	4.32	4.19	4.89	4.83	4.82	4.75	4.59	
720	4.96	5.15	5.22	4.88	4.63	4.88	4.42	4.63	4.58	5.32	5.16	5.18	5.10	4.92	
840	5.32	5.50	5.57	5.20	4.92	5.26	4.75	4.96	4.88	5.64	5.37	5.48	5.37	5.12	
960	5.62	5.81	5.85	5.47	5.14	5.59	5.01	5.23	5.12	5.92	5.56	5.67	5.62	5.26	
1080	5.86	6.07	6.03	5.70	5.35	5.79	5.26	5.35	5.32	6.15	5.68	5.87	5.81	5.41	
1200	6.06	6.29	6.13	5.90	5.56	5.94	5.50	5.33	5.49	6.33	5.82	6.04	5.98	5.57	
1320	6.24	6.48	6.20	6.07	5.76	6.07	5.68	5.45	5.64	6.45	5.95	6.14	6.12	5.71	
1440	6.38	6.63	6.30	6.22	5.89	6.14	5.83	5.58	5.75	6.44	6.06	6.31	6.24	5.80	
1560	6.50	6.77	6.37	6.33	5.94	6.26	5.94	5.67	5.80	6.41	6.16	6.34	6.34	5.90	
1680	6.57	6.88	6.45	6.41	6.02	6.35	6.03	5.72	5.78	6.48	6.21	6.41	6.43	6.00	
1800	6.59	6.99	6.53	6.46	6.11	6.38	6.12	5.79	5.80	6.51	6.24	6.41	6.55	6.09	

ตารางที่ ง-22 การดูดซึมก๊าซออกซิเจนของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกปรับสภาพพื้นผิว จำนวน 5 เส้น ที่ อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเฟสก๊าซ 1 ถึง 12 ลิตรต่อนาที

Time (s)	Air 12 U/min			Air 10 U/min			Air 6 U/min			Air 2 U/min			Air 1 U/min		
	DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)			DO (mg/l)		
	ครั้งที่1 (t=23.5°C)	ครั้งที่2 (t=23°C)	ครั้งที่3 (t=22.8°C)	ครั้งที่1 (t=23.1°C)	ครั้งที่2 (t=23°C)	ครั้งที่3 (t=23.3°C)	ครั้งที่1 (t=23.9°C)	ครั้งที่2 (t=23.6°C)	ครั้งที่3 (t=24.1°C)	ครั้งที่1 (t=22.3°C)	ครั้งที่2 (t=23.7°C)	ครั้งที่3 (t=23.9°C)	ครั้งที่1 (t=24.8°C)	ครั้งที่2 (t=25.2°C)	ครั้งที่3 (t=25.3°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.24	2.05	2.05	2.45	2.19	1.87	1.98	2.13	2.04	2.01	2.29	2.24	2.24	2.36	2.17
240	3.30	3.03	3.07	3.56	3.19	2.88	2.96	3.20	3.04	3.02	3.30	3.27	3.27	3.47	3.16
360	4.01	3.75	3.85	4.35	3.87	3.66	3.68	3.98	3.80	3.72	4.03	3.99	3.99	4.19	3.90
480	4.45	4.28	4.43	4.89	4.38	4.24	4.23	4.56	4.38	4.27	4.58	4.53	4.53	4.74	4.45
600	4.74	4.67	4.86	5.30	4.76	4.73	4.65	5.01	4.83	4.69	4.98	4.93	4.93	5.14	4.85
720	5.01	4.98	5.14	5.64	5.03	5.09	4.98	5.36	5.20	5.03	5.31	5.21	5.21	5.45	5.13
840	5.24	5.23	5.32	5.92	5.25	5.40	5.22	5.64	5.49	5.28	5.57	5.84	5.41	5.77	5.31
960	5.42	5.43	5.44	6.14	5.43	5.62	5.40	5.85	5.73	5.50	5.78	6.02	5.49	5.99	5.47
1080	5.54	5.60	5.60	6.32	5.59	5.77	5.52	6.04	5.93	5.65	5.96	6.12	5.58	6.18	5.60
1200	5.65	5.73	5.73	6.47	5.71	5.86	5.56	6.19	6.10	5.77	6.10	6.22	5.74	6.28	5.74
1320	5.76	5.84	5.82	6.56	5.78	5.94	5.63	6.30	6.23	5.88	6.22	6.32	5.87	6.32	5.86
1440	5.85	5.94	5.91	6.64	5.83	6.04	5.72	6.39	6.35	5.98	6.31	6.42	5.97	6.36	5.95
1560	5.93	6.02	6.00	6.75	5.90	6.13	5.79	6.43	6.45	6.06	6.41	6.50	6.00	6.39	6.02
1680	6.00	6.07	6.07	6.86	5.95	6.16	5.84	6.42	6.54	6.12	6.49	6.57	6.00	6.43	6.09
1800	6.06	6.13	6.13	6.94	5.97	6.23	5.88	6.43	6.61	6.17	6.56	6.62	6.07	6.49	6.16

