

การจำลองการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปแทนด้วยระบบดูดซึม
ด้วยสารอัลคานอลเอมีนโดยใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS



นางสาววีราภรณ์ เรืองศรี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF HYDROGEN SULFIDE AND METHYL MERCAPTAN REMOVAL
BY ALKANOLAMINE ABSORPTION USING ASPEN HYSYS PROGRAM



Miss Weeraporn Ruengsri

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์-
แคปเทนด้วยระบบดูดซับด้วยสารอัลคานอลเอมีนโดย
ใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS

โดย

นางสาววีราภรณ์ เรืองศรี


สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

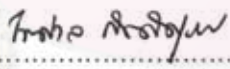
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

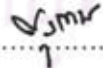
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

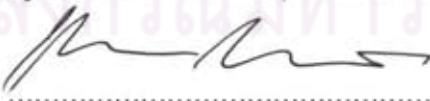

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरุวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กษิตศ หนูทอง)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.วชิรา ดาวสุด)

วิทยานิพนธ์ เรื่อง: การจำลองการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปแทนด้วยระบบดูดซับด้วยสารอัลคานอลเอมีนโดยใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS. (SIMULATION OF HYDROGEN SULFIDE AND METHYL MERCAPTAN REMOVAL BY ALKANOLAMINE ABSORPTION USING ASPEN HYSYS PROGRAM) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุกร, 100 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองระบบดูดซับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และเมทิลเมอร์แคปแทน (CH_3SH) ด้วยสารละลายไดเอทานอลเอมีน (DEA), โมโนเอทานอลเอมีน (MEA) และเมทิลไดเอทานอลเอมีน (MDEA) ประยุกต์ใช้ ASPEN HYSYS จำลองหน่วยดูดซับอ้างอิงจากผลข้อมูลการทดลองของงานวิจัยอื่น พบว่าค่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลข้างต้น จากนั้นประยุกต์ใช้ ASPEN HYSYS เพื่อศึกษาสัดส่วนน้ำหนัก (w) และอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีนในรูป (L^*/G^*), สัดส่วนโมลของก๊าซ H_2S , CH_3SH และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), อุณหภูมิของก๊าซเสียและสารละลายอัลคานอลเอมีนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซ H_2S และ CH_3SH เพิ่มขึ้นที่ L^*/G^* เพิ่มขึ้น ส่วนค่า η ของก๊าซ H_2S เพิ่มขึ้นเมื่อค่า w ของสาร DEA, MEA และ MDEA เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า η ของก๊าซ CH_3SH ลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ด้วยสาร MDEA มีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับสาร DEA และ MEA ส่วนค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ลดลงเมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนโมลของ H_2S , CH_3SH , CO_2 ที่ L^* คงที่ และเพิ่มค่าอุณหภูมิของสารอัลคานอลเอมีนขาเข้า ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้าส่งผลต่อค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH เล็กน้อย ค่าสภาวะที่เหมาะสมของ L^*/G^* , สัดส่วนน้ำหนักของสารละลาย MDEA และอุณหภูมิของสารอัลคานอลเอมีน เท่ากับ 16, 0.20-0.35 และ $30^\circ C$ ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต กักรัตน์ เรืองศรี
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ไพศาล กิตติศุกร
 ปีการศึกษา.....2553.....

5271504221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ABSORPTION / HYDROGEN SULFIDE / METHYL MERCAPTAN /
ALKANOLAMINE

WEERAPORN RUENGSRİ : SIMULATION OF HYDROGEN SULFIDE AND
METHYL MERCAPTAN REMOVAL BY ALKANOLAMINE ABSORPTION
USING ASPEN HYSYS PROGRAM. ADVISOR : PROFESSOR PAISAN
KITTISUPAKORN, Ph.D., 100 pp.

This research presents the simulation of absorption to determine an optimal condition for hydrogen sulfide (H_2S) and methyl mercaptan (CH_3SH) removal using diethanolamine (DEA), monoethanolamine (MEA) and methyldiethanolamine (MDEA). The ASPEN HYSYS simulator has been used to simulate the absorption unit according to experiment data of other researches. The removal efficiencies obtained in the simulation show a good agreement with the above mentioned experiment data. Then, the ASPEN HYSYS model is employed to study the effects of weight fraction (w_i) and mass flow rate of alkanolamine solution (L^*/G^*), mole fraction of H_2S , CH_3SH and carbon dioxide (CO_2), feed gas and alkanolamine solution temperature on the H_2S and CH_3SH removal efficiency. Simulation results show that the removal efficiencies (η) of H_2S and CH_3SH increase with an increase in the L^*/G^* . In particular, the η of H_2S increases with increasing the w_i of DEA, MEA and MDEA, whereas the η of CH_3SH reduces. The removal of H_2S and CH_3SH using MDEA is more efficient as compared to DEA and MEA. The η of H_2S and CH_3SH decreases with an increase in the mole fraction of H_2S , CH_3SH , CO_2 (constant L^*) and solution temperature, whereas the effect of feed gas temperature on η is small. The optimum condition consisting of L^*/G^* , w_i range of MDEA and alkanolamine solution temperature is at 16, 0.20-0.35 and 30 °C respectively.

Department : ...Chemical Engineering..... Student's Signature Weeraporn Ruengsrı

Field of Study : ...Chemical Engineering..... Advisor's Signature Paisan Kittisupakorn

Academic Year :2010.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ที่ให้แนวคิด ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์ ประธาน
ในการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ ดร.กษิตศิ หนูทอง และอาจารย์
ดร.วชิรา ดาวสุด ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ความสนใจและชี้
แนวทางให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เป็นแหล่งความรู้ให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาตลอด
การทำงานวิจัย

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และบุคคลที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้ ที่ให้ความ
ช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา น้ำ และครอบครัว ที่เป็น
กำลังใจและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
2 ทฤษฎี.....	5
2.1 ความหมายและระบบการดูดซึม.....	5
2.2 ประเภทของหอดูดซึม.....	7
2.3 คุณสมบัติของก้ำชกรดและสารอัลคานอลเอมีน.....	10
2.4 กลไกการดูดซึมทางเคมี.....	13
2.5 การประยุกต์ใช้สารอัลคานอลเอมีน.....	17
2.6 การกักร่อนของสารอัลคานอลเอมีนในระบบก้ำจัดก้ำชกรด.....	19
2.7 การประมาณค่า Flood และความดันลด (Pressure drop) ในหอบแบบแพค.....	22
2.8 การหาค่าประสิทธิภาพในการก้ำจัด (η).....	25

บทที่	หน้า
3 หลักการของ Amine Property Package.....	26
3.1 หลักการเบื้องต้นและขอบเขตการใช้งาน.....	26
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	28
3.2.1 การจำลองขั้นไม่สมดุล (Non-Equilibrium Stage Model).....	28
3.2.2 ประสิทธิภาพของขั้น (Stage Efficiency).....	28
3.2.3 แบบจำลองของหอหลายขั้น (Multistage Column Model).....	29
3.2.4 สมดุลการละลาย (Equilibrium Solubility).....	30
3.2.5 เอนทัลปีของสถานะ (Phase Enthalpy).....	32
4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
5 วิเคราะห์ผลการจำลอง.....	36
5.1 ผลจำลองการกำจัดก๊าซกรดเทียบกับข้อมูลการทดลองของงานวิจัยอื่น.....	36
5.1.1 จำลองระบบดูดซึ่มก๊าซกรดด้วยสาร MDEA เทียบกับผลการทดลอง ของ Lu, Zheng และ He (2006).....	36
5.1.2 จำลองระบบดูดซึ่มก๊าซกรดด้วยสาร MEA เทียบกับผลการทดลองของ Godini และ Mowla (2008).....	42
5.1.3 จำลองระบบกำจัดก๊าซกรดด้วยสาร MDEA เทียบกับผลการทดลอง ของ Alfadala และ Al-Musleh (2009).....	48
5.2 ผลการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ป้อนเข้าหอดูดซึ่มต่อประสิทธิภาพในการกำจัด.....	52
5.2.1 ตัวแปรที่ 1 ค่าสัดส่วนน้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีน.....	55
5.2.2 ตัวแปรที่ 2 อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีน.....	57
5.2.3 ตัวแปรที่ 3 ค่าสัดส่วนโมลของ H ₂ S, CH ₃ SH และ CO ₂	60
5.2.4 ตัวแปรที่ 4 ค่าอุณหภูมิของก๊าซเสีย.....	68
5.2.5 ตัวแปรที่ 5 ค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีน.....	70
5.3 ผลจำลองระบบกำจัดก๊าซกรดจากผลการศึกษาตัวแปรในหัวข้อ 5.2.....	72
6 สรุปผลการจำลอง.....	77

รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก ข้อมูลการจำลองและค่าประสิทธิภาพในการกำจัดของหัวข้อ 5.2.....	84
ภาคผนวก ข ข้อมูลและผลการคำนวณค่าความดันลดของหัวข้อ 5.2.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตินี้

ตารางที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
2.1	ความเข้มข้นของก๊าซกรดและสารประกอบหลักในระบบบ่อก๊าซหรือจากขยะชีวภาพ.....	10
2.2	คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซกรด.....	11
2.3	คุณสมบัติทั่วไปของสารอัลคานอลเอมีน.....	12
2.4	ค่าสัมประสิทธิ์ C_1 ถึง C_4	17
2.5	เปรียบเทียบค่าเฉพาะของสารละลายอัลคานอลเอมีนต่างชนิด.....	19
2.6	ตัวอย่างค่าเฉพาะของ packing.....	24
3.1	สารประกอบที่ประยุกต์ใช้ได้ ใน Amine Property Package.....	27
3.2	แสดงขอบเขตค่าสมดุลการละลาย (Equilibrium Solubility) เมื่อใช้ Amine Property Package.....	27
5.1	ค่าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ASPEN HYSYS และค่าจากผลทดลองของ Lu, Zheng และ He (2006).....	40
5.2	ค่าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ASPEN HYSYS และค่าจากผลทดลองของ Godini และ Mowla (2008).....	46
5.3	ค่าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ASPEN HYSYS และค่าจากงานวิจัยของ Alfadala และ Al-Musleh (2009).....	51
5.4	ขอบเขตข้อมูลจำลองระบบดูดซึมเพื่อกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH โดยมีข้อมูลก๊าซเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมผลิตก๊าซชีวภาพแห่งหนึ่ง.....	52
5.5	ขอบเขตข้อมูลจำลองระบบกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH	75
5.6	ข้อมูลรายละเอียดของสารประกอบในแต่ละสายของการจำลอง.....	76
ก.1	ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลจากการปรับค่าความเข้มข้นของสารละลายอัลคานอลเอมีน.....	85
ก.2	ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลจากการปรับค่าอัตราการไหลของสารละลายอัลคานอลเอมีน.....	86

ตารางที่	หน้า
ก.3	ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลจากการปรับค่าปริมาณ H_2S และ CH_3SH ของก๊าซเสียขาเข้าที่ $L^*/G^*=10$ 87
ก.4	ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลจากการปรับค่าปริมาณ CO_2 ของก๊าซเสียขาเข้าที่ $L^*/G^*=10$ 88
ก.5	ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลจากการปรับค่าปริมาณ H_2S และ CH_3SH ของก๊าซเสียขาเข้าที่ $L^*=34,350$ kg/h..... 89
ก.6	ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลจากการปรับค่าปริมาณ CO_2 ของก๊าซเสียขาเข้าที่ $L^*=34,350$ kg/h..... 90
ก.7	ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลจากการปรับค่า อุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้า..... 91
ก.8	ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ผลจากการปรับค่า อุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้า..... 92
ข.1	ข้อมูลคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วน น้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีน..... 94
ข.2	ข้อมูลคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการ ไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีน..... 95
ข.3	ข้อมูลคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วน โมลของ H_2S , CH_3SH และ CO_2 ของก๊าซเสียขาเข้า..... 98

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น.....	6
2.2	หอแบบแพค.....	7
2.3	ตัวอย่าง packing (a) Berl saddle; (b) Intalox saddle; (c) Raschig ring; (d) Lessing ring; (e) Pall ring; (f) Tellerette.....	8
2.4	หอแบบเพลท.....	8
2.5	หอสเปร์ย์แบบต่างๆ.....	9
2.6	หอแบบถาด.....	9
2.7	โครงสร้างทางเคมีของก๊าซกรด.....	11
2.8	โครงสร้างทางเคมีของสารอัลคานอลเอมีน.....	13
2.9	อัตราการกัดกร่อนสำหรับ 15 % โดยน้ำหนักของ MEA กับเหล็กกล้าคาร์บอน...	20
2.10	ผลทดสอบการกัดกร่อนที่ผิวด้วยก๊าซ CO ₂ ที่สภาวะบรรยากาศกับเหล็กกล้า คาร์บอน 7 วันทดลองที่ 210 °F.....	20
2.11	อัตราการกัดกร่อนสำหรับ 20 % โดยน้ำหนักของ MEA และก๊าซ CO ₂ ที่สภาวะ บรรยากาศกับเหล็กกล้าคาร์บอน.....	21
2.12	อัตราการกัดกร่อนของโลหะต่างชนิดด้วย 30 % โดยน้ำหนักของ MEA ที่ 250 °F และก๊าซ CO ₂ ที่สภาวะบรรยากาศ.....	21
2.13	Generalized pressure drop correlation ของ Eckert ที่ถูกแก้ไขโดย Strigle..	23
3.1	ระบบดูดซึมก๊าซโดยใช้สารละลายที่นำกลับมาใช้ใหม่ (a) ระบบดูดซึม; (b) ระบบดีซอร์พชัน.....	26
3.2	รูปแบบการไหลในหอและตัวแปร.....	28
5.1	แผนผังโครงสร้างหน่วยการทดลองสำหรับระบบดูดซึมก๊าซกรด (Lu และคณะ, 2006).....	38
5.2	โครงสร้างแบบจำลองหอดูดซึมก๊าซกรดด้วยสาร MDEA.....	39
5.3	แผนผังโครงสร้าง (ก) และรูปภาพ (ข) ของ pilot-scale (Godini และคณะ, 2008).....	44
5.4	โครงสร้างแบบจำลองหอดูดซึมก๊าซกรดด้วยสาร MEA.....	45

ภาพที่	หน้า	
5.5	แผนผังโครงสร้างหน่วยการทดลองสำหรับระบบดูดซึ่มก๊าซกรด (Alfadala และคณะ, 2009).....	49
5.6	โครงสร้างแบบจำลองระบบกำจัดก๊าซกรดด้วยสาร MDEA.....	50
5.7	แบบจำลองกระบวนการกำจัดก๊าซกรดในหน่วยดูดซึ่มของหัวข้อ 5.2.....	54
5.8	ผลของสัดส่วนน้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีนต่างชนิดต่อประสิทธิภาพในการกำจัด (ก) สำหรับ H ₂ S, (ข) สำหรับ CH ₃ SH, (ค) สำหรับ CO ₂	56
5.9	ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีนที่อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซเสียคงที่ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด (ก) สำหรับ H ₂ S, (ข) สำหรับ CH ₃ SH, (ค) สำหรับ CO ₂	59
5.10	ผลของสัดส่วนโมลของ H ₂ S และ CH ₃ SH ในก๊าซเสียเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ L*/G* = 10 (ก) สำหรับ H ₂ S, (ข) สำหรับ CH ₃ SH, (ค) สำหรับ CO ₂	61
5.11	ผลของสัดส่วนโมลของ CO ₂ ในก๊าซเสียเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ L*/G* = 10 (ก) สำหรับ H ₂ S, (ข) สำหรับ CH ₃ SH, (ค) สำหรับ CO ₂	63
5.12	ผลของสัดส่วนโมลของ H ₂ S และ CH ₃ SH ในก๊าซเสียเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ L*=34,350 kg/h (ก) สำหรับ H ₂ S, (ข) สำหรับ CH ₃ SH, (ค) สำหรับ CO ₂	65
5.13	ผลของสัดส่วนโมลของ CO ₂ ในก๊าซเสียเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ L*=34,350 kg/h (ก) สำหรับ H ₂ S, (ข) สำหรับ CH ₃ SH, (ค) สำหรับ CO ₂	67
5.14	ผลของอุณหภูมิของก๊าซเสียเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัด (ก) สำหรับ H ₂ S, (ข) สำหรับ CH ₃ SH, (ค) สำหรับ CO ₂	69
5.15	ผลของอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัด (ก) สำหรับ H ₂ S, (ข) สำหรับ CH ₃ SH, (ค) สำหรับ CO ₂	71
5.16	รูปแบบโครงสร้างระบบกำจัดก๊าซกรดของหัวข้อ 5.3.....	74

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
w_t	สัดส่วนน้ำหนักของสารอัลคานอลเอมีนในน้ำ	
L^*	อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายเอมีน	kg/h
G^*	อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซเสีย	kg/h
K	ค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant) อัตราส่วนสมดุล (equilibrium ratio)	
U_s	ความเร็วก๊าซที่หน้าตัด (superficial gas velocity)	ft/s
ρ_G, ρ_L	ความหนาแน่นของก๊าซและของเหลว	lb/ft ³ , kg/m ³
F_p	Packing factor	ft ⁻¹
ν	ความหนืดของของเหลว (kinematic viscosity of liquid)	cS
C_s	C-factor	ft/s
CP	Capacity-factor	
L	ความเร็วเชิงมวลของของเหลว (liquid mass velocity)	kg/(s.m ²)
G	ความเร็วเชิงมวลของก๊าซ (gas mass velocity)	kg/(s.m ²)
η	ประสิทธิภาพในการกำจัด	
i	ชนิดของสารประกอบ (component number)	
j	เลขของชั้น (stage number)	
Y, y	สัดส่วนโมลในไอหรือก๊าซ	
X, x	สัดส่วนโมลในของเหลว	
z	สัดส่วนโมลในสายป้อน	
η'	ประสิทธิภาพของชั้น	
SV	อัตราการไหลเชิงโมลของของเหลวในกระแสปั่นก่อย	kmol/h
V	อัตราการไหลเชิงโมลของไอหรือก๊าซ	kmol/h
F	อัตราการไหลเชิงโมลของสายป้อน	kmol/h
L	อัตราการไหลเชิงโมลของของเหลว	kmol/h
SL	อัตราการไหลเชิงโมลของไอในกระแสปั่นก่อย	kmol/h

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Q	อัตราการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer rate)	kJ/h
H	เอนทาลปีของไอ (enthalpy of vapour)	kJ/kmol
h	เอนทาลปีของของเหลว (enthalpy of liquid)	kJ/kmol
H_F	เอนทาลปีของสายป้อน (enthalpy of feed)	kJ/kmol
H_i	ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's constant)	
P	ความดันของระบบ	
ϕ_i^V	fugacity coefficient ในสถานะไอ	
γ_i^L	activity coefficient ในสถานะของเหลว	
C	ความเข้มข้นของก๊าซ	kmol/m ³

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาหมอกพิษทางอากาศเป็นปัญหาที่สำคัญซึ่งทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ข้อมูลสถิติการร้องเรียนของชุมชนเกี่ยวกับปัญหาหมอกพิษทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย รวบรวมโดยกรมควบคุมมลพิษตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2548 มีจำนวนการร้องเรียนเฉลี่ยในเรื่องกลิ่นเหม็นมากที่สุด ส่วนใหญ่มาจากสารมีกลิ่นโดยหนึ่งในนั้น ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide, H_2S) และเมทิลเมอร์แคปแทน (methyl mercaptan, CH_3SH) (Tantrakarnapa, 2007) ตัวอย่างข้อมูลอุบัติเหตุที่เกิดการรั่วไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้แก่ ปี พ.ศ. 2552 บริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน) จังหวัดระยอง มีคนงานจำนวน 27 คน เกิดอาการหายใจไม่ออกต้องนำส่งโรงพยาบาล และบริษัท ไทยเรยอน จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี พนักงานเสียชีวิต 1 คน และรักษาตัวที่โรงพยาบาล 4 คน จากข้อมูลสถิติและอุบัติเหตุแสดงให้เห็นว่าปัญหาเรื่องกลิ่นรบกวนหรือมลพิษทางอากาศ จำเป็นต้องมีการป้องกันและบำบัดก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ อีกหนึ่งปัจจัยคือในอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ โรงกลั่นน้ำมัน ต้องมีการกำจัดก๊าซกรด อาทิเช่น สารประกอบซัลเฟอร์ เพื่อป้องกันตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเสียหาย ลดการกัดกร่อนในโครงสร้างที่เป็นโลหะ และเพื่อรักษาปริมาณองค์ประกอบในก๊าซผสมให้ได้ตามมาตรฐาน (Lu, Zheng และ He, 2006)

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเป็นพิษและอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ที่ความเข้มข้นต่ำมีกลิ่นคล้ายไข่เน่า และที่ความเข้มข้นสูงจะไม่มีกลิ่นเนื่องจากระบบทางเดินหายใจเป็นอัมพาตเมื่อได้รับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณสูง โดยที่ระดับความเข้มข้น 20 ppm ทำให้ตาระคายเคือง ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ที่ระดับความเข้มข้น 500 ppm ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที เป็นเหตุให้ป่วย ขณะที่ระดับความเข้มข้น 1000 ppm ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที สามารถทำให้เสียชีวิตได้ ด้านก๊าซเมทิลเมอร์แคปแทนมีความเป็นพิษน้อยกว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แต่สามารถส่งผลกระทบต่อระบบได้เหมือนกันในสภาวะที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่าเล็กน้อย (Iliuta และ Larachi, 2007)

อุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดก๊าซประเภทไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมอร์แคปเทน ได้แก่ โรงงานฟอกหนัง โรงงานกระดาษและเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตสุรา โรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรม ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ โรงงานบำบัดน้ำเสียและบ่อทิ้งขยะ ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้กำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทนมีหลายวิธี เช่น ระบบดูดซับ (adsorption system) ระบบ กรองชีวภาพ (biofilter system) และระบบดูดซึม (absorption system) (Ducom และคณะ, 2009; กรมควบคุมมลพิษ และสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553)

ระบบดูดซึมด้วยสารละลายอัลคานอลเอมีนเพื่อจับก๊าซกรดนี้ เป็นหนึ่งวิธีทั่วไปที่ นิยมใช้กันมากที่สุดโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมก๊าซและโรงกลั่นน้ำมัน สารละลายอัลคานอลเอมีนที่ ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ โมโนเอทานอลเอมีน (monoethanolamine, MEA), ไดเอทานอลเอมีน (diethanolamine, DEA), เมทิลไดเอทานอลเอมีน (methyldiethanolamine, MDEA) และ ไดโกล- คอลเอมีน (diglycolamine, DGA) (Al-Baghli และคณะ, 2001; Edali, Aboudheir และ Idem, 2009; Zare และ Mirzaei, 2009)

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS จำลองระบบดูดซึมและศึกษา ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทน ด้วยสารละลาย อัลคานอลเอมีน เพื่อใช้ออกแบบระบบดูดซึมของผู้ประกอบการธุรกิจระบบบำบัดอากาศเสีย เพิ่ม ทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมที่ประสบปัญหามลพิษประเภทนี้ ให้เกิดประโยชน์และประสิทธิภาพ สูงสุดในการกำจัดกลิ่น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาสัดส่วนน้ำหนักและอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีน, สัดส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์, เมทิลเมอร์แคปเทนและคาร์บอนไดออกไซด์, อุณหภูมิของ ก๊าซเสียและสารละลายอัลคานอลเอมีนที่ป้อนเข้าสู่ระบบดูดซึม ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดหรือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทน โดยเน้นระบบดูดซับด้วยสารละลายอัลคานอลเอมีนชนิดต่างๆ
- 1.3.2 หาข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรม ASPEN HYSYS ที่ใช้จำลองระบบดูดซับด้วยสารอัลคานอลเอมีน
- 1.3.3 ประยุกต์ใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS จำลองระบบดูดซับด้วยข้อมูลตัวแปรต่างๆ จากงานวิจัย เอกสารประกอบของ ASPEN HYSYS และข้อมูลจากแหล่งอุตสาหกรรม โดยขอบเขตข้อมูลที่ศึกษามีดังนี้
- ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนน้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีนชนิดต่างๆ ได้แก่ 0.10-0.45 ของสาร DEA และ MDEA, 0.10-0.25 ของสาร MEA
 - ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสาร DEA, MEA และ MDEA ในรูป L^*/G^* ได้แก่ 6-16
 - ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทน ได้แก่ 0.003-0.030 ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ 0.300-0.400
 - ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียคือ 35-55 °C
 - ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนคือ 30-60 °C
- ทุกการจำลองอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงค่าตามกรณีศึกษาโดยตัวแปรอื่นๆ คงที่ และ L^*/G^* คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายเอมีนส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซเสีย
- 1.3.4 นำข้อมูลตัวแปรที่เหมาะสมจากการจำลองระบบดูดซับ มาจำลองระบบกำจัดก๊าซกรดที่ประกอบด้วยหอดูดซับ, หอกลิ้น, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, ปั๊ม และเครื่องอัดอากาศ
- 1.3.5 วิเคราะห์ผลการจำลอง สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

เป็นกรณีศึกษาที่นำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดอากาศหรือระบบกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทนด้วยสารละลายอัลคานอลเอมีนได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบบำบัดหรือระบบกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทนแบบต่างๆ เพื่อทราบถึงข้อดี ข้อเสีย และการนำประยุกต์ใช้งาน
- 1.5.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS
- 1.5.3 หาข้อมูลทางทฤษฎี สมการที่ใช้คำนวณของ Amine Property Package ที่มีแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับสารละลายของ Li-Mather Electrolyte และแบบจำลองของสถานะก๊าซแบบ Non-Ideal
- 1.5.4 ประยุกต์ใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS จากข้อมูลที่ได้จำลองระบบดูดซึม โดยทำตามกรณีศึกษาต่างๆ
- 1.5.5 วิเคราะห์ค่าของตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบดูดซึม
- 1.5.6 สรุปผลการจำลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบบำบัดหรือระบบกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทน	←		→				
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS		←		→			
3. หาข้อมูลทางทฤษฎี และสมการที่ใช้คำนวณของโปรแกรม ASPEN HYSYS			←		→		
4. ประยุกต์ใช้โปรแกรม ASPEN HYSYS จากข้อมูลที่ได้จำลองระบบดูดซึม				←		→	
5. วิเคราะห์ค่าของตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบดูดซึม					←		→
6. สรุปผลการจำลอง และเขียนวิทยานิพนธ์						←	→

บทที่ 2

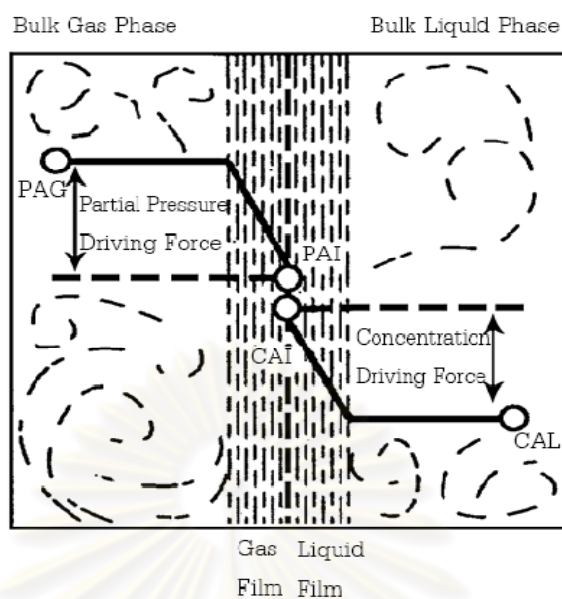
ทฤษฎี

2.1 ความหมายและระบบการดูดซึม

การดูดซึม (absorption) เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีที่ใช้หลักการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) ของก๊าซหรือไอซึ่งมีความสามารถในการละลาย (soluble gas) ออกจากกระแสอากาศไปยังตัวทำละลายที่เป็นของเหลว (solvent liquid) ระบบดูดซึม (absorption system) เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่จัดให้มีการสัมผัสกันระหว่างกระแสอากาศและตัวทำละลาย โดยใช้แรงผลักดัน (driving force) เป็นตัวทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร แรงผลักดันที่ใช้กำจัดก๊าซออกจากกระแสอากาศไปสู่ตัวทำละลาย ได้แก่ ความแตกต่างของความดันย่อย (partial pressure) ของก๊าซชนิดนั้นๆ ในกระแสอากาศกับค่าความดันไอ (vapor pressure) ของก๊าซชนิดดังกล่าวที่ผิวหน้าของสารละลายที่สัมผัส การดูดซึมเกิดขึ้นเมื่อแรงผลักดันมีค่าเป็นบวก กล่าวคือก๊าซจะออกจากกระแสอากาศไปสู่ตัวทำละลาย แต่ถ้าแรงผลักดันมีค่าเป็นลบกระบวนการที่เกิดขึ้นจะตรงข้ามกับการดูดซึม นั่นคือดีซอร์พชัน (desorption) หรือสตรIPPING (stripping) อันได้แก่ กระบวนการที่ก๊าซออกจากตัวทำละลายไปสู่อากาศหรือก๊าซเฉื่อย (inert gas) ใช้ในระบบกำจัดก๊าซมลพิษที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย (waste water) หรือระบบที่นำตัวทำละลายที่ใช้ดักจับก๊าซมลพิษแล้วกลับมาใช้ใหม่

ระบบดูดซึมถูกประยุกต์ใช้ในการย้ายมวลของก๊าซหรือไอเสีย ออกจากกระแสอากาศไปสู่ตัวทำละลาย แบบจำลองที่ใช้อธิบายกลไกของกระบวนการดูดซึมคือ ทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (two films theory) ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายมวลที่มีอยู่ในสถานะก๊าซและของเหลวระหว่างผิวของสองส่วนดังรูปที่ 2.1

ระบบการดูดซึมแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่แบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และแบบที่ใช้สารละลายอินทรีย์ที่มีค่าการระเหยต่ำเป็นตัวทำละลายแทนน้ำ (การดูดซึมเกิดได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี) โดย



รูปที่ 2.1 ทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (นพภาพร พานิช และคณะ, 2547)

ระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (aqueous system) ระบบนี้ก๊าซเสียต้องมี ความสามารถในการละลาย (solubility) ในน้ำเพียงพอ ณ อุณหภูมิของกระแสดอากาศเสียที่ถูก ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต สำหรับก๊าซที่มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ เช่น ก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide, SO_2) ต้องใช้น้ำในการบำบัดปริมาณมาก ดังนั้นน้ำจึงไม่ เหมาะสำหรับกระบวนการนี้ ตัวอย่างก๊าซที่ใช้น้ำบำบัด ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (hydrogen chloride, HCl) และก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (hydrogen fluoride, HF) โดยน้ำที่มีค่า pH สูงหรือมี ความเป็นด่างจะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรดได้ บางระบบเติมสารเคมี ประเภทด่างลงในน้ำเพื่อเพิ่มค่า pH เช่น การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) หรือปูนขาว

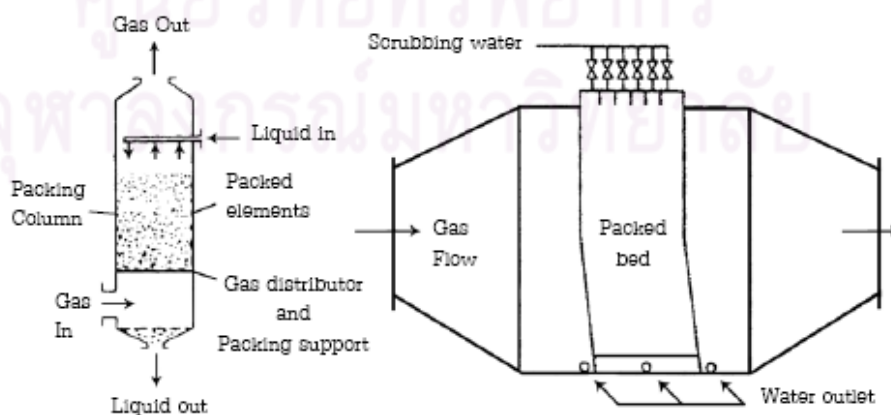
ระบบที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (non-aqueous system) ในระบบนี้ใช้ของเหลว ที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น สารเอมีน (amines) เป็นตัวทำละลายแทนน้ำ สามารถใช้ในการบำบัดไอ ของสารอินทรีย์บางชนิดและไอของสารอินทรีย์ได้ เมื่อต้องการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ สามารถสกัดก๊าซเสียออกได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าและหรือความดันน้อยกว่าระบบดูดซึม โดยเรียกว่า ระบบstripping (stripping system)

ระบบดูดซึมเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยอัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ เช่น การแพร่กระจาย อัตราการไหล ความเข้มข้น ความหนาแน่น และสถานะของตัวทำละลาย เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของตัวทำละลาย ความบริสุทธิ์ของตัวทำละลาย เป็นต้น (Calvert และ Englund, 1984; Nevers, 1995; McCabe, Smith และ Harriott, 2001; นพภาพร พานิช และคณะ, 2547)

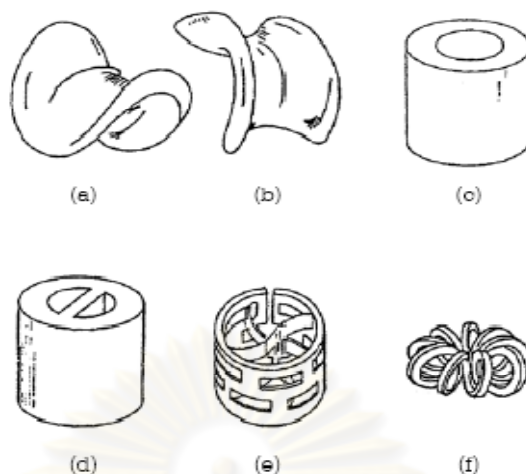
2.2 ประเภทของหอดูดซึม

หน้าที่ของหอดูดซึมคือทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างกระแสอากาศที่มีมลพิษปนเปื้อนกับของเหลวที่เป็นตัวทำละลาย โดยให้ของเหลวกลายเป็นหยดเล็กหรือแผ่นฟิล์มบางๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัส เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ดี หอดูดซึมที่นิยมใช้มีดังต่อไปนี้

หอบแบบแพค (packed column) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ดี หอมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับหอสเปรย์ชนิดอื่น ที่นิยมใช้มี 2 แบบ ได้แก่ แบบไหลสวนทาง (counter-current flow) และแบบไหลตั้งฉาก (cross-current flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนวัสดุที่บรรจุในหอบแบบแพค คือ packing ใช้เป็นตัวกลางสำหรับเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว ลักษณะ packing ที่ดีคือมีพื้นที่ผิวมาก มีช่องว่าง (void space) เพียงพอเพื่อให้ของเหลวไหลสะดวก มีความดันลด (pressure drop) น้อย มีความแข็งแรง และไม่แตกหักง่าย นอกจากนี้วัสดุดังกล่าวต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีในระบบ รูปแบบ packing ชนิดต่างๆ มีดังรูปที่ 2.3

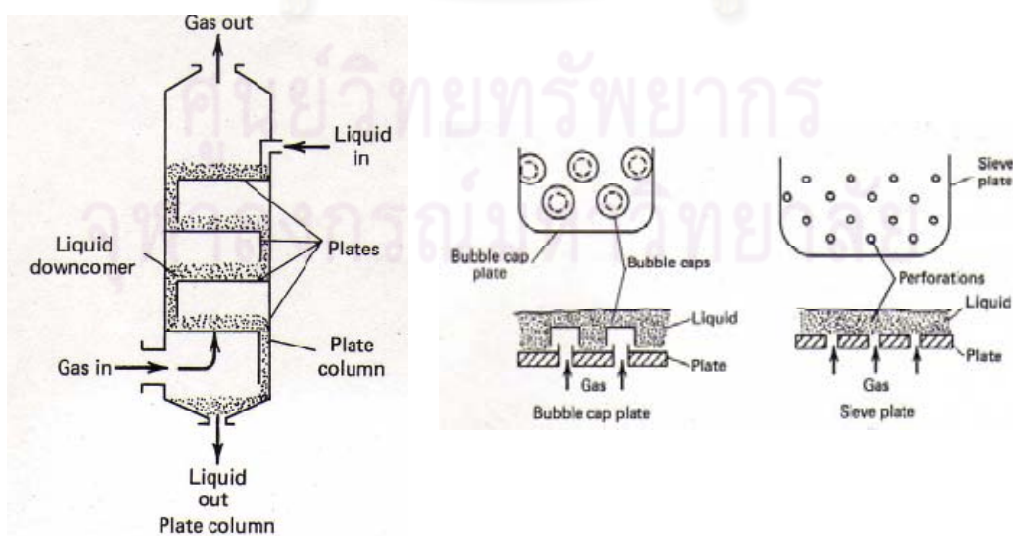


รูปที่ 2.2 หอบแบบแพค (Calvert และ Englund, 1984)



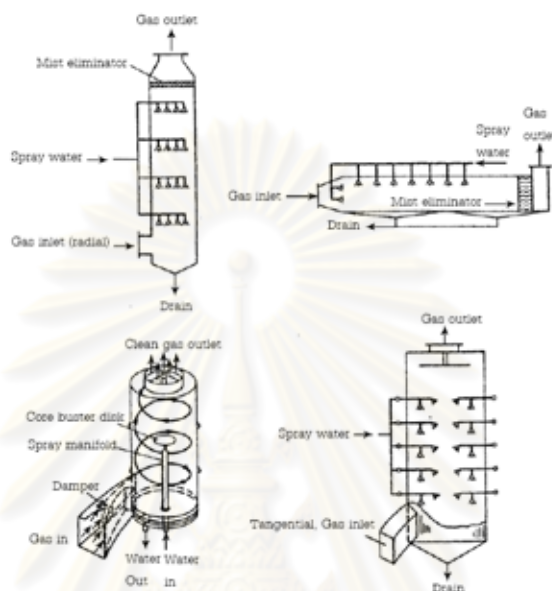
รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง packing (a) Berl saddle; (b) Intalox saddle; (c) Raschig ring;
(d) Lessing ring; (e) Pall ring; (f) Tellerette (Calvert และคณะ, 1984)

หอแบบเพลท (plate column) ใช้หลักการบังคับให้กระแสอากาศไหลย้อนขึ้นด้านบน ผ่านรูเล็กๆ ของแผ่นรองรับ (plate) สัมผัสกับชั้นของน้ำหรือของเหลวที่เป็นตัวทำละลายซึ่งไหลอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 2.4 ชนิดของการไหลเป็นแบบสวนทางกันโดยกระแสอากาศไหลขึ้นและของเหลวไหลลง เพลทที่อยู่ภายในมี 2 แบบ คือ เพลทแบบ bubble cap และเพลทแบบ sieve โดยทั่วไปจะใช้แผ่นรองรับต่อเนื่องเป็นอนุกรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดให้ได้ตามต้องการ



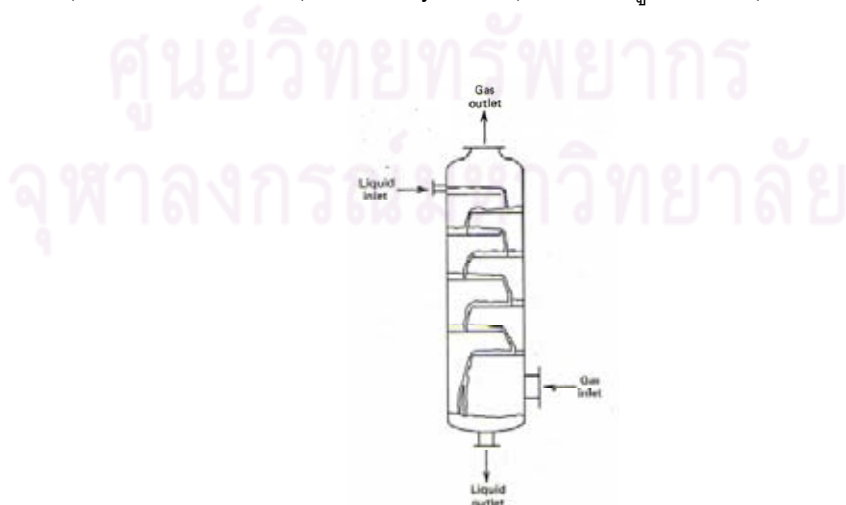
รูปที่ 2.4 หอแบบเพลท (Calvert และคณะ, 1984)

หอสเปรย์ (spray tower) ลักษณะทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.5 หลักการของอุปกรณ์คือ พ่นฝอยของเหลวลงสู่กระแสอากาศเพื่อล้างสารมลพิษที่ต้องการบำบัดออก ข้อดีคือยากที่จะอุดตันในกรณีที่กระแสอากาศมีอนุภาคปะปนอยู่ด้วย



รูปที่ 2.5 หอสเปรย์แบบต่างๆ (Calvert และคณะ, 1984)

การสัมผัสรูปแบบอื่นๆ ของกระบวนการดูดซึม ได้แก่ เวนจูรีสกรับเบอร์ (venturi scrubber), เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์แบบพ่นของเหลว (liquid-sprayed wet electrostatic precipitator) และหอแบบถาด (baffle tray tower) แสดงดังรูปที่ 2.6 (Calvert และ Englund, 1984)



รูปที่ 2.6 หอแบบถาด (Calvert และคณะ, 1984)

2.3 คุณสมบัติของก๊าซกรดและสารอัลคานอลเอมีน

ก๊าซกรด

ก๊าซกรดเป็นสิ่งปนเปื้อนในกระแสก๊าซ พบได้ในอุตสาหกรรมผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยก๊าซ CO_2 , H_2S , CH_3SH , COS และ SO_2 ที่จำเป็นต้องบำบัดหรือกำจัดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตหรือปล่อยสู่บรรยากาศ ปริมาณและชนิดของสารประกอบของก๊าซกรดในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีขอบเขตที่กว้างและแตกต่างกัน โดยตัวอย่างก๊าซกรดที่ปนเปื้อนในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีดังตารางที่ 2.1 และตัวอย่างคุณสมบัติทั่วไปของก๊าซกรดดังตารางที่ 2.2

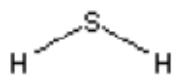
ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของก๊าซกรดและสารประกอบหลักในระบบบ่อกึ่งขยะหรือจากขยะชีวภาพ

สารประกอบ	ความเข้มข้น			
	ข้อมูลจากแหล่งอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้	(Ducom และคณะ, 2009)	(Gaur และคณะ, 2010)	(Tippayawong และ Thanompongchart, 2010)
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซ (Nm^3/h)	2,250-2,917	5,000	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล
สารประกอบหลักและรอง (%โดยปริมาตร)				
- มีเทน (CH_4)	55-65	45-49	47-55	53.1
- คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	30-40	24-39	45-52	46.8
- ไนโตรเจน (N_2)	ไม่มีข้อมูล	11-15	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล
- ออกซิเจน (O_2)	ไม่มีข้อมูล	2	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล
สารประกอบก๊าซเสีย (ส่วนในล้านส่วน)				
- ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	3,000-30,000	63.9-98.8	15.1-427.5	2,150
- เมทิลเมอร์แคปเทน (CH_3SH)	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล	12.1-84.9	ไม่มีข้อมูล

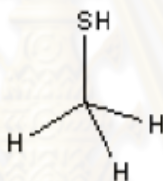
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซกรด (Perry และ Green, 2008)

รายละเอียด	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	34.08	48.11	44.01
จุดหลอมเหลว (°C)	-82.9	-121	-
จุดเดือด (°C)	-59.6	5.8	-78.5
จุดลุกติดไฟได้เอง (°C)	260	-	-
ความสามารถในการละลาย ในน้ำ (ซีซี/100 กรัม)	186 (ที่ 40 °C)	ละลายได้	90.1 (ที่ 20 °C)

ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมี



ไฮโดรเจนซัลไฟด์



เมทิลเมอร์แคปเทน



คาร์บอนไดออกไซด์

รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของก๊าซกรด

สารอัลคานอลเอมีน

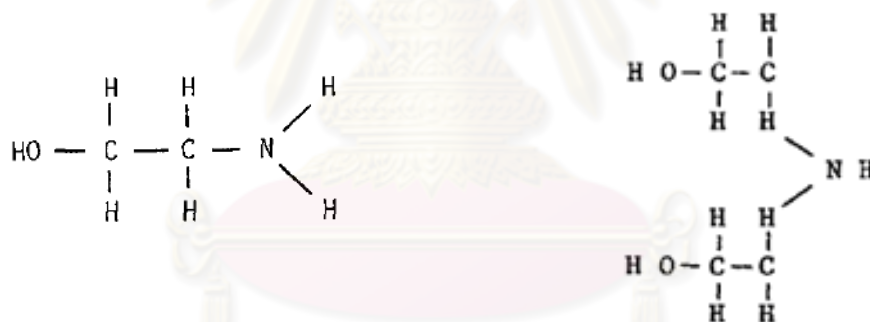
สารอัลคานอลเอมีนหรือเอมีนเป็นสารที่มีการยอมรับ และถูกใช้อย่างกว้างขวาง เพื่อเป็นสารละลายในการกำจัด CO₂, H₂S, COS และสารประกอบซัลเฟอร์จากแหล่งก๊าซธรรมชาติ สารอัลคานอลเอมีนถูกนำไปใช้และมีความสำคัญในอุตสาหกรรมบำบัดก๊าซกรดโดย สารไตรเอทานอลเอมีน (triethanolamine, TEA) เป็นสารแรกที่ถูกนำมาใช้เชิงพาณิชย์สำหรับ กระบวนการบำบัดอากาศ ต่อมาการประยุกต์ใช้ทั่วไปถูกแทนที่ด้วยสารอัลคานอลเอมีนชนิดอื่นๆ ได้แก่ โมโนเอทานอลเอมีน (MEA), ไดเอทานอลเอมีน (DEA), ไดไอโซโพรพานอลเอมีน (diisopropanolamine, DIPA), ไดไกลคอลเอมีน (DGA) และเมทิลไดเอทานอลเอมีน (MDEA) โดยสารเอมีนทั้งหมดสามารถแบ่งชนิดได้จากโครงสร้างทางเคมี คือ ไพรมารีเอมีน (primary amine), เซคันดารีเอมีน (secondary amine) และเทอเชียรีเอมีน (tertiary amine)

คำนำหน้า “โมโน”, “ได” และ “ไตร” อ้างอิงจากดีกรีของอนุมูลแทนที่ที่กิ่งบนอะมิโนไนโตรเจน (amino nitrogen) ตามโครงสร้างที่แสดงดังรูป 2.8 และตัวอย่างคุณสมบัติทั่วไปของสารอัลคานอลเอมีนแสดงไว้ดังตารางที่ 2.3 (Perry และคณะ, 2008)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของสารอัลคานอลเอมีน

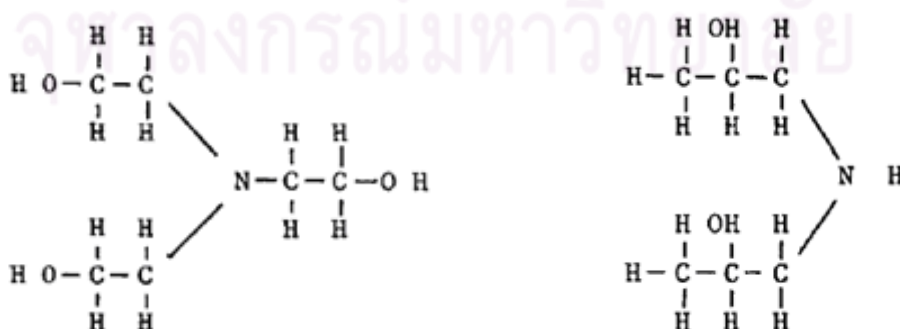
รายละเอียด	DEA	MEA	MDEA
น้ำหนักโมเลกุล	105.14	61.08	119.17
จุดหลอมเหลว (°C)	27	10	-21
จุดเดือด (°C)	217	170	247
จุดลุกติดไฟได้เอง (°C)	661.85	410	265

ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมี



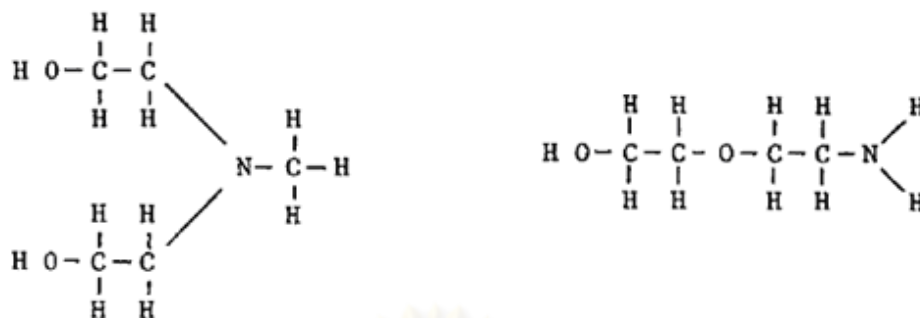
โมโนเอทานอลเอมีน

ไดเอทานอลเอมีน



ไตรเอทานอลเอมีน

ไดไอโซโพรพานอลเอมีน



เมทิลไดเอทานอลเอมีน

ไดเอทานอลเอมีน

รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของสารอัลคานอลเอมีน

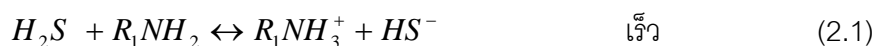
2.4 กลไกการดูดซึมทางเคมี

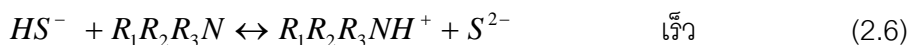
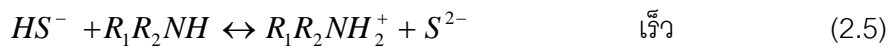
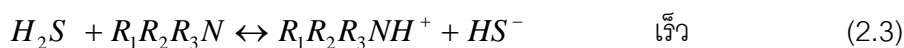
กลไกการดูดซึมทางเคมีทั้งหมดของก๊าซ H_2S , CH_3SH และ CO_2 ได้แสดงไว้ดังสมการข้างล่าง โดยไพรมารีเอมีนแทนด้วยสัญลักษณ์ R_1NH_2 , เซคันดารีเอมีนแทนด้วย R_1R_2NH และเทอเชียรีเอมีนแทนด้วย $R_1R_2R_3N$ โดยที่

- ไมโนเอทานอลเอมีน (ไพรมารีเอมีน): $R_1 = CH_2CH_2OH$
- ไดเอทานอลเอมีน (เซคันดารีเอมีน): $R_1 = R_2 = CH_2CH_2OH$
- เมทิลไดเอทานอลเอมีน (เทอเชียรีเอมีน): $R_1 = R_2 = CH_2CH_2OH$ และ $R_3 = CH_3$

สำหรับไฮโดรเจนซัลไฟด์

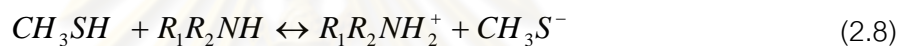
สมการทั้งหมดระหว่าง H_2S กับสารอัลคานอลเอมีนเป็นสมการพื้นฐานทั่วไป ก๊าซ H_2S ที่ละลายในสารละลายแล้วสามารถทำปฏิกิริยาได้โดยตรงและรวดเร็วกับสารอัลคานอลเอมีน เกิดเป็นไบซัลไฟด์ (bisulfide) ดังแสดงจากสมการ (2.1) ถึง (2.3) และเกิดเป็นซัลไฟด์ดังสมการ (2.4) ถึง (2.6)





สำหรับเมทิลเมอร์แคปเทน

ก๊าซ CH_3SH มีความเป็นกรดน้อยกว่าก๊าซ H_2S หรือ CO_2 แต่มีปฏิกิริยาค้ำยเคียงกันโดยเกิดพันธะแบบเกลือกับสารละลายอัลคานอลเอมีน ตัวอย่างดังสมการ (2.7) ถึง (2.9)



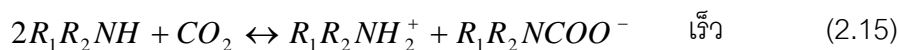
สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์

กรณีของไพรมารีและเซคันดารีเอมีน สารละลายนี้ทำปฏิกิริยากับ CO_2 ที่ละลายในสารละลายเกิดเป็นหมู่คาร์บาเมต (carbamate) อันได้แก่ R_1NHCOO^- และ $R_1R_2NCOO^-$ ของไพรมารีและเซคันดารีเอมีนตามลำดับ และเอมีนที่ถูกโปรโตเนต (protonate amines) ได้แก่ $R_1NH_3^+$ และ $R_1R_2NH_2^+$ ของไพรมารีและเซคันดารีเอมีนตามลำดับ

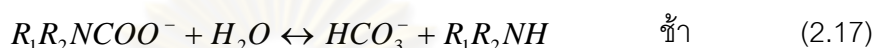
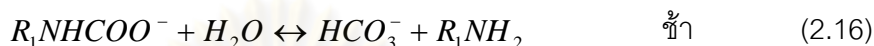


สมการรวมปฏิกิริยาระหว่าง CO_2 กับไพรมารีและเซคันดารีเอมีน แสดงไว้ดังสมการ (2.14) และ (2.15)

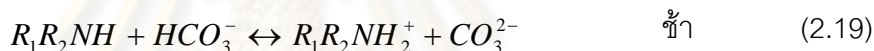




คาร์บาเมตทำปฏิกิริยากับน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต (bicarbonate, HCO_3^-) และเกิดเป็นเอมีนที่สามารถทำปฏิกิริยากับ CO_2 เพิ่มเติมได้ แสดงไว้ดังสมการด้านล่าง



ที่ $pH > 10$ ไบคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ (HCO_3^-) ทำปฏิกิริยาและเกิดเป็นคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ (CO_3^{2-}) แสดงไว้ดังสมการ (2.18) และ (2.19)



กรณีของเทอเชียรีเอมีน สารละลายนี้ขาดพันธะ N-H ที่จำเป็นสำหรับการเกิดของคาร์บาเมตไฮดรอกไซด์ ด้วยเหตุนี้เทอเชียรีเอมีนจึงไม่สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ CO_2 ได้ อย่างไรก็ตามในสารละลายเทอเชียรีเอมีนก่อให้เกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กับ CO_2 สร้างผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนตและเอมีนที่ถูกโปรโตเนต แสดงไว้ดังสมการต่อไปนี้ (Iliuta และ Larachi, 2007; Nuttawee lam-amphai, 2008)



หากพิจารณาระบบการดูดซับก๊าซกรด เช่น CO_2 และ H_2S ที่แตกตัวในน้ำในสารละลายอัลคานอลเอมีน เช่น MEA, DEA และ MDEA มีตัวอย่างปฏิกิริยาสมดุลเคมี (chemical equilibrium reaction) ดังนี้





เมื่อ $DEACOO^-$ และ $MEACOO^-$ แทนคาร์บาเมตไดออกอน ส่วนค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant), K_i อ้างอิงในหน่วยสัดส่วนโมล โดยขึ้นกับอุณหภูมิที่มีสมการอธิบายดังนี้ (Haghtalab และ Shojaeian, 2010; Nasrifar และ Tafazzol, 2010)

$$\ln K_i = C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3 \ln T + C_4 T \quad (2.31)$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ C_1 ถึง C_4 (Haghtalab และ Shojaeian, 2010; Nasrifar และ Tafazzol, 2010)

สมการ	รายละเอียด	C_1	C_2	C_3	C_4	ขอบเขต อุณหภูมิ (K)
2.21	การแตกตัว H_2O	132.899	-13445.9	-22.4773	0.0	273-498
2.22	การเกิด HCO_3^-	231.465	-12092.1	-36.7816	0.0	273-498
2.23	การเกิด CO_3^{2-}	216.049	-12431.7	-35.4819	0.0	273-498
2.24	การเกิด HS^-	214.582	-12995.4	-33.5471	0.0	273-423
2.25	การเกิดซัลไฟด์	-32.0	-3338.0	0.0	0.0	287-343
2.26	การแตกตัว $MDEAH^+$	-9.4165	-4234.98	0.0	0.0	298-333
2.27	การแตกตัว $DEAH^+$	-13.3373	-4218.71	0.0	0.009872	273-323
2.28	DEA carbamate	16.5027	-4068.76	-1.5027	0.0	298-393
2.29	การแตกตัว $MEAH^+$	2.1211	-8189.38	0.0	-0.007484	273-323
2.30	MEA carbamate	2.8898	-3635.09	0.0	0.0	298-393

2.5 การประยุกต์ใช้สารอัลคานอลเอมีน

โมโนเอทานอลเอมีน (MEA)

ระบบกำจัดก๊าซกรดด้วยสารโมโนเอทานอลเอมีน (MEA) ถูกใช้ที่ระบบความดันต่ำและปริมาณก๊าซกรดมีความหนาแน่น สาร MEA ใช้อย่างกว้างขวางเพื่อดูดซับก๊าซกรด อาทิ เช่น CO_2 , H_2S จากแหล่งก๊าซธรรมชาติและก๊าซสังเคราะห์ สาร MEA เป็นเบสแก่ที่สุดเทียบกับสารเอมีนชนิดอื่นๆ และเกิดปฏิกิริยากับก๊าซกรดได้เร็วที่สุด เพราะสาร MEA มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า สามารถกำจัดก๊าซกรดได้มากกว่าโดยเทียบจากเกณฑ์หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตร เป็นเหตุผลให้ลดปริมาณการหมุนเวียนของสารละลายเอมีนลงได้ สาเหตุการสูญเสียสาร MEA เกิดจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาบางส่วนเป็นของแข็ง และสารนี้มีค่าความดันไอสูงกว่าสารเอมีนชนิดอื่น ปัญหาทั่วไปของสาร MEA คือ การกัดกร่อน เสื่อมสภาพ และใช้พลังงานสูง

ไดเอทานอลเอมีน (DEA)

สารละลาย DEA มีรูปแบบและหลักการการใช้งานเหมือนกับสาร MEA นอกจากนี้เรื่อง strength ของสารละลาย โดยปกติ DEA จะใช้งานที่ความเข้มข้นของสารละลาย 25 ถึง 35 % โดยน้ำหนัก สาร DEA เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้และเหมาะสมสำหรับกำจัดก๊าซกรดที่มีสารซัลเฟอร์ในปริมาณมากหรืออัตราส่วนของก๊าซ H_2S ต่อก๊าซ CO_2 สูง นอกจากนี้ความร้อนจากปฏิกิริยา (heat of reaction) ของสาร DEA กับก๊าซกรดน้อยกว่าสาร MEA ดังนั้นจึงสะดวกในระบบที่นำสารละลายกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากใช้พลังงานน้อยกว่า

เมทิลไดเอทานอลเอมีน (MDEA)

สาร MDEA เป็นสารที่มีการประยุกต์ใช้ภายหลังในระบบก๊าซธรรมชาติ สามารถใช้ในระบบที่มีความดันสลับได้ เป็นสารที่มีความสามารถในการเลือกจับและทำปฏิกิริยากับก๊าซ H_2S ได้ดีในขณะที่มีก๊าซ CO_2 เจือปนอยู่ด้วย สามารถใช้ได้ทั้งอัตราส่วนของก๊าซ H_2S ต่อก๊าซ CO_2 น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับไพรมารีและเซคันดารีเอมีนแล้วสาร MDEA ประหยัดพลังงานกว่า ค่าความดันไอน้อยกว่า และมีความต้านทานในการเสื่อมสภาพมากกว่า

ไตรเอทานอลเอมีน (TEA)

ถึงแม้ว่าสารละลาย TEA เป็นสารแรกที่ถูกนำมาใช้เชิงพาณิชย์ แต่ในปัจจุบันสารนี้ถูกแทนที่ด้วยสารละลาย MEA, DEA หรือ DGA เนื่องจากสาร TEA เกิดปฏิกิริยากับ H_2S และ CO_2 ได้น้อยและปัญหาเรื่องการบำบัดให้ได้ตามค่ามาตรฐานกำหนด

ไดโกลคอลเอมีน (DGA)

สาร DGA ถูกพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ปี 1950 เพื่อใช้ในระบบการกำจัดก๊าซกรดทั้งในอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติและโรงกลั่นน้ำมัน สาร DGA ใช้ได้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 50-70 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงจะใช้อัตราการไหลของสารละลายที่น้อยกว่าเป็นผลให้ลดพลังงานไอน้ำในหม้อต้ม (reboiler) นอกจากนี้ใช้กำจัดก๊าซ H_2S แล้วสาร DGA ยังนิยมใช้กำจัดก๊าซ COS และเมอร์แคปเทนด้วย

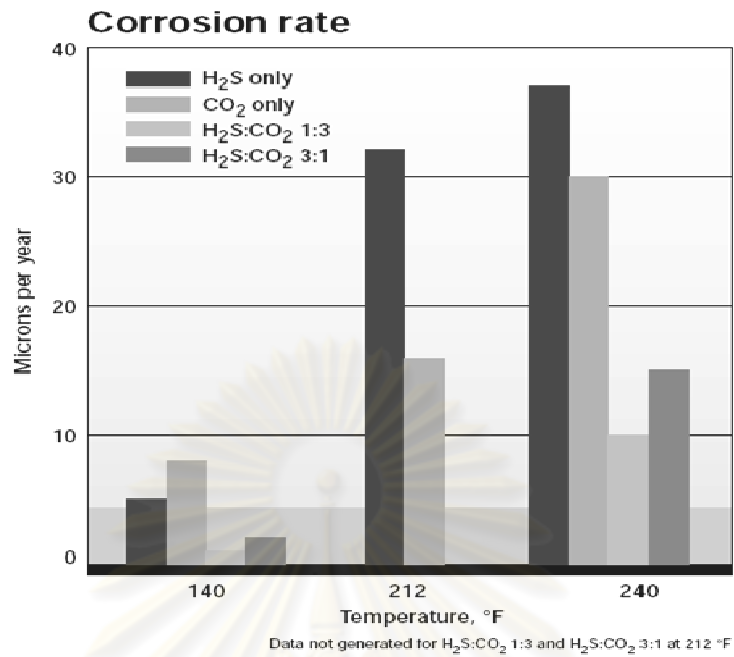
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบค่าเฉพาะของสารละลายอัลคานอลเอมีนต่างชนิด (Khakdaman และคณะ, 2008; Amines and Plasticizers Limited, 2010)

รายละเอียด	DEA	MEA	MDEA
Strength ของสารละลาย (%โดยน้ำหนัก)	25-35	15-20	20-50
ปริมาณ loading ของก๊าซกรด (โมล/โมล)	0.30-0.40	0.30-0.40	0.70-0.80
ความร้อนจากปฏิกิริยาสำหรับ H ₂ S (kJ/kg)	1188	1278	1213
ความร้อนจากปฏิกิริยาสำหรับ CO ₂ (kJ/kg)	1518	1917	1394
การเลือกจับ, selectivity	2.27	0.89	3.85

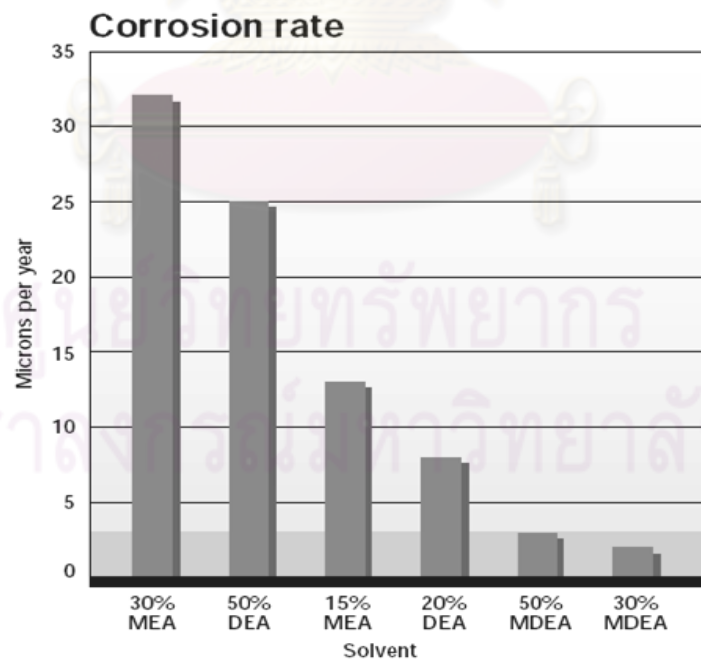
หมายเหตุ: - ปริมาณ loading ของก๊าซกรดหรือ acid gas loading เป็นค่าแนะนำในการออกแบบให้กับโครงสร้างที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เพื่อลดปัญหาการกัดกร่อน
 - selectivity คืออัตราส่วนของ (%โดยโมลของ H₂S ที่ถูกกำจัดต่อ %โดยโมลของ H₂S ในก๊าซเสียขาเข้า, Feed Gas) ต่อ (%โดยโมลของ CO₂ ที่ถูกกำจัดต่อ %โดยโมลของ CO₂ ในก๊าซเสียขาเข้า, Feed Gas)

