



บทที่ 5

ผลการทดลอง และการวิจารณ์

5.1 ผลการเดินเครื่องมือทดลอง

5.1.1 การใช้น้ำในการทดลองเดินเครื่องมือทดลอง

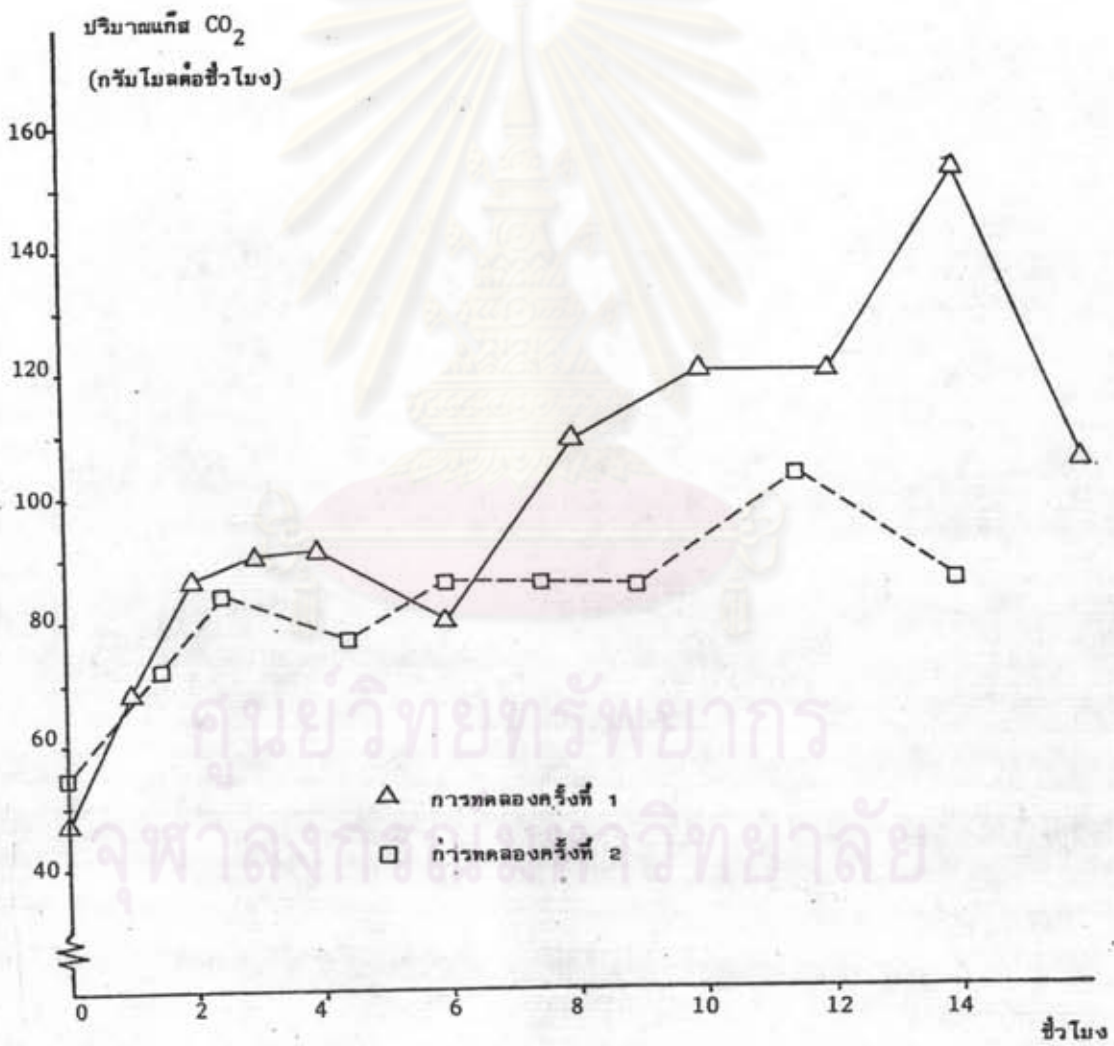
เนื่องจากเครื่องมือเป็นขนาดโรงงานต้นแบบ (Pilot Scale) จึงทำการทดลองการเดินเครื่องมือ โดยใช้น้ำในการไหลหมุนเวียน ระหว่างหอดูดซึมกับหอกลั่นแยกสาร พบว่าหม้อต้มซ้ำ (Reboiler) ของหอกลั่นแยกสารต้องใช้หลอดความร้อน (Heater) ขนาด 4500 วัตต์ (Watt) จำนวน 4 ตัว ในการให้ความร้อน จึงจะสามารถต้มน้ำให้เป็นไอไปสู่เครื่องควบแน่นได้ อุณหภูมิในหม้อต้มซ้ำจะอยู่ระหว่าง 80-100 องศาเซลเซียส การใช้หลอดความร้อนมีข้อควรระวัง คือต้องให้ของเหลวท่วมตัวหลอดความร้อนอยู่ตลอดเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้หลอดความร้อนขาด เนื่องจากระบายความร้อนไม่ทัน และเลือกใช้หลอดความร้อนที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายโมโนเอธาโนลามีน (MEA)

5.1.2 ปัญหาการกัดกร่อนของเครื่องมือ

เมื่อใช้สารละลายเอ็มอีเอ ในการไหลหมุนเวียน พบปัญหาการกัดกร่อน โดยจะมีการกัดกร่อนมากกับโลหะพวกทองแดง และทองเหลือง จึงทำการแก้ไขโดยเปลี่ยนชิ้นส่วนต่าง ๆ ในระบบที่ทำด้วยทองแดง หรือทองเหลือง ให้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม หรือเป็นอะลูมิเนียม (Aluminium) เช่น วาล์ว (Valve) ทองเหลืองเปลี่ยนเป็นวาล์วเหล็กกล้าไร้สนิม, ท่อทองแดงที่ใช้เป็นปลอกหุ้มเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เปลี่ยนเป็นท่อเหล็กกล้าไร้สนิม, ชุดท่อทองแดงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เปลี่ยนเป็นอะลูมิเนียม ฯลฯ จากประสบการณ์พบว่า การปฏิบัติงานสามารถช่วยลดการกัดกร่อนได้ เช่น อุณหภูมิของสารละลายในหม้อต้มซ้ำ และอุณหภูมิของไอควรรักษาให้ต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และใช้สารละลายที่สะอาดไม่มีโลหะแขวนลอย

5.1.3 ผลการทำงานของเตาผลิตแก๊สสังเคราะห์

เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาผลิตแก๊สสังเคราะห์คือ ซีลี้อยผสมถ่าน ในอัตราส่วน 2:1 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้จะไม่คงที่ตลอด ดังแสดงในกราฟรูป 5.1.1



รูปที่ 5.1.1 แสดงปริมาณแก๊ส CO₂ ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สสังเคราะห์เมื่อเวลาผ่านไป

จะเห็นได้ว่าในช่วงชั่วโมงแรกๆ หลังจากจุดเตาผลิตแก๊สสังเคราะห์แล้ว ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ในแก๊สสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนได้ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ประมาณ 6-7 เปอร์เซ็นต์ จึงเริ่มปล่อยแก๊สเข้าสู่หอดูดซึม พบว่ามีช่วงเวลาที่ปริมาณแก๊ส CO_2 มีค่าคงที่ และไม่คงที่ จึงได้เลือกพิจารณาในช่วงชั่วโมงที่ 3-4, 4-6 และ 10-12 ของการทดลองครั้งที่ 1 และช่วงชั่วโมงที่ 6-9 ของการทดลองครั้งที่ 2