ตารางที่ ง-23 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.05 ถึง 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 7000 ppm

Time (s)	liquid 0.05 l/min			liquid 0.1 l/min			liquid 0.15 l/min		
	Concentration (ppm)			Concentration (ppm)			Concentration (ppm)		
	ครั้งที่1 (t=23.5°C)	ครั้งที่2 (t=23.5°C)	ครั้งที่3 (t=23.4°C)	ครั้งที่1 (t=23°C)	ครั้งที่2 (t=23.2°C)	ครั้งที่3 (t=23.3°C)	ครั้งที่1 (t=23.7°C)	ครั้งที่2 (t=24.3°C)	ครั้งที่3 (t=24.5°C)
0	7116	7088	7421	7312	7293	7099	7041	7310	7212
120	5825	5915	6068	6000	5988	6038	5516	5563	6045
240	5148	5180	5342	5150	5250	5246	4867	4758	5251
360	4698	4637	4823	4553	4720	4711	4393	4232	4667
480	4348	4268	4453	4112	4338	4284	4044	3867	4253
600	4089	4007	4179	3810	4055	4004	3765	3582	3945
720	3884	3785	3979	3570	3825	3781	3565	3375	3724
840	3741	3637	3813	3404	3655	3614	3400	3230	3562
960	3620	3521	3696	3278	3537	3490	3265	3121	3421
1080	3519	3426	3603	3175	3440	3401	3150	3019	3321
1200	3444	3343	3523	3105	3349	3315	3061	2931	3245
1320	3381	3273	3460	3037	3285	3250	2978	2874	3184
1440	3325	3223	3410	2971	3231	3192	2918	2824	3126
1560	3278	3179	3359	2926	3184	3148	2860	2780	3070
1680	3234	3138	3313	2887	3135	3106	2801	2741	3033
1800	3190	3099	3276	2842	3098	3076	2753	2707	2997

ตารางที่ ง-24 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 5000 และ 9000 ppm

time(s)	CO ₂ 5000 ppm			CO ₂ 9000 ppm		
	Concentration (ppm)			Concentration (ppm)		
	ครั้งที่1 (t=24.8°C)	ครั้งที่2 (t=25°C)	ครั้งที่3 (t=23.4°C)	ครั้งที่1 (t=23.5°C)	ครั้งที่2 (t=24.6°C)	ครั้งที่3 (t=23°C)
0	5463	5119	5727	9302	9070	8923
120	4566	4398	4878	7634	7378	7304
240	3941	3959	4337	6483	6350	6237
360	3504	3641	3969	5712	5604	5507
480	3186	3400	3712	5150	5097	4957
600	2955	3229	3512	4759	4729	4583
720	2785	3088	3375	4472	4463	4301
840	2648	2976	3253	4240	4238	4080
960	2551	2889	3161	4064	4093	3915
1080	2461	2823	3099	3926	3963	3798
1200	2401	2769	3039	3818	3871	3688
1320	2353	2722	2988	3733	3785	3606
1440	2308	2686	2949	3662	3709	3540
1560	2265	2645	2904	3589	3657	3471
1680	2235	2617	2870	3531	3613	3418
1800	2205	2588	2852	3483	3557	3374