2.6 การกัดกร่อนของสารอัลคานอลเอมีนในระบบกำจัดก๊าซกรด

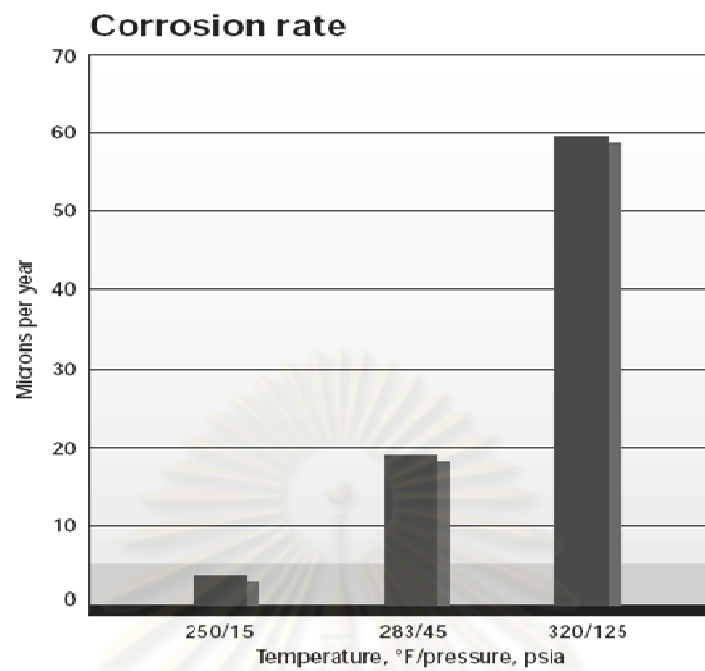
ปัจจัยทั้งทางกายภาพและทางเคมี เป็นส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบบำบัดหรือกำจัดก๊าซกรดได้ สาเหตุสำคัญคือความเข้มข้นของสารละลาย ปริมาณก๊าซกรดและชนิดของก๊าซกรดที่ผสมในสารละลาย ปัจจัยอื่นๆ คือ อุณหภูมิ ความดัน การหลุดของก๊าซกรดออกจากสารละลาย ผลิตภัณฑ์ที่ทำให้สารละลายเสื่อมสภาพ heat stable salts และ foaming ถึงแม้ว่าสารละลายอัลคานอลเอมีนที่ความเข้มข้นสูง ทำให้ปริมาณก๊าซกรดผสมในสารละลายได้มากกว่า แต่ในการออกแบบจริง ความเข้มข้นของสารละลายที่ยอมรับได้ถูกจำกัดไว้ เพื่อลดความสามารถในการกัดกร่อน โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารไพรมารีเอมีนที่ยอมรับได้จะต่ำกว่าเซคันดารีเอมีนและเทอเชียรีเอมีน ตัวอย่างปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนของสารอัลคานอลเอมีนต่อโลหะ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9 ถึงรูปที่ 2.12 (Dupart, Bacon และ Edwards, 1993; Nuttawee lam-amphai, 2008)



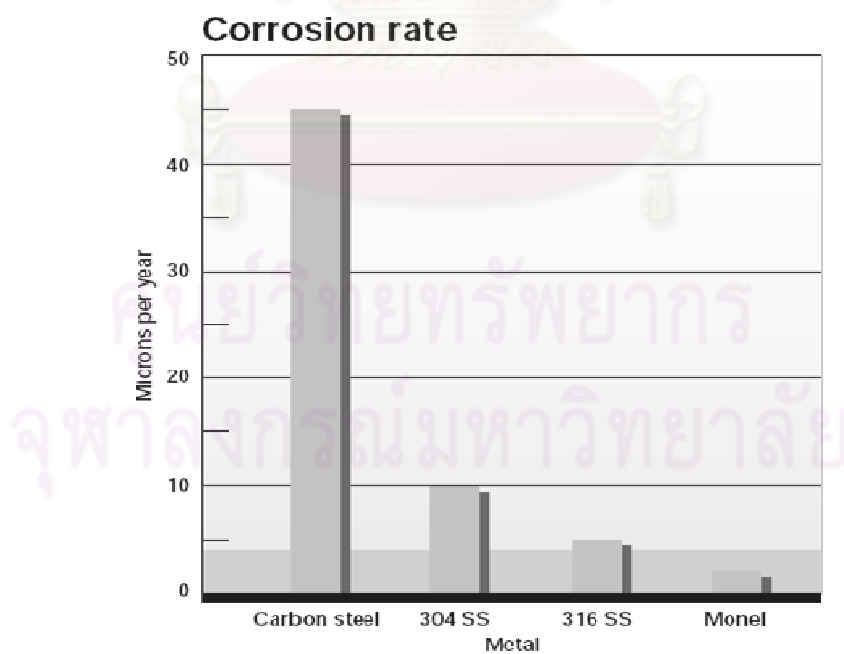
รูปที่ 2.9 อัตราการกัดกร่อนสำหรับ 15 % โดยน้ำหนักของ MEA กับเหล็กกล้าคาร์บอน
(Dupart, Bacon และ Edwards, 1993)



รูปที่ 2.10 ผลทดสอบการกัดกร่อนที่ผิวด้วยก๊าซ CO₂ ที่สภาวะบรรยากาศกับเหล็กกล้าคาร์บอน
7 วันทดลองที่ 210 °F (Dupart และคณะ, 1993)



รูปที่ 2.11 อัตราการกัดกร่อนสำหรับ 20 % โดยน้ำหนักของ MEA และก๊าซ CO_2 ที่สภาวะบรรยากาศกับเหล็กกล้าคาร์บอน (Dupart และคณะ, 1993)



รูปที่ 2.12 อัตราการกัดกร่อนของโลหะต่างชนิดด้วย 30 % โดยน้ำหนักของ MEA ที่ 250 °F และก๊าซ CO_2 ที่สภาวะบรรยากาศ (Dupart และคณะ, 1993)

2.7 การประมาณค่า Flood และความดันลด (Pressure drop) ในหอแบบแพค

การหาค่าความดันลด (Pressure drop) ในหอแบบแพค สามารถอ่านค่าได้จากกราฟ generalized pressure drop correlation (GPDC) ดังรูปที่ 2.13 โดยจุดพิกัดคำนวณได้จากสมการที่ (2.32) และ (2.33) ตามลำดับ

$$CP = C_s F_p^{0.5} v^{0.05} = U_s \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right)^{0.50} F_p^{0.5} v^{0.05} \quad (2.32)$$

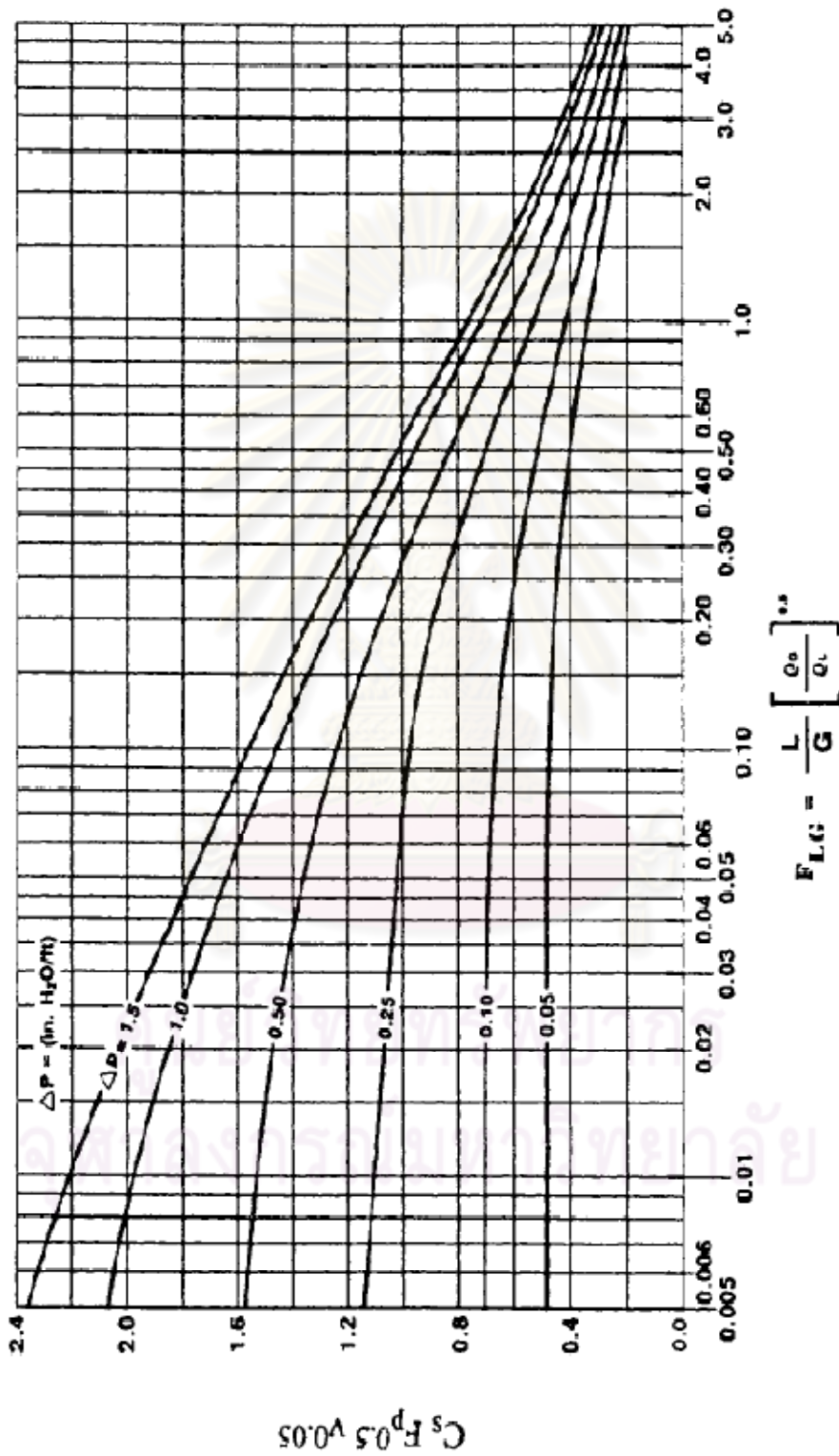
$$F_{LG} = \frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.50} \quad (2.33)$$

- เมื่อ U_s = ความเร็วก๊าซที่หน้าตัด (superficial gas velocity), ft/s
 ρ_G, ρ_L = ความหนาแน่นของก๊าซและของเหลว, lb/ft³ หรือ kg/m³
 F_p = Packing factor, ft⁻¹
 v = ความหนืดของของเหลว (kinematic viscosity of liquid), cS
 C_s = C-factor, ft/s
 CP = Capacity-factor
 L = ความเร็วเชิงมวลของของเหลว (liquid mass velocity), kg/(s.m²)
 G = ความเร็วเชิงมวลของก๊าซ (gas mass velocity), kg/(s.m²)

และการประมาณค่า Flood สามารถคำนวณได้จากสมการของ Kister และ Gill ที่แสดงไว้ดังสมการ (2.34)

$$\Delta P_{flood} = 0.12 F_p^{0.70} \quad (2.34)$$

ตัวอย่างค่า Packing factor และค่าเฉพาะอื่นๆของ packing แสดงไว้ดังตารางที่ 2.6 (Perry และ Green, 2008)



รูปที่ 2.13 Generalized pressure drop correlation ของ Eckert ที่ถูกแก้ไขโดย Strigle

(Perry และคณะ, 2008)

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างค่าเฉพาะของ packing (Perry และคณะ, 2008)

Name	Size, mm, or no. (#)	Bed density, ^o kg/m ³	Area, m ² /m ³	% voids	Packing factor, m ⁻¹		Vendor
					Normal F_p^1	Dry F_{pd}^1	
Metals							
Pall rings (also Flexi-rings, Ballast rings, P-rings)	16	510	360	92	256	262	Various
	25	325	205	94	183	174	
	38	208	130	95	131	91	
	50	198	105	96	89	79	
	90	135	66	97	59	46	
Metal Intalox (IMTP) [also I-rings, AHPP, RSMR, MSR] ¹	25	224	207	97	134	141	Koch-Clitsch [Sulzer, Amistco, Rauschert, Montz] ¹
	40	153	151	97	79	85	
	50	166	98	98	59	56	
	70	141	60	98	39	—	
Nutter rings	#0.7	177	226	98	—	128	Sulzer
	#1	179	168	98	98	89	
	#1.5	181	124	98	79	66	
	#2	144	96	98	59	56	
	#2.5	121	83	98	52	49	
	#3.0	133	66	98	43	36	
Raschig Super-ring	#0.5	275	250	98	—	—	Raschig
	#0.7	185	175	98	—	—	
	#1	220	160	98	82	—	
	#1.5	170	115	98	59	—	
	#2	155	98	99	49	—	
	#3	150	80	98	36	—	
Cascade mini-rings (CMR)	#1	389	250	96	131	102	Koch-Clitsch
	#1.5	285	190	96	95	—	
	#2	234	151	97	72	79	
	#2.5	195	121	97	62	—	
	#3	160	103	98	46	43	
	#4	125	71	98	33	32	
Fleximax	#300	—	141	98	85	—	Koch-Clitsch
	#400	—	85	98	56	—	
Jaeger Tripacks (Top-Pak)	#1	223	118	96	85	—	Raschig
	#2	170	75	98	46	—	
VSP	25	352	206	98	105 ¹	—	Raschig
	50	296	112	96	69	—	
Ralu-rings	25	310	215	98	157 ¹	—	Raschig
	38	260	135	97	92 ¹	—	
	50	200	105	98	66 ¹	—	
Hiflow	25	298	203	96	—	—	Rauschert
	50	175	92	98	52	—	
Hy-Pak, K-Pak, AIPR	#1	262	174	97	148	—	Koch-Clitsch, Amistco
	#1.5	180	118	98	95	—	
	#2	161	92	98	85	—	
	#3	181	69	98	52	—	
Raschig rings (1/16 in wall)	19	1500	245	80	722	—	Various
	25	1140	185	86	472	492	
	50	590	95	92	187	223	
	75	400	66	95	105	—	

2.8 การหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η)

การหาค่าความสามารถในการดูดซับของหอดูดซับ พิจารณาจากค่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) หรือ removal efficiency โดยอ้างอิงสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_i = \frac{(Vy_i)_{inlet} - (Vy_i)_{outlet}}{(Vy_i)_{inlet}} \times 100\% \quad (2.35)$$

เมื่อ η = ประสิทธิภาพในการกำจัด

i = ชนิดของสารประกอบ

V = อัตราการไหลเชิงโมลของไอหรือก๊าซ, kmol/h

y = สัดส่วนโมลในไอหรือก๊าซ



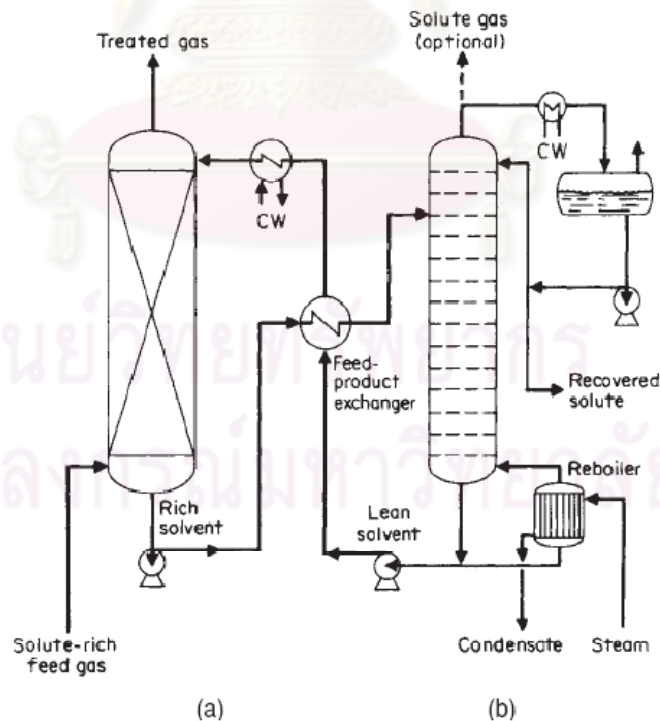
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

หลักการของ Amine Property Package

3.1 หลักการเบื้องต้นและขอบเขตการใช้งาน

ปัจจุบันกระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษมีหลายวิธี แต่อย่างไรก็ตามไม่มีวิธีหนึ่งวิธีใดที่รองรับได้ทุกการประยุกต์ใช้ การกำจัดก๊าซกรดผ่านระบบดูดซึมด้วยสารละลายเป็นวิธีที่นิยม โดยเฉพาะด้วยสารอัลคานอลเอมีน โดย Amine Property Package ในโปรแกรม ASPEN HYSYS เป็นกลุ่มข้อมูลที่ออกแบบเพื่อใช้จำลองระบบบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide, CO₂) ด้วยสารละลายอัลคานอลเอมีนที่มีรูปแบบการจำลองได้ทั้งการดูดซึมและดีซอร์พชันหรือสทริปปิง โดยอากาศเสีย (feed gas) จะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างและสัมผัสกับสารละลายดักจับแบบไหลสวนทางกันในระบบดูดซึมแบบถาด (trayed absorber) หรือแบบแพค (packed absorber) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบดูดซึมก๊าซโดยใช้สารละลายที่นำกลับมาใช้ใหม่
(a) ระบบดูดซึม; (b) ระบบดีซอร์พชัน (Perry และ Green, 2008)

Amine Property Package มีฐานข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีจำกัดอยู่ที่ สารละลายเอมีนและสารประกอบต่างๆ ดังตาราง 3.1 พร้อมทั้งขอบเขตการใช้งานสารละลายเอมีนดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สารประกอบที่ประยุกต์ใช้ได้ ใน Amine Property Package (Aspentech, 2005)

ประเภทสารประกอบ	โครงสร้างสารประกอบ
ก๊าซกรด	CO ₂ , H ₂ S, COS, CS ₂
ไฮโดรคาร์บอน	CH ₄ ถึง C ₁₂ H ₂₆
โอเลฟิน	C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆
เมอร์แคปเทน	CH ₃ SH, C ₂ H ₆ S
ไม่ใช่สารไฮโดรคาร์บอน	H ₂ , N ₂ , O ₂ , CO, H ₂ O
อะโรมาติก	C ₆ H ₆ , C ₇ H ₈ , C ₈ H ₁₀

ตารางที่ 3.2 แสดงขอบเขตค่าสมดุลการละลาย (Equilibrium Solubility) เมื่อใช้ Amine Property Package (Aspentech, 2005)

อัลคานอลเอมีน	ความเข้มข้นของสารอัลคานอลเอมีน (%โดยน้ำหนัก)	ความดันย่อยก๊าซกรด (psia)	อุณหภูมิ (°F)
โมโนเอทานอลเอมีน, MEA	0-30	0.00001-300	77-260
ไดเอทานอลเอมีน, DEA	0-50	0.00001-300	77-260
ไตรเอทานอลเอมีน, TEA	0-50	0.00001-300	77-260
เมทิลไดเอทานอลเอมีน, MDEA	0-50	0.00001-300	77-260
ไดโกลคคอลเอมีน, DGA	50-70	0.00001-300	77-260
ไดไอโซโพรพานอลเอมีน, DIPA	0-40	0.00001-300	77-260

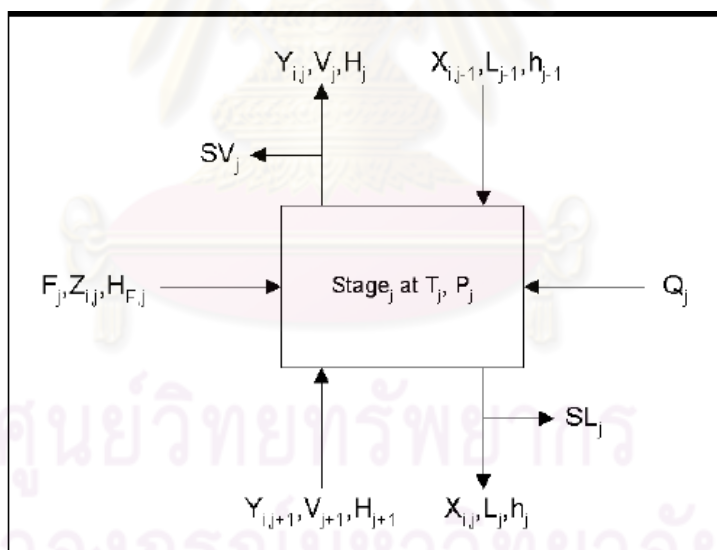
หมายเหตุ: ข้อมูลไม่สามารถประยุกต์ใช้ในกรณีที่ปริมาณก๊าซกรดรวม (H₂S+CO₂) ต่อโมลของสารละลายอัลคานอลเอมีนมีค่าเกิน 1

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.2.1 การจำลองชั้นไม่สมดุล (Non-Equilibrium Stage Model)

การจำลองชั้นไม่สมดุลถูกพัฒนาขึ้นเพื่อจำลองกระบวนการถ่ายโอนมวลสารของสารหลายชนิดในหลายชั้นของระบบบำบัดด้วยสารเอมีนใน Amine Property Package หลักการทั่วไปของการจำลองชั้นแต่ละชั้นในหอแสดงดังรูปที่ 3.2 แนวคิดสำคัญที่ถูกใช้คือ อัตราการดูดซึมและอัตราการดีซอร์พชันของก๊าซกรดไปยังสารละลายเอมีนและออกจากสารละลายนั้น มีการพิจารณาอัตราการถ่ายโอนมวลสาร โดยอัตรานี้ขึ้นกับค่าสมดุลและตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (kinetic parameter)

การจำลองร่วมกับการประยุกต์ Murphree-type vapor efficiency ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการถ่ายโอนมวลสารของก๊าซกรดแต่ละชนิด



รูปที่ 3.2 รูปแบบการไหลในหอและตัวแปร (Aspentech, 2005)

3.2.2 ประสิทธิภาพของชั้น (Stage Efficiency)

ประสิทธิภาพของชั้นถูกนิยามไว้ภายใต้ Amine Property Package โดยมีสมการดังนี้

$$\eta' = \frac{(V_j + SV_j)Y_{i,j} - V_{j+1}Y_{i,j+1}}{(V_j + SV_j)K_{i,j}X_{i,j} - V_{j+1}Y_{i,j+1}} \quad (3.1)$$

เมื่อ η' = ประสิทธิภาพของขั้น

i = ชนิดของสารประกอบ (component number)

j = เลขของขั้น (stage number)

K = อัตราส่วนสมดุล (equilibrium ratio)

V = อัตราการไหลเชิงโมลของไอ (molar flow rate of vapor), kmol/h

X, x = สัดส่วนโมลในของเหลว (mole fraction in liquid phase)

Y, y = สัดส่วนโมลในไอ (mole fraction in vapor phase)

SV = อัตราการไหลเชิงโมลของของเหลวในกระแสปลีกย่อย (molar side stream flow rate of liquid), kmol/h

ประสิทธิภาพของขั้นเป็นฟังก์ชันของ ค่าคงที่อัตราทางจลนพลศาสตร์ (kinetic rate constants) สำหรับปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกรดแต่ละชนิดกับสารเอมีน คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสารละลายเอมีน ความดัน อุณหภูมิ และการออกแบบของตัวแปรต่างๆ ในหอ เช่น ขนาดหอ ความสูงและความยาวของ weir

3.2.3 แบบจำลองของหอหลายขั้น (Multistage Column Model)

ผลการจำลองได้จากสมการต่างๆ ที่อธิบายดังสมการ 3.2 ถึง 3.6 สมการทั้งหมดนี้ใช้คำนวณในแต่ละขั้นของหอ โดยประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) เพื่อคำนวณสมการในการจำลองขั้นไม่สมดุล

สมการดุลมวลสารรวม (Overall Material Balance)

$$F_j + L_{j-1} - (L_j + SL_j) - (V_j + SV_j) = 0 \quad (3.2)$$

สมการดุลมวลสารประกอบ (Component Material Balance)

$$F_j z_{i,j} + L_{j-1} x_{i,j-1} + V_{j+1} y_{i,j+1} - (L_j + SL_j) x_{i,j} - (V_j + SV_j) y_{i,j} = 0 \quad (3.3)$$

สมการดุลพลังงาน (Energy Balance)

$$F_j H_{F_j} + Q_j + L_{j-1} h_{j-1} + V_{j+1} H_{j+1} - (L_j + SL_j) h_j - (V_j + SV_j) H_j = 0 \quad (3.4)$$

ความสัมพันธ์เชิงสมดุล (Equilibrium Relationship)

$$\eta'_{i,j} K_{i,j} x_{i,j} (V_j + SV_j) - (V_j + SV_j) y_{i,j} + (1 - \eta'_{i,j}) V_{j+1} y_{i,j+1} = 0 \quad (3.5)$$

สมการรวม (Summation Equation)

$$\sum y_{i,j} - 1.0 = 0 \quad (3.6)$$

- เมื่อ F = อัตราการไหลเชิงโมลของสายป้อน (molar flow rate of feed), kmol/h
 L = อัตราการไหลเชิงโมลของของเหลว (molar flow rate of liquid), kmol/h
 SL = อัตราการไหลเชิงโมลของไอในกระแสปลีกย่อย (molar side stream flow rate of vapor), kmol/h
 z = สัดส่วนโมลในสายป้อน (mole fraction in feed)
 Q = อัตราการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer rate), kJ/h
 H = เอนทาลปีของไอ (enthalpy of vapor), kJ/kmol
 h = เอนทาลปีของของเหลว (enthalpy of liquid), kJ/kmol
 H_F = เอนทาลปีของสายป้อน (enthalpy of feed), kJ/kmol

3.2.4 สมดุลการละลาย (Equilibrium Solubility)

แบบจำลอง Li-Mather Electrolyte

Amines Property Package เป็นการประยุกต์ใช้เพื่อจำลองคุณสมบัติของสามสถานะ โดยค่า K จากสมการเพง-โรบินสัน (Peng-Robinson) ถูกประกอบกันกับค่า K จาก Amines LLE และ VLE package แบบจำลองของ Li-Mather แสดงถึงความสามารถในการทำนายอย่างแม่นยำบนขอบเขตที่กว้างของทั้งอุณหภูมิ ความดัน ปริมาณ loading ของก๊าซกรด และความเข้มข้นของสารเอมีน

โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ข้างอิง 2 สมดุลคือ สมดุลไอ-ของเหลว (vapor-liquid phase equilibria) และสมดุลเคมีชั้นของเหลว (liquid phase chemical equilibria)

สมดุลชั้น (Phase Equilibria)

สมดุลไอ-ของเหลวของโมเลกุลแต่ละชนิดมีดังนี้

$$y_i \phi_i^V P = H_i x_i \gamma_i^L \quad (3.7)$$

เมื่อ H_i = ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's constant)

P = ความดันของระบบ

x_i, y_i = สัดส่วนโมลของโมเลกุลแต่ละชนิดในของเหลวและไอ ตามลำดับ

ϕ_i^V = fugacity coefficient ในสถานะไอ

γ_i^L = activity coefficient ในสถานะของเหลว

ค่า fugacity coefficient คำนวณจากสมการเพง-โรบินสัน

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b) + b(V - b)} \quad (3.8)$$

โดยค่าตัวแปรต่างๆ มาจากฐานข้อมูลของโปรแกรม EQUI-PHASE EQUI90™ และคำนวณค่า activity coefficient จากสมการ Clegg-Pitzer

สมดุลเคมี (Chemical Equilibria)

ในกรณีนี้เป็นระบบสารอัลคานอลเอมีนชนิดเดียว-H₂S-CO₂-H₂O ซึ่งมีปฏิกิริยาการแตกตัวทางเคมีที่สำคัญดังนี้





ค่าคงที่สมดุลทางเคมี (chemical equilibrium constants) ในระบบก๊าซกรดและเอมีน เป็นสิ่งสำคัญในการทำนายค่าสมดุลการละลายของก๊าซกรดในสารละลายอัลคานอลเอมีน ค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant, K) สามารถอธิบายได้ดังสมการ (3.15) และค่า K สามารถอธิบายในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิได้ดังสมการ (3.16)

$$K = \prod_i (x_i y_i)^{\beta_i} \quad (3.15)$$

$$\ln K = C_1 + C_2 / T + C_3 \ln T + C_4 T \quad (3.16)$$

3.2.5 เอนทัลปีของสถานะ (Phase Enthalpy)

เอนทัลปีของไอคำนวณจากสมการเพ็ง-โรบินสัน (Peng-Robinson equation-of-state) ซึ่งรวมข้อมูลค่าความจุความร้อนของก๊าซในอุดมคติที่อุณหภูมิอ้างอิงไว้ ส่วนเอนทัลปีของของเหลวได้จากผลของความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization) และความร้อนจากปฏิกิริยา (heat of reaction)

การดูดซึม (absorption) และการดีซอร์พชัน (desorption) ของก๊าซ H_2S และ CO_2 ในสารละลายอัลคานอลเอมีนก่อให้เกิดผลของความร้อน (heat effect) เนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ผลของความร้อนเป็นฟังก์ชันของชนิดของสารเอมีนและความเข้มข้น และปริมาณโมล loading ของก๊าซกรด ส่วนความร้อนของสารละลายจากก๊าซกรดหาได้จากข้อมูลการทดลองความสามารถในการละลายที่สภาวะต่างๆ โดยการใช้รูปแบบสมการ Gibbs-Helmholtz ผลของความร้อนซึ่งเกิดจากการระเหย (evaporation) และการควบแน่น (condensation) ของสารละลายเอมีนและน้ำทั้งในหอดูดซึมและหอ regenerator เป็นเหตุจากความร้อนแฝงซึ่งปรากฏในการคำนวณเอนทัลปีของสารละลาย ปริมาณน้ำในก๊าซเสียเข้าสามารถส่งผลอย่างกะทันหันในการประมาณรูปแบบของอุณหภูมิในระบบดูดซึมได้ และควรต้องพิจารณาโดยเฉพาะที่ระบบความดันต่ำ (Aspentech, 2005)

บทที่ 4

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nordenkamp และคณะ (2004) ใช้การจำลองทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (two-film theory) เป็นวิธีการหาอัตราพื้นฐานที่ใช้เพื่อทำนายผลในระบบดูดซับก๊าซด้วยสารละลาย MDEA โดยสมมุติว่าที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว คงอยู่ด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์เท่านั้น สมดุลทางเคมีของกลุ่มสารที่ทำปฏิกิริยาในของเหลวสมมุติใช้สำหรับทั้งระบบ การถ่ายโอนมวลสารถูกจำลองจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร อัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกนำไปใช้อธิบายกระบวนการดีซอร์พชันซึ่งคำนวณจากการเข้าสู่สมดุล ระบบดูดซับและดีซอร์พชันจำลองโดยใช้ ASPEN (RATEFRAC™)

Sohbi และคณะ (2007) กล่าวว่าในก๊าซธรรมชาติทั่วไปมีองค์ประกอบหลักคือ มีเทนรวมไปถึงสารไฮโดรคาร์บอนหนักตัวอย่างเช่น อีเทน โพรเพน ไอโซบิวทีน และบิวเทน ถึงอย่างนั้นก๊าซธรรมชาติยังประกอบด้วยไนโตรเจนและก๊าซกรดโดยส่วนใหญ่คือคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีความจำเป็นต้องกำจัดออกก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ระบบหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมกำจัดก๊าซกรดจากแหล่งก๊าซธรรมชาติคือใช้สารละลายอัลคานอลเอมีน งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของสารละลายเอมีนแบบผสม (MDEA+DEA) ในกระบวนการบำบัดอากาศเสียด้วยโปรแกรม HYSYS

Godini และ Mowla (2008) ทำการทดลองและสืบหาข้อมูลตามหลักทฤษฎีของการเลือกจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบหอดูดซับแบบแพคด้วยสารละลายโมโนเอทานอลเอมีน (MEA) ณ เวลาเดียวกัน การเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลตามทฤษฎีของการถ่ายเทมวลของระบบดูดซับคือทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (two-film theory) พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับทฤษฎีดังกล่าว ผลจากความดัน ความเข้มข้นของสารละลายเอมีน ขนาด packing และอัตราส่วนระหว่างโมลของ MEA ต่อโมลของก๊าซ มีความสำคัญต่อการเลือกจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบนี้