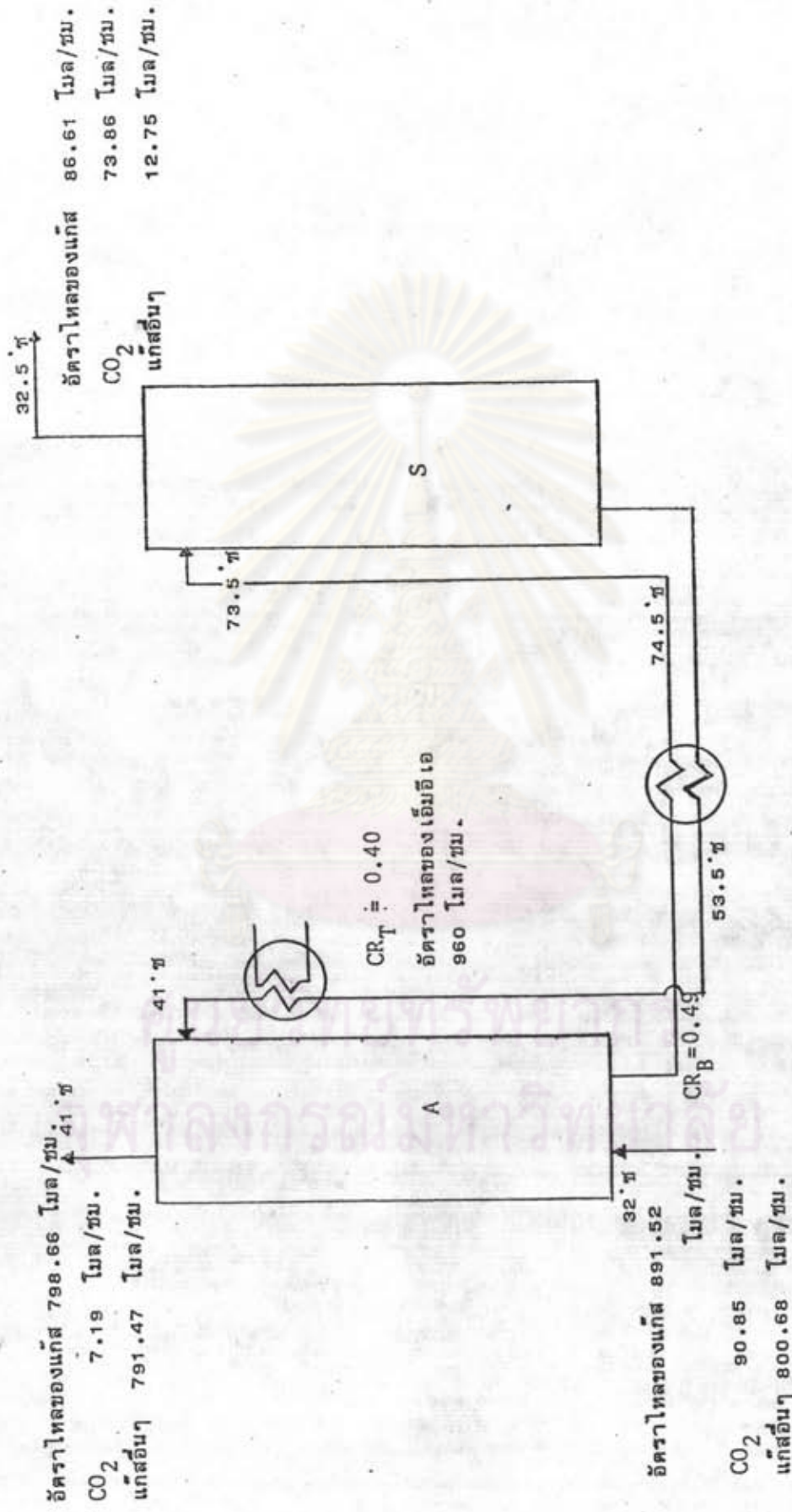
5.2 ผลการทดลอง

การทดลองครั้งที่ 1

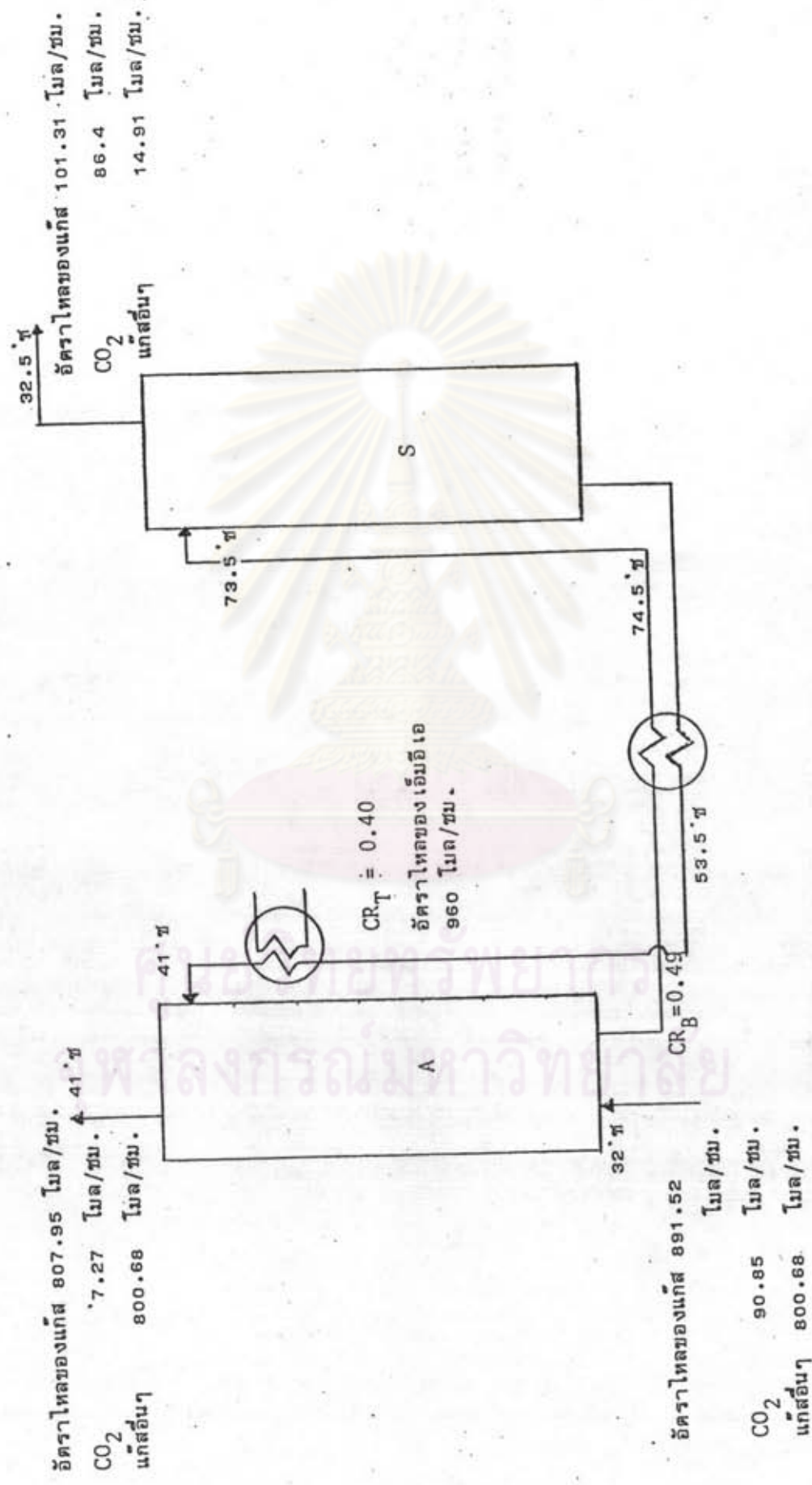
ความดันรวม (P_T)	1	บาร์
อัตราการไหลของแก๊ส (G_V)	0.211	กก./วินาที/ตารางเมตร
อัตราการไหลของสารละลาย (G_L)	4.016	กก./วินาที/ตารางเมตร
ค่าอัตราส่วนการจับ CO_2 ของเอ็มอีเอ ที่ยอดหอ (CR_T)	0.375-0.411	
ค่าอัตราส่วนการจับ CO_2 ของเอ็มอีเอ ที่ก้นหอ (CR_B)	0.475-0.495	
ความเข้มข้นของสารละลายเอ็มอีเอ	2	โมล/ลิตร
อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า	31-34	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของแก๊สขาออก	40-43	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในหอดูดซึม	39-42	องศาเซลเซียส
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอดูดซึม	0.205	เมตร
พื้นที่หน้าตัดของหอดูดซึม (A)	0.033	ตารางเมตร
ช่วงที่บรรจุแพคกิง (Packing) มี	6	ชั้น
แพคกิงเป็นอะลูมิเนียมแบบวงแหวนแรชชิ่ง (Rashing Ring)		
ขนาดมาตรฐาน	1/2	นิ้ว
เรซิเดนซ์ไทม์ (Residence Time) ของหอดูดซึมอยู่ในช่วง	3.08-10.67	นาที
ดีเลย์ไทม์ (Delay Time) ของหอดูดซึมประมาณ	3.08	นาที

การทดลองครั้งที่ 2		
ความดันรวม (P_T)	1	บาร์
อัตราการไหลของแก๊ส (G_V)	0.191	กก./วินาที/ตารางเมตร
อัตราการไหลของสารละลาย (G_L)	4.016	กก./วินาที/ตารางเมตร
ค่าอัตราส่วนการจับ CO_2 ของเอ็มอีเอ ที่ยอดหอ (CR_T)	0.401	
ค่าอัตราส่วนการจับ CO_2 ของเอ็มอีเอ ที่ก้นหอ (CR_B)	0.481	
ความเข้มข้นของสารละลายเอ็มอีเอ	2	โมล/ลิตร
อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า	29-32	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของแก๊สขาออก	38-40	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในหอคูดซิม	40-43	องศาเซลเซียส
เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหอคูดซิม	0.205	เมตร
พื้นที่หน้าตัดของหอคูดซิม (A)	0.033	ตารางเมตร
ช่วงที่บรรจุแพคกิง (Packing) มี	6	ชั้น
แพคกิงเป็นอะลูมิเนียมแบบวงแหวนแรชชิ่ง (Rashing Ring)		
ขนาดมาตรฐาน	1/2	นิ้ว
เรซิเดนซ์ไทม์ (Residence Time)		
ของหอคูดซิมอยู่ในช่วง	3.08-10.67	นาที
ดีเลย์ไทม์ (Delay Time)		
ของหอคูดซิมประมาณ	3.08	นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2.1 แสดงตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4



รูปที่ 5.2.2 แสดงตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4 หลังจากทำมวลสารสมดุล

ตารางที่ 5.2.1 แสดงองค์ประกอบของแก๊สขาเข้า และขาออกจากหอดูดซึม

การทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

แก๊ส	ขาเข้า		ขาออก	
	%	โมล/ชั่วโมง	%	โมล/ชั่วโมง
CO ₂	10.20	90.85	0.9	7.27
H ₂	3.68	32.81	3.80	30.70
O ₂	6.75	60.18	7.16	57.85
N ₂	66.71	594.73	75.76	612.10
CO	4.14	36.91	4.91	39.67
H ₂ O	8.51	75.87	7.46	60.27

การทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

แก๊ส	ขาเข้า		ขาออก	
	%	โมล/ชั่วโมง	%	โมล/ชั่วโมง
CO ₂	9.58	85.41	1.92	15.78
H ₂	4.58	40.83	2.73	22.44
O ₂	12.20	108.77	10.45	85.88
N ₂	53.95	480.98	65.09	534.94
CO	13.49	120.27	12.44	102.24
H ₂ O	6.20	55.27	7.37	60.57

การทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

แก๊ส	ขาเข้า		ขาออก	
	%	โมล/ชั่วโมง	%	โมล/ชั่วโมง
CO ₂	13.5	120.36	3.50	27.95
H ₂	4.75	42.35	6.06	48.40
O ₂	3.44	30.67	4.70	37.54
N ₂	68.35	609.35	73.69	588.53
CO	5.46	48.68	6.78	54.15
H ₂ O	4.49	40.03	5.27	42.09

การทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

แก๊ส	ขาเข้า		ขาออก	
	%	โมล/ชั่วโมง	%	โมล/ชั่วโมง
CO ₂	10.77	85.87	2.45	17.87
H ₂	4.62	36.84	4.39	32.02
O ₂	12.16	96.95	16.25	118.53
N ₂	58.72	468.19	63.05	459.89
CO	8.60	68.57	7.85	57.26
H ₂ O	5.14	40.98	6.01	43.84