ตารางที่ ง-25 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 9000 ppm ปนเปื้อนสาร SLS ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC

time(s)	SLS 0.2 CMC			SLS 3 CMC		
	Concentration (ppm)			Concentration (ppm)		
	ครั้งที่1 (t=24°C)	ครั้งที่2 (t=23.6°C)	ครั้งที่3 (t=24.9°C)	ครั้งที่1 (t=22.7°C)	ครั้งที่2 (t=22.5°C)	ครั้งที่3 (t=22.8°C)
0	9222	9095	9162	9042	9065	9055
120	7350	7715	7444	7342	7044	7349
240	6188	6719	6439	6259	6166	6322
360	5405	6032	5731	5497	5431	5565
480	4819	5520	5195	4941	4889	5024
600	4357	5102	4797	4491	4478	4585
720	4028	4811	4511	4167	4155	4257
840	3775	4566	4272	3909	3916	3998
960	3573	4352	4086	3698	3732	3799
1080	3420	4208	3924	3526	3560	3634
1200	3297	4073	3786	3372	3432	3503
1320	3181	3966	3682	3264	3313	3388
1440	3098	3867	3590	3166	3226	3293
1560	3014	3785	3504	3083	3143	3207
1680	2947	3707	3448	3005	3074	3136
1800	2890	3645	3386	2921	2997	3066

ตารางที่ ง-26 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 9000 ppm ปนเปื้อนสาร Tween 80 ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC

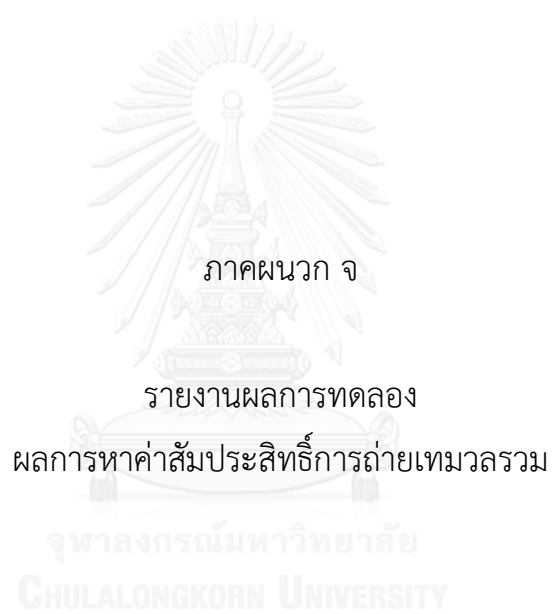
time(s)	Tween 80 0.2 CMC			Tween 80 3 CMC		
	Concentration (ppm)			Concentration (ppm)		
	ครั้งที่1 (t=23.3°C)	ครั้งที่2 (t=25°C)	ครั้งที่3 (t=24.2°C)	ครั้งที่1 (t=24.3°C)	ครั้งที่2 (t=24.1°C)	ครั้งที่3 (t=23.6°C)
0	9035	8881	8908	9119	9139	9064
120	7588	7532	7711	7923	7726	7397
240	6607	6553	6708	7076	6796	6333
360	5871	5855	6037	6416	6142	5648
480	5347	5360	5555	5917	5677	5119
600	4970	4984	5186	5571	5310	4703
720	4656	4691	4909	5278	5050	4411
840	4420	4476	4707	5067	4827	4175
960	4244	4316	4555	4896	4649	3988
1080	4098	4173	4422	4761	4515	3831
1200	3978	4064	4327	4638	4398	3717
1320	3880	3976	4246	4537	4290	3616
1440	3793	3887	4173	4439	4185	3534
1560	3720	3829	4103	4372	4115	3460
1680	3656	3767	4055	4310	4050	3393
1800	3598	3716	4004	4243	3973	3339