Nuttawee lam-amphai (2008) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการใช้เอมีนผสม Monoethanolamine/Methyldiethanolamine (MEA/MDEA) ในหน่วยบำบัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้โปรแกรม HYSYS ทำการจำลองกระบวนการของหน่วยนี้จากข้อมูลโรงงานผลิตเอทีดีเอ็นแห่งหนึ่งที่ใช้เอมีนเดี่ยว (MEA) อยู่แล้ว เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพของหน่วยนี้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ อาทิเช่น บี้ม, คูลเลอร์ เพิ่มนั้นจะทำให้ค่าใช้จ่ายและอัตราการเผาผลาญพลังงานสูงขึ้น ดังนั้นเอมีนจึงถูกพิจารณาเพื่อจะพัฒนาประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดนี้ สารละลายเอมีนที่ทำหน้าที่ดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติข้อดีและข้อเสียต่างกัน จึงมีการศึกษาการใช้สารละลายเอมีนผสมอย่างกว้างขวาง จากการจำลองการใช้เอมีนเดี่ยว (MEA) พบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากโรงงาน ดังนั้นจึงสามารถเชื่อถือแบบจำลองนี้ได้ จากนั้นทำการจำลองโดยใช้เอมีนผสม (MEA/MDEA) โดยการเติม MDEA ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนักแทนที่น้ำในสารละลาย MEA ที่ความเข้มข้น 27.2 % โดยน้ำหนักคงที่ ผลการจำลองพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้เอมีนในระบบลงจาก 62,992 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเหลือเพียง 33,981 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการใช้พลังงานลดลงประมาณ 22 % เพื่อดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จนเหลือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซที่ผ่านการบำบัดแล้ว 10.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเท่าเดิม ข้อดีสำหรับการใช้เอมีนผสมที่สำคัญคือสามารถใช้อเอมีนผสมได้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 50 % โดยน้ำหนัก ลดปัญหาการกัดกร่อนในท่อ และสามารถลดปริมาณของเอมีนที่ใช้ในระบบลงได้ ส่งผลทำให้การใช้พลังงานสำหรับหน่วย regeneration ลดลง

Zare และ Mirzaei (2009) นำเสนอการสืบค้นตามหลักวิชาการในการจำลองระบบดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลาย MDEA และ DEA ระบบดูดซึ่มนี้สารประเภทกรดทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคานอลเอมีน เกิดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ ใช้การจำลองผ่านโปรแกรม HYSYS และ ASPEN ตามทฤษฎีของ Electrolyte NRTL, Amine Package และ Amine equation of state (จากการทดลอง) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ อัตราการไหลเวียน ความเข้มข้นของสารละลายอัลคานอลเอมีน ความสูงของ packing และ murphree efficiency ของอัตราการดูดซึ่ม จากการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราการไหลเวียนและความเข้มข้นของสารละลายอัลคานอลเอมีนเพิ่มขึ้น การดูดซึ่มก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทางออกที่ผ่านการบำบัดแล้ว มีผลจากอิทธิพลของความสูง packing อย่างมาก แต่กับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Dicko และคณะ (2010) ทำการทดลองเพื่อวัดสมดุลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายเมทิลไดเอทานอลเอมีน (MDEA) 50 % โดยน้ำหนัก การทราบค่าความสามารถในการละลายที่ถูกต้องของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ คาร์บอนไดออกไซด์และสารประกอบซัลเฟอร์ในสารละลายเอมีนนั้น มีความจำเป็นในระบบบำบัดของกระบวนการก๊าซธรรมชาติหรือโรงกลั่นน้ำมัน วิธีหาข้อมูลพื้นฐานคือเรียบเรียงข้อมูลที่ได้จากการค้นหา ข้อมูลแรกจากแบบจำลองของ Posey et al. ในปี 1996 จากนั้นแบบจำลองของ Deshmukh-Mather ได้นำมาประยุกต์ใช้กับสมดุลไอ-ของเหลว (vapor liquid equilibria) จากผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองของ Posey และคณะ ขาดความถูกต้องเมื่ออ้างอิงกับข้อมูลการทดลอง โดยเฉพาะเมื่อมีก๊าซเสียในปริมาณมาก แบบจำลองของ Deshmukh-Mather ได้ผลสอดคล้องกับการทดลองที่ปริมาณก๊าซเสียรวม (H_2S+CO_2) ต่อโมลของ MDEA ไม่ถึง 1



คุรุวิทยุทยทรัพยากร
จุพาลงกรณัฒหาวิทยาลัทย

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการจำลอง

5.1 ผลจำลองการกำจัดก๊าซกรดเทียบกับข้อมูลการทดลองของงานวิจัยอื่น

ในส่วนนี้เป็นการจำลองระบบดูดซึ่มและระบบกำจัดก๊าซกรด ในที่นี้คือ H_2S และ CO_2 ด้วยสารละลายอัลคานอลเอมีนเทียบกับข้อมูลการทดลองจริงของงานวิจัยอื่น จากนั้นทำการหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซกรดและเทียบผลกับการทดลองของงานอ้างอิงข้างต้น เพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำ ความคลาดเคลื่อนของการจำลองด้วย Amine Property Package ที่มีแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับสารละลายของ Li-Mather Electrolyte และแบบจำลองของสถานะก๊าซแบบ Non-Ideal ในโปรแกรม ASPEN HYSYS โดยอ้างอิงผลการทดลองจาก 3 งานวิจัยดังรายละเอียดในหัวข้อ 5.1.1, 5.1.2 และ 5.1.3

5.1.1 จำลองการดูดซึ่มก๊าซกรดด้วยสาร MDEA เทียบกับผลการทดลองของ Lu, Zheng และ He (2006)

รายละเอียดการทดลองของ Lu และคณะ (2006)

การทดลองระบบดูดซึ่มก๊าซ H_2S ด้วยสาร MDEA ในหอแบบแพคของ Lu และคณะ เป็นการออกแบบระบบทดลองให้คล้ายกับกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง ขั้นตอนแรกคือ หมุนวาล์วบนถังก๊าซแล้วปรับค่าอัตราการไหลให้ได้ตามที่ออกแบบ โดยสามารถอ่านค่าได้จาก flow meter จากนั้นก๊าซจะป้อนเข้าทางด้านล่างของหอดูดซึ่มและสัมผัสกับ lean-solution ที่ไหลลงมาจากด้านบน ก๊าซกรดจะถูกดูดซึ่มลงในสารละลาย ส่วนก๊าซที่ผ่านการบำบัด (purified gas) แล้วจะถูกปล่อยออกทางด้านบนของหอดูดซึ่ม ขณะที่ lean-solution จะเปลี่ยนเป็น rich-solution ออกทางด้านล่างของหอและถูกส่งไปยังด้านบนของ regenerator โดย rich-solution pump แต่ก่อนที่สารละลายนี้จะป้อนเข้าหอ regenerator จะถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับ lean-solution ที่ออกมาทางด้านล่างของหอ regenerator ก่อน ภายในหอ regenerator สารละลายนี้จะเปลี่ยนเป็น lean-solution โดยไอน้ำร้อนที่เกิดจากความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าจะแยกก๊าซกรด (acid gas) ออกจากสารละลายนี้และถูกปล่อยออกทางด้านบนของหอ regenerator ผ่านเครื่อง

ทำความเย็นเพื่อแยกน้ำที่ควบแน่นไว้ในถังแยก และป้อนกลับสู่ด้านบนของหอ regenerator ใหม่ ส่วน lean-solution จะถูกส่งกลับไปยังด้านบนของหอดูดซึมด้วย lean-solution pump หน่วยนี้จะทำงานเป็นเวลา 30 นาที ให้ระบบเข้าสู่สภาวะดำเนินการแบบคงตัว (steady state) จึงเก็บข้อมูลแผนผังโครงสร้างระบบดูดซึมดังรูปที่ 5.1 มีรายละเอียดอุปกรณ์หลักๆ ดังนี้

- ถังก๊าซ (Mixed gas cylinder) 1 ถัง
- หอดูดซึม (Absorber) 1 หอ และหอสตริบปีง (Stripping column หรือ Regenerator) 1 หอ โดยหอทำด้วยสแตนเลส พร้อมทั้งหุ้มฉนวนกันความร้อนภายนอก หอทั้งสองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.057 เมตร
- Packing ชนิด ceramic raschig ring ขนาด ¼" ความสูงของ packing ในหอดูดซึมและหอสตริบปีง คือ 0.85 และ 0.90 เมตร ตามลำดับ
- ปั๊มแบบเฟือง (Gear pump) 2 เครื่อง คือ lean-solution pump และ rich-solution pump
- ตัวควบคุมอุณหภูมิในการ regeneration (Regulating voltage) 1 ชุด
- อุปกรณ์วัดการไหลของก๊าซ (Flow meter) 1 เครื่อง
- ถังแยก (Gas-liquid separator) 1 ถัง
- เครื่องทำความเย็น (Water cooler) 2 เครื่อง
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) 1 เครื่อง

ค่าพารามิเตอร์ในการทดลองของ Lu และคณะ ได้แก่

- ก๊าซเข้าหอดูดซึมประกอบด้วยก๊าซ CO_2 , H_2S และ N_2
- อุณหภูมิในหอดูดซึมอยู่ในช่วง $20-60\text{ }^\circ\text{C}$
- ความดันในหอดูดซึม 0.1 MPa
- อัตราการไหลของสารละลาย $0.52\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ที่ความเข้มข้น $2.5\text{ kmol}/\text{m}^3$ ของ MDEA
- อุณหภูมิในการ regeneration $108\text{ }^\circ\text{C}$

โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

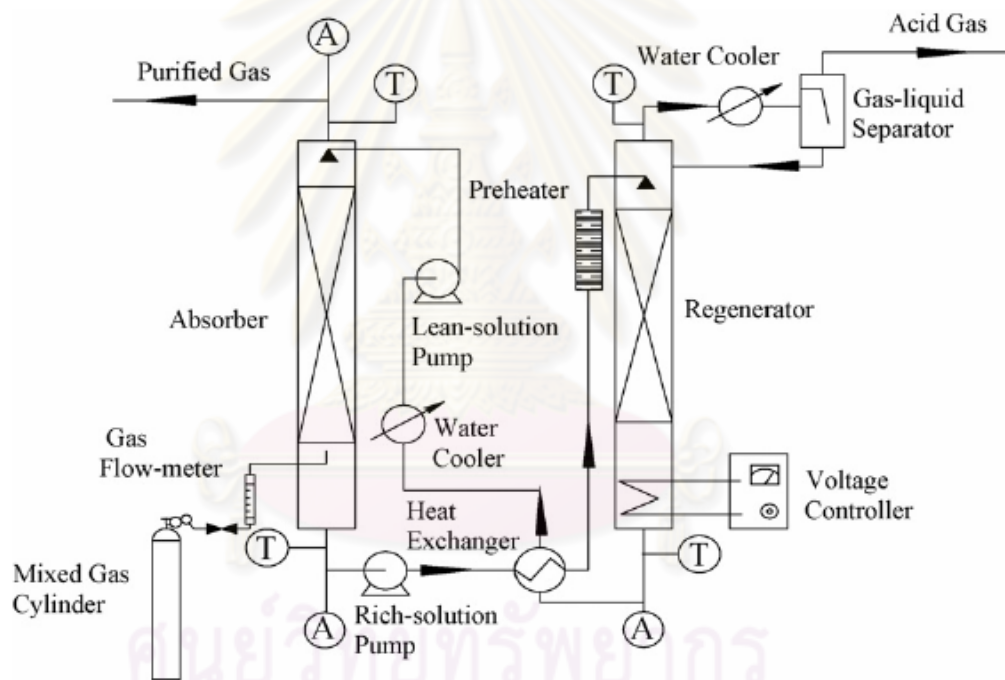
- กรณีที่ 1 อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซเข้าเท่ากับ $2.78 \times 10^{-4}\text{ kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ที่ความเข้มข้น 1.2% H_2S และ $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S} = 6.6$

- กรณีที่ 2, 3 และ 4 อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซเข้าเท่ากับ 5.2×10^{-4} kmol/(m².s) ที่ความเข้มข้น 1.0% H₂S โดย CO₂/H₂S = 6.51, CO₂/H₂S = 10.19 และ CO₂/H₂S = 12.52 ของกรณีที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

งานวิจัยของ Lu และคณะ ได้กำหนดสมการของ removal efficiency, η ไว้ดังนี้

$$\eta_{H_2S} = \left[1 - \frac{y_{H_2S,out}}{y_{H_2S,in}} \left(\frac{1 - y_{H_2S,in} - y_{CO_2,in}}{1 - y_{H_2S,out} - y_{CO_2,out}} \right) \right] \times 100\% \quad (5.1)$$

โดยที่ y คือ สัดส่วนโมลในไอหรือก๊าซ



รูปที่ 5.1 แผนผังโครงสร้างหน่วยการทดลองสำหรับระบบดูดซึมก๊าซกรด

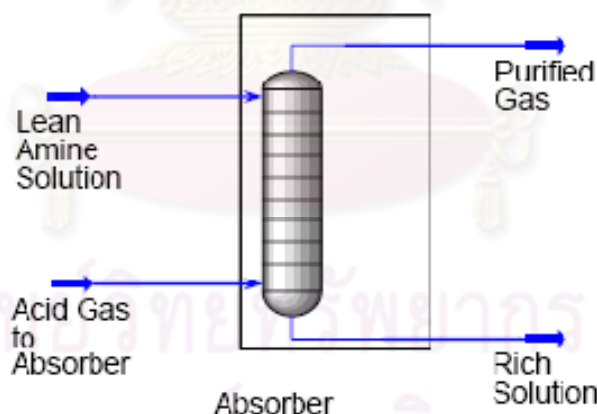
(Lu และคณะ, 2006)

จากข้อมูลข้างต้นทำการจำลองหอดูดซึมโดยเลือกใช้ Amine Property Package ในโปรแกรม ASPEN HYSYS ที่อ้างอิงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังหัวข้อ 3.2 และมีสมมติฐาน (assumptions) ดังนี้

- ระบบศึกษาที่สภาวะดำเนินการแบบคงตัว (steady state)
- ระบบหอดูดซึมพิจารณาที่สภาวะไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับภายนอก (adiabatic)
- ปฏิกริยาเกิดในสารละลาย
- ความต่างของความสูง packing ส่งผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพในการกำจัด
- ค่าปริมาณก๊าซกรดของ H_2S และ CO_2 ที่อยู่ใน lean-solution ในกรณีที่ 2, 3 และ 4 มีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ 1

โครงสร้างแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.2 โดยรายละเอียดอุปกรณ์คือ

- หอดูดซึม (Absorber) 1 หอ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.057 เมตร
- Packing ชนิด ceramic raschig ring ขนาด 1/4"



รูปที่ 5.2 โครงสร้างแบบจำลองหอดูดซึมก๊าซกรดด้วยสาร MDEA

ผลการทดลองของ Lu และคณะ (2006) เปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงไว้ดังตารางที่ 5.1 จากข้อมูลการจำลองระบบดูดซึมก๊าซกรดเทียบกับค่าจากการทดลองจริงของ Lu และคณะ แสดงให้เห็นว่าค่ามีความใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนของ removal efficiency ของ H_2S มากสุดอยู่ที่ 4.2%

ตารางที่ 5.1 ค่าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ASPEN HYSYS และค่าจากผลทดลองของ Lu, Zheng และ He (2006)

รายละเอียด	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2		หน่วย
	ค่าจากการทดลองของ Lu และคณะ	ค่าจากการจำลอง	ค่าจากการทดลองของ Lu และคณะ	ค่าจากการจำลอง	
Gas to absorber					
- อัตราการไหลเชิงโมล	2.554×10^{-3}	2.554×10^{-3}	4.777×10^{-3}	4.777×10^{-3}	kmol/h
- อุณหภูมิ	20-60	40	20-60	40	°C
- ความดัน	201.3	201.3	201.3	201.3	kPa
- สัดส่วนโมล					
CO ₂	0.0792	0.0792	0.0651	0.0651	-
H ₂ S	0.0120	0.0120	0.0100	0.0100	-
N ₂	0.9088	0.9088	0.9249	0.9249	-
Lean solution					
- อัตราการไหลเชิงมวล	4.777	4.777	4.777	4.777	kg/h
- อุณหภูมิ	20-60	40	20-60	40	°C
- ความดัน	ไม่มีข้อมูล	101.3	ไม่มีข้อมูล	101.3	kPa
- % โดยน้ำหนัก					
MDEA	29.3000	29.3000	29.3000	29.3000	%
H ₂ O	ปรับสมดุล	70.6250	ปรับสมดุล	70.6250	%
CO ₂	<0.0541	0.0541	ไม่มีข้อมูล	0.0541	%
H ₂ S	0.0209	0.0209	ไม่มีข้อมูล	0.0209	%
Purified gas					
- removal efficiency, η	99.00	96.80	99.00	94.81	%
- ความคลาดเคลื่อน	2.2		4.2		%
Packed column					
- ขนาดหอก (diameter)	0.057				เมตร (m)
- ชนิดของ packing	ceramic raschig rings 1/4"				-
- ความสูง packing	0.85	0.97	0.85	0.97	เมตร (m)
- ความดันลด	ไม่มีข้อมูล	0.1	ไม่มีข้อมูล	0.1	kPa

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ASPEN HYSYS และการทดลองของ Lu, Zheng และ He (2006)

รายละเอียด	กรณีที่ 3		กรณีที่ 4		หน่วย
	ค่าจากการทดลองของ Lu และคณะ	ค่าจากการจำลอง	ค่าจากการทดลองของ Lu และคณะ	ค่าจากการจำลอง	
Gas to absorber					
- อัตราการไหลเชิงโมล	4.777×10^{-3}	4.777×10^{-3}	4.777×10^{-3}	4.777×10^{-3}	kmol/h
- อุณหภูมิ	20-60	40	20-60	40	°C
- ความดัน	201.3	201.3	201.3	201.3	kPa
- สัดส่วนโมล					
CO ₂	0.1019	0.1019	0.1252	0.1252	-
H ₂ S	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	-
N ₂	0.8881	0.8881	0.8648	0.8648	-
Lean solution					
- อัตราการไหลเชิงมวล	4.777	4.777	4.777	4.777	kg/h
- อุณหภูมิ	20-60	40	20-60	40	°C
- ความดัน	ไม่มีข้อมูล	101.3	ไม่มีข้อมูล	101.3	kPa
- % โดยน้ำหนัก					
MDEA	29.3000	29.3000	29.3000	29.3000	%
H ₂ O	ปรับสมดุล	70.6250	ปรับสมดุล	70.6250	%
CO ₂	ไม่มีข้อมูล	0.0541	ไม่มีข้อมูล	0.0541	%
H ₂ S	ไม่มีข้อมูล	0.0209	ไม่มีข้อมูล	0.0209	%
Purified gas					
- removal efficiency, η	96.00	94.81	92.00	94.81	%
- ความคลาดเคลื่อน	1.2		3.1		%
Packed column					
- ขนาดหอก (diameter)	0.057				เมตร (m)
- ชนิดของ packing	ceramic raschig rings 1/4"				-
- ความสูง packing	0.85	0.97	0.85	0.97	เมตร (m)
- ความดันลด	-	0.1	-	0.1	kPa

หมายเหตุ: ค่าความดันลดคำนวณจากสมการ (2.32) และ (2.33) แล้วอ่านรูปที่ 2.13

5.1.2 จำลองการดูดซึ่มก๊าซกรดด้วยสาร MEA เทียบกับผลการทดลองของ Godini และ Mowla (2008)

รายละเอียดการทดลองของ Godini และคณะ (2008)

การทดลองระบบดูดซึ่มก๊าซ H_2S ด้วยสาร MEA ในหอแบบแพคของ Godini และคณะ มีโครงสร้าง pilot-scale ติดตั้งอยู่ในโรงกลั่นน้ำมัน Shiraz การทดลองนี้ใช้ก๊าซผสม (SRU tail gas) ที่ประกอบด้วย N_2 เป็นก๊าซหลักและเจือปนด้วยก๊าซ CO_2 และ H_2S โดยก๊าซผสมนี้จะถูกเพิ่มความดันด้วยเครื่องอัดอากาศ หลังจากนั้นจะเติมก๊าซ CO_2 และ H_2S เข้าไปเพื่อให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการและป้อนเข้าสู่ด้านล่างของหอดูดซึ่ม ส่วนสาร MEA ป้อนทางด้านบนของหอ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผลหลังการทดลองแต่ละการทดลอง ลักษณะโครงสร้างหอดูดซึ่ม ดังรูปที่ 5.3 พร้อมรายละเอียดอุปกรณ์หลักๆ ดังนี้

- หอดูดซึ่ม (Absorber) 1 หอ โดยหอทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอน หอมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 เมตร
- Packing ชนิด raschig ring ขนาด 1" ความสูงรวมของ packing ในหอดูดซึ่มคือ 1.8 เมตร
- เครื่องอัดอากาศ (Reciprocating compressor) 1 เครื่อง
- ปั๊ม (Amine pump) 1 เครื่อง
- Globe valve สำหรับปรับค่าความดันก๊าซ

ค่าพารามิเตอร์ในการทดลองของ Godini และคณะ ได้แก่

- ก๊าซขาเข้าหอดูดซึ่มประกอบด้วยก๊าซ CO_2 , H_2S และ N_2 อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซขาเข้าเท่ากับ 2.1216 kmol/h ที่ความเข้มข้น 5% CO_2 และ 1.5% H_2S
- อุณหภูมิก๊าซขาเข้า 30°C
- ความดันลด (pressure drop) ในหอดูดซึ่มเท่ากับ 0.0108 bar ภายใต้ความดัน 1 bar และ 0.15 bar ภายใต้ความดัน 7.5 bar
- สารละลาย MEA ความเข้มข้น 15 % โดยน้ำหนัก

โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 และ 2 ค่าความดันในหอด้านบนเท่ากับ 7.5 bar และอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายเอมีนเท่ากับ 260 และ 350 kg/h ตามลำดับ
- กรณีที่ 3 และ 4 ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายเอมีนเท่ากับ 216 kg/h และความดันในหอด้านบนเท่ากับ 1 bar และ 7.5 bar ตามลำดับ

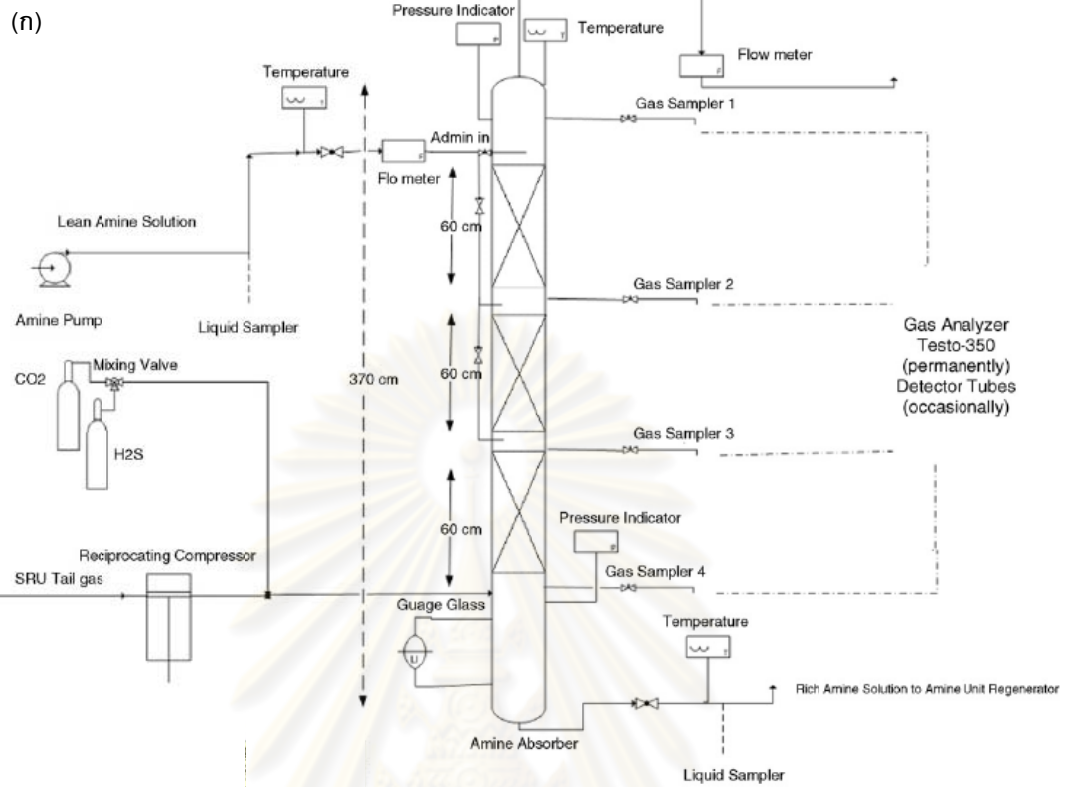
ในงานวิจัยของ Godini และคณะ ได้กำหนดสมการของ absolute efficiency, η ไว้ดังนี้

$$\eta_i = \left[\frac{C_{i,in} - C_{i,out}}{C_{i,in}} \right] \times 100\% \quad (5.2)$$

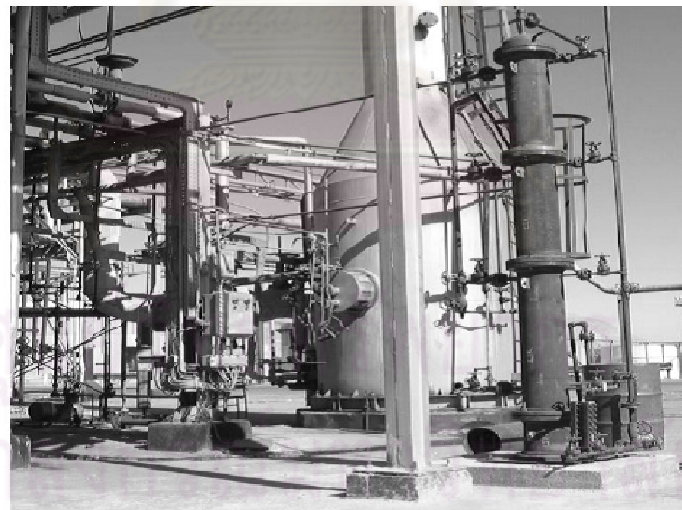
โดยที่ C = ความเข้มข้นของก๊าซ (kmol/m^3)

i = ชนิดของสารประกอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข)



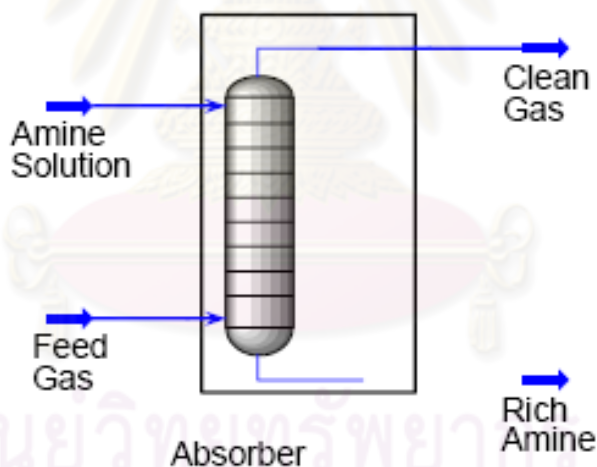
รูปที่ 5.3 แผนผังโครงสร้าง (ก) และรูปภาพ (ข) ของ pilot-scale (Godini และคณะ, 2008)

จากข้อมูลข้างต้นทำการจำลองหอดูดซึ่มโดยเลือกใช้ Amine Property Package ในโปรแกรม ASPEN HYSYS ที่อ้างอิงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังหัวข้อ 3.2 และมีสมมุติฐาน (assumptions) ดังนี้

- ระบบศึกษาที่สภาวะดำเนินการแบบคงตัว (steady state)
- ระบบหอดูดซึ่มพิจารณาที่สภาวะไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับภายนอก (adiabatic)
- ปฏิกริยาเกิดในสารละลาย
- ความต่างของความสูง packing ส่งผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

โครงสร้างแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.4 โดยรายละเอียดอุปกรณ์คือ

- หอดูดซึ่ม (Absorber) 1 หอ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 เมตร
- Packing ชนิด metal raschig ring ขนาด 1"



รูปที่ 5.4 โครงสร้างแบบจำลองหอดูดซึ่มก้ำซกรดด้วยสาร MEA

ผลการทดลองของ Godini และคณะ (2008) เทียบกับผลจากการจำลองมีดังตารางที่ 5.2 ข้อมูลการจำลองระบบดูดซึ่มก้ำซกรดเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่าค่า absolute efficiency ของ H_2S มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 8.2% ส่วนของ CO_2 มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 23.1% โดยสาเหตุเกิดได้จากปัจจัยหลายอย่าง ทั้งความแตกต่างของสภาวะจริงในการทดลองกับการจำลอง ผลจากความดันของระบบ และอื่นๆ

ตารางที่ 5.2 ค่าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ASPEN HYSYS และค่าจากผลทดลองของ Godini และ Mowla (2008)

รายละเอียด	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2		หน่วย
	ค่าจากการทดลองของ Godini และคณะ	ค่าจากการจำลอง	ค่าจากการทดลองของ Godini และคณะ	ค่าจากการจำลอง	
Feed gas					
- อัตราการไหลเชิงโมล	2.1216	2.1216	2.1216	2.1216	kmol/h
- อุณหภูมิ	30	30	30	30	°C
- ความดัน	866.30	866.30	866.30	866.30	kPa
- สัดส่วนโมล					
CO ₂	0.050	0.050	0.050	0.050	-
H ₂ S	0.015	0.015	0.015	0.015	-
N ₂	0.935	0.935	0.935	0.935	-
Amine solution					
- อัตราการไหลเชิงมวล	260	260	350	350	kg/h
- อุณหภูมิ	ไม่มีข้อมูล	30	ไม่มีข้อมูล	30	°C
- ความดัน	ไม่มีข้อมูล	101.3	ไม่มีข้อมูล	101.3	kPa
- % โดยน้ำหนัก					
MEA	15	15	15	15	%
H ₂ O	85	85	85	85	%
Clean gas					
- absolute efficiency (CO ₂)	76.00	91.16	78.00	91.32	%
- ความคลาดเคลื่อน	20		17		%
- absolute efficiency (H ₂ S)	99.00	99.30	99.50	99.32	%
- ความคลาดเคลื่อน	0.3		0.2		%
Packed column					
- ขนาดห่อ (diameter)	0.25				เมตร (m)
- ชนิดของ packing	raschig rings 1"				-
- ความสูง packing	1.8	1.75	1.8	1.75	เมตร (m)
- ความดันลด	15	15	15	15	kPa

ตารางที่ 5.2 (ต่อ) ค่าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ASPEN HYSYS และค่าจากผลทดลองของ Godini และ Mowla (2008)

รายละเอียด	กรณีที่ 3		กรณีที่ 4		หน่วย
	ค่าจากการทดลองของ Godini และคณะ	ค่าจากการจำลอง	ค่าจากการทดลองของ Godini และคณะ	ค่าจากการจำลอง	
Feed gas					
- อัตราการไหลเชิงโมล	2.1216	2.1216	2.1216	2.1216	kmol/h
- อุณหภูมิ	30	30	30	30	°C
- ความดัน	202.38	202.38	866.30	866.30	kPa
- สัดส่วนโมล					
CO ₂	0.050	0.050	0.050	0.050	-
H ₂ S	0.015	0.015	0.015	0.015	-
N ₂	0.935	0.935	0.935	0.935	-
Amine solution					
- อัตราการไหลเชิงมวล	216	216	216	216	kg/h
- อุณหภูมิ	ไม่มีข้อมูล	30	ไม่มีข้อมูล	30	°C
- ความดัน	ไม่มีข้อมูล	101.3	ไม่มีข้อมูล	101.3	kPa
- % โดยน้ำหนัก					
MEA	15	15	15	15	%
H ₂ O	85	85	85	85	%
Clean gas					
- absolute efficiency (CO ₂)	70.00	79.47	74.00	91.07	%
- ความคลาดเคลื่อน	13.5		23.1		%
- absolute efficiency (H ₂ S)	90.00	97.40	98.00	99.28	%
- ความคลาดเคลื่อน	8.2		1.3		%
Packed column					
- ขนาดห่อ (diameter)	0.25				เมตร (m)
- ชนิดของ packing	raschig rings 1"				-
- ความสูง packing	1.8	1.75	1.8	1.75	เมตร (m)
- ความดันลด	1.08	1.08	15	15	kPa