ตารางที่ 5.2.2 แสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ
ตามความสูงของหอคูดูดซึม

การทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ตำแหน่ง	Z ^m (เซนติเมตร)	P _A (บาร์)	%
CM 108	0	0.102	10.2
CM 107	60.0	0.093	9.25
CM 106	127.5	0.078	7.81
CM 105	195.0	0.052	5.18
CM 104	262.5	0.039	3.90
CM 103	330.0	0.019	1.88
CM 102	405.0	0.009	0.90

การทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

ตำแหน่ง	Z ^m (เซนติเมตร)	P _A (บาร์)	%
CM 108	0	0.096	9.58
CM 107	60.0	0.087	8.65
CM 106	127.5	0.074	7.40
CM 105	195.0	0.051	5.05
CM 104	262.5	0.034	3.43
CM 103	330.0	0.028	2.75
CM 102	405.0	0.019	1.92

z = ความสูงของหอคูดูดซึมส่วนที่บรรจุแพคกิ้ง

การทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

ตำแหน่ง	Z^* (เซนติเมตร)	P_A (บาร์)	%
CM 108	0	0.135	13.5
CM 107	60.0	0.125	12.5
CM 106	127.5	0.110	11.0
CM 105	195.0	0.076	7.6
CM 104	262.5	0.048	4.8
CM 103	330.0	0.038	3.8
CM 102	405.0	0.035	3.5

การทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

ตำแหน่ง	Z^* (เซนติเมตร)	P_A (บาร์)	%
CM 108	0	0.108	10.77
CM 107	60.0	0.091	9.05
CM 106	127.5	0.068	6.75
CM 105	195.0	0.052	5.16
CM 104	262.5	0.039	3.90
CM 103	330.0	0.030	3.00
CM 102	405.0	0.025	2.45

* Z = ความสูงของหลอดชิมส่วนที่บรรจุแนคกิง



ตารางที่ 5.2.3 แสดงอุณหภูมิของสารละลาย เอ็มอีเอ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความสูงของหอคอยชิม

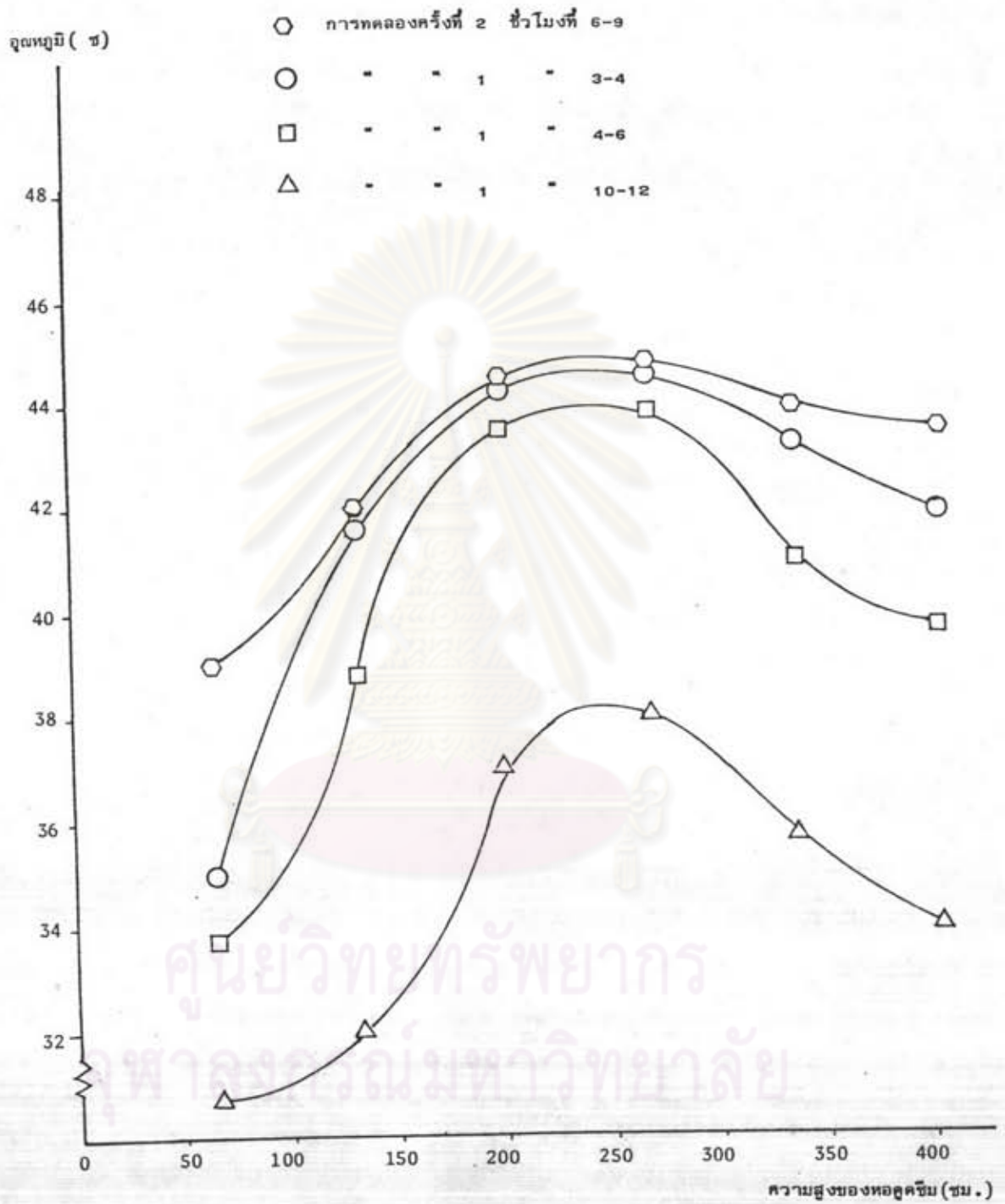
การทดลองครั้งที่ 1

ตำแหน่ง	Z ^m (ซม)	อุณหภูมิ (°ซ)		
		ซ.ม.ที่ 3-4	ซ.ม.ที่ 4-6	ซ.ม.ที่ 10-12
TM 113	67.5	35.0	33.7	30.7
TM 112	135.0	41.6	38.8	32.02
TM 111	202.5	44.2	43.5	37.0
TM 110	270.0	44.5	43.8	38.0
TM 109	337.5	43.2	41.0	35.7
TM 108	405.0	41.9	39.7	34.0

การทดลองครั้งที่ 2 (ชั่วโมงที่ 6-9)

ตำแหน่ง	Z ^m (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ (°ซ)
TM 113	67.5	39.0
TM 112	135.0	42.0
TM 111	202.5	44.5
TM 110	270.0	44.8
TM 109	337.5	43.9
TM 108	405.0	43.5

Z^m = ความสูงของหอคอยชิมส่วนที่บรรจุแพคกิง



รูปที่ 5.2.3 แสดงโพรไฟล์ (Profile) ของอุณหภูมิของของเหลว ตลอดความสูงของหอคอย

จากผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 5.2.3 จะเห็นว่า อุณหภูมิของของเหลวเมื่อเข้ามาในหอคูดซิม อุณหภูมิจะสูงขึ้นจากช่วง $34-43.5^{\circ}$ ซ. ไปเป็นประมาณ $38-45.3^{\circ}$ ซ. ในช่วงกลางหอ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง เอ็มอีเอ กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิของของเหลวจึงสูงขึ้นต่อนั้นอุณหภูมิจะลดลงเนื่องจาก ของเหลวจะสัมผัสกับแก๊สที่เข้ามาทางด้านกันหอ ซึ่งเย็น มีอุณหภูมิประมาณ $32-35^{\circ}$ ซ. ทำให้อุณหภูมิจึงลดลงในช่วงกันหอ

แก๊สที่ได้จากเตาสังเคราะห์ จะมีอุณหภูมิประมาณ $150-170^{\circ}$ ซ. เมื่อผ่านสกรับเบอร์ อุณหภูมิของแก๊สจะลดเหลือประมาณ $30-35^{\circ}$ ซ. และเมื่อผ่านเข้าหอคูดซิม จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของเหลว เมื่อออกจากหอคูดซิมทางด้านบนของหอ จะมีอุณหภูมิประมาณ $40-43^{\circ}$ ซ.

5.3 การคำนวณนิรโทษ์ของความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ตามความสูงของหอคูดซิม เมื่อคิดว่าเป็นการคูดซิมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

การคำนวณความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ตามความสูงของหอจะเริ่มจากการตั้งสมมติฐานที่ง่าย คือคิดว่าเป็นการคูดซิมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี, มีอัตราไหลของแก๊สคงที่ และมีอุณหภูมิภายในหอคูดซิมคงที่ โดยให้เป็นกรณีที่ 1 แสดงผลในตารางที่ 5.3.1 จากนั้น ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และอัตราการไหลของแก๊สที่เปลี่ยนไปตลอดความสูงของหอคูดซิมว่าจะมีผลต่อการคำนวณอย่างไรบ้าง

5.3.1 ผลของอัตราไหลของแก๊สต่อการคำนวณ

โดยปกติอัตราไหลของแก๊ส จะไม่คงที่ตลอดความสูงของหอคูดซิม เนื่องจากแก๊ส CO_2 จำนวนหนึ่งในวัฏภาคแก๊สจะถ่ายเทเข้าไปในวัฏภาคของเหลว ดังนั้น สมมติฐานที่จะใช้กับ กรณีที่ 2 นี้ คือคิดว่าเป็นการคูดซิมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี และมีอุณหภูมิภายในหอคูดซิมคงที่ แสดงผลการคำนวณในตาราง 5.3.1 และรูป 5.3.1