ตารางที่ ง-27 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 9000 ppm ปนเปื้อนสาร DPC ความเข้มข้น 0.2 และ 3 CMC

time(s)	DPC 0.2 CMC			DPC 3 CMC		
	Concentration (ppm)			Concentration (ppm)		
	ครั้งที่1 (t=24.3°C)	ครั้งที่2 (t=24.9°C)	ครั้งที่3 (t=24.8°C)	ครั้งที่1 (t=25°C)	ครั้งที่2 (t=24.7°C)	ครั้งที่3 (t=25.4°C)
0	8884	9076	9431	9023	8892	9077
120	7236	7322	7681	7086	7065	7581
240	6327	6368	6595	6121	6020	6476
360	5671	5663	5827	5449	5334	5711
480	5163	5174	5252	4977	4817	5190
600	4797	4837	4833	4617	4433	4769
720	4496	4543	4521	4334	4142	4442
840	4261	4326	4284	4113	3913	4187
960	4083	4158	4092	3943	3733	3990
1080	3938	4016	3950	3797	3587	3845
1200	3811	3902	3828	3680	3474	3704
1320	3716	3813	3722	3581	3370	3599
1440	3630	3732	3628	3491	3291	3512
1560	3554	3670	3547	3437	3207	3415
1680	3496	3608	3474	3351	3145	3338
1800	3432	3558	3410	3298	3090	3280

ตารางที่ ง-28 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 9000 ppm บนป้อนสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์

time(s)	Na ₂ CO ₃ 1%			Na ₂ CO ₃ 5%			Na ₂ CO ₃ 10%		
	Concentration (ppm)			Concentration (ppm)			Concentration (ppm)		
	ครั้งที่1 (t=24.4°C)	ครั้งที่2 (t=24.4°C)	ครั้งที่3 (t=23.8°C)	ครั้งที่1 (t=23.8°C)	ครั้งที่2 (t=23.5°C)	ครั้งที่3 (t=23.7°C)	ครั้งที่1 (t=24.2°C)	ครั้งที่2 (t=24°C)	ครั้งที่3 (t=23.4°C)
0	9162	9427	8909	9413	9214	9286	9027	8821	9820
120	6771	7433	7076	7415	7199	7521	6975	7012	7581
240	5425	5907	5604	6044	5763	6122	5516	5618	6121
360	4447	4814	4557	5057	4778	5001	4453	4583	5111
480	3740	4034	3788	4292	4048	4209	3693	3871	4334
600	3224	3483	3223	3754	3488	3631	3152	3347	3773
720	2862	3068	2831	3339	3107	3198	2738	2963	3353
840	2601	2764	2527	3013	2786	2877	2447	2674	3024
960	2433	2546	2303	2784	2557	2641	2237	2467	2789
1080	2306	2367	2143	2586	2386	2450	2073	2304	2596
1200	2193	2236	2011	2440	2250	2300	1942	2179	2450
1320	2105	2124	1908	2322	2136	2191	1844	2081	2341
1440	2046	2038	1818	2216	2051	2101	1761	2003	2226
1560	1988	1964	1746	2136	1973	2024	1703	1937	2133
1680	1948	1901	1696	2061	1908	1957	1650	1884	2047
1800	1910	1842	1638	1997	1860	1898	1612	1829	1991



ภาคผนวก จ

รายงานผลการทดลอง

ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ-1 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0009	0.0009	0.0009
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0007	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006

ตารางที่ จ-2 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0009	0.001	0.0009	0.001
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0012	0.0011	0.0012	0.0012
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.001	0.0009	0.001	0.0009
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.0012	0.0012	0.0011
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.001	0.0011	0.0011

ตารางที่ จ-3 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 14 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0015	0.0014	0.0014
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.001	0.0011	0.0012	0.0011
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0012	0.0014	0.0013

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.0012	0.0011	0.0012
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0014	0.0012	0.0013

ตารางที่ จ-4 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0015	0.0015	0.0014	0.0015
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0014	0.0013	0.0013
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0015	0.0014	0.0014	0.0014
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0013	0.0012	0.0013
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.001	0.0011	0.0011