5.1.3 จำลองระบบกำจัดก๊าซกรดด้วยสาร MDEA เทียบกับผลการทดลองของ Alfadala และ Al-Musleh (2009)

รายละเอียดงานวิจัยของ Alfadala และคณะ (2009)

ระบบกำจัดก๊าซกรดด้วยสาร MDEA ในหอแบบถาดจากข้อมูลงานวิจัยของ Alfadala และคณะ ติดตั้งอยู่ที่ Qatar's plant ระบบประกอบด้วยหอดูดซึ่มและหอstripping โดยก๊าซกรดจะถูกแยกออกในหอดูดซึ่มจากการสัมผัสโดยตรงกับสารละลายเอมีน เกิดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ส่วน rich amine ที่มีก๊าซกรดผสมอยู่ปล่อยออกทางด้านล่างของหอและถูกส่งไปยังถังแยกเพื่อแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ละลายอยู่ออกจากสารละลายเอมีน จากนั้น rich amine จะป้อนเข้าทางด้านบนของหอstripping แต่ก่อนที่สารละลายนี้จะป้อนเข้าหอจะถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับ amine ที่ออกมาทางด้านล่างของหอstrippingก่อน ภายในหอนี้สารละลายจะเปลี่ยนเป็น lean amine และถูกส่งกลับยังด้านบนของหอดูดซึ่มด้วย pump อีกครั้ง ลักษณะโครงสร้างระบบกำจัดก๊าซกรดดังรูปที่ 5.5 พร้อมรายละเอียดอุปกรณ์หลักๆ ดังนี้

- หอดูดซึ่ม (Absorber) 1 หอ และหอstripping (Stripping column หรือ Stripper) 1 หอ
- ถังแยก (Flash drum) 1 ถัง
- ถังเก็บ (Tank) 1 ถัง
- จำนวนถาดในหอดูดซึ่มและหอstripping คือ 25 และ 24 ชั้น ตามลำดับ
- ปั๊ม 1 เครื่อง
- เครื่องทำความเย็น (Air cooler) 1 เครื่อง
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) 1 เครื่อง

ค่าพารามิเตอร์ในการทดลองของ Alfadala และคณะ ได้แก่

Absorber

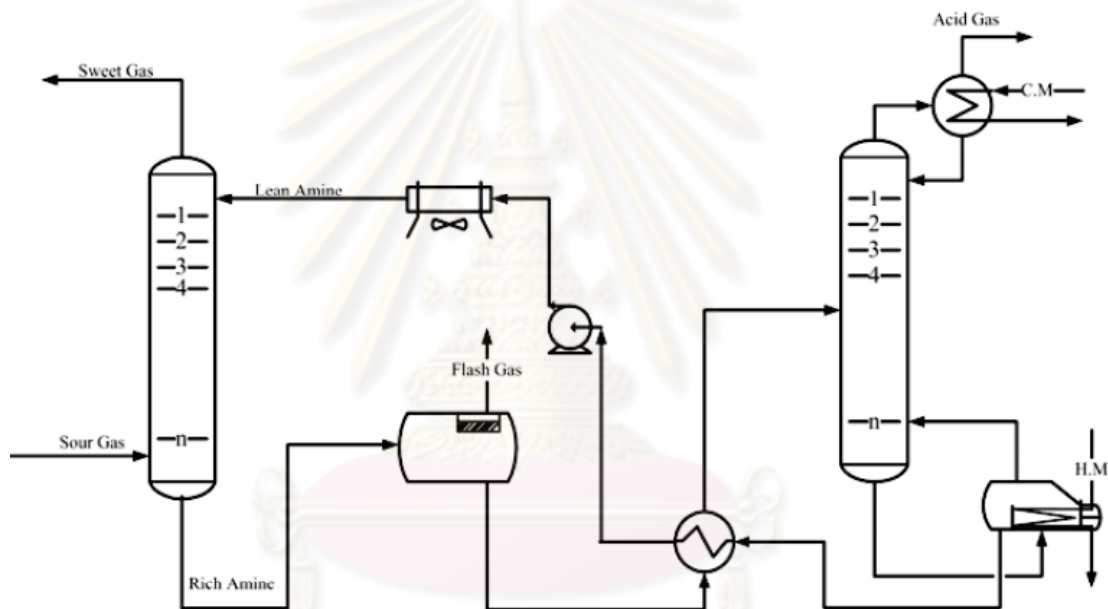
- ก๊าซเข้าหอดูดซึ่มประกอบด้วยก๊าซ Hydrocarbon, CO₂, H₂S , COS และ N₂ อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซเข้าเท่ากับ 20,000 kmol/h ที่ความเข้มข้น 2.39 % CO₂, 0.92 % H₂S และ 96.68 % N₂+Hydrocarbon
- อุณหภูมิก๊าซเข้า 35°C
- ความดันในหอดูดซึ่ม 72 bar

- อัตราการไหลเชิงโมลของสารละลาย 10,000 kmol/h ที่ความเข้มข้น 45 % โดยน้ำหนักของ MDEA
- อุณหภูมิของสารละลาย 40 °C

Stripper

- อุณหภูมิของก๊าซกรด (acid gas) 53 °C
- อุณหภูมิของสารละลาย 103.6 °C
- ความดันในหอstripping 2.35 bar

หมายเหตุ ความดันใน Flash drum 10 bar



รูปที่ 5.5 แผนผังโครงสร้างหน่วยการทดลองสำหรับระบบดูดซึมก๊าซกรด

(Alfadala และคณะ, 2009)

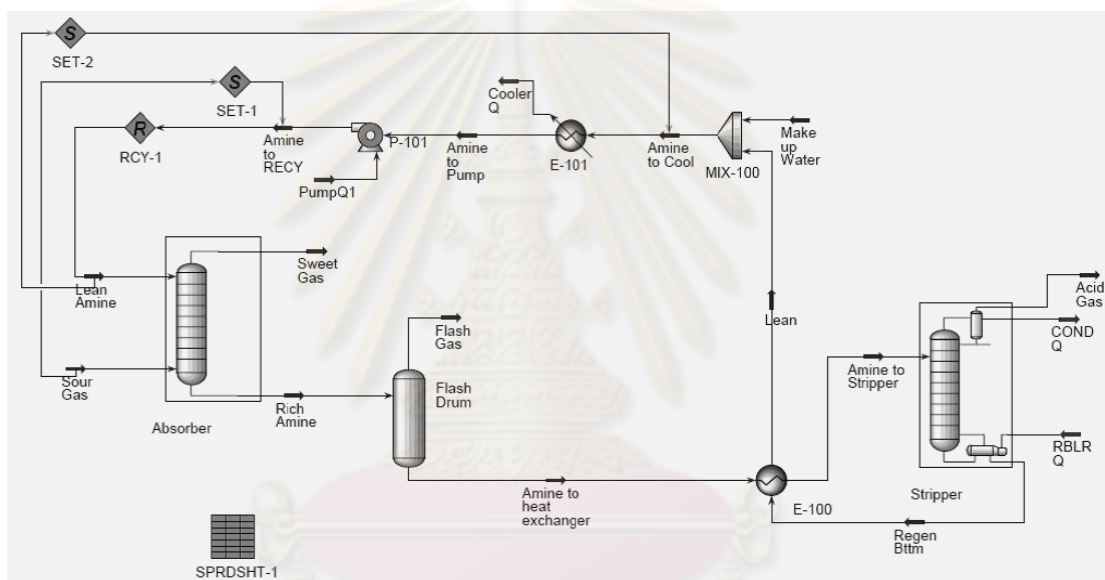
จากข้อมูลข้างต้นทำการจำลองระบบกำจัดก๊าซกรดโดยเลือกใช้ Amine Property Package ในโปรแกรม ASPEN HYSYS ที่อ้างอิงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังหัวข้อ 3.2 และมีสมมุติฐาน (assumptions) ดังนี้

- ระบบศึกษาที่สภาวะดำเนินการแบบคงตัว (steady state)
- ระบบหอดูดซึม, หอstripping, บั้ม, เครื่องทำความเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พิจารณาที่สภาวะไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับภายนอก (adiabatic)

- ปฏิกริยาเกิดในสารละลาย

โครงสร้างแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.6 โดยรายละเอียดอุปกรณ์คือ

- หอดูดซึม (Absorber) 1 หอ และหอสไตริปปิงหรือ Regenerator 1 หอ จำนวนภาค 25 และ 24 ชั้นตามลำดับ
- ถังแยก (Flash drum) 1 ถัง
- ปั๊ม 1 เครื่อง
- เครื่องทำความเย็น (Cooler) 1 เครื่อง
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) 1 เครื่อง



รูปที่ 5.6 โครงสร้างแบบจำลองระบบกำจัดก๊าซกรดด้วยสาร MDEA

ผลจากงานวิจัยของ Alfadala และคณะ (2009) เทียบกับผลจากการจำลองมีดังตารางที่ 5.3 ข้อมูลการจำลองระบบกำจัดก๊าซกรดเทียบกับผลจากนํ้างานจริงแสดงให้เห็นว่าค่าคุณนํ้าของสารละลายและของก๊าซที่ออกจากหอดูดซึมมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 8.4 และ 5.3% ตามลำดับ ในส่วนของค่าอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซที่ออกจากหอสไตริปปิงมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 34.3% โดยความคลาดเคลื่อนเกิดได้จากปัจจัยหลายอย่างทั้งความแตกต่างของสภาวะจริงในการทดลองกับการจำลอง ปริมาณสารประกอบของก๊าซเข้า ผลจากความดันของระบบและอื่นๆ

ตารางที่ 5.3 ค่าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ASPEN HYSYS และค่าจากงานวิจัยของ Alfadala และ Al-Musleh (2009)

รายละเอียด	ค่าจากการทดลอง ของ Alfadala และ คณะ (2009)	ค่าจากการจำลอง	ความคลาด เคลื่อน (%)
Absorber			
Sweet gas flow (kmol/h)	ไม่มีข้อมูล	19710	-
H ₂ S (mole%)	0.0004	0.2860	-
CO ₂ (mole%)	0.9000	1.4400	-
Removal efficiency ของ H ₂ S (%)	-	69.36	-
Removal efficiency ของ CO ₂ (%)	-	40.62	-
Sweet gas temperature (°C)	47	49.47	5.3
Rich amine temperature (°C)	50.8	46.51	8.4
Stripper			
Acid gas flow (kmol/h)	514	337.6	34.3
H ₂ S (mole%)	34.8	37.74	-
CO ₂ (mole%)	57	57.33	-
H ₂ S mole flow (kmol/h)	178.87	127.41	28.8
CO ₂ mole flow (kmol/h)	292.98	193.55	33.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ผลการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ป้อนเข้าหอดูดซึมต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

การจำลองนี้เป็นการจำลองในระบบดูดซึมเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ตามแบบจำลองระบบกำจัดก๊าซกรดในหน่วยหอดูดซึมดังรูปที่ 5.7 พร้อมทั้งขอบเขตข้อมูลการจำลองในหน่วยระบบดูดซึมดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ขอบเขตข้อมูลจำลองระบบดูดซึมเพื่อกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH โดยมีข้อมูลก๊าซเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมผลิตก๊าซชีวภาพแห่งหนึ่ง

รายการ	ปริมาณค่า	หน่วย
ก๊าซเสียขาเข้า (Feed Gas)		
- อัตราการไหลเชิงปริมาตร	2,917 (70,000)	Nm^3/h (Nm^3/day)
- อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h
- อุณหภูมิ	35 (*)	$^{\circ}C$
- ความดัน	104.3	kPa
- สัดส่วนโมล		
CH_4	0.550	-
CO_2	0.300 (*)	-
H_2S	0.003 (*)	-
CH_3SH	0.003 (*)	-
N_2	0.124 (ปรับสมดุล)	-
O_2	0.020	-
สารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Amine to Absorber)		
- L^*/G^*	10 (*)	-
- อุณหภูมิ	40 (*)	$^{\circ}C$
- ความดัน	104.3	kPa
- สัดส่วนน้ำหนัก (w_i)		
กรณีสาร DEA	0.25 (*)	-
กรณีสาร MEA	0.25 (*)	-
กรณีสาร MDEA	0.25 (*)	-

ตารางที่ 5.4 (ต่อ) ขอบเขตข้อมูลจำลองระบบดูดซึมเพื่อกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH โดยมีข้อมูลก๊าซเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมผลิตก๊าซชีวภาพแห่งหนึ่ง

รายการ	ปริมาณค่า	หน่วย
รายละเอียดของหอดูดซึม (Absorber Column Specification)		
หอดูดซึมแบบถาด		
- จำนวนถาด (Number of Trays)	10	ชั้น
- ขนาด (Diameter)	1.5	เมตร (m)
ค่าเทียบเท่าของหอบแบบแพค		
- ความสูง Packing	4.87 (metal pall rings 2")	เมตร (m)
- ขนาด (Diameter)	0.9144	เมตร (m)
- ความดันลด (Pressure Drop)		
กรณี $L^*/G^*=10$	1.0 (*)	kPa

หมายเหตุ - ข้อมูลก๊าซเสียขาเข้าจากแหล่งอุตสาหกรรมประกอบด้วยค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร
 อุณหภูมิ ความดัน ค่าสัดส่วนโมลของ CH_4 , CO_2 และ H_2S
 - (*) หมายถึงตัวแปรปรับตามกรณีศึกษา โดย

ตัวแปรที่ 1 ปรับค่าสัดส่วนน้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีนที่ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25
 สำหรับสาร MEA และที่ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.35 และ 0.45 สำหรับสาร DEA
 และ MDEA

ตัวแปรที่ 2 ปรับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสาร DEA, MEA และ MDEA ในรูป L^*/G^* ที่ 6, 8,
 10, 12, 14 และ 16

ตัวแปรที่ 3 ปรับค่าสัดส่วนโมลของ H_2S , CH_3SH และ CO_2 (ที่ $L^*/G^*=10$ และ $L^*=34,350$ kg/h)
 3.1 ปรับค่าสัดส่วนโมลของ H_2S และ CH_3SH ที่ 0.003, 0.012, 0.021 และ 0.030
 3.2 ปรับค่าสัดส่วนโมลของ CO_2 ที่ 0.300, 0.350 และ 0.400

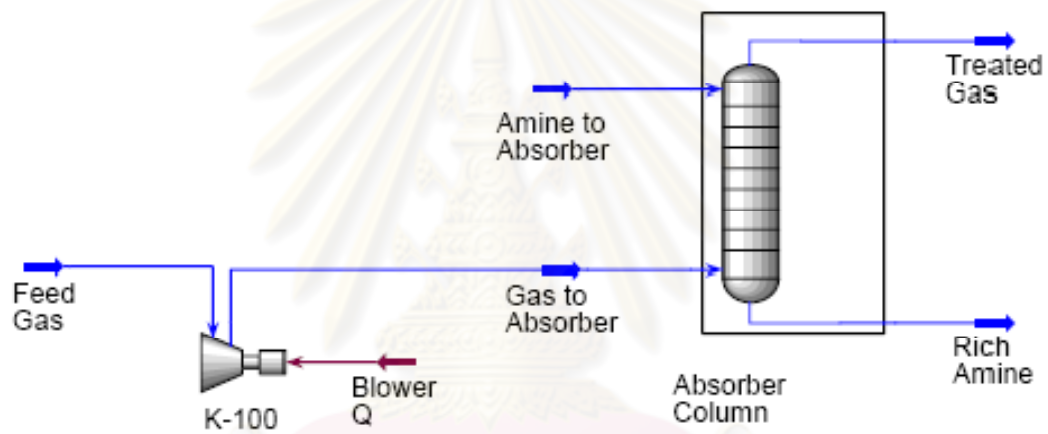
ตัวแปรที่ 4 ปรับค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ 35, 45 และ 55 °C

ตัวแปรที่ 5 ปรับค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีน 30, 40, 50 และ 60 °C

ทุกการจำลองอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงค่าตามกรณีศึกษาโดยตัวแปรอื่นๆ คงที่ และ
 L^*/G^* คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายเอมีนส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซเสีย

จากข้อมูลข้างต้นทำการสร้างแบบจำลองหอดูดซึมตามกรณีศึกษาต่างๆ โดยเลือกใช้ Amine Property Package แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับสารละลายของ Li-Mather Electrolyte และแบบจำลองของสถานะก๊าซแบบ Non-Ideal ในโปรแกรม ASPEN HYSYS ที่อ้างอิงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังหัวข้อ 3.2 และมีสมมติฐาน (assumptions) ดังนี้

- ระบบศึกษาที่สภาวะดำเนินการแบบคงตัว (steady state)
- ระบบหอดูดซึมพิจารณาที่สภาวะไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับภายนอก (adiabatic)
- ปฏิกริยาเกิดในสารละลาย



รูปที่ 5.7 แบบจำลองกระบวนการกำจัดก๊าซกรดในหน่วยหอดูดซึมของหัวข้อ 5.2

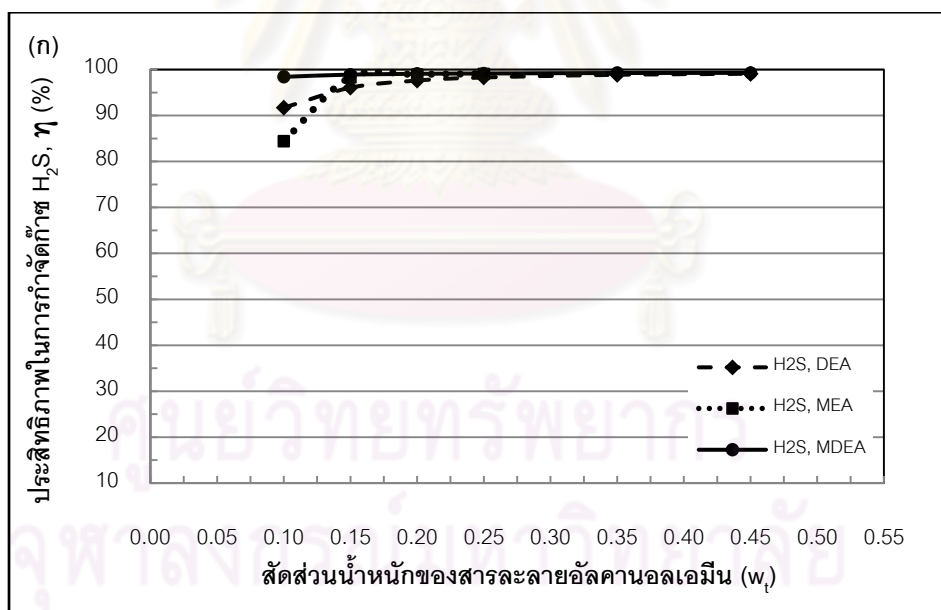
รายละเอียดอุปกรณ์คือ

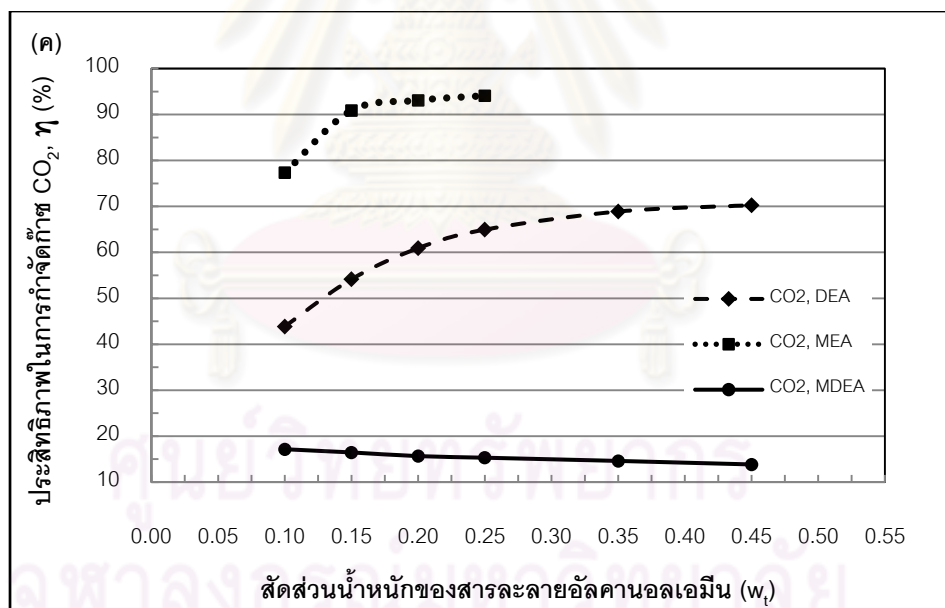
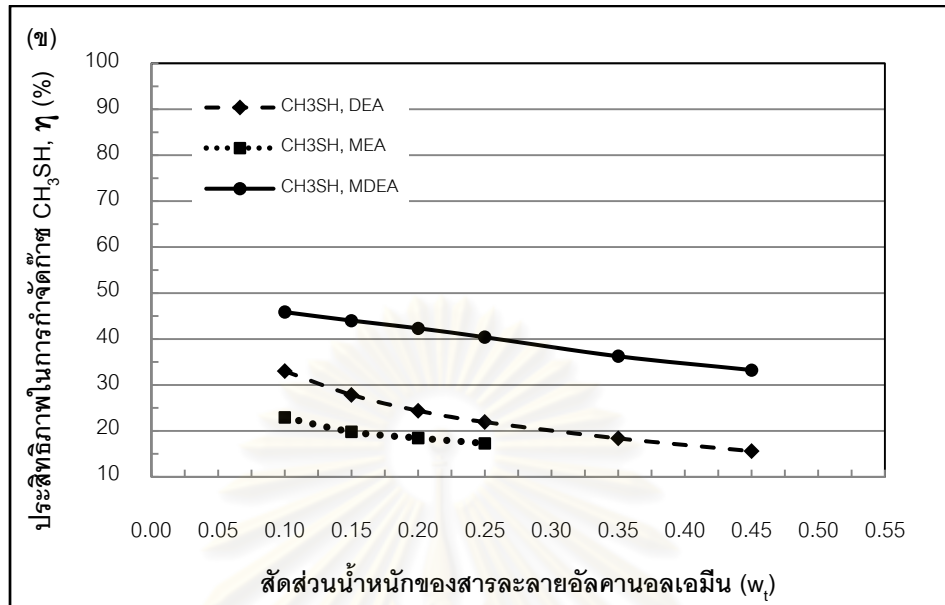
- หอดูดซึม (Absorber) 1 หอ
- เครื่องอัดอากาศ (Blower) 1 เครื่อง
- Packing ชนิด metal pall ring ขนาด 2"

5.2.1 ตัวแปรที่ 1 ค่าสัดส่วนน้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนน้ำหนัก (w_t) ของสารละลายอัลคานอลเอมีน

การปรับค่า w_t ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีนในรูป $L^*/G^* = 10$ ของสารละลายอัลคานอลเอมีนต่างชนิด DEA, MEA และ MDEA จากผลการจำลอง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นเมื่อค่า w_t เพิ่มขึ้น ส่วน η ของก๊าซเมทิลเมอร์แคปเทนจะลดลง แสดงไว้ดังรูปที่ 5.8 โดยค่า η ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เริ่มคงที่ประมาณ 98-99% ที่ $w_t = 0.15$ ของสารละลาย MEA และ MDEA และค่า η เริ่มคงที่ ประมาณ 98-99% ที่ $w_t = 0.25$ ของสารละลาย DEA ในส่วน η ของก๊าซเมทิลเมอร์แคปเทนจะมี ค่าสูงสุดประมาณ 45-46% ที่ $w_t = 0.10$ ของสารละลาย MDEA และมีประสิทธิภาพมากกว่าสาร DEA และ MEA ตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะมีค่า η สูงสุดด้วย สารละลาย MEA และลดลงตามลำดับด้วยสาร DEA และ MDEA





รูปที่ 5.8 ผลของสัดส่วนน้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีนต่างชนิดต่อประสิทธิภาพในการกำจัด (ก) สำหรับ H₂S, (ข) สำหรับ CH₃SH, (ค) สำหรับ CO₂

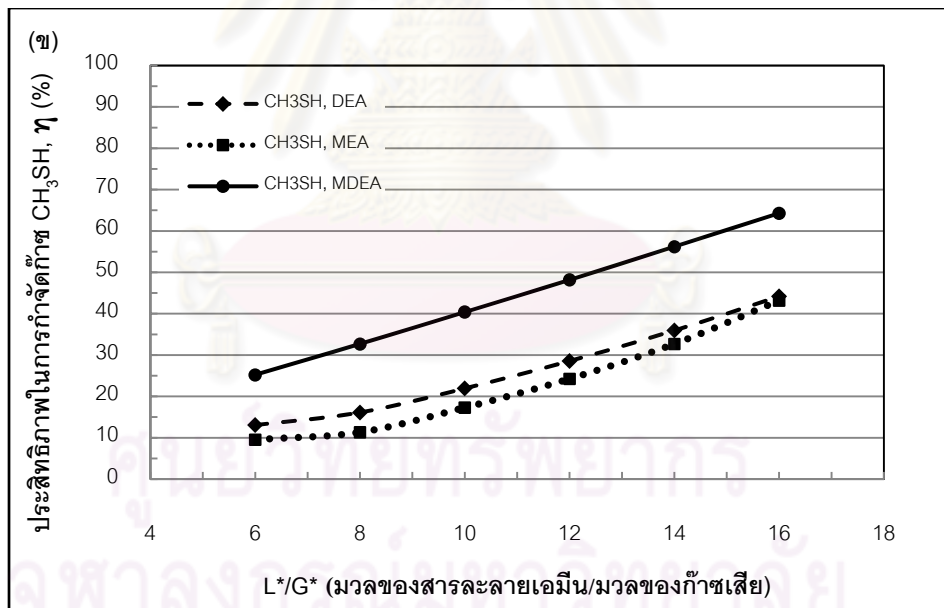
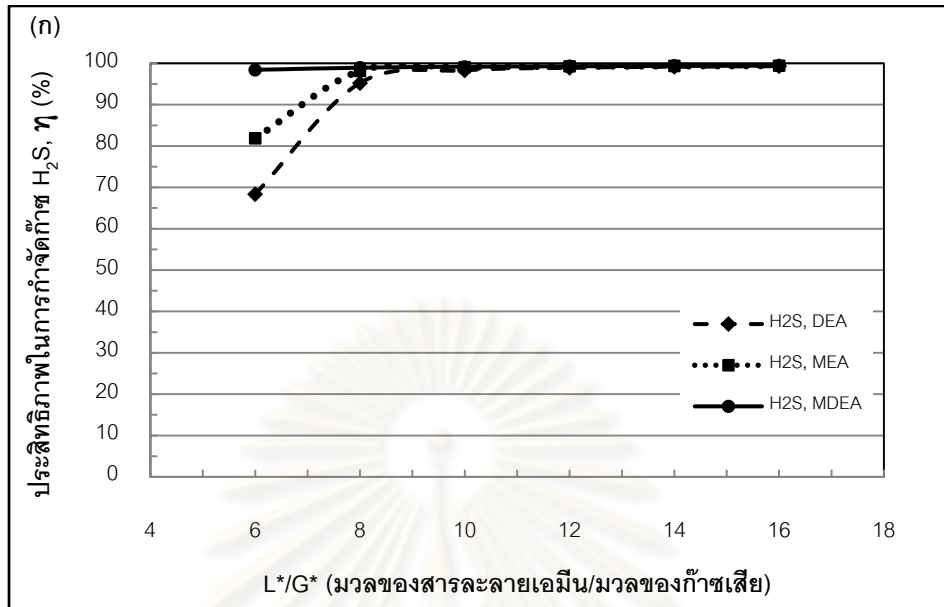
พิจารณาค่า η ของก๊าซ H₂S เพิ่มขึ้นที่ค่า w_t ของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณสารอัลคานอลเอมีนที่แพร่กระจายและพร้อมจะทำปฏิกิริยากับ H₂S ได้มากขึ้น และยังส่งผลให้แรงผลักดัน (driving force) ในการดูดซึมของก๊าซ H₂S เพิ่มขึ้นด้วย เพราะ

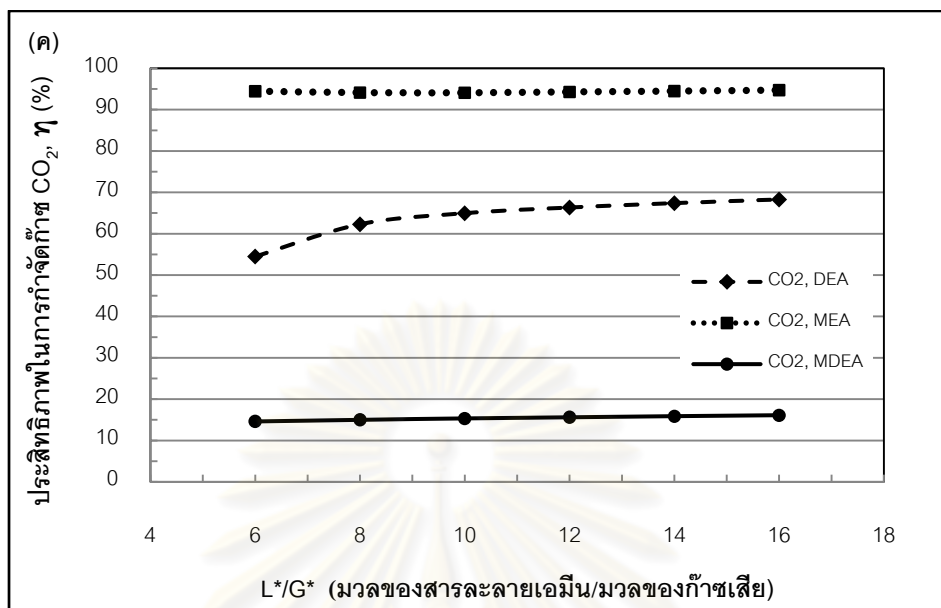
ค่าความดันไอ (vapor pressure) ของก๊าซ H_2S ที่ผิวหน้าของสารละลายน้อยกว่าในขณะที่ค่าความดันก๊าซย่อย (partial pressure) คงที่ เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับผลจากงานวิจัยอื่น เช่น Godini และคณะ (2008) แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกัน เมื่อพิจารณาค่า η ของก๊าซ CH_3SH ลดลงที่ค่า w_i เพิ่มขึ้น เนื่องจากก๊าซ H_2S และ CO_2 มีผลต่อการดูดซึมของก๊าซ CH_3SH ในสารละลายอัลคานอลเอมีน โดยการคำนวณการดูดซึมของก๊าซ CH_3SH ในโปรแกรม ASPEN HYSYS เน้นที่ความสามารถในการละลายเชิงกายภาพ (physical solubility) แตกต่างจากก๊าซ H_2S และ CO_2 ที่มีการคำนวณอ้างอิงทั้งความสามารถในการละลายเชิงกายภาพ (physical solubility) และเชิงเคมี (chemical solubility) ดังนั้นเมื่อก๊าซ H_2S และ CO_2 ทำปฏิกิริยาและดูดซึมได้มากขึ้นที่ค่า w_i เพิ่มขึ้น จึงทำให้การดูดซึมของก๊าซ CH_3SH ในสารละลายอัลคานอลเอมีนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jou และคณะ (1999), Bedell และคณะ (2007) ที่สรุปไว้ว่าก๊าซ CH_3SH มีความเป็นกรดน้อยกว่าก๊าซ H_2S และ CO_2 โดยก๊าซ CH_3SH นี้จะทำปฏิกิริยาน้อยมากหรือไม่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายอัลคานอลเอมีนเลย โดยเฉพาะเมื่อมีการดูดซึมก๊าซ H_2S และ CO_2 ในสารละลายเพิ่มขึ้น และการดูดซึมก๊าซ H_2S และ CO_2 ทำให้สารละลายอัลคานอลเอมีนมีความเป็นด่างลดลง ส่งผลให้การดูดซึมของก๊าซ CH_3SH ลดลงเช่นกัน

5.2.2 ตัวแปรที่ 2 อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีนในรูป L^*/G^*