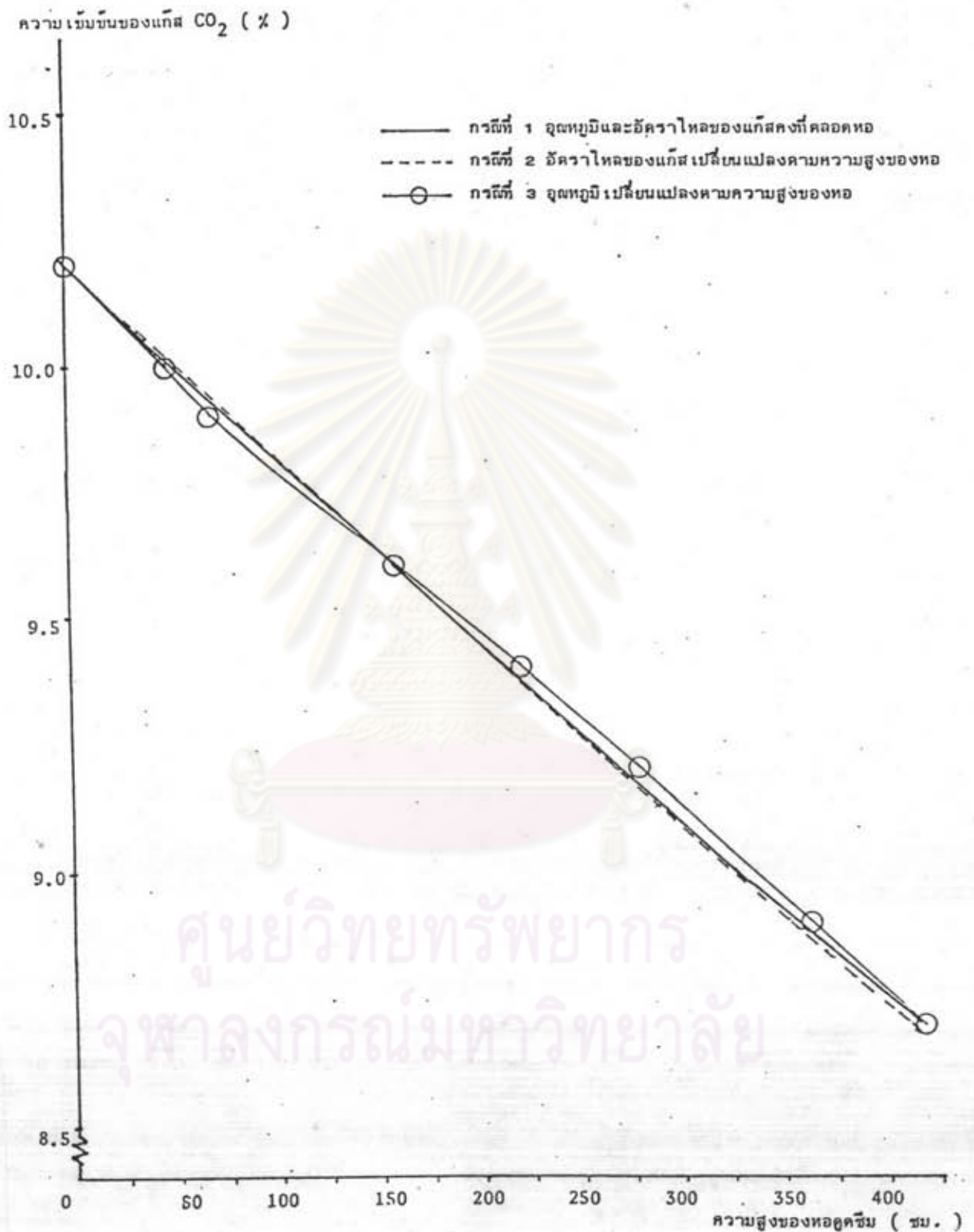
5.3.2 ผลของอุณหภูมิภายในหอดูดซึมต่อการคำนวณ

จากตารางที่ 5.2.3 ซึ่งแสดงอุณหภูมิของสารละลายเอมีนอีเอตามความสูงของหอ จะเห็นว่า อุณหภูมิเปลี่ยนไปตามความสูงของหอ ดังนั้นสมมติฐานที่จะใช้กับกรณีที่ 3 นี้ คือคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี และมีอัตราไหลของแก๊สคงที่ แสดงผลในตารางที่ 5.3.1 และรูปที่ 5.3.1

ตารางที่ 5.3.1 ตัวอย่างผลการคำนวณความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยา

การทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

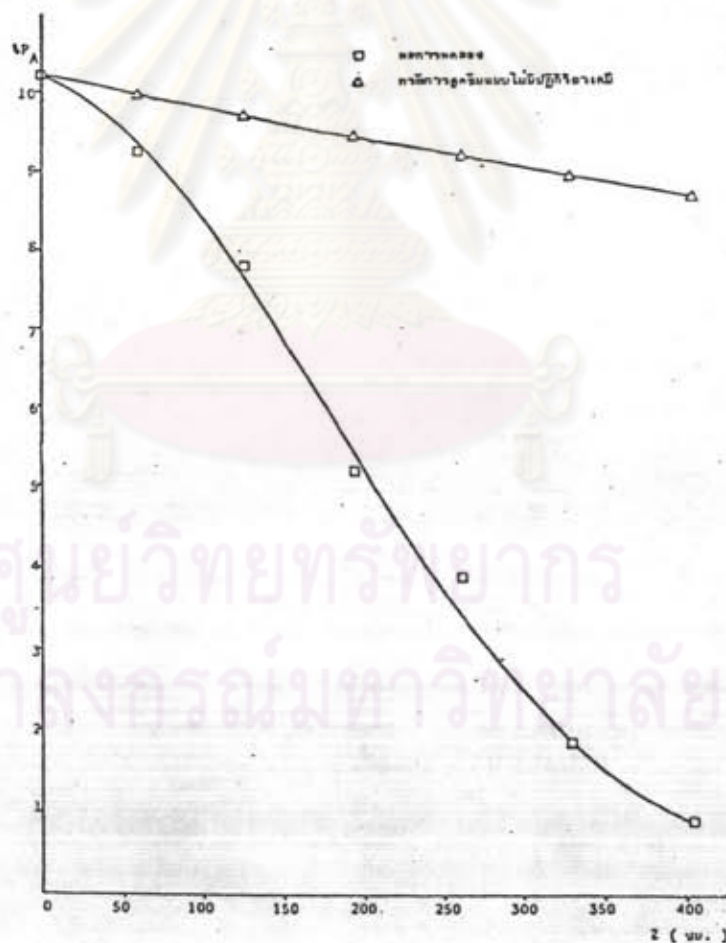
ตำแหน่ง	ความสูงของหอ (ชม.)	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)		
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
CM 108	0	10.20	10.20	10.20
CM 107	60.0	9.966	9.969	9.940
CM 106	127.0	9.711	9.713	9.700
CM 105	195.0	9.462	9.462	9.480
CM 104	262.5	9.220	9.218	9.254
CM 103	330.0	8.984	8.979	9.015
CM 102	405.0	8.729	8.720	8.744



รูปที่ 5.3.1 แสดงโพรไฟล์ของความเข้มข้นของ CO₂ ที่คำนวณได้ เมื่อคิดว่าการดูดซับเป็นแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี ของการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณทั้ง 3 กรณีแล้ว จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงของหอตำแหน่งเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น การตั้งสมมติฐานว่า อุณหภูมิคงที่ตลอดความสูงของหอ และอัตราไหลของแก๊สดังที่ตลอดความสูงของหอ ดังในกรณีที่ 1 จะไม่มีผลต่อการคำนวณมากนัก

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณความเข้มข้น CO_2 เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี กับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่ายังห่างจากผลการทดลองมาก ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 5.3.2



รูปที่ 5.3.2 โปรไฟล์ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่คำนวณได้ กับผลทดลองจริง ที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

5.4 การคำนวณโพรไฟล์ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ตามความสูงของหอคูดูดซับ เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซับแบบมีปฏิกิริยาเคมี

เมื่อการดูดซับเป็นแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นด้วย อัตราการถ่ายเทมวลสารจะมีค่าสูงขึ้น จะมีเทอมของเอนฮานซ์เมนต์แฟคเตอร์ (E) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย มีผู้เสนอแบบจำลองไว้สำหรับการคำนวณค่า E (ดูในบทที่ 2) และได้เลือกมาใช้ 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม, กรณีที่ 2 ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับไม่ได้ และ กรณีที่ 3 ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับได้

5.4.1 ผลของอุณหภูมิภายในหอคูดูดซับต่อการคำนวณ

เนื่องจากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามความสูงของหอ จึงทำการคำนวณในกรณีที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับกรณีที่คิดว่าอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงของหอ โดยเลือกแบบจำลองกรณีที่ปฏิกิริยาเป็นแบบอันดับหนึ่งเทียมมาใช้คำนวณ ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.4.1 และรูปที่ 5.4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองกรณีให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการคิดว่าอุณหภูมิภายในหอคงที่เท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ย ก็ไม่ทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนไป

5.4.2 ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

แดงค์เวอร์ท (Danckwert) (15) ได้เสนอว่า ถ้าในสภาวะที่ $\sqrt{M} < (1/2)E$ และ $\sqrt{M} > 3$ แล้ว ปฏิกิริยาจะเป็นแบบอันดับหนึ่งเทียม สามารถให้ค่า $E = \sqrt{M}$ ได้ ซึ่งช่วยให้การคำนวณง่ายขึ้น ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.4.2 ถึง 5.4.9 และรูปที่ 5.4.2 ถึง 5.4.5 จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณโพรไฟล์ความเข้มข้นของ CO₂ ยิ่งห่างจากผลการทดลอง และค่าความเข้มข้นของเอ็มอีเอในเนื้อของเหลว (C_{2,2}) ที่ออกจากหอคูดูดซับ ที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนจากผลการทดลองอยู่มาก

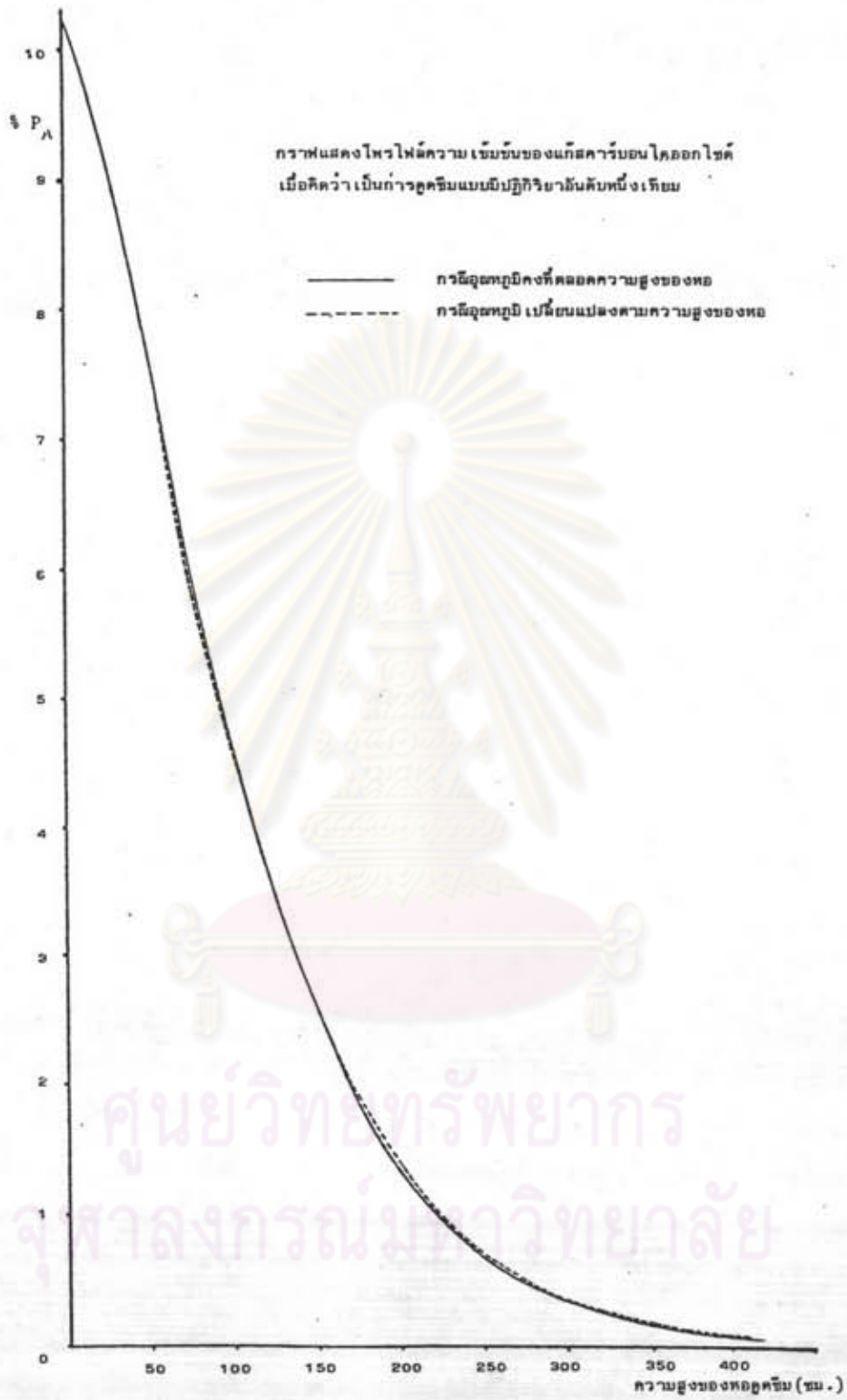
ตารางที่ 5.4.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณโพรไฟล์ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบมีปฏิริยาอันดับหนึ่งเทียม

ตำแหน่ง	ความสูงของหอ (ชม.)	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
cm 108	0	10.20	10.20
cm 107	60.0	6.95	6.88
cm 106	127.0	3.43	3.40
cm 105	195.0	1.45	1.48
cm 104	262.5	0.60	0.62
cm 103	330.0	0.24	0.25
cm 102	405.0	0.08	0.08

กรณีที่ 1 อุณหภูมิคงที่ตลอดความสูงของหอดูดซึม

กรณีที่ 2 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามความสูงของหอ





รูปที่ 5.4.1 ผลการคำนวณโพรไฟล์ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ เมื่อคิดว่าเป็นปฏิกิริยาระดับหนึ่งเทียม

5.4.3 ปฏิกริยาเป็นปฏิกริยาอันดับสองแบบผันกลับไม่ได้

การคำนวณค่า E ใช้สมการคำตอบของดีคูร์เซย์ (DeCourzey)

(9)

$$(2.2.23) \quad E = \frac{-M}{2(E_1 - 1)} + \left[\frac{M^2}{4(E_1 - 1)^2} + \frac{E_1 M}{(E_1 - 1)} + 1 \right]^{1/2}$$

โดย E_1 ได้จากสมการ (2.2.20) ของไบรอัน (Brian) และคณะ (17)

$$(2.2.20) \quad E_1 = 1 + \frac{C_{Bb}}{2C_{A1}} \sqrt{\frac{D_B}{D_A}}$$

ผลการคำนวณแสดงในตาราง 5.4.2 ถึง 5.4.9 และรูปที่ 5.4.2 ถึง 5.4.5 จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณโพรไฟล์ความเข้มข้นของ CO_2 ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น และค่าความเข้มข้นของเอมีเอไอในเนื้อของเหลวที่ออกจากหอคูดซิมที่คำนวณได้ ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม

5.4.4 ปฏิกริยาเป็นปฏิกริยาอันดับสองแบบผันกลับได้

ฮิคิตะ (Hikita) และคณะ (10) ได้ทดลองหาอัตราการดูดซิม CO_2 ในสารละลายเอมีเอไอ ที่จับ CO_2 แล้วบางส่วน (Partly Carbonated MEA) โดยมีค่าอัตราส่วนการจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbonation Ratio) เท่ากับ 0.52-0.72 พบว่า อัตราการดูดซิมสอดคล้องดีกับการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับปฏิกริยาผันกลับได้ และมีค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant) ใหญ่มาก ดังนั้น ในกรณีนี้ เราจะคำนวณค่า E จากสมการคำตอบของดีคูร์เซย์ (2.2.23) โดย E_1 ได้จากสมการ (2.2.13)

$$(2.2.13) \quad E_1 = 1 + \frac{C_{Bb}}{2C_{A1}} \frac{D_B}{D_A} \frac{1}{1 + \sqrt{C_{Ab}/C_{A1}}}$$

ผลการคำนวณ แสดงในตารางที่ 5.4.2 ถึง 5.4.9 และรูปที่ 5.4.2 ถึง 5.4.5 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณโปรไฟล์ความเข้มข้นของ CO_2 ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น และค่าความเข้มข้นของเอเอ็มอีเอในเนื้อของเหลวที่ออกจากหอดูดซึมที่คำนวณได้ ใกล้เคียงผลการทดลองมากที่สุด(ยกเว้นการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6 ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าหอดูดซึมไม่คงที่) แสดงว่าในสารละลายเอเอ็มอีเอ ที่จับ CO_2 แล้ว บางส่วน ความสำคัญของ C_{A} จะมีมากขึ้น และไม่สามารถตัดทิ้งได้ซึ่งในการทดลองนี้สารละลายเอเอ็มอีเอมีค่าอัตราส่วนการจับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.375-0.411



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4.2 ผลการคำนวณความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาเคมี เปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