ตารางที่ จ-5 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0004	0.0005	0.0004
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0003	0.0004	0.0003	0.0003
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0002	0.0004	0.0003	0.0003

ตารางที่ จ-6 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0007	0.0008	0.0008	0.0008
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0008	0.0008	0.0007	0.0008
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0006	0.0004	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0003	0.0006	0.0004

ตารางที่ จ-7 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 14 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0007	0.0008	0.0007
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0006	0.0008	0.0007
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0008	0.0005	0.0007	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0007	0.0007	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0006	0.0004	0.0004

ตารางที่ จ-8 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0005	0.0004	0.0004

	$k_{La} (s^{-1})$			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0006	0.0005	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0003	0.0005	0.0004	0.0004

ตารางที่ จ-9 เปรียบเทียบค่า $k_{La} (s^{-1})$ ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที

	$k_{La} (s^{-1})$			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0003	0.0005	0.0004
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0002	0.0002	0.0003
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0003	0.0004	0.0005	0.0004
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003

ตารางที่ จ-10 เปรียบเทียบค่า $k_{La} (s^{-1})$ ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที

	$k_{La} (s^{-1})$			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 14 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0004	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0004	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0003	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004

ตารางที่ จ-11 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 14 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0005	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0008	0.0006	0.0008	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0005	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005

ตารางที่ จ-12 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0005	0.0006
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006

ตารางที่ จ-13 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.001	0.0011	0.0011	0.0011
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0014	0.0013	0.0013
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0013	0.0012	0.0013

ตารางที่ จ-14 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0012	0.0013	0.0013
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0015	0.0012	0.0012	0.0013
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0012	0.0014	0.0013	0.0013
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0012	0.0013	0.0015	0.0013
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0015	0.0013	0.0014

ตารางที่ จ-15 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.001	0.0011	0.0011
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0014	0.0012	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.001	0.0011	0.0011
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	N/A	0.0006

ตารางที่ จ-16 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0013	0.0012	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.0012	0.0011	0.0012
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.0012	0.0012	0.0011
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	N/A	0.0006

ตารางที่ จ-17 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0015	0.0014	0.0014	0.0014
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0012	0.0014	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.001	0.0009	0.001	0.0009
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0007	N/A	0.0006

ตารางที่ จ-18 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0014	0.0013	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.001	0.0011	0.0012	0.0011
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0012	0.0011	0.0012	0.0012
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	N/A	0.0006

ตารางที่ จ-19 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0015	0.0015	0.0014	0.0015
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0015	0.0014	0.0014
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0009	0.001	0.0009	0.001
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0009	0.0009	N/A	0.001

ตารางที่ จ-20 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0003	0.0005	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0006	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0003	0.0006	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0002	0.0004	0.0003	0.0003

ตารางที่ จ-21 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0007	0.0007	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0006	0.0004	0.0005
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0003	0.0004	0.0003	0.0003

ตารางที่ จ-22 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0006	0.0005	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0008	0.0005	0.0007	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0008	0.0008	0.0007	0.0008
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005

ตารางที่ จ-23 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0006	0.0008	0.0007
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005

ตารางที่ จ-24 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0005	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0007	0.0008	0.0008	0.0008
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0004	0.0005	0.0004

ตารางที่ จ-25 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003

ตารางที่ จ-26 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0005	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0005	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0003	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0003	0.0004	0.0005	0.0004

ตารางที่ จ-27 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0005	0.0004	0.0005
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0002	0.0002	0.0003

ตารางที่ จ-28 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0008	0.0006	0.0008	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003

ตารางที่ จ-29 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด C ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0006	0.0005	0.0006	0.0006
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.025 ลิตรต่อนาที	0.0005	0.0003	0.0005	0.0004

ตารางที่ จ-30 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสติก (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0015	0.0013	0.0014
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0013	0.0012	0.0013

ตารางที่ จ-31 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0012	0.0013	0.0015	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0014	0.0013	0.0013