การปรับค่า L^*/G^* ตั้งแต่ 6 ถึง 16 ที่ค่าสัดส่วนน้ำหนัก = 0.25 ของสารละลายต่างชนิด DEA, MEA และ MDEA จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทนจะเพิ่มขึ้นที่ค่า L^*/G^* เพิ่มขึ้น แสดงไว้ดังรูปที่ 5.9 โดยค่า η ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดประมาณ 98-99% ที่ $L^*/G^* = 8$ ทั้งสารละลาย MEA และ MDEA และสูงสุดประมาณ 98-99% ที่ $L^*/G^* = 10$ ของสารละลาย DEA ในส่วนของก๊าซเมทิลเมอร์แคปเทนค่า η สูงสุดประมาณ 64-65% ที่ $L^*/G^* = 16$ ของสารละลาย MDEA และมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับสาร DEA และ MEA ตามลำดับ





รูปที่ 5.9 ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีนที่อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซเสียคงที่ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด (ก) สำหรับ H₂S, (ข) สำหรับ CH₃SH, (ค) สำหรับ CO₂

พิจารณาค่า η ของก๊าซ H₂S เพิ่มขึ้นเมื่อค่า L*/G* หรืออัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาด column คงที่ เวลาของสารละลายที่ค้างอยู่ใน tray หรือ packing (liquid residence time) ลดลง เป็นผลให้อัตราการดูดซึม (rate of absorption) ของก๊าซ H₂S เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่า η ของก๊าซ CH₃SH เพิ่มขึ้นที่ค่า L*/G* เพิ่มขึ้น มีเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีข้างต้น แต่อีกหนึ่งเหตุผลที่สำคัญคือค่า η ของก๊าซ CO₂ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ปริมาณก๊าซ CO₂ ที่ละลายในสารอัลคานอลเอมีนเปลี่ยนแปลงไม่มากในสภาวะที่มวลของสารละลายเอมีนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของก๊าซ CH₃SH เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาจากชนิดของสารอัลคานอลเอมีน ได้แก่ DEA, MEA และ MDEA แล้ว จากผลการจำลองของการศึกษาตัวแปรที่ 1 และ 2 พบว่าค่า η ของก๊าซ H₂S และ CH₃SH มีค่าสูงสุดเมื่อใช้สารละลาย MDEA โดยจากผลการจำลองของก๊าซ CO₂ มีค่า η และการเลือกดูดซึม (selective absorption) ด้วยสาร MEA ได้ดีกว่าสาร DEA และ MDEA ตามลำดับ ดังนั้นสารละลาย MDEA จึงมีเอมีนที่แพร่กระจายและพร้อมจะทำปฏิกิริยาหรือดูดซึมก๊าซ H₂S และ CH₃SH ได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของงานวิจัยอื่น เช่น Anufrikov และคณะ (2007) สรุปได้ว่าสาร MDEA มีการเลือกดูดซึมก๊าซ H₂S ได้ดีในระบบที่มีก๊าซ CO₂ อยู่ด้วย เนื่องจากก๊าซ CO₂ ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับสาร MDEA

5.2.3 ตัวแปรที่ 3 ค่าสัดส่วนโมลของ H_2S , CH_3SH และ CO_2

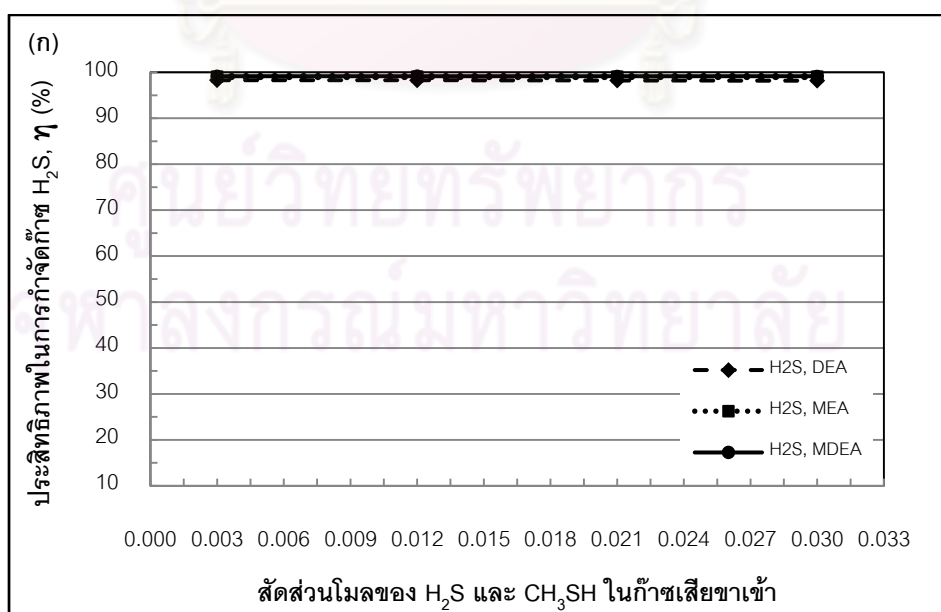
กรณีที่ 1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนโมลของ H_2S , CH_3SH และ CO_2 ของก๊าซเสียขาเข้าที่

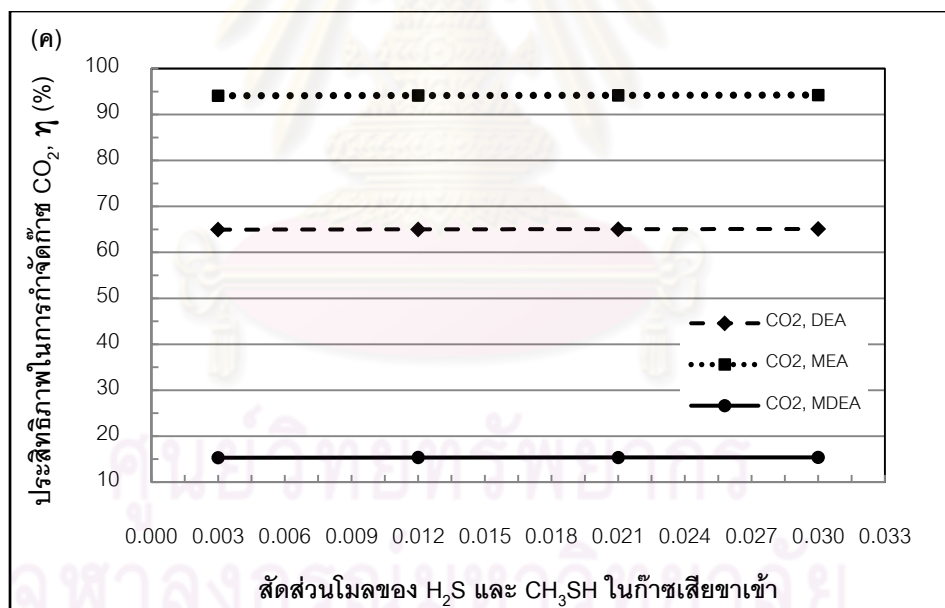
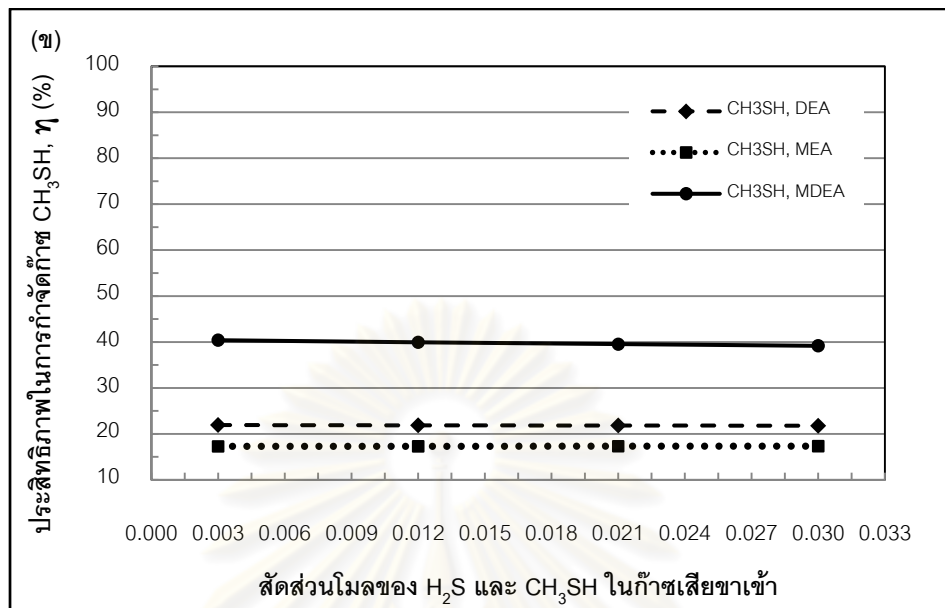
$$L^*/G^* = 10$$

การเปลี่ยนแปลงของก๊าซ H_2S และ CH_3SH

การปรับค่าสัดส่วนโมลของ H_2S และ CH_3SH ตั้งแต่ 0.003 ถึง 0.030 ในก๊าซเสียขาเข้า โดยที่ $L^*/G^* = 10$ และ $w_t = 0.25$ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทนลดลงเล็กน้อยที่ค่าสัดส่วนโมลของ H_2S และ CH_3SH เพิ่มขึ้น แสดงไว้ดังรูปที่ 5.10 ทั้งในสารละลาย DEA, MEA และ MDEA

พิจารณาค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มค่าสัดส่วนโมลของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ในก๊าซเสียขาเข้า เนื่องจากค่า L^*/G^* คงที่ ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของสารอัลคานอลเอมีนมีการปรับปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซเสียที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณเอมีนที่แพร่กระจายและพร้อมจะทำปฏิกิริยามากขึ้นตามลำดับส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH เล็กน้อย

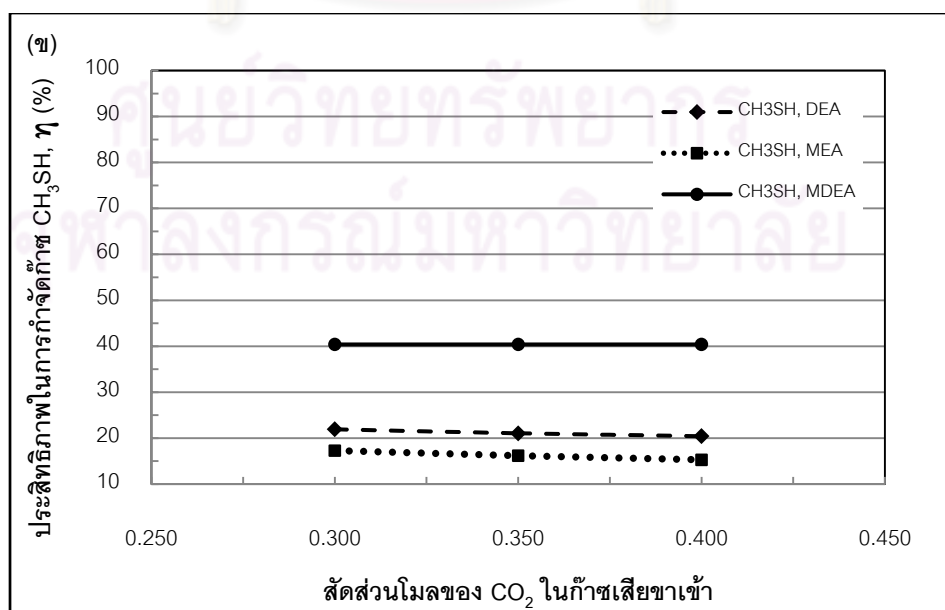
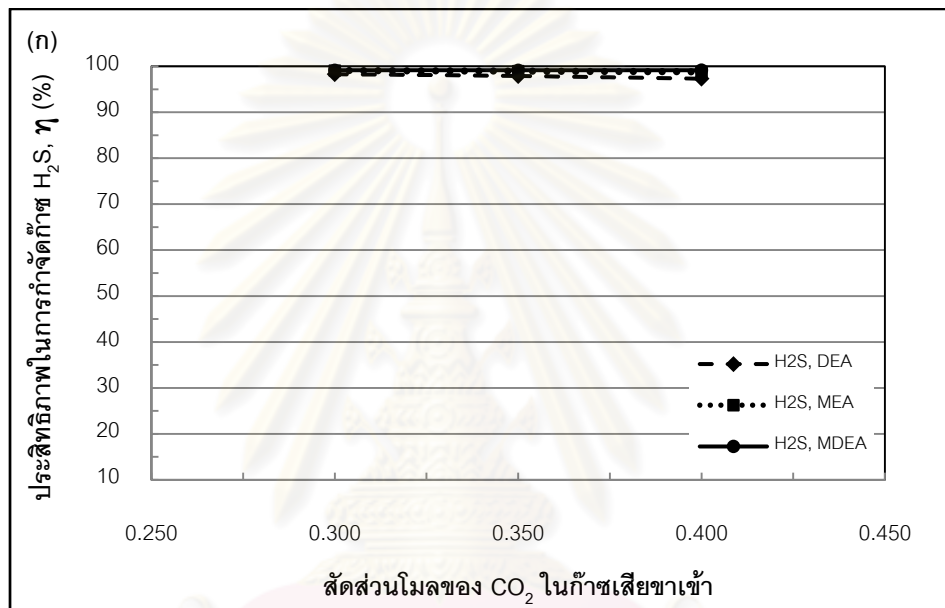


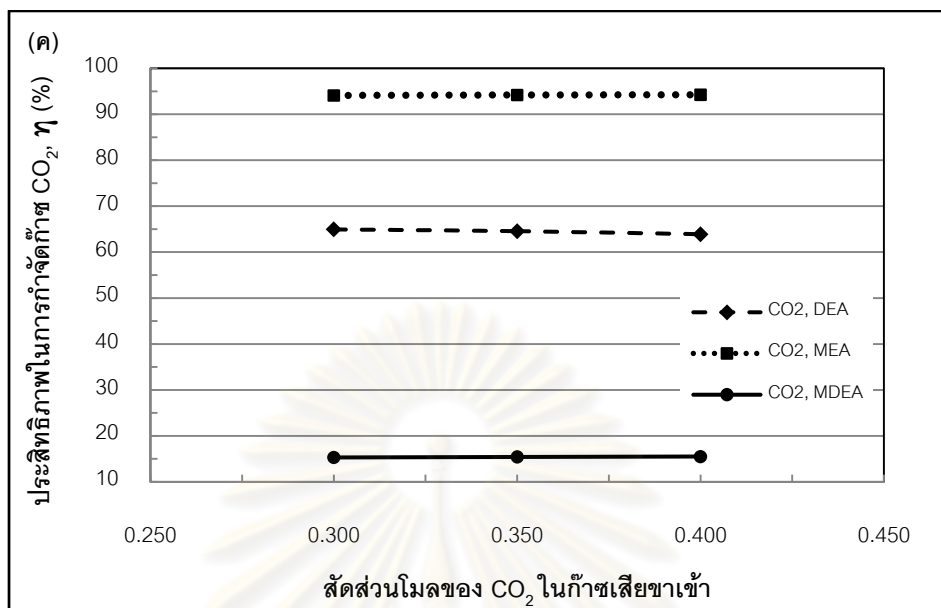


รูปที่ 5.10 ผลของสัดส่วนโมลของ H₂S และ CH₃SH ในก๊าซเสียขาเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ L*/G* = 10 (ก) สำหรับ H₂S, (ข) สำหรับ CH₃SH, (ค) สำหรับ CO₂

การเปลี่ยนแปลงของก๊าซ CO_2

การปรับค่าสัดส่วนโมลของก๊าซ CO_2 ตั้งแต่ 0.30 ถึง 0.40 ในก๊าซเสียขาเข้า โดยที่ $L^*/G^* = 10$ และ $w_t = 0.25$ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทนลดลงเล็กน้อยที่ค่าสัดส่วนโมลของ CO_2 เพิ่มขึ้น แสดงไว้ดังรูปที่ 5.11 ทั้งในสารละลาย DEA, MEA และ MDEA





รูปที่ 5.11 ผลของสัดส่วนโมลของ CO₂ ในก๊าซเสียขาเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ที่ $L^*/G^* = 10$ (ก) สำหรับ H₂S, (ข) สำหรับ CH₃SH, (ค) สำหรับ CO₂

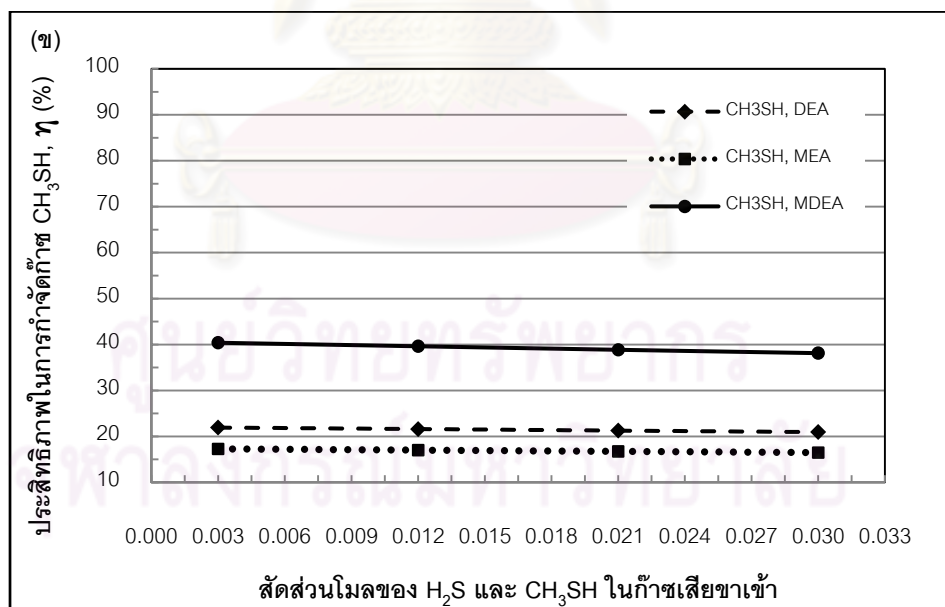
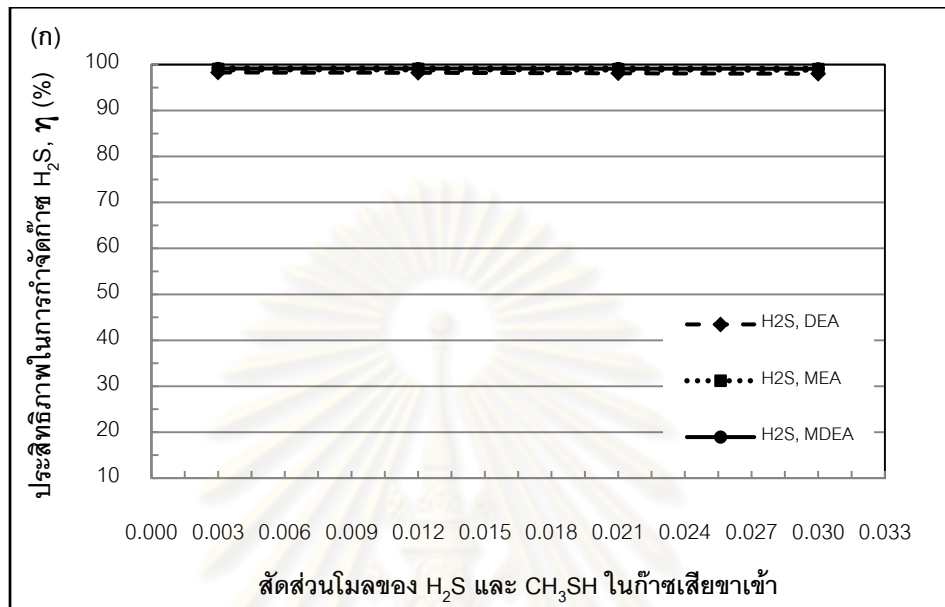
พิจารณาค่า η ของก๊าซ H₂S และ CH₃SH มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มค่าสัดส่วนโมลของ CO₂ ในก๊าซเสียขาเข้า เนื่องจากค่า L^*/G^* คงที่ ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของสารอัลคานอลเอมีนมีการปรับปริมาณเพิ่มขึ้น ตามอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซเสียที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณเอมีนที่แพร่กระจายและพร้อมจะทำปฏิกิริยามีมากขึ้นตามลำดับ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH เล็กน้อย เช่นเดียวกับกรณีข้างต้น

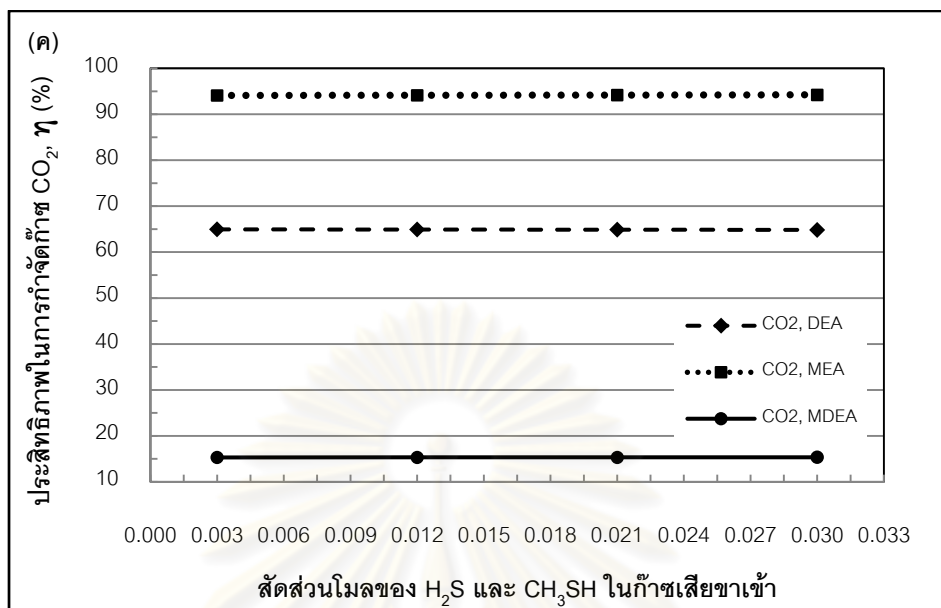
กรณีที่ 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนโมลของ H₂S, CH₃SH และ CO₂ ของก๊าซเสียขาเข้าที่ $L^* = 34,350$ kg/h

การเปลี่ยนแปลงของก๊าซ H₂S และ CH₃SH

การปรับค่าสัดส่วนโมลของ H₂S และ CH₃SH ตั้งแต่ 0.003 ถึง 0.030 ในก๊าซเสียขาเข้า โดยที่ $L^* = 34,350$ kg/h และ $w_t = 0.25$ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงเล็กน้อยทั้งในสารละลาย DEA, MEA และ MDEA ส่วน

ค่า η ของก๊าซเมทิลเมอร์แคปเทนลดลงอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในสารละลาย MDEA ที่ค่าสัดส่วนโมลของ H_2S และ CH_3SH เพิ่มขึ้น แสดงไว้ดังรูปที่ 5.12



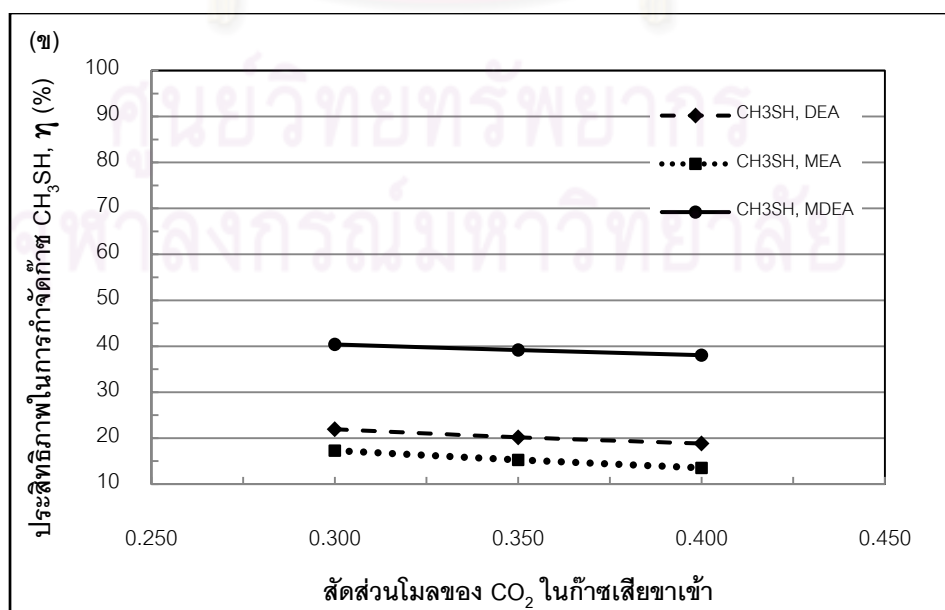
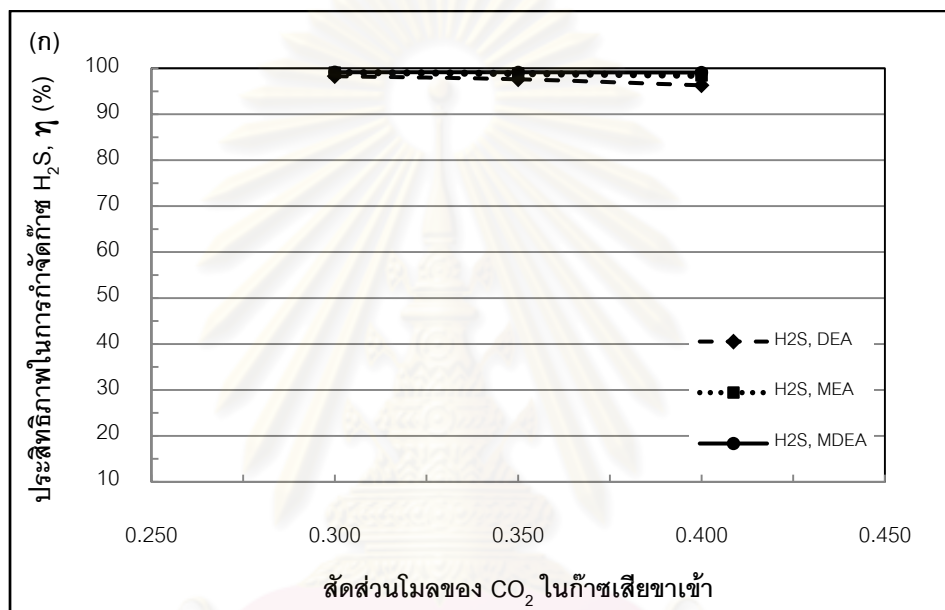


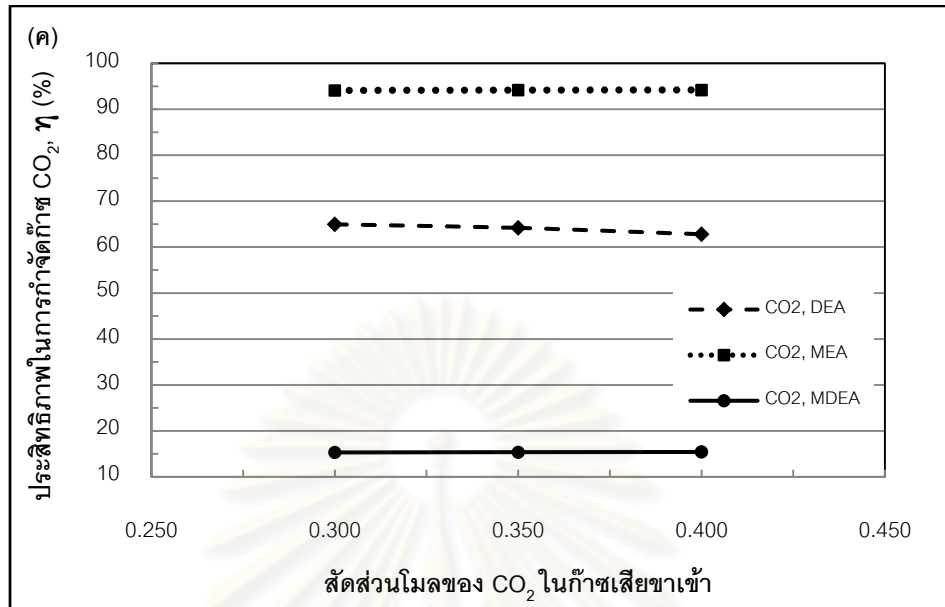
รูปที่ 5.12 ผลของสัดส่วนโมลของ H₂S และ CH₃SH ในก๊าซเสียขาเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ L^{*}=34,350 kg/h (ก) สำหรับ H₂S, (ข) สำหรับ CH₃SH, (ค) สำหรับ CO₂

พิจารณาค่า η ของก๊าซ H₂S มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนโมลของ H₂S และ CH₃SH ในก๊าซเสียขาเข้า โดยที่ค่า L^{*} หรือค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าคงที่ เนื่องจากผลของความดันก๊าซย่อยของก๊าซ H₂S มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้แรงผลักดันเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของก๊าซ H₂S ในสารละลายเอมีนมีมากขึ้น แต่ปริมาณสารเอมีนที่แพร่กระจายและพร้อมจะทำปฏิกิริยากับ H₂S ก็ลดลงเช่นกัน ดังนั้นค่า η ของก๊าซ H₂S จึงเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อพิจารณาค่า η ของ CH₃SH ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนโมลของ H₂S และ CH₃SH ในก๊าซเสียขาเข้า โดยเฉพาะในสารละลาย MDEA เนื่องจากปริมาณก๊าซ H₂S ละลายในสารอัลคานอลเอมีนเพิ่มขึ้นและละลายได้ดีในสาร MDEA ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของ CH₃SH ในสารอัลคานอลเอมีนลดลง

การเปลี่ยนแปลงของก๊าซ CO₂

การปรับค่าสัดส่วนโมลของก๊าซ CO₂ ตั้งแต่ 0.30 ถึง 0.40 ในก๊าซเสียขาเข้า โดยที่ $L^* = 34,350$ kg/h และ $w_t = 0.25$ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด (ก) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปเทนลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในสารละลาย DEA และ MEA แสดงไว้ดังรูป 5.13





รูปที่ 5.13 ผลของสัดส่วนโมลของ CO₂ ในก๊าซเสียขาเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ที่ L* = 34,350 kg/h (ก) สำหรับ H₂S, (ข) สำหรับ CH₃SH, (ค) สำหรับ CO₂

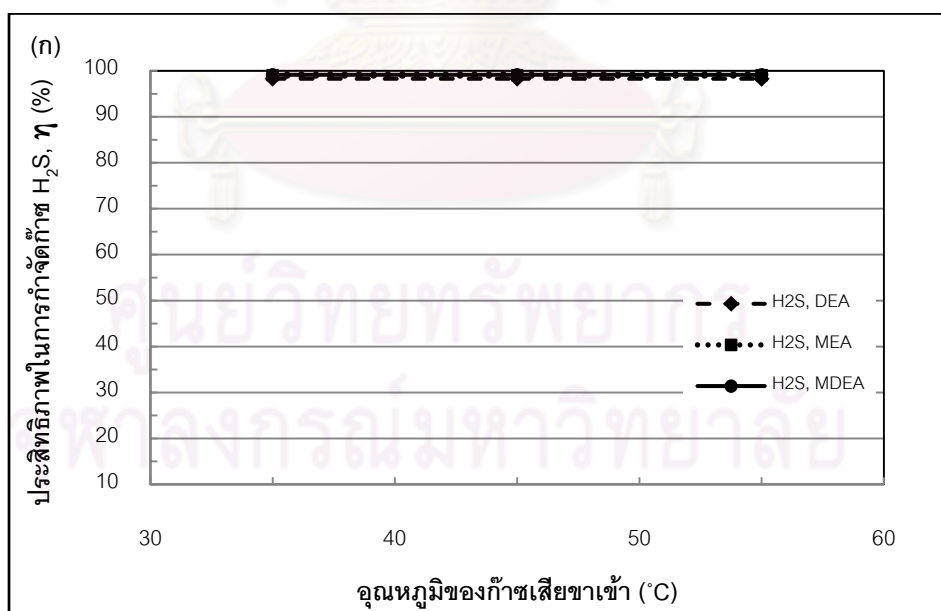
พิจารณาค่า η ของก๊าซ H₂S และ CH₃SH ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลของ CO₂ ในก๊าซเสียขาเข้า ที่ค่า L* หรืออัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าคงที่ เนื่องจากผลของความดันก๊าซย่อยของก๊าซ CO₂ มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้แรงผลักดันเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ความสามารถในการละลายของก๊าซ CO₂ ในสารละลายเอมีนมีมากขึ้น แต่ปริมาณสารเอมีนที่แพร่กระจายและพร้อมจะทำปฏิกิริยากับ CO₂ ก็ลดลงเช่นกัน ดังนั้นค่า η ของก๊าซ CO₂ จึงเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่ส่งผลต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาของก๊าซ H₂S เพราะสัดส่วนเชิงโมลหรือความดันก๊าซย่อยในก๊าซเสียขาเข้าของก๊าซ CO₂ มีค่ามากกว่าก๊าซกรดอีก 2 ชนิด ถึง 100-130 เท่า ขณะที่ค่าความดันก๊าซย่อยของก๊าซ H₂S เท่าเดิม ดังนั้นปริมาณสารเอมีนที่พร้อมจะทำปฏิกิริยาที่ลดลงจึงส่งผลทำให้ค่า η ของก๊าซ H₂S ลดลงเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยของ Lu และคณะ (2006) มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน และส่งผลให้ความสามารถในการละลายของ CH₃SH ลดลงด้วย เมื่อพิจารณาค่า η ของก๊าซ H₂S และ CH₃SH ที่ลดลงโดยเฉพาะในสารละลาย DEA และ MEA นั้น เนื่องจากก๊าซ CO₂ ละลายและทำปฏิกิริยาได้มากกว่าในสารละลายทั้งสองชนิดข้างต้น ทำให้สารเอมีนที่พร้อมจะทำปฏิกิริยามีค่าลดลงเช่นกัน