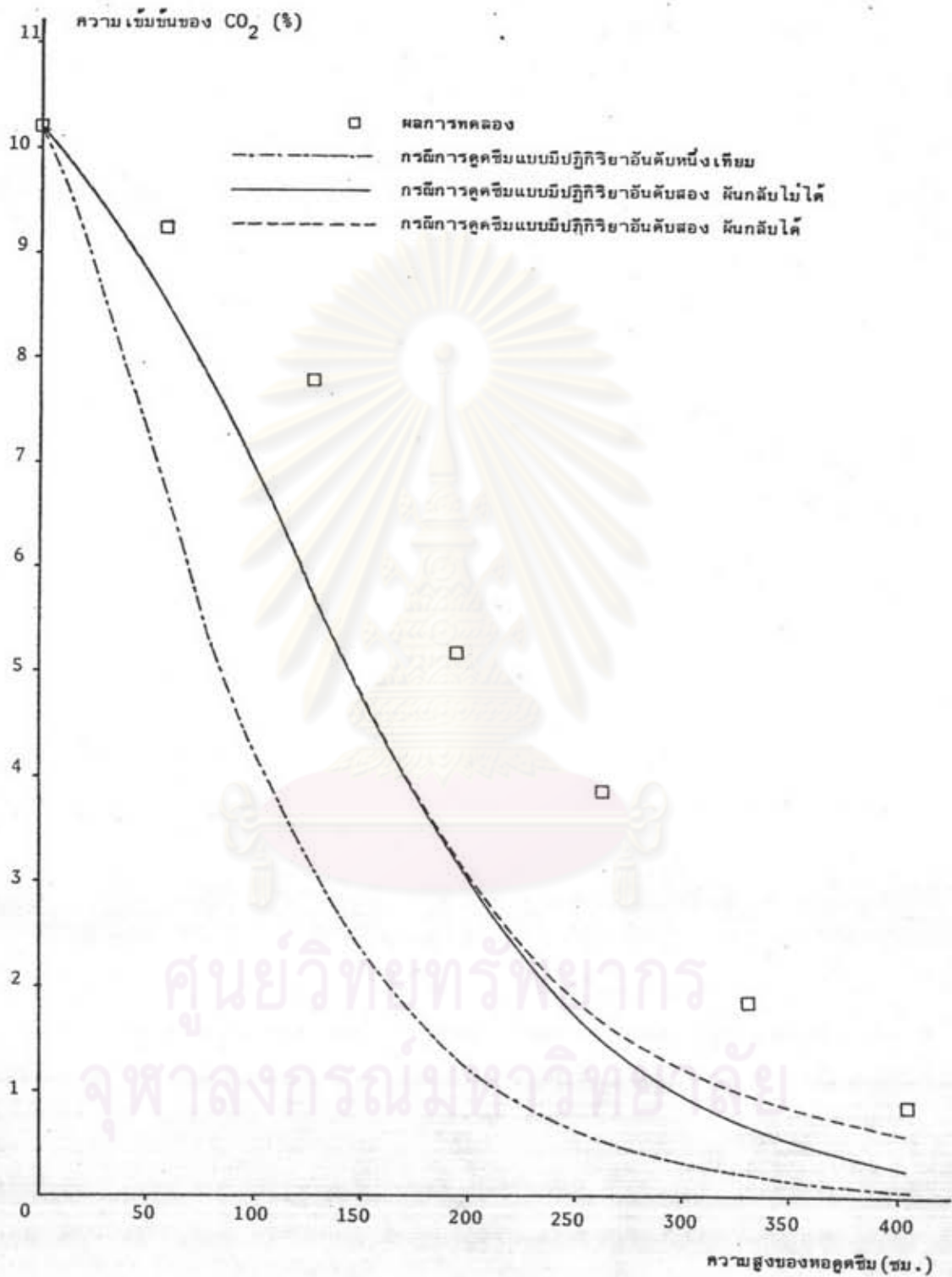
ค่าอัตราส่วนการจับ CO₂ เท่ากับ 0.40

ตำแหน่ง	ความสูงของหอ (ชม.)	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)			ผลการทดลอง
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	
CM 108	0	10.20	10.20	10.20	10.20
CM 107	60.0	6.67	8.50	8.50	9.35
CM 106	127.0	3.10	5.75	5.75	7.64
CM 105	195.0	1.30	3.17	3.24	5.40
CM 104	262.5	0.54	1.50	1.68	3.43
CM 103	330.0	0.21	0.65	0.98	1.88
CM 102	405.0	0.073	0.26	0.60	0.90

ตารางที่ 5.4.3 ผลการคำนวณความเข้มข้นของเอมีเอไอในเนื้อของเหลว เปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

กรณีที่	C _{๒๒} ที่ยอดหอ		C _{๒๒} ที่ก้นหอ	
	การวัด	คำนวณ	การวัด	คำนวณ
1. อันดับหนึ่งเทียม	0.40	0.401	0.04	0.026
2. อันดับสองผันกลับไม่ได้	0.40	0.398	0.04	0.028
3. อันดับสองผันกลับได้	0.40	0.401	0.04	0.045

C_{๒๒} = ความเข้มข้นของเอมีเอไอในของเหลว (โมล/ลิตร)



รูปที่ 5.4.2 ผลการคำนวณโพรไฟล์ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ตามความสูงของหอเปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 1 ในช่วงเวลาที่ 3-4

ตารางที่ 5.4.4 ผลการคำนวณความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ เมื่อคิดว่าเป็นการ
ดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาเคมี เปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่
ที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

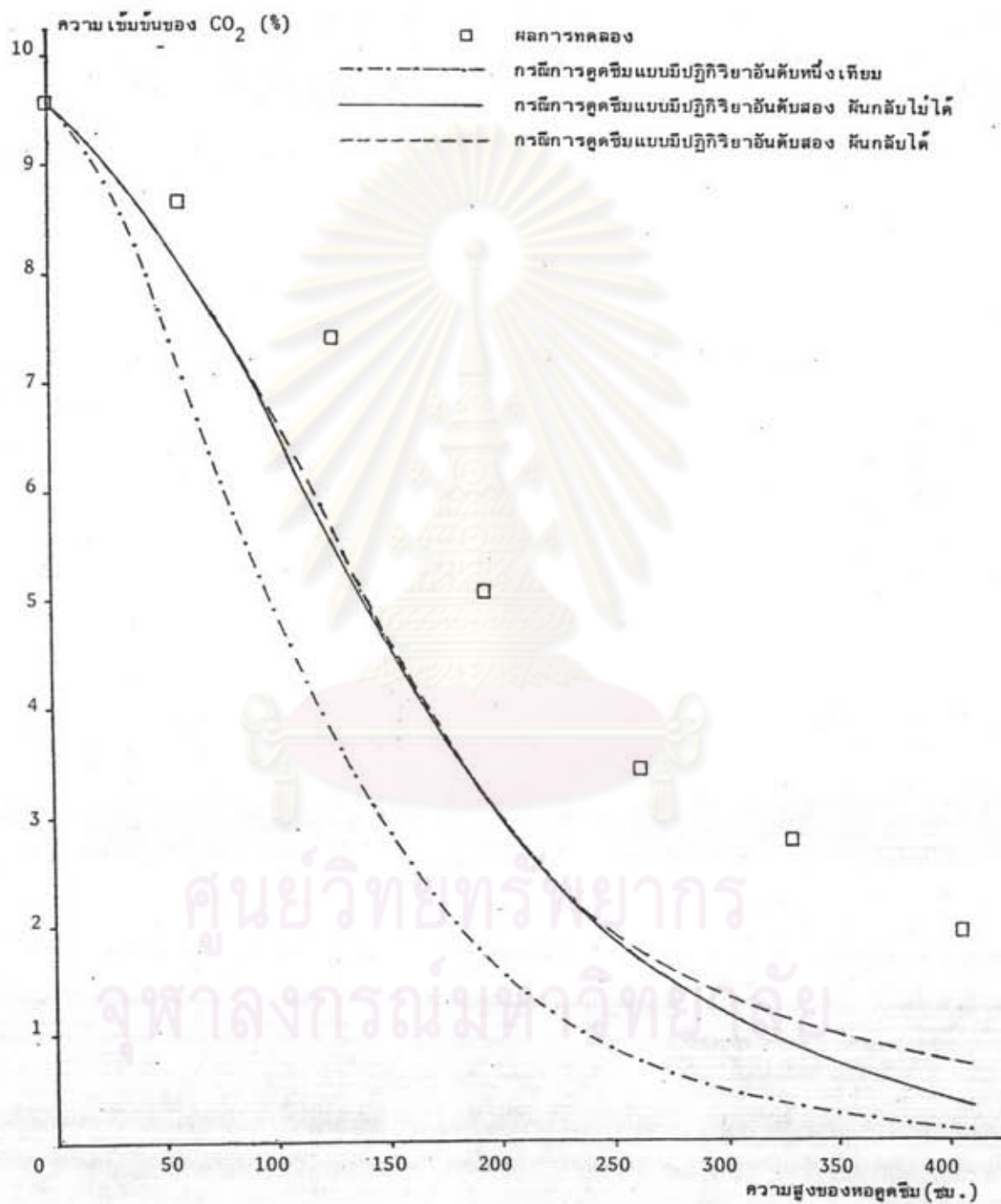
ค่าอัตราส่วนการจับ CO₂ เท่ากับ 0.411

ตำแหน่ง	ความสูงของหอ (ชม.)	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)			ผลการ ทดลอง
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	
CM 108	0	9.58	9.58	9.58	9.58
CM 107	60.0	7.07	8.10	8.10	8.65
CM 106	127.0	3.68	5.45	5.60	7.40
CM 105	195.0	1.65	3.15	3.15	5.05
CM 104	262.5	0.72	1.65	1.75	3.43
CM 103	330.0	0.57	0.86	1.10	2.75
CM 102	405.0	0.10	0.35	0.72	1.92

ตารางที่ 5.4.5 ผลการคำนวณความเข้มข้นของเอมีเอไอในเนื้อของเหลว
เปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

กรณีที่	C _{๒๒} ที่ยอดหอ		C _{๒๒} ที่ก้นหอ	
	การวัด	คำนวณ	การวัด	คำนวณ
1. อันดับหนึ่งเทียม	0.356	0.356	0.10	0.004
2. อันดับสองผันกลับไม่ได้	0.356	0.356	0.10	0.024
3. อันดับสองผันกลับได้	0.356	0.356	0.10	0.027

C_{๒๒} = ความเข้มข้นของเอมีเอไอของเหลว (โมล/ลิตร)



รูปที่ 5.4.3 ผลการคำนวณโพรไฟล์ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ตามความสูงของหอเปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 1 ในช่วงเวลาที่ 4-6



**ตารางที่ 5.4.6 ผลการคำนวณความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ เมื่อคิดว่าเป็นการ
ดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาเคมี เปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่
ที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12**