ตารางที่ จ-32 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0012	0.0014	0.0013	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.001	0.0011	0.0011	0.0011

ตารางที่ จ-33 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0015	0.0012	0.0012	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012

ตารางที่ จ-34 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A ที่ถูกทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วย พลาสมา (PVDF-PAM) ที่อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0012	0.0013	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012

ตารางที่ จ-35 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.002	0.0021	0.0022	0.0021
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0021	0.0023	0.002	0.0021
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0023	0.0022	0.0022	0.0022
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0021	0.0019	0.002	0.002
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0022	0.002	0.002	0.0021

ตารางที่ จ-36 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0033	0.0035	0.0035	0.0034
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0036	0.004	0.0032	0.0036
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.004	0.0038	0.0038	0.0039
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0039	0.0041	0.0038	0.0039
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 0.5 ลิตรต่อนาที	0.004	0.0042	0.0041	0.0041

ตารางที่ จ-37 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B จำนวน 10 เส้น ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.0018	0.0018	0.0019	0.0018
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0016	0.002	0.0019	0.0018

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0019	0.0022	0.002	0.002
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0018	0.0017	0.0017	0.0017
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.0014	0.0017	0.0021	0.0017

ตารางที่ จ-38 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด B จำนวน 20 เส้น ที่อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที	0.003	0.0029	0.0025	0.0028
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที	0.0027	0.0027	0.0029	0.0028
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 6 ลิตรต่อนาที	0.0029	0.0028	0.003	0.0029
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที	0.0037	0.003	0.0034	0.0033
อัตราการไหลของเฟสก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที	0.003	0.0032	0.0032	0.0031

ตารางที่ จ-39 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อมีสารละลายของสารลดแรงตึงผิวประจุลบความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3 CMC	0.0019	0.0014	0.0018	0.0016
2 CMC	0.0017	0.002	0.0019	0.0019
1.5 CMC	0.0014	0.0014	0.0016	0.0015
1 CMC	0.0017	0.002	0.0016	0.0018
0.7 CMC	0.0017	0.0022	0.0021	0.002
0.2 CMC	0.0027	0.0027	0.0027	0.0027

ตารางที่ จ-40 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อมีสารละลายของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3 CMC	0.0037	0.0031	0.0036	0.0034
2 CMC	0.0042	0.0028	0.0031	0.0034
1.5 CMC	0.0034	0.0035	0.0034	0.0034
1 CMC	0.0038	0.0041	0.0035	0.0038
0.7 CMC	0.004	0.0039	0.0035	0.0038
0.2 CMC	0.0037	0.0037	0.0034	0.0036

ตารางที่ จ-41 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อมีสารละลายของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกความเข้มข้น 0.2 ถึง 3 CMC

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
4 CMC	0.0064	0.0058	0.0055	0.0059
3 CMC	0.006	0.006	0.0059	0.006
2 CMC	0.0023	0.0022	0.0022	0.0023
1.5 CMC	0.0029	0.0027	0.0026	0.0027
1 CMC	0.0029	0.0032	0.0029	0.003
0.7 CMC	0.0031	0.0027	0.0029	0.0029
0.2 CMC	0.0029	0.0028	0.0031	0.003

ตารางที่ จ-42 เปรียบเทียบค่า k_{La} (s^{-1}) ของเมมเบรนชนิด A จำนวน 20 เส้น เมื่อมีความขุ่นความเข้มข้น 50 ถึง 800 มิลลิกรัมต่อลิตร

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
800 mg/l	0.0034	0.0034	0.0035	0.0034
400 mg/l	0.0036	0.0033	0.0031	0.0033
200 mg/l	0.0031	0.0034	0.0035	0.0033
100 mg/l	0.0036	0.0035	0.0036	0.0036
50 mg/l	0.0034	0.0037	0.0036	0.0035