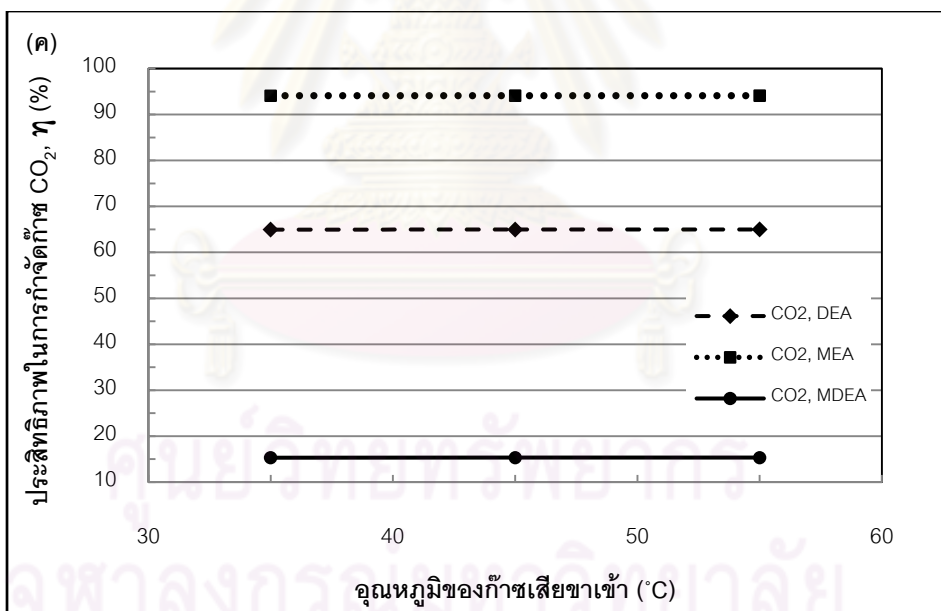
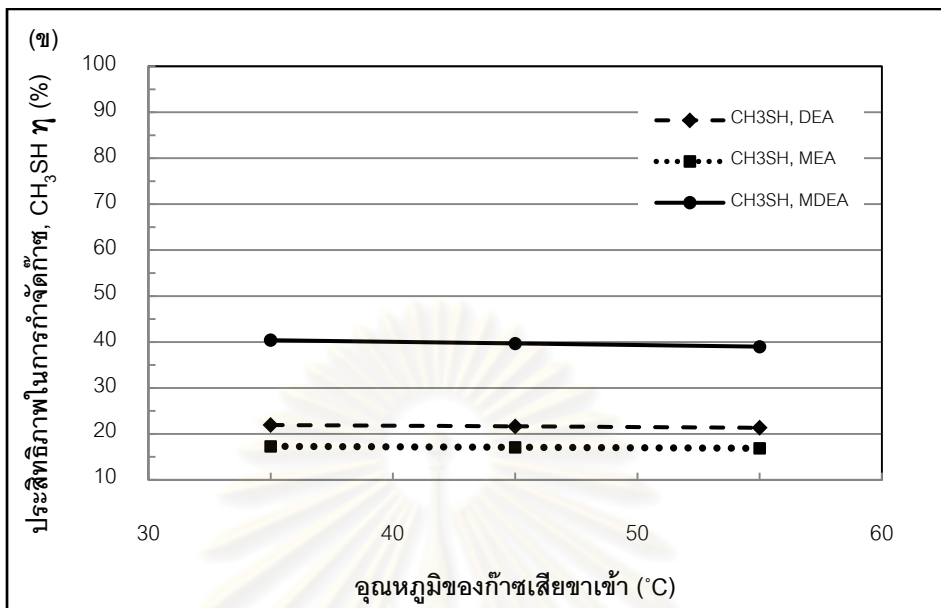
5.2.4 ตัวแปรที่ 4 ค่าอุณหภูมิของก๊าซเสีย

ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้า

การปรับค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้าตั้งแต่ 35 ถึง 55 °C โดยที่ $L^*/G^* = 10$ และ $w_t = 0.25$ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซเมทิลเมอร์แคปเทนลดลงเล็กน้อยที่ค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้าเพิ่มขึ้น แสดงไว้ดังรูปที่ 5.14 ทั้งในสารละลาย DEA, MEA และ MDEA

พิจารณาค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ลดลงเล็กน้อยที่ค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้าเท่ากับ 45 และ 55 °C ความร้อนของก๊าซเสียถูกถ่ายโอนไปยังสารละลายอัลคานอลเอมีนที่มีอุณหภูมิ 40 °C ซึ่งมีค่าความจุความร้อนมากกว่า และอัตราการไหลเชิงมวลมากกว่าก๊าซเสียถึง 10 เท่า ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในหอดูดซึม เป็นเหตุผลให้ความสามารถในการละลายของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ลดลงเล็กน้อย





รูปที่ 5.14 ผลของอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

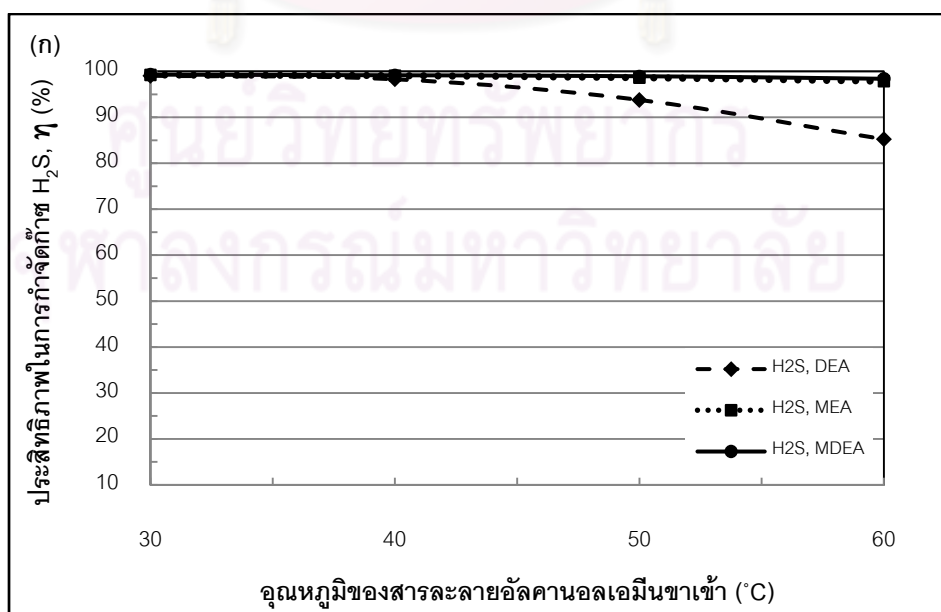
(ก) สำหรับ H₂S, (ข) สำหรับ CH₃SH, (ค) สำหรับ CO₂

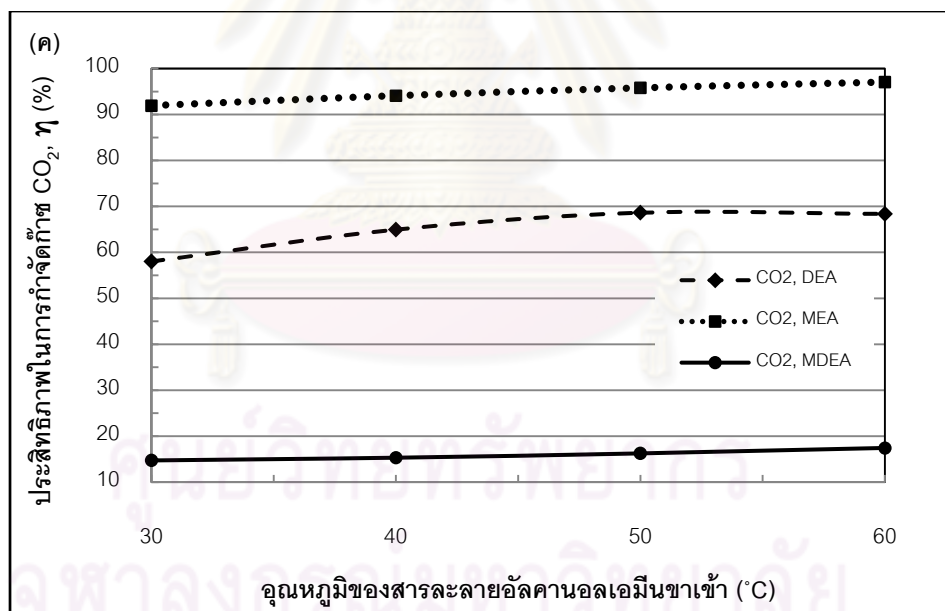
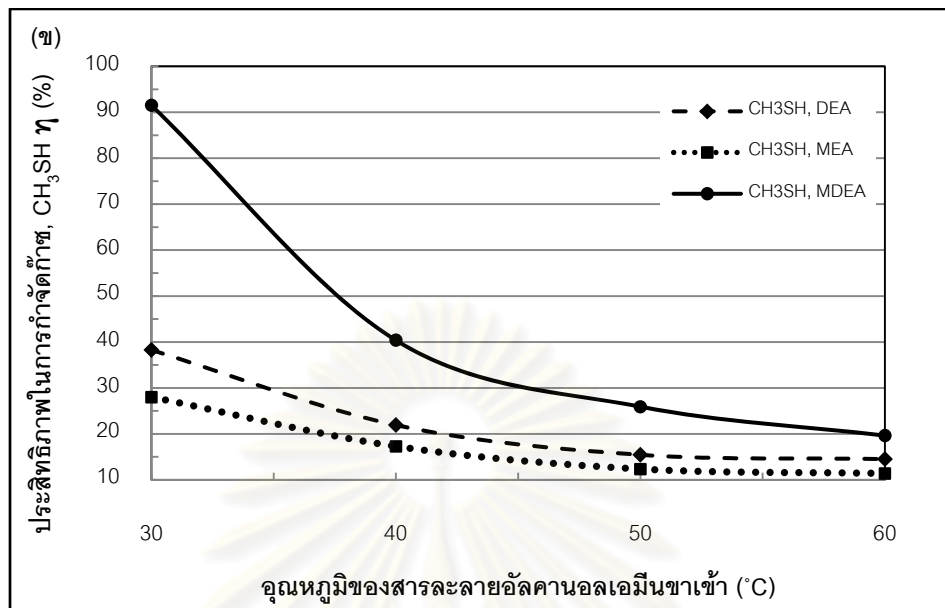
5.2.5 ตัวแปรที่ 5 ค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้า

การปรับค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าตั้งแต่ 30 ถึง 60 °C โดยที่ $L^*/G^* = 10$ และ $w_i = 0.25$ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงเล็กน้อยที่ค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าเพิ่มขึ้น ทั้งในสารละลาย MEA และ MDEA และค่า η ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิประมาณ 50 °C ของสารละลาย DEA ในส่วนค่า η ของก๊าซเมทิลเมอร์แคปแทนลดลงอย่างต่อเนื่องที่ค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าเพิ่มขึ้น ทั้งในสารละลาย DEA, MEA และ MDEA แสดงไว้ดังรูปที่ 5.15

พิจารณาค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ลดลงเมื่อค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ลดลง โดยเฉพาะกับก๊าซ CH_3SH ที่ลดลงอย่างมากในสารละลายทั้ง 3 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jou และคณะ (1999) ที่แสดงผลของความสามารถในการละลายของก๊าซ CH_3SH ที่ลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีก๊าซกรดอื่นๆ ละลายอยู่ในสารละลาย





รูปที่ 5.15 ผลของอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

(ก) สำหรับ H₂S, (ข) สำหรับ CH₃SH, (ค) สำหรับ CO₂

5.3 ผลจำลองระบบกำจัดก๊าซกรดจากผลการศึกษาค่าตัวแปรในหัวข้อ 5.2

จากผลการจำลองหอดูดซึมเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ป้อนเข้าสู่หอดูดังรายละเอียดข้างต้น แสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH สูงสุด คือ ที่ $L^*/G^* = 16$ และ w_1 อยู่ในช่วง 0.20-0.35 ของสารละลาย MDEA และอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}C$ จากนั้นนำค่าตัวแปรที่ได้จำลองระบบกำจัดก๊าซกรด โดยใช้ Amine Property Package ที่มีแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับสารละลายของ Li-Mather Electrolyte และแบบจำลองของสถานะก๊าซแบบ Non-Ideal ในโปรแกรม ASPEN HYSYS ที่อ้างอิงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังหัวข้อ 3.2 มีสมมุติฐาน (assumptions) ดังนี้

- ระบบศึกษาที่สภาวะดำเนินการแบบคงตัว (steady state)
- ระบบหอดูดซึม, หอสตริปปิง, เครื่องอัดอากาศ, ปั๊ม, เครื่องทำความเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พิจารณาที่สภาวะไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับภายนอก (adiabatic)
- ปฏิกิริยาเกิดในสารละลาย

พร้อมทั้งขอบเขตข้อมูลการจำลองในระบบกำจัดก๊าซกรดดังตารางที่ 5.5 และรูปแบบในการจำลอง รูปที่ 5.16 โดยมีรายละเอียดอุปกรณ์ดังนี้

- หอดูดซึม (Absorber) 1 หอ และหอสตริปปิง (Stripping column) 1 หอ
- เครื่องอัดอากาศ (Blower) 1 เครื่อง คือ K-100
- ปั๊ม (Pump) 2 เครื่อง คือ P-100 และ P-101
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) 1 เครื่อง คือ E-100
- เครื่องทำความเย็น (Cooler) 1 เครื่อง คือ E-101
- Mixer คือ Mix-100

จากผลการจำลองตามขอบเขตข้อมูลที่กำหนด ส่งผลให้ค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ประมาณ 75 และ 96% ตามลำดับ แสดงข้อมูลรายละเอียดของสารประกอบในแต่ละสายดังตารางที่ 5.6 โดยผลการจำลองของระบบกำจัดก๊าซกรดได้ค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH แตกต่างกับการจำลองในหน่วยหอดูดซึม เกิดจากส่วนของหอสตริปปิงที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกก๊าซกรดออกจากสารละลาย MDEA ทำให้ค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ที่ได้แตกต่าง

กัน ดังนั้นค่าตัวแปรที่ให้ η สูงสุดจากการศึกษาในระบบดูดซึม ยังไม่ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในระบบกำจัดก๊าซกรด

เมื่อปรับลดค่าอัตราการไหลของสารละลายอัลคานอลเอมีนอยู่ที่ L^*/G^* ประมาณ 8.7 ส่งผลให้ค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ในระบบกำจัดก๊าซกรดที่ค่าอื่นๆ คงที่ ปรับเป็น 82 และ 81% ตามลำดับ

หากพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้งานจริง ที่คำนึงถึงการใช้พลังงานในระบบกำจัดก๊าซกรด และค่า strength ของสารละลายแล้ว พบว่าค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนอยู่ที่ประมาณ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ และค่า w_1 ของสารละลาย MDEA ประมาณ 0.45 ส่งผลให้ค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ในระบบกำจัดก๊าซกรดที่ค่าอื่นๆ คงที่ ลดลงถึง 33 และ 19% ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5 ขอบเขตข้อมูลจำลองระบบกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH

รายการ	ปริมาณค่า	หน่วย
ก๊าซเสียขาเข้า (Feed Gas)		
- อัตราการไหลเชิงปริมาตร	2,917 (70,000)	Nm ³ /h (Nm ³ /day)
- อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h
- อัตราการไหลเชิงมวล, G*	3,435	kg/h
- อุณหภูมิ	35	°C
- ความดัน	104.3	kPa
- สัดส่วนโมล		
CH ₄	0.550	-
CO ₂	0.300	-
H ₂ S	0.003	-
CH ₃ SH	0.003	-
N ₂	0.124	-
O ₂	0.020	-
สารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Amine to Absorber)		
- L*	54,960 (L*/G*=16)	kg/h
- อุณหภูมิ	30	°C
- ความดัน	104.3	kPa
- สัดส่วนน้ำหนัก (w _i)		
MDEA	0.25	-
H ₂ O	0.75	-
รายละเอียดของหอดูดซึม (Absorber Column Specification)		
หอดูดซึมแบบถาด		
- จำนวนถาด (Number of Trays)	10	ชั้น
- ขนาด (Diameter)	1.5	เมตร (m)
ค่าเทียบเท่าของหอบแบบแพค		
- ความสูง Packing	4.87 (metal pall rings 2")	เมตร (m)
- ขนาด (Diameter)	0.9144	เมตร (m)
- ความดันลด (Pressure Drop)	1.6	kPa
รายละเอียดของหอสตรีปปีง (Stripping Column Specification)		
- จำนวนถาด (Number of Trays)	14	ชั้น
- ขนาด (Diameter)	1.5	เมตร (m)
- อุณหภูมิของหม้อต้ม	115	°C

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลรายละเอียดของสารประกอบในแต่ละสายของการจำลอง

Material Streams						Fluid Pkg:	All
Name	Amine to Absorber	Treated Gas	Rich Amine to Heat	Stripping Feed	Lean Amine to Cool		
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
Temperature (C)	30.00	30.19	30.92	90.00	115.0		
Pressure (kPa)	104.3	104.3	243.8	174.8	170.0		
Molar Flow (kgmole/h)	2400	128.5	2402	2402	2392		
Mass Flow (kg/h)	5.496e+004	3233	5.516e+004	5.516e+004	5.482e+004		
Liquid Volume Flow (m3/h)	54.56	6.328	54.83	54.83	54.42		
Heat Flow (kJ/h)	-6.915e+007	1.451e+006	-6.910e+007	-5.641e+007	-5.036e+007		
Name	Cooled Lean Amine	Acid Gas	Gas to Absorber	Feed Gas	Rich Amine		
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000		
Temperature (C)	57.93	80.01	36.45	35.00	30.87		
Pressure (kPa)	101.1	169.0	105.9	104.3	105.9		
Molar Flow (kgmole/h)	2392	9.377	130.2	130.2	2402		
Mass Flow (kg/h)	5.482e+004	341.1	3435	3435	5.516e+004		
Liquid Volume Flow (m3/h)	54.42	0.4039	6.591	6.591	54.83		
Heat Flow (kJ/h)	-6.305e+007	1.092e+005	1.495e+006	1.488e+006	-6.910e+007		
Name	Make up Water	Amine to Cool	Amine to Pump	Amine to RECY			
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			
Temperature (C)	30.00	57.86	29.99	30.00			
Pressure (kPa)	104.3	101.1	66.58	104.3			
Molar Flow (kgmole/h)	7.757	2400	2400	2400			
Mass Flow (kg/h)	139.7	5.496e+004	5.496e+004	5.496e+004			
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.1400	54.56	54.56	54.56			
Heat Flow (kJ/h)	-2.617e+005	-6.331e+007	-6.915e+007	-6.915e+007			
Compositions						Fluid Pkg:	All
Name	Amine to Absorber	Treated Gas	Rich Amine to Heat	Stripping Feed	Lean Amine to Cool		
Comp Mole Frac (Methane)	0.0000	0.5568	0.0000	0.0000	0.0000		
Comp Mole Frac (CO2)	0.0005	0.2572	0.0030	0.0030	0.0005		
Comp Mole Frac (H2S)	0.0016	0.0008	0.0017	0.0017	0.0016		
Comp Mole Frac (M-Mercaptan)	0.0000	0.0001	0.0002	0.0002	0.0000		
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.0000	0.0202	0.0000	0.0000	0.0000		
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.0000	0.1256	0.0000	0.0000	0.0000		
Comp Mole Frac (MDEAmine)	0.0479	0.0000	0.0479	0.0479	0.0481		
Comp Mole Frac (H2O)	0.9500	0.0394	0.9472	0.9472	0.9498		
Comp Mole Frac (DEAmine)	***	***	***	***	***		
Name	Cooled Lean Amine	Acid Gas	Gas to Absorber	Feed Gas	Rich Amine		
Comp Mole Frac (Methane)	0.0000	0.0032	0.5500	0.5500	0.0000		
Comp Mole Frac (CO2)	0.0005	0.6388	0.3000	0.3000	0.0030		
Comp Mole Frac (H2S)	0.0016	0.0335	0.0030	0.0030	0.0017		
Comp Mole Frac (M-Mercaptan)	0.0000	0.0404	0.0030	0.0030	0.0002		
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.0000	0.0001	0.0200	0.0200	0.0000		
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.0000	0.0003	0.1240	0.1240	0.0000		
Comp Mole Frac (MDEAmine)	0.0481	0.0000	0.0000	0.0000	0.0479		
Comp Mole Frac (H2O)	0.9498	0.2836	0.0000	0.0000	0.9472		
Comp Mole Frac (DEAmine)	***	***	***	***	***		
Name	Make up Water	Amine to Cool	Amine to Pump	Amine to RECY			
Comp Mole Frac (Methane)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			
Comp Mole Frac (CO2)	0.0000	0.0005	0.0005	0.0005			
Comp Mole Frac (H2S)	0.0000	0.0016	0.0016	0.0016			
Comp Mole Frac (M-Mercaptan)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			
Comp Mole Frac (MDEAmine)	0.0000	0.0479	0.0479	0.0479			
Comp Mole Frac (H2O)	1.0000	0.9500	0.9500	0.9500			
Comp Mole Frac (DEAmine)	***	***	***	***			
Energy Streams						Fluid Pkg:	All
Name	Pump Q0	COND Q	RBLR Q	Blower Q	Cooler Q		
Heat Flow (kJ/h)	9860	8.093e+004	6.240e+006	6980	5.843e+006		
Name	PumpQ1						
Heat Flow (kJ/h)	2703						

บทที่ 6

สรุปผลการจำลอง

การจำลองระบบดูดซึ่มในการกำจัดก๊าซกรด เบื้องต้นทำการจำลองการกำจัดก๊าซกรดด้วยโปรแกรม ASPEN HYSYS เทียบกับข้อมูลการทดลองของงานวิจัยอื่น พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน โดยค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยสารละลายอัลคานอลเอมีนจากการจำลองเทียบกับผลการทดลองของ Lu และคณะ (2006) ในรูปแบบ removal efficiency มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 4.2% และเทียบกับผลการทดลองของ Godini และคณะ (2008) ในรูปแบบ absolute efficiency ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 8.2% ในส่วนผลจากงานวิจัยของ Alfadala และคณะ (2009) เทียบผลกับการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิที่ออกจากหอดูดซึ่มมีค่าใกล้เคียงกัน มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 8.4 % ในส่วนของค่าอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซที่ออกจากหอสตริปปีงมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 34.3% โดยสาเหตุเกิดได้จากหลายปัจจัย ทั้งความแตกต่างของสภาวะจริงในการทดลองกับการจำลอง ผลจากความดันของระบบที่สูงกว่าความดันบรรยากาศหลายเท่า และอื่นๆ จากการทดสอบแสดงว่า Amine Property Package ในโปรแกรม ASPEN HYSYS มีประสิทธิภาพเพียงพอในการประยุกต์ใช้โดยเฉพาะระบบที่มีสภาวะใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ ถัดมาในงานวิจัยได้มีการศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และเมทิลเมอร์แคปเทน (CH_3SH) จากแหล่งก๊าซชีวภาพด้วยสารละลาย DEA, MEA และ MDEA ด้วยโปรแกรม ASPEN HYSYS สรุปผลการจำลองมีรายละเอียดดังนี้

ประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซ H_2S เพิ่มขึ้นเมื่อค่า w_i ของสาร DEA, MEA และ MDEA เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า η ของก๊าซ CH_3SH จะลดลง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S เพิ่มขึ้นเมื่อค่า w_i เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณเอมีนที่แพร่กระจายและทำปฏิกิริยากับก๊าซกรดได้มากกว่า และจากแรงผลักดัน (driving force) ในการดูดซึ่มของก๊าซ H_2S ที่เพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนของค่า η ของก๊าซ CH_3SH ลดลงที่ค่า w_i เพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของก๊าซ CH_3SH ลดลงเมื่อปริมาณก๊าซกรดอื่นๆ ได้แก่ ก๊าซ H_2S และ CO_2 ละลายในสารละลายเอมีนเพิ่มขึ้น

ประสิทธิภาพในการกำจัด (η) ก๊าซ H_2S และ CH_3SH เพิ่มขึ้นเมื่อค่า L^*/G^* เพิ่มขึ้น (ที่ L^*/G^* อยู่ในขอบเขตระหว่างช่วงแห้ง, dryness และช่วงท่วม, flood) เนื่องจากขนาด

column คงที่ ทำให้เวลาของสารละลายที่ค้างอยู่ใน tray หรือ packing (liquid residence time) ลดลง เป็นผลให้อัตราการดูดซึม (rate of absorption) ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH เพิ่มขึ้น และก๊าซ CO_2 ที่ละลายในสารเอมีนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในสภาวะที่มวลของสารละลายเอมีนเพิ่มขึ้น ทำให้การละลายของก๊าซ CH_3SH เพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาชนิดของสารอัลคานอลเอมีนพบว่า สาร MDEA มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH มากกว่าเมื่อเทียบกับสาร DEA และ MEA เนื่องจากสาร MDEA มีการเลือกดูดซึมก๊าซ H_2S ได้ดีในระบบที่มีก๊าซ CO_2 ปนอยู่ด้วย และก๊าซ CO_2 มีค่า η สูงขึ้นในสารละลาย MEA, DEA และ MDEA ตามลำดับ

ในส่วนของผลการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนโมลของ H_2S , CH_3SH และ CO_2 ของก๊าซเสียขาเข้า ในกรณี L^*/G^* คงที่ มีผลต่อค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH เล็กน้อย เนื่องจากค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเอมีนมีการปรับปริมาณเพิ่มขึ้น ตามอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซเสียที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณเอมีนที่แพร่กระจายและทำปฏิกิริยาได้มีปริมาณใกล้เคียงเดิม ส่วนในกรณีค่าสัดส่วนโมลของ H_2S และ CH_3SH เพิ่มขึ้นที่ L^* =ค่าคงที่ จากผลการจำลองค่า η ของ H_2S ลดลงเล็กน้อยทั้งในสารละลาย DEA, MEA และ MDEA ส่วนค่า η ของ CH_3SH ลดลงอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในสารละลาย MDEA เนื่องจากปริมาณก๊าซ H_2S ละลายในสารเอมีนชนิดนี้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของ CH_3SH ลดลง ส่วนกรณีค่าสัดส่วนโมลของ CO_2 เพิ่มขึ้นที่ L^* =ค่าคงที่ จากผลการจำลองค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในสารละลาย DEA และ MEA เนื่องจากปริมาณก๊าซ CO_2 ละลายและทำปฏิกิริยามากขึ้นโดยเฉพาะในสารละลายทั้งสองข้างต้น ทำให้สารเอมีนที่แพร่กระจายและพร้อมจะทำปฏิกิริยากับก๊าซ H_2S และ CH_3SH ลดลง

ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้าในช่วงที่ศึกษา ส่งผลต่อค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH เล็กน้อย เนื่องจากความร้อนของก๊าซเสียขาเข้าที่อุณหภูมิมากกว่า $40\text{ }^{\circ}C$ และไม่เกิน $55\text{ }^{\circ}C$ ถูกถ่ายโอนไปยังสารละลายเอมีน ทำให้ในหอดูดซึมมีอุณหภูมิสูงขึ้นไม่มากและกระทบต่อความสามารถในการละลายของก๊าซ H_2S และ CH_3SH เล็กน้อย ส่วนผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าส่งผลต่อค่า η ของก๊าซ H_2S เล็กน้อย ส่วนค่า η ของก๊าซ CH_3SH มีค่าลดลงเป็นลำดับเนื่องจากอุณหภูมิของระบบดูดซึมสูงขึ้น ความสามารถในการละลายของก๊าซกรดจึงลดลง โดยเฉพาะก๊าซ CH_3SH

ค่าเหมาะสมที่ได้จากการจำลองหน่วยหอดูดซึมเพื่อกำจัดก๊าซ H_2S และ CH_3SH ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ที่ $L^*/G^* = 16$ และ w_1 อยู่ในช่วง 0.20-0.35 ของสารละลาย MDEA และอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้าเท่ากับ $30\text{ }^\circ\text{C}$ ส่งผลให้ค่า η ของก๊าซ H_2S และ CH_3SH ในระบบกำจัดก๊าซกรดตามขอบเขตข้อมูลที่ศึกษามีค่าประมาณ 75 และ 96% ตามลำดับ จากผลการจำลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบระบบกำจัดก๊าซกรดทั้ง 2 ชนิดจากแหล่งอุตสาหกรรมได้

ข้อเสนอแนะคือศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกก๊าซกรดออกจากสารละลายอัลคานอลเอมีนในหอสตรipping และพิจารณาถึงค่าพลังงานที่ใช้ในระบบกำจัดก๊าซกรดด้วย เพื่อเป็นข้อมูลศึกษาที่ใช้ออกแบบระบบกำจัดก๊าซกรดทั้ง 2 ชนิด ให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้นที่การใช้พลังงานลดลงถัดไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ และสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หลักการเลือกระบบบำบัดกลิ่นที่เหมาะสม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/consideration.html [2553, ตุลาคม 26]

นพภาพร พานิช และคนอื่น. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ภาษาอังกฤษ

Al-Baghli, N. A., Pruess, S. A., Yesavage, V. F., and Selim, M. S. A rate-based model for the design of gas absorbers for the removal of CO₂ and H₂S using aqueous solutions of MEA and DEA. Fluid Phase Equilibria 185 (2001): 31–43.

Alfadala, H.E., and Al-Musleh, E. Simulation of an acid gas removal process using methyldiethanolamine; an equilibrium approach. Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium (2009): 256-265.

Amines and Plasticizers Limited. Amine: Comparison of various parameters of MEA, DEA and MDEA [Online]. Available from: http://www.amines.com/mdea_comp.htm [2010, December 20]

Anufrikov, Y. A., Kuranov, G. L., and Smirnova N. A. Solubility of CO₂ and H₂S in alkanolamine-containing aqueous solutions. Russian Journal of Applied Chemistry 80 (2007): 515-527.

Aspentech. HYSYS: Simulation basis. Cambridge, MA: ASPEN Technology, 2005.

Bedell, S. A., and Miller, M. Aqueous amines as reactive solvents for mercaptan removal. Ind. Eng. Chem. Res. 46 (2007): 3729-3733.

Calvert, S. and Englund, H. M. Handbook of air pollution technology. New York: John Wiley & Sons, 1984.

Dicko, M., Coquelet, C., Jarne, C., Northrop, S., and Richon, D. Acid gases partial pressures above a 50 wt% aqueous methyldiethanolamine solution: Experimental work and modeling. Fluid Phase Equilibria 289 (2010): 99–109.