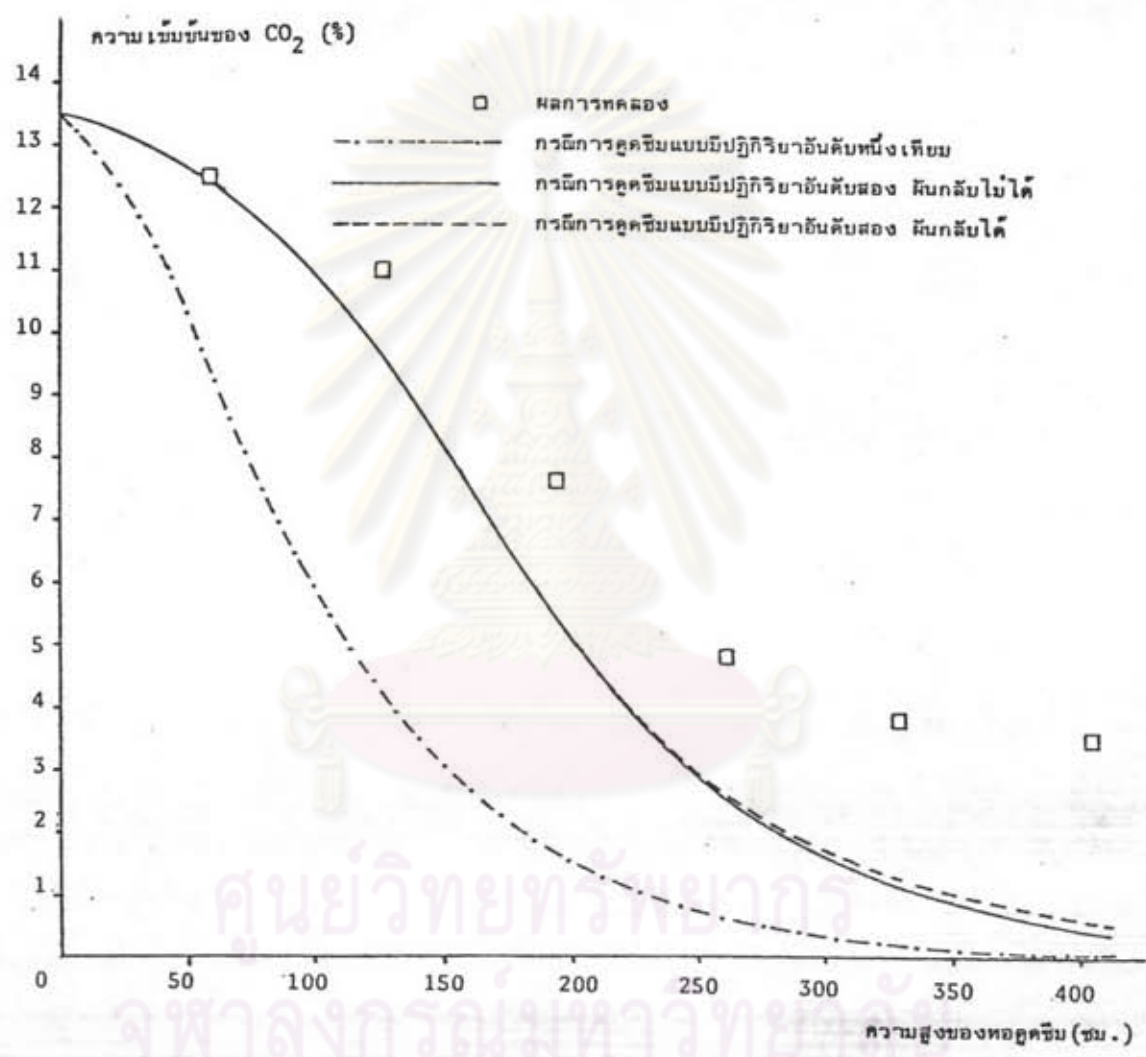
ค่าอัตราส่วนการจับ CO₂ เท่ากับ 0.380

ตำแหน่ง	ความสูงของหอ (ชม.)	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)			ผลการ ทดลอง
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	
CM 108	0	13.50	13.50	13.50	13.50
CM 107	60.0	9.16	12.20	12.20	12.50
CM 106	127.0	4.15	9.60	9.60	11.00
CM 105	195.0	1.67	5.35	5.40	7.60
CM 104	262.5	0.60	2.46	2.55	4.80
CM 103	330.0	0.20	1.13	1.25	3.80
CM 102	405.0	0.07	0.41	0.60	3.50

**ตารางที่ 5.4.7 ผลการคำนวณความเข้มข้นของเอมีเอไอในเนื้อของเหลว
เปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12**

กรณีที่	C _{๒๒} ที่ยอดหอ		C _{๒๒} ที่ก้นหอ	
	การวัด	คำนวณ	การวัด	คำนวณ
1. อันดับหนึ่งเทียบ	0.50	0.500	0.02	0.002
2. อันดับสองผันกลับไม่ได้	0.50	0.499	0.02	0.012
3. อันดับสองผันกลับได้	0.50	0.499	0.02	0.020

C_{๒๒} = ความเข้มข้นของเอมีเอไอในของเหลว (โมล/ลิตร)



รูปที่ 5.4.4 ผลการคำนวณโปรแกรมไฟลส์ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ตามความสูงของหอเปรียบเทียบกับการทดลองครั้งที่ 1 ในช่วงเวลาที่ 10-12

ตารางที่ 5.4.8 ผลการคำนวณความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาเคมี เปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

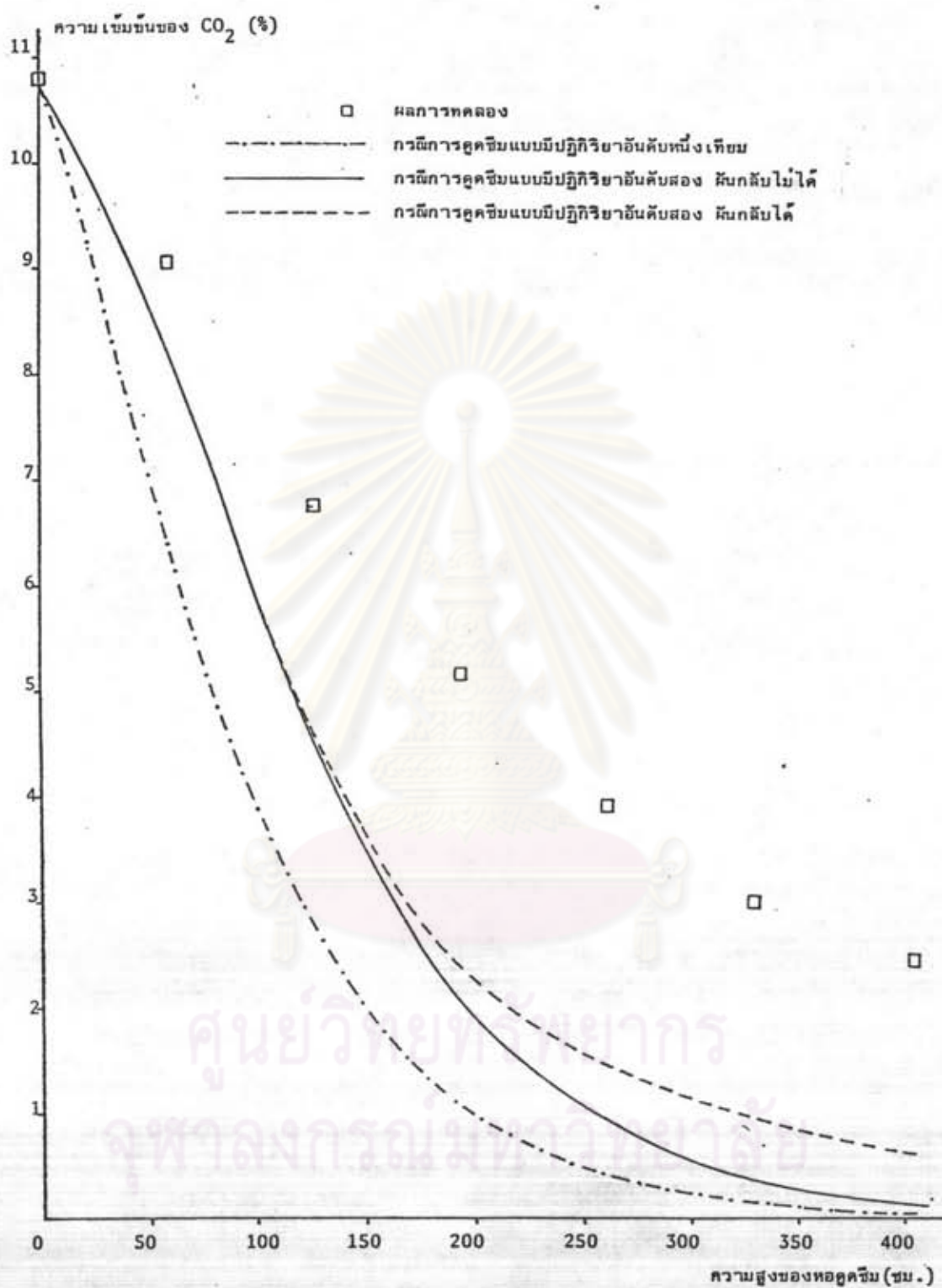
ค่าอัตราส่วนการจับ CO₂ เท่ากับ 0.401

ตำแหน่ง	ความสูงของหอ (ชม.)	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)			ผลการทดลอง
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	
CM 108	0	10.77	10.77	10.77	10.77
CM 107	60.0	6.40	8.20	8.20	9.05
CM 106	127.0	2.75	4.50	4.60	6.75
CM 105	195.0	1.05	2.03	2.35	5.16
CM 104	262.5	0.41	0.92	1.43	3.90
CM 103	330.0	0.15	0.36	0.95	3.00
CM 102	405.0	0.04	0.12	0.63	2.45

ตารางที่ 5.4.9 ผลการคำนวณความเข้มข้นของเอมีเอไอในเนื้อของเหลว เปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

กรณีที่	C _{๒๒} ที่ยอดหอ		C _{๒๒} ที่ก้นหอ	
	การวัด	คำนวณ	การวัด	คำนวณ
1. อันดับหนึ่งเทียม	0.395	0.395	0.076	0.038
2. อันดับสองผันกลับไม่ได้	0.395	0.396	0.076	0.041
3. อันดับสองผันกลับได้	0.395	0.394	0.076	0.056

C_{๒๒} = ความเข้มข้นของเอมีเอไอในของเหลว (โมล/ลิตร)



รูปที่ 5.4.5 ผลการคำนวณโพรไฟล์ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ตามความสูงของหอเปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 2 ในช่วงเวลาที่ 6-9

5.5 การคำนวณโพรไฟล์ของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ตามความสูงของหอคูดูดซึมเปรียบเทียบกับผลการทดลองของผู้อื่น

จากวิธีการคำนวณความเข้มข้น CO_2 ตามความสูงของหอคูดูดซึมเมื่อมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ตามหัวข้อ 5.4.2, 5.4.3 และ 5.4.4 จะใช้กับข้อมูลการทดลองของ ดร.สุธรรม วาณิชเสนี (8)

ข้อมูลการทดลองชุด R.1

ความดันรวม	2.5	บาร์
อัตราไหลของแก๊ส	0.747	กิโลกรัม/วินาที/ตารางเมตร
อัตราไหลของสารละลาย	3.263	กิโลกรัม/วินาที/ตารางเมตร
ค่าอัตราส่วนการจับ CO_2 ของ		
เอ็มอีเอ ที่ยอดหอ	0.193	
ค่าอัตราส่วนการจับ CO_2 ของ		
เอ็มอีเอ ที่ก้นหอ	0.322	
ความเข้มข้นของสารละลาย		
โมโนเอธาโนลามีน	2	โมล/ลิตร
อุณหภูมิแก๊สขาเข้า	23.9	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิแก๊สขาออก	22.1	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในหอคูดูดซึม	24.0	องศาเซลเซียส
หอคูดูดซึมเป็นหอเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)		
เส้นผ่าศูนย์กลางภายในหอ	27.94	เซนติเมตร
แพคกิ้งเป็นเซอรามิคแบบพอลริงขนาด	1	นิ้ว
ช่วงที่บรรจุแพคกิ้งมี	5	ช่วง
พื้นที่หน้าตัดหอ	0.0613	ตารางเมตร

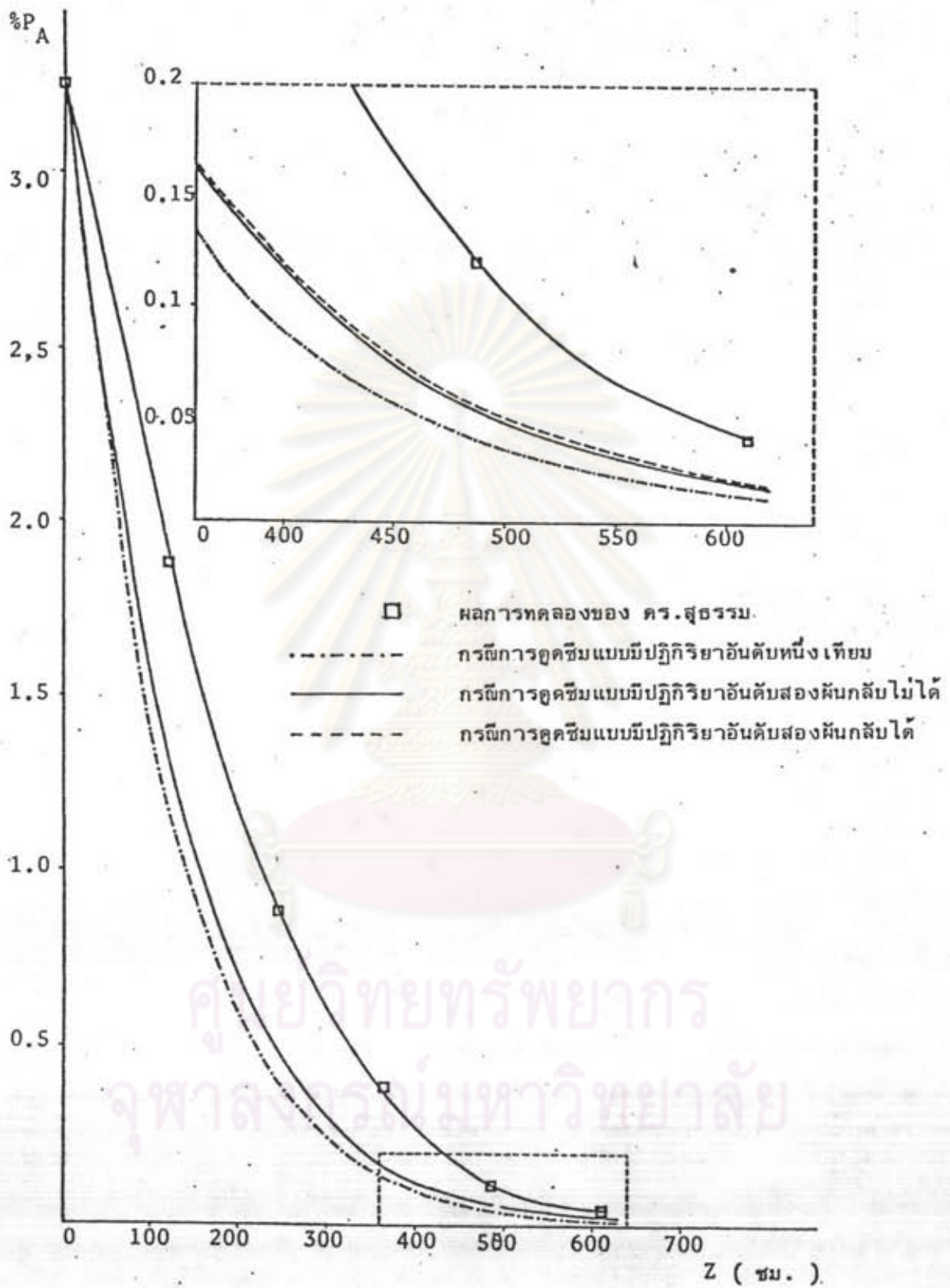
5.5.1 ผลการคำนวณเมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาเคมี

ค่าความเข้มข้นของ CO_2 ตลอดความสูงหอที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณตามทฤษฎี แสดงในกราฟรูปที่ 5.5.1

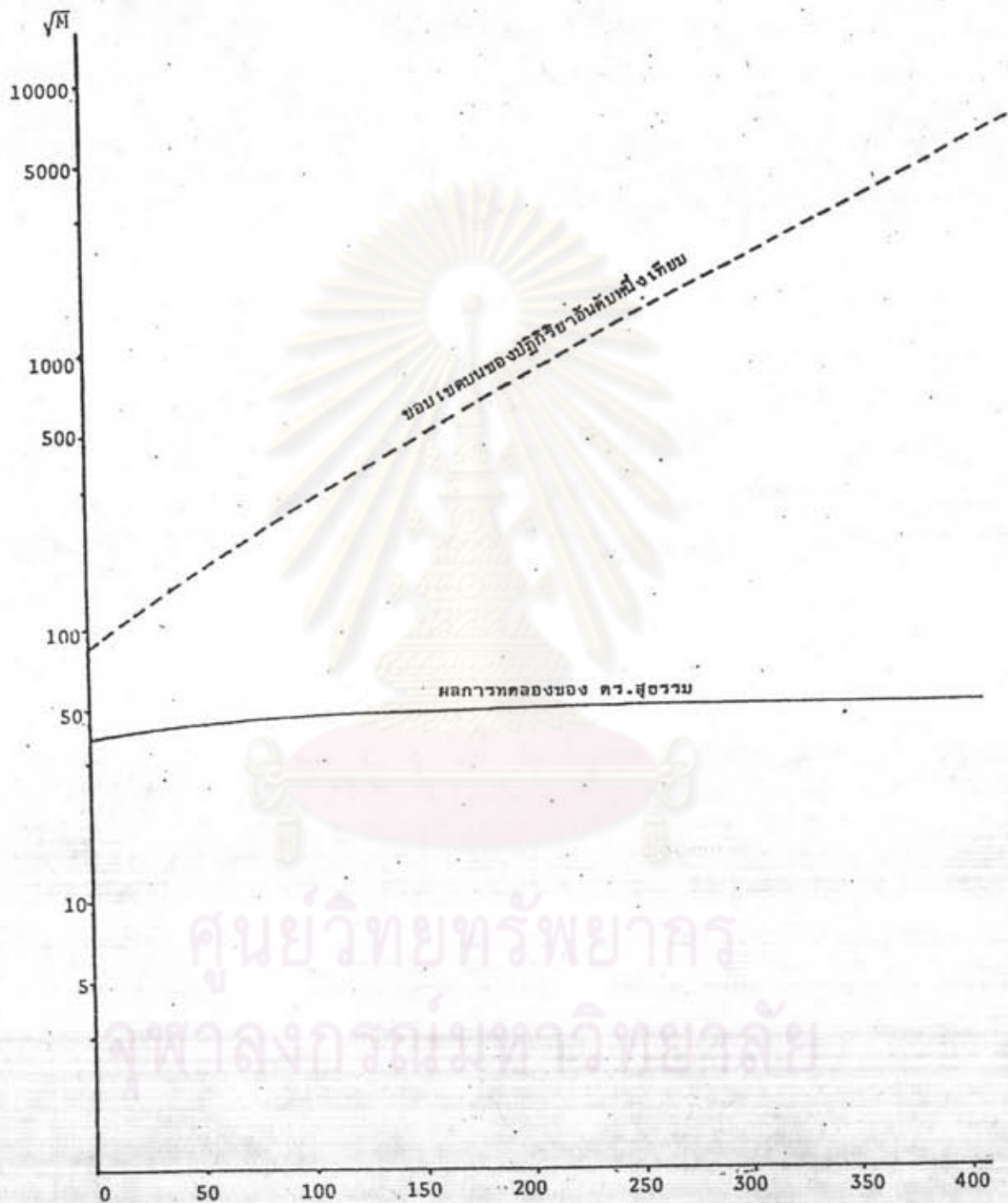
การคำนวณทั้ง 3 กรณี ให้ค่าความเข้มข้นของ CO_2 ใกล้เคียงกันโดยเฉพาะ กรณีที่ 2 (คิดว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ผันกลับไม่ได้) กับกรณีที่ 3 (คิดว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับได้) เส้นกราฟเกือบทับกันสนิท แสดงว่า C_{A_0} มีความสำคัญน้อยเมื่อเทียบกับ C_{A_1} ดังนั้น ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนการจับ CO_2 ของสารละลายเอ็มอีเอ ตอนเริ่มต้นมีค่าน้อยมาก เราสามารถใช้การคำนวณในกรณีที่ 2 ทำนายได้

สำหรับกรณีที่ 1 (คิดว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม) ก็ทำนายได้ใกล้เคียงกับปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากสถานะการทดลองอยู่ในขอบเขตของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม คือ $\sqrt{M} < (1/2) E_1$ และ $\sqrt{M} > 3$ แสดงในรูป 5.5.2 ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของแดงค์เวอร์ท จึงสามารถใช้การคำนวณในกรณีที่ 1 และการคำนวณก็ง่ายกว่ากรณีที่ 2 และ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5.1 โพรไฟล์ของความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ตามความสูงของหอที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ ดร.สุธรรม วาณิชเสณี



รูปที่ 5.5.2 แสดงค่า \sqrt{H} ตามความสูงของหอดูดซึม