ตารางที่ จ-43 สรุปผลจากอัตราการไหลของเฟสของเหลวต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.15 ลิตรต่อนาที	0.0013	0.0019	0.0013	0.0014
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.1 ลิตรต่อนาที	0.0015	0.0012	0.0011	0.0013
อัตราการไหลของเฟสของเหลว 0.05 ลิตรต่อนาที	0.001	0.0011	0.001	0.001

ตารางที่ จ-44 สรุปผลจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9000 ppm	0.0017	0.0015	0.0017	0.0016
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 7000 ppm	0.0013	0.0019	0.0013	0.0014
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5000 ppm	0.0013	0.0007	0.0008	0.0009

ตารางที่ จ-45 สรุปผลจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุลบต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
โซเดียมลอริลซัลเฟต 3 CMC	0.0017	0.0017	0.0016	0.0017
โซเดียมลอริลซัลเฟต 0.2 CMC	0.0019	0.0011	0.0014	0.0015

ตารางที่ จ-46 สรุปผลจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ทวิน 80 3 CMC	0.0009	0.001	0.0016	0.0011
ทวิน 80 0.2 CMC	0.0013	0.0012	0.001	0.0012

ตารางที่ จ-47 สรุปผลจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
โตะเดซิลไพริดิเนียมคลอไรด์ 3 CMC	0.0016	0.0019	0.0016	0.0017
โตะเดซิลไพริดิเนียมคลอไรด์ 0.2 CMC	0.0013	0.0014	0.0017	0.0015

ตารางที่ จ-48 สรุปผลจากความเข้มข้นของการดูดซึมทางเคมีโดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

	k_{La} (s^{-1})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 10%	0.0037	0.0035	0.0033	0.0035
โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 5%	0.0021	0.0023	0.0022	0.0022
โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1%	0.0017	0.0018	0.0019	0.0018





ภาคผนวก ฉ

รายงานผลการทดลอง

การหาค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ (ไม่รวมความเข้มข้น
ของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก จ

การหาค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ)

จากสมการการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ซึ่งมีค่าคงที่การแตกตัว คือ K_1^* โดยหาได้จาก $K_1^* = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]} = 10^{-6.3}$



ซึ่งมีค่าคงที่การแตกตัว คือ K_2^* โดยหาได้จาก $K_2^* = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = 10^{-10.33}$



ซึ่งมีค่าคงที่การแตกตัว คือ K_w โดยหาได้จาก $K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$



และเมื่อพิจารณาการหาความเข้มข้นของสารละลายแต่ละตัวจากขนาดของการเกิดปฏิกิริยา

(Extend of Reaction) จะได้

$$1. [\text{CO}_2] = [\text{CO}_2]_{\text{ละลายน้ำเริ่มต้น}} - \epsilon_1$$

$$2. [\text{HCO}_3^-] = \epsilon_1 - \epsilon_2$$

$$3. [\text{CO}_3^{2-}] = \epsilon_2$$

$$4. [\text{H}^+] = \epsilon_1 + \epsilon_2 + 10^{-7} - \epsilon_3$$

$$5. [\text{OH}^-] = 10^{-7} - \epsilon_3$$

นำค่าความเข้มข้นข้างต้นมาแทนเพื่อหาค่า K_1^* และ K_2^* จะได้

$$K_1^* = \frac{[\epsilon_1 + \epsilon_2][\epsilon_1 - \epsilon_2]}{[[\text{CO}_2]_{\text{ละลายน้ำเริ่มต้น}} - \epsilon_1]} = 10^{-6.3}$$

$$K_2^* = \frac{[\epsilon_1 + \epsilon_2][\epsilon_2]}{[\epsilon_1 - \epsilon_2]} = 10^{-10.33}$$

$$K_w = [\epsilon_1 + \epsilon_2 + 10^{-7} - \epsilon_3][10^{-7} - \epsilon_3] = 10^{-14}$$

ใช้โปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ในการหาค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ

ตัวอย่างการหาค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ)

1. คำนวณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ สมมุติคำนวณได้ค่า 0.006 กรัมต่อลิตร

ขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 ต่อจากนี้จะใช้โปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้รูปที่ ฉ-1 ประกอบ

2. ใส่ค่าความเข้มข้น 0.006 ในช่อง F6

3. ช่อง C7 คือการแปลงหน่วย จาก กรัมต่อลิตร เป็น โมลต่อลิตร

4. ช่อง D7 ถึง D11 คือ ความเข้มข้นของสปีชีส์แต่ละชนิดที่สถานะสมดุล ดังนี้

D7 คือ C7-D2

D8 คือ D2-D3

D9 คือ D3

D10 คือ D2+D3+C10-D4

D11 คือ C11-D4

5. คอลัมน์ G14 ถึง G16 คือ ค่าคงที่การแตกตัว K_1^* K_2^* และ K_w ตามลำดับ

6. คอลัมน์ I14 ถึง I16 คือ ค่า $\frac{[H^+][HCO_3^-]}{[CO_2]}$ $\frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]}$ และ $[H^+][OH^-]$ ตามลำดับ

7. ใช้ Solver โดยทำการตั้งค่าดังแสดงในรูปที่ ฉ-2

8. จะได้ค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ) คือ ช่อง F7 ซึ่งมีค่า 0.00565 กรัมต่อลิตร

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1							Vary Extend						
2			Extend of Reaction 1	8.02E-06		802.24							
3			Extend of Reaction 2	4.65E-11		0.00							
4			Extend of Reaction 3	9.88E-08		9.88							
5													
6		Species	Conc Initial	Conc Equilibrium	เดิม	6.00E-03	g/L						
7		CO2	1.36E-04	1.28E-04	ใหม่	5.65E-03	g/L						
8		HCO3-	0	8.02E-06									
9		CO3-	0	4.65E-11									
10		H+	1.00E-07	8.02E-06									
11		OH-	1.00E-07	1.24E-09									
12				0.000136457									
13						K	K x 10-6	Conc	Conc x 10-6	Error			
14		pK1		6.3		K1	5.01187E-07	0.501187	5.01E-07	0.501186944	5.77E-05		
15		pK2		10.33		K2	4.67735E-11	4.68E-05	4.65E-11	4.65E-05	0.5		
16						K3	1.00E-14	1.00E+00	9.95E-15	9.95E-01	5.00E-01		
17										Mass Balance	0.00E+00		
18										Charge Balance	5.97E-22		
19											1.000058		
20													

รูปที่ ฉ-1 ตัวอย่างการคำนวณค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่เวลาใดๆ (ไม่รวมความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนที่ละลายน้ำ)

Solver Parameters

Set Objective:

To: Max Min Value Of:

By Changing Variable Cells:

Subject to the Constraints:

Make Unconstrained Variables Non-Negative

Select a Solving Method: Options

Solving Method

Select the GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.

Help Solve Close

รูปที่ ๑-2 การตั้งพารามิเตอร์ใน Solver

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกษิติศ แผ่นผา เกิดเมื่อวันที่ 20 กันยายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญารัฐศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง เมื่อปีการศึกษา 2552 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) เกียรตินิยมอันดับ 2 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2555 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุม Proceedings of the 4 th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management ที่โรงแรมโลตัส ปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 27-29 พฤษภาคม 2558 ในชื่อหัวข้อ Study of Gas Absorption by Hollow Fiber Membrane Contactor in Terms of Physical Properties and Mass Transfers

นอกจากนี้ ยังมีผลงานทางวิชาการด้านอื่นๆอีก เช่น

งานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13 ประจำปี 2557 ระหว่างวันที่ 26-28 มีนาคม 2557 ที่โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร บทความปริทัศน์เรื่อง กระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

งานประชุม “The 1st International Conference on Environment, Livelihood, and Services”: Environment for Life. ที่โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ เซ็นทรัลเวิลด์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร วันที่ 2-5 พฤศจิกายน 2558 ในชื่อหัวข้อ Effect of Gas Sparger and Plastic Media on Mass Transfer and Hydrodynamic Parameters in Airlift Reactor