- Ducom, G., Tirnoveanu, D. R., Pascual, C., Benadda, B., and Germain, P. Biogas – Municipal solid waste incinerator bottom ash interactions: Sulphur compounds removal. Journal of Hazardous Materials 166 (2009): 1102–1108.
- Dupart, M. S., Bacon, T. R., and Edwards, D. J. Understanding corrosion in alkanolamine gas treating plants. Hydrocarbon Processing (1993): 89-94.
- Edali, M., Aboudheir, A., and Idem, R. Kinetics of carbon dioxide absorption into mixed aqueous solutions of MDEA and MEA using a laminar jet apparatus and a numerically solved 2D absorption rate/kinetics model. International Journal of Greenhouse Gas Control 3 (2009): 550–560.
- Gaur, A., Park, J. W., Maken, S., Song, H. J., and Park, J. J. Landfill gas (LFG) processing via adsorption and alkanolamine absorption. Fuel Processing Technology 91 (2010): 635–640.
- Godini, H. R., and Mowla, D. Selectivity study of H₂S and CO₂ absorption from gaseous mixtures by MEA in packed beds. Chemical Engineering Research and Design 86 (2008): 401–409.
- Haghtalab, A. and Shojaeian, A. Modeling solubility of acid gases in alkanolamines using the nonelectrolyte Wilson-nonrandom factor model. Fluid Phase Equilibria 289 (2010): 6–14.
- Iliuta, M. C., and Larachi, F. Solubility of total reduced sulfurs (hydrogen sulfide, methyl mercaptan, dimethyl sulfide, and dimethyl disulfide) in Liquids. J. Chem. Eng. 52 (2007): 2-19.
- Jou, F. Y., Mather, A. E., and Ng, H. J. Effect of CO₂ and H₂S on the solubility of methanethiol in an aqueous methyldiethanolamine solution. Fluid Phase Equilibria 158–160 (1999): 933–938.
- Khakdaman, H. R., Zoghi, A. T., Abedinzadegan, M., and Ghadirian, H. A. Revamping of gas refineries using amine blends. IUST International Journal of Engineering Science (2008): 27-32.
- Lu, J. G., Zheng, Y. F., and He, D. L. Selective absorption of H₂S from gas mixtures into aqueous solutions of blended amines of methyldiethanolamine and 2-tertiarybutylamino-2-ethoxyethanol in a packed column. Separation and

Purification Technology 52 (2006): 209–217.

McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P. Unit operations of chemical engineering.

6th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

Nasrifar, K., and Tafazzol, A. H. Vapor-liquid equilibria of acid gas-aqueous

ethanolamine solutions using the PC-SAFT equation of state. Ind. Eng. Chem.

Res. 49 (2010): 7620–7630.

Nevers, N. D. Air pollution control engineering. New York: McGraw-Hill, 1995.

Nordenkamp, B. M., Friedl, A., Koss, U., and Tork, T. Modelling selective H₂S

absorption and desorption in an aqueous MDEA-solution using a rate-based

non-equilibrium approach. Chemical Engineering and Processing 43 (2004):

701–715.

Nuttawee lam-amphai. Energy consumption improvement for natural gas treatment

by blended monoethanolamine/methy-diethanolamine (MEA/MDEA). Master's

Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University, 2008.

Perry, R. H., and Green, D. W. Perry's chemical engineers' handbook. 8th ed. New York:

McGraw-Hill, 2008.

Sohbi, B., Meakaff, M., Emtir, M., and Elgarni, M. The using of mixing amines in an

industrial gas sweetening plant. Engineering and Technology 31 (2007).

Tantrakarnapa, K. The study of the relationship between odorant concentration and odor

intensity. Environment and Natural Resources Journal (2007): 101-108.

Tippayawong, N., and Thanompongchart, P. Biogas quality upgrade by simultaneous

removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. Energy (2010): 1-5.

Zare, A. H., and Mirzaei, S. Removal of CO₂ and H₂S using aqueous alkanolamine

solutions. International Journal of Chemical and Biological Engineering 2 (2009).



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการจำลองและค่าประสิทธิภาพในการกำจัดของหัวข้อ 5.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวแปรที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนน้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ก๊าซเสียขาเข้า (Feed gas)			สารอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Alkanolamine to absorber)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	เปลี่ยนค่า	STDm ³ /h
อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h	อัตราการไหลเชิงโมล	เปลี่ยนค่า	kmol/h
อัตราการไหลเชิงมวล, G*	3,435	kg/h	อัตราการไหลเชิงมวล, L*	34,350	kg/h
อุณหภูมิ	35	°C	อุณหภูมิ	40	°C
ความดัน	104.3	kPa	ความดัน	104.3	kPa
สัดส่วนโมล			สัดส่วนน้ำหนัก		
CH ₄	0.550		DEA, MEAหรือ MDEA	ตัวแปรปรับ	
CO ₂	0.300		H ₂ O	เปลี่ยนค่า	
H ₂ S	0.003				
CH ₃ SH	0.003				
N ₂	0.124				
O ₂	0.020				
ก๊าซเสียเข้า absorber (Gas to absorber)			ระบบหอดูดซึม (Absorber column)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	จำนวนชั้น	10	Stage
ความดัน	105.3	kPa	เทียบเท่าขนาด absorber	Ø 0.9144	m
			ความสูง Packing	4.87	m
			ความดันลด	1.0	kPa

ตารางที่ ก.1 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH ผลจากการปรับค่าความเข้มข้นของสารละลายอัลคานอลเอมีน (ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดคำนวณจากสมการ 2.35)

สัดส่วนน้ำหนัก (w _i)	ประสิทธิภาพในการกำจัด, Removal efficiency (%)								
	L*/G*=10								
	DEA			MEA			MDEA		
	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
0.10	91.69	33.01	43.87	84.41	22.95	77.35	98.41	45.86	17.15
0.15	96.04	27.85	54.15	98.32	19.82	90.85	98.89	44.01	16.45
0.20	97.59	24.40	60.91	98.92	18.46	93.07	99.07	42.33	15.68
0.25	98.28	21.94	64.94	99.06	17.30	94.08	99.15	40.39	15.33
0.35	98.84	18.39	68.89	-	-	-	99.24	36.25	14.61
0.45	99.06	15.61	70.25	-	-	-	99.29	33.24	13.85

ตัวแปรที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ก๊าซเสียขาเข้า (Feed gas)			สารอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Alkanolamine to absorber)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	เปลี่ยนค่า	STDm ³ /h
อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h	อัตราการไหลเชิงโมล	เปลี่ยนค่า	kmol/h
อัตราการไหลเชิงมวล, G*	3,435	kg/h	อัตราการไหลเชิงมวล, L*	ตัวแปรปรับ	kg/h
อุณหภูมิ	35	°C	อุณหภูมิ	40	°C
ความดัน	104.3	kPa	ความดัน	104.3	kPa
สัดส่วนโมล			สัดส่วนน้ำหนัก		
CH ₄	0.550		DEA, MEA หรือ MDEA	0.25	
CO ₂	0.300		H ₂ O	0.75	
H ₂ S	0.003				
CH ₃ SH	0.003				
N ₂	0.124				
O ₂	0.020				
ก๊าซเสียเข้า absorber (Gas to absorber)			ระบบหอดูดซึม (Absorber column)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	จำนวนชั้น	10	Stage
ความดัน	105.1	kPa ที่ L*/G*=6, 8	เทียบเท่าขนาด absorber	∅ 0.9144	m
	105.3	kPa ที่ L*/G*=10, 12	ความสูง Packing	4.87	m
	105.6	kPa ที่ L*/G*=14	ความดันลด	0.8	kPa ที่ L*/G*=6, 8
	105.9	kPa ที่ L*/G*=16		1.0	kPa ที่ L*/G*=10, 12
				1.3	kPa ที่ L*/G*=14
				1.6	kPa ที่ L*/G*=16

ตารางที่ ก.2 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH ผลจากการปรับค่าอัตราการไหลของสารละลายอัลคานอลเอมีน

L*/G*	ประสิทธิภาพในการกำจัด, Removal efficiency (%)								
	สัดส่วนน้ำหนัก=0.25								
	DEA			MEA			MDEA		
	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
6	68.34	13.07	54.50	81.86	9.53	94.45	98.41	25.21	14.62
8	95.19	16.12	62.28	98.14	11.33	94.12	98.93	32.67	15.01
10	98.28	21.94	64.94	99.06	17.30	94.08	99.15	40.39	15.33
12	98.90	28.55	66.33	99.26	24.24	94.27	99.28	48.17	15.62
14	99.15	35.95	67.38	99.36	32.67	94.49	99.36	56.19	15.88
16	99.28	44.19	68.27	99.42	43.18	94.71	99.42	64.28	16.12

ตัวแปรที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนโมลของ H₂S, CH₃SH และ CO₂ ของก๊าซเสียขาเข้า

กรณีศึกษาที่ 3.1 ค่อก๊าซที่ L*/G*=10

ก๊าซเสียขาเข้า (Feed gas)			สารอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Alkanolamine to absorber)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	เปลี่ยนค่า	STDm ³ /h
อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h	อัตราการไหลเชิงโมล	เปลี่ยนค่า	kmol/h
อัตราการไหลเชิงมวล, G*	เปลี่ยนค่า	kg/h	อัตราการไหลเชิงมวล, L*	เปลี่ยนค่า	kg/h
อุณหภูมิ	35	°C	อุณหภูมิ	40	°C
ความดัน	104.3	kPa	ความดัน	104.3	kPa
สัดส่วนโมล			สัดส่วนน้ำหนัก		
CH ₄	0.550		DEA, MEA หรือ MDEA	0.25	
CO ₂	0.300		H ₂ O	0.75	
H ₂ S		ตัวแปรปรับ			
CH ₃ SH		ตัวแปรปรับ			
N ₂		เปลี่ยนค่า			
O ₂	0.020				
ก๊าซเสียเข้า absorber (Gas to absorber)			ระบบหอดูดซึม (Absorber column)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	จำนวนชั้น	10	Stage
ความดัน	105.3	kPa	เทียบเท่าขนาด absorber	Ø 0.9144	m
			ความสูง Packing	4.87	m
			ความดันลด	1.0	kPa

ตารางที่ ก.3 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH ผลจากการปรับค่าปริมาณ H₂S และ CH₃SH ของก๊าซเสียขาเข้าที่ L*/G*=10

สัดส่วน โมลของ H ₂ S และ CH ₃ SH	ประสิทธิภาพในการกำจัด, Removal efficiency (%)								
	L*/G*=10, สัดส่วนน้ำหนักรวบรวม=0.25								
	DEA			MEA			MDEA		
	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
0.003	98.28	21.94	64.94	99.06	17.30	94.08	99.15	40.39	15.33
0.012	98.25	21.87	65.00	99.06	17.31	94.13	99.14	39.95	15.36
0.021	98.21	21.83	65.04	99.06	17.33	94.17	99.13	39.55	15.38
0.030	98.17	21.78	65.09	99.06	17.35	94.22	99.12	39.18	15.40

ก๊าซเสียขาเข้า (Feed gas)			สารอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Alkanolamine to absorber)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	เปลี่ยนค่า	STDm ³ /h
อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h	อัตราการไหลเชิงโมล	เปลี่ยนค่า	kmol/h
อัตราการไหลเชิงมวล, G*	เปลี่ยนค่า	kg/h	อัตราการไหลเชิงมวล, L*	เปลี่ยนค่า	kg/h
อุณหภูมิ	35	°C	อุณหภูมิ	40	°C
ความดัน	104.3	kPa	ความดัน	104.3	kPa
สัดส่วนโมล			สัดส่วนน้ำหนัก		
CH ₄	0.550		DEA, MEA หรือ MDEA	0.25	
CO ₂	ตัวแปรปรับ		H ₂ O	0.75	
H ₂ S	0.003				
CH ₃ SH	0.003				
N ₂	เปลี่ยนค่า				
O ₂	0.020				
ก๊าซเสียเข้า absorber (Gas to absorber)			ระบบหอดูดซึม (Absorber column)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	จำนวนชั้น	10	Stage
ความดัน	105.3	kPa	เทียบเท่าขนาด absorber	∅ 0.9144	m
			ความสูง Packing	4.87	m
			ความดันลด	1.0	kPa

ตารางที่ ก.4 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH ผลจากการปรับค่าปริมาณ CO₂ ของก๊าซเสียขาเข้าที่ L*/G*=10

สัดส่วน โมลของ CO ₂	ประสิทธิภาพในการกำจัด, Removal efficiency (%)								
	L*/G*=10, สัดส่วนน้ำหนัก=0.25								
	DEA			MEA			MDEA		
	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
0.300	98.28	21.94	64.94	99.06	17.30	94.08	99.15	40.39	15.33
0.350	97.87	21.06	64.55	98.94	16.20	94.18	99.15	40.39	15.43
0.400	97.30	20.44	63.88	98.77	15.30	94.23	99.14	40.40	15.52

กรณีศึกษาที่ 3.2 คีแกซที่ $L^*=34,350$ kg/h

ก๊าซเสียขาเข้า (Feed gas)			สารอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Alkanolamine to absorber)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	33.66, 34.26	STDm ³ /h
อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h	ของ DEA, MEA และ MDEA	และ 34.07	
อัตราการไหลเชิงมวล, G*	เปลี่ยนค่า	kg/h	อัตราการไหลเชิงโมล	1512, 1571	kmol/h
อุณหภูมิ	35	°C	ของ DEA, MEA และ MDEA	และ 1502	
ความดัน	104.3	kPa	อัตราการไหลเชิงมวล, L*	34,350	kg/h
สัดส่วนโมล			อุณหภูมิ	40	°C
CH ₄	0.550		ความดัน	104.3	kPa
CO ₂	0.300		สัดส่วนน้ำหนัก		
H ₂ S	ตัวแปรปรับ		DEA, MEA หรือ MDEA	0.25	
CH ₃ SH	ตัวแปรปรับ		H ₂ O	0.75	
N ₂	เปลี่ยนค่า				
O ₂	0.020				
ก๊าซเสียเข้า absorber (Gas to absorber)			ระบบหอดูดซึม (Absorber column)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	จำนวนชั้น	10	Stage
ความดัน	105.3	kPa	เทียบเท่าขนาด absorber	Ø 0.9144	m
			ความสูง Packing	4.87	m
			ความดันลด	1.0	kPa

ตารางที่ ก.5 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH ผลจากการปรับค่าปริมาณ H₂S และ CH₃SH ของก๊าซเสียขาเข้าที่ $L^*=34,350$ kg/h

สัดส่วน โมลของ H ₂ S และ CH ₃ SH	ประสิทธิภาพในการกำจัด, Removal efficiency (%)								
	$L^*=34,350$ kg/h, สัดส่วนน้ำหนักรวม=0.25								
	DEA			MEA			MDEA		
	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
0.003	98.28	21.94	64.94	99.06	17.30	94.08	99.15	40.39	15.33
0.012	98.20	21.61	64.92	99.05	17.03	94.12	99.13	39.63	15.34
0.021	98.10	21.28	64.88	99.03	16.76	94.16	99.11	38.87	15.35
0.030	97.99	20.96	64.82	99.01	16.49	94.21	99.09	38.13	15.36

ก๊าซเสียขาเข้า (Feed gas)			สารอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Alkanolamine to absorber)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	33.66, 34.26	STDm ³ /h
อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h	ของ DEA, MEA และ MDEA	และ 34.07	
อัตราการไหลเชิงมวล, G*	เปลี่ยนค่า	kg/h	อัตราการไหลเชิงโมล	1512, 1571	kmol/h
อุณหภูมิ	35	°C	ของ DEA, MEA และ MDEA	และ 1502	
ความดัน	104.3	kPa	อัตราการไหลเชิงมวล, L*	34,350	kg/h
สัดส่วนโมล			อุณหภูมิ	40	°C
CH ₄	0.550		ความดัน	104.3	kPa
CO ₂	ตัวแปรปรับ		สัดส่วนน้ำหนัก		
H ₂ S	0.003		DEA, MEA หรือ MDEA	0.25	
CH ₃ SH	0.003		H ₂ O	0.75	
N ₂	เปลี่ยนค่า				
O ₂	0.020				
ก๊าซเสียเข้า absorber (Gas to absorber)			ระบบหอดูดซึม (Absorber column)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	จำนวนชั้น	10	Stage
ความดัน	105.3	kPa	เทียบเท่าขนาด absorber	∅ 0.9144	m
			ความสูง Packing	4.87	m
			ความดันลด	1.0	kPa

ตารางที่ ก.6 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH ผลจากการปรับค่าปริมาณ CO₂ ของก๊าซเสียขาเข้าที่ L*=34,350 kg/h

สัดส่วนโมลของ CO ₂	ประสิทธิภาพในการกำจัด, Removal efficiency (%)								
	L*=34,350 kg/h, สัดส่วนน้ำหนักรวม=0.25								
	DEA			MEA			MDEA		
	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
0.300	98.28	21.94	64.94	99.06	17.30	94.08	99.15	40.39	15.33
0.350	97.59	20.19	64.18	98.86	15.28	94.16	99.12	39.17	15.38
0.400	96.29	18.84	62.79	98.44	13.54	94.17	99.08	38.07	15.43

ตัวแปรที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้า

ก๊าซเสียขาเข้า (Feed gas)			สารอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Alkanolamine to absorber)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	33.66, 34.26	STDm ³ /h
อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h	ของ DEA, MEA และ MDEA	และ 34.07	
อัตราการไหลเชิงมวล, G*	3,435	kg/h	อัตราการไหลเชิงโมล	1512, 1571	kmol/h
อุณหภูมิ	ตัวแปรปรับ °C		ของ DEA, MEA และ MDEA	และ 1502	
ความดัน	104.3	kPa	อัตราการไหลเชิงมวล, L*	34,350	kg/h
สัดส่วนโมล			อุณหภูมิ	40	°C
CH ₄	0.550		ความดัน	104.3	kPa
CO ₂	0.300		สัดส่วนน้ำหนัก		
H ₂ S	0.003		DEA, MEA หรือ MDEA	0.25	
CH ₃ SH	0.003		H ₂ O	0.75	
N ₂	0.124				
O ₂	0.020				
ก๊าซเสียเข้า absorber (Gas to absorber)			ระบบหอดูดซึม (Absorber column)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	จำนวนชั้น	10	Stage
ความดัน	105.3	kPa	เทียบเท่าขนาด absorber	Ø 0.9144	m
			ความสูง Packing	4.87	m
			ความดันลด	1.0	kPa

ตารางที่ ก.7 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH ผลจากการปรับค่าอุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้า


อุณหภูมิ ก๊าซเสีย ขาเข้า (°C)	ประสิทธิภาพในการกำจัด, Removal efficiency (%)								
	L*/G*=10, สัดส่วนน้ำหนัก=0.25								
	DEA			MEA			MDEA		
	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
35	98.28	21.94	64.94	99.06	17.30	94.08	99.15	40.39	15.33
45	98.27	21.65	64.97	99.06	17.09	94.09	99.15	39.68	15.34
55	98.26	21.35	64.98	99.05	16.88	94.10	99.15	38.99	15.34

ตัวแปรที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้า

ก๊าซเสียขาเข้า (Feed gas)			สารอัลคานอลเอมีนขาเข้า (Alkanolamine to absorber)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	33.66, 34.26	STDm ³ /h
อัตราการไหลเชิงโมล	130.2	kmol/h	ของ DEA, MEA และ MDEA	และ 34.07	
อัตราการไหลเชิงมวล, G*	3,435	kg/h	อัตราการไหลเชิงโมล	1512, 1571	kmol/h
อุณหภูมิ	35	°C	ของ DEA, MEA และ MDEA	และ 1502	
ความดัน	104.3	kPa	อัตราการไหลเชิงมวล, L*	34,350	kg/h
สัดส่วนโมล			อุณหภูมิ	ตัวแปรปรับ °C	
CH ₄	0.550		ความดัน	104.3	kPa
CO ₂	0.300		สัดส่วนน้ำหนัก		
H ₂ S	0.003		DEA, MEA หรือ MDEA	0.25	
CH ₃ SH	0.003		H ₂ O	0.75	
N ₂	0.124				
O ₂	0.020				
ก๊าซเสียเข้า absorber (Gas to absorber)			ระบบหอดูดซึม (Absorber column)		
อัตราการไหลเชิงปริมาตร	3,078	STDm ³ /h	จำนวนชั้น	10	Stage
ความดัน	105.3	kPa	เทียบเท่าขนาด absorber	Ø 0.9144	m
			ความสูง Packing	4.87	m
			ความดันลด	1.0	kPa

ตารางที่ ก.8 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ H₂S และ CH₃SH ผลจากการปรับค่าอุณหภูมิของสารละลายอัลคานอลเอมีนขาเข้า

อุณหภูมิ สารละลาย ขาเข้า (°C)	ประสิทธิภาพในการกำจัด, Removal efficiency (%)								
	L*/G*=10, สัดส่วนน้ำหนัก=0.25								
	DEA			MEA			MDEA		
	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂	H ₂ S	CH ₃ SH	CO ₂
30	99.01	38.28	58.02	99.22	28.01	91.91	99.28	91.52	14.73
40	98.28	21.94	64.94	99.06	17.30	94.08	99.15	40.39	15.33
50	93.76	15.47	68.63	98.61	12.35	95.80	98.91	25.93	16.26
60	85.21	14.54	68.36	97.86	11.39	97.05	98.38	19.64	17.43



ภาคผนวก ข

ข้อมูลและผลการคำนวณค่าความดันลดของหัวข้อ 5.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนน้ำหนักของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ตัวแปร	หน่วย	กรณีศึกษาตัวแปรที่ 1 ($L^*/G^*=10$)					
		DEA		MEA		MDEA	
		w_t		w_t		w_t	
		0.45	0.10	0.25	0.10	0.45	0.10
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/h ที่ STD	3078	3078	3078	3078	3078	3078
ขนาด absorber	m	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
ความเร็วก๊าซที่หน้าตัด, U_s	m/s	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	ft/s	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27
ความหนาแน่นของก๊าซ, ρ_G	kg/m^3 ที่ STD	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
ความหนาแน่นของสารละลาย, ρ_L	kg/m^3 ที่ STD	1039	1007	1003	1000	1016	1002
Packing factor, F_p (จากตารางที่ 2.6)	m^{-1}	89	89	89	89	89	89
	ft^{-1}	27	27	27	27	27	27
ความหนืดของสารละลาย, ν	cS	4.26	0.83	1.14	0.78	3.85	0.89
ความเร็วเชิงมวลของก๊าซ, G	kg/h	3435	3435	3435	3435	3435	3435
	$kg/(m^2 \cdot h)$	5231	5231	5231	5231	5231	5231
ความเร็วเชิงมวลของสารละลาย, L	kg/h	34350	34350	34350	34350	34350	34350
	$kg/(m^2 \cdot h)$	52308	52308	52308	52308	52308	52308
F_{LG} (จากสมการ 2.33)		0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
CP (จากสมการ 2.32)		0.78	0.73	0.75	0.73	0.79	0.74
ความสูงของ packing	m	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	ft	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97
ความดันลด (อ่านจากรูปที่ 2.13)	inH ₂ O/ft	0.25	0.23	0.24	0.23	0.25	0.23
	Pa	998	918	958	918	998	918
	Pa	~1000					

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ตัวแปร	หน่วย	กรณีศึกษาตัวแปรที่ 2 ($w_1 = 0.25$)					
		DEA					
		L*/G*					
		6	8	10	12	14	16
อัตราการไหลของก๊าซ	m ³ /h ที่ STD	3078	3078	3078	3078	3078	3078
ขนาด absorber	m	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
ความเร็วก๊าซที่หน้าตัด, U_s	m/s	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	ft/s	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27
ความหนาแน่นของก๊าซ, ρ_G	kg/m ³ ที่ STD	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
ความหนาแน่นของสารละลาย, ρ_L	kg/m ³ ที่ STD	1021	1021	1021	1021	1021	1021
Packing factor, F_p (จากตารางที่ 2.6)	m ⁻¹	89	89	89	89	89	89
	ft ⁻¹	27	27	27	27	27	27
ความหนืดของสารละลาย, ν	cS	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
ความเร็วเชิงมวลของก๊าซ, G	kg/h	3435	3435	3435	3435	3435	3435
	kg/(m ² .h)	5231	5231	5231	5231	5231	5231
ความเร็วเชิงมวลของสารละลาย, L	kg/h	20610	27480	34350	41220	48090	54960
	kg/(m ² .h)	31385	41846	52308	62769	73231	83692
F_{LG} (จากสมการ 2.33)		0.20	0.26	0.33	0.40	0.46	0.53
CP (จากสมการ 2.32)		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
ความสูงของ packing	m	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	ft	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97
ความดันลด (อ่านจากรูปที่ 2.13)	inH ₂ O/ft	0.18	0.19	0.24	0.25	0.32	0.38
	Pa	719	759	958	998	1278	1517
	Pa	~800		~1000		~1300	~1600

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลคำนวณค่าความดันตก (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ตัวแปร	หน่วย	กรณีศึกษาตัวแปรที่ 2 ($w_1 = 0.25$)					
		MEA					
		L^*/G^*					
		6	8	10	12	14	16
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/h ที่ STD	3078	3078	3078	3078	3078	3078
ขนาด absorber	m	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
ความเร็วก๊าซที่หน้าตัด, U_s	m/s	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	ft/s	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27
ความหนาแน่นของก๊าซ, ρ_G	kg/m^3 ที่ STD	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
ความหนาแน่นของสารละลาย, ρ_L	kg/m^3 ที่ STD	1003	1003	1003	1003	1003	1003
Packing factor, F_p (จากตารางที่ 2.6)	m^{-1}	89	89	89	89	89	89
	ft^{-1}	27	27	27	27	27	27
ความหนืดของสารละลาย, ν	cS	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
ความเร็วเชิงมวลของก๊าซ, G	kg/h	3435	3435	3435	3435	3435	3435
	$kg/(m^2 \cdot h)$	5231	5231	5231	5231	5231	5231
ความเร็วเชิงมวลของสารละลาย, L	kg/h	20610	27480	34350	41220	48090	54960
	$kg/(m^2 \cdot h)$	31385	41846	52308	62769	73231	83692
F_{LG} (จากสมการ 2.33)		0.20	0.27	0.33	0.40	0.47	0.53
CP (จากสมการ 2.32)		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
ความสูงของ packing	m	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	ft	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97
ความดันตก (อ่านจากรูปที่ 2.13)	inH ₂ O/ft	0.18	0.19	0.24	0.25	0.32	0.38
	Pa	719	759	958	998	1278	1517
	Pa	~800		~1000		~1300	~1600

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายอัลคานอลเอมีน

ตัวแปร	หน่วย	กรณีศึกษาตัวแปรที่ 2 ($w_1 = 0.25$)					
		MDEA					
		L^*/G^*					
		6	8	10	12	14	16
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/h ที่ STD	3078	3078	3078	3078	3078	3078
ขนาด absorber	m	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
ความเร็วก๊าซที่หน้าตัด, U_s	m/s	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	ft/s	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27
ความหนาแน่นของก๊าซ, ρ_G	kg/m^3 ที่ STD	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
ความหนาแน่นของสารละลาย, ρ_L	kg/m^3 ที่ STD	1008	1008	1008	1008	1008	1008
Packing factor, F_p (จากตารางที่ 2.6)	m^{-1}	89	89	89	89	89	89
	ft^{-1}	27	27	27	27	27	27
ความหนืดของสารละลาย, ν	cS	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
ความเร็วเชิงมวลของก๊าซ, G	kg/h	3435	3435	3435	3435	3435	3435
	$kg/(m^2 \cdot h)$	5231	5231	5231	5231	5231	5231
ความเร็วเชิงมวลของสารละลาย, L	kg/h	20610	27480	34350	41220	48090	54960
	$kg/(m^2 \cdot h)$	31385	41846	52308	62769	73231	83692
F_{LG} (จากสมการ 2.33)		0.20	0.27	0.33	0.40	0.47	0.53
CP (จากสมการ 2.32)		0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
ความสูงของ packing	m	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	ft	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97
ความดันลด (อ่านจากรูปที่ 2.13)	inH ₂ O/ft	0.18	0.19	0.24	0.25	0.32	0.38
	Pa	719	759	958	998	1278	1517
	Pa	~800		~1000		~1300	~1600

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมลของ H_2S , CH_3SH และ CO_2 ของก๊าซเสียขาเข้า

ตัวแปร	หน่วย	กรณีศึกษาตัวแปรที่ 3 ($L^*/G^*=10$, $w_t=0.25$, $CO_2=0.3$)					
		DEA		MEA		MDEA	
		สัดส่วนโมล H_2S , CH_3SH					
		0.003	0.030	0.003	0.030	0.003	0.030
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/h ที่ STD	3078	3078	3078	3078	3078	3078
ขนาด absorber	m	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
ความเร็วก๊าซที่หน้าตัด, U_s	m/s	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	ft/s	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27
ความหนาแน่นของก๊าซ, ρ_G	kg/m^3 ที่ STD	1.12	1.15	1.12	1.15	1.12	1.15
ความหนาแน่นของสารละลาย, ρ_L	kg/m^3 ที่ STD	1021	1021	1003	1003	1008	1008
Packing factor, F_p (จากตารางที่ 2.6)	m^{-1}	89	89	89	89	89	89
	ft^{-1}	27	27	27	27	27	27
ความหนืดของสารละลาย, ν	cS	1.38	1.38	1.14	1.14	1.56	1.56
ความเร็วเชิงมวลของก๊าซ, G	kg/h	3435	3527	3435	3527	3435	3527
	$kg/(m^2 \cdot h)$	5231	5371	5231	5371	5231	5371
ความเร็วเชิงมวลของสารละลาย, L	kg/h	34350	35270	34350	35270	34350	35270
	$kg/(m^2 \cdot h)$	52308	53709	52308	53709	52308	53709
F_{LG} (จากสมการ 2.33)		0.33	0.34	0.33	0.34	0.33	0.34
CP (จากสมการ 2.32)		0.75	0.76	0.75	0.76	0.76	0.77
ความสูงของ packing	m	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	ft	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97
ความดันลด (อ่านจากรูปที่ 2.13)	inH ₂ O/ft	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25
	Pa	958	958	958	958	958	998
	Pa	~1000					

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ข้อมูลคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมลของ H_2S , CH_3SH และ CO_2 ของก๊าซเสียขาเข้า

ตัวแปร	หน่วย	กรณีศึกษาตัวแปรที่ 3 ($L^*/G^*=10$, $w_t=0.25$, H_2S และ $CH_3SH=0.03$)					
		DEA		MEA		MDEA	
		สัดส่วนโมล CO_2		สัดส่วนโมล CO_2		สัดส่วนโมล CO_2	
		0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/h ที่ STD	3078	3078	3078	3078	3078	3078
ขนาด absorber	m	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
ความเร็วก๊าซที่หน้าตัด, U_s	m/s	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	ft/s	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27
ความหนาแน่นของก๊าซ, ρ_G	kg/m^3 ที่ STD	1.12	1.18	1.12	1.18	1.12	1.18
ความหนาแน่นของสารละลาย, ρ_L	kg/m^3 ที่ STD	1021	1021	1003	1003	1008	1008
Packing factor, F_p (จากตารางที่ 2.6)	m^{-1}	89	89	89	89	89	89
	ft^{-1}	27	27	27	27	27	27
ความหนืดของสารละลาย, ν	cS	1.38	1.38	1.14	1.14	1.56	1.56
ความเร็วเชิงมวลของก๊าซ, G	kg/h	3435	3643	3435	3643	3435	3643
	$kg/(m^2 \cdot h)$	5231	5547	5231	5547	5231	5547
ความเร็วเชิงมวลของสารละลาย, L	kg/h	34350	36430	34350	36430	34350	36430
	$kg/(m^2 \cdot h)$	52308	55475	52308	55475	52308	55475
F_{LG} (จากสมการ 2.33)		0.33	0.34	0.33	0.34	0.33	0.34
CP (จากสมการ 2.32)		0.75	0.77	0.75	0.77	0.76	0.78
ความสูงของ packing	m	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	ft	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97
ความดันลด (อ่านจากรูปที่ 2.13)	inH ₂ O/ft	0.24	0.25	0.24	0.25	0.24	0.25
	Pa	958	998	958	998	958	998
	Pa	~1000					

หมายเหตุ: 1. STD คือ สภาวะที่ $15^\circ C$, 1 atm

2. ตัวแปร ρ_G , ρ_L และ ν ได้จากฐานข้อมูลคุณสมบัติจากโปรแกรม ASPEN HYSYS

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววีราภรณ์ เรืองศรี เกิดวันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2550 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2552



ศูนย์วิทยพัชการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย