

บทที่ 5

ผลและบทวิเคราะห์ผล

5.1 ผลการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองอัตราการหายใจ

แบบจำลองอัตราการหายใจทั้ง 7 แบบดังแสดงในตาราง 4.1 ได้ถูกนำมาพิตกับข้อมูลอัตราการหายใจทั้ง 6 ข้อมูล (ดังแสดงในตาราง 4.2) โดยใช้โปรแกรม Sigma Plot ซึ่งพิตด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด (least square regression analysis method) และได้พารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองอัตราการหายใจดังแสดงในตารางที่ 5.1 ถึง 5.7 (ข้อมูลผลการคำนวณแสดงไว้ในตาราง ก.1 ถึง ก.6 ในภาคผนวก ก.)

แบบจำลองอัตราการหายใจแต่ละแบบพร้อมกับค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของแต่ละแบบจำลองถูกนำมาเขียนเป็นกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แบบจำลองทั้ง 7 แบบพร้อมกับค่าพารามิเตอร์ที่พิตมาได้จากข้อมูลชุดที่ 1 ถูกนำมาเขียนเป็นกราฟพื้นผิวดังรูป 5.1 ถึง 5.7 สำหรับอัตราการใช้แก๊สออกซิเจนและรูป 5.8 ถึง 5.14 สำหรับอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนจะถูกเปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 21 โดยปริมาตร และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 19 โดยปริมาตรเพื่อเป็นตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ตามสมการ (4.28) ที่คำนวณได้จากการพีดแบบจำลองอัตราดอกเบี้ยแต่ละแบบเข้ากับข้อมูลแต่ละชุดสำหรับการใช้แก๊สออกซิเจนและการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า R^2 เหล่านี้ถูกนำมาวาดเป็นกราฟแท่งดังแสดงในรูปที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองอัตราดอกเบี้ยแต่ละแบบสำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 5.1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบเส้นตรง (แบบที่ 1)

สมการ	พารามิเตอร์	ข้อมูลอัตราการหายใจ					
		1	2	3	4	5	6
R_O	a_1	2.501	141.1	84.4	4.661	0.3471	32.35
	a_2	0.3584	5.074	-2.872	0.5514	1.019	-1.143
	a_3	0.1009	-1.681	-4.005	-0.1227	1.19	-1.293
	R^2	0.9002	0.7687	0.8607	0.9343	0.9220	0.6672
R_C	a_1	10.61	141.5	18.83	7.135	-0.6361	2.276
	a_2	0.0124	3.177	0.06708	0.6461	0.5792	0.2567
	a_3	-0.3532	-3.396	-0.4478	-0.3033	1.583	0.2088
	R^2	0.9618	0.8294	0.6203	0.8656	0.9489	0.9034

ตาราง 5.2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบโพลีโนเมียล (แบบที่ 2)

สมการ	พารามิเตอร์	ข้อมูลอัตราการหายใจ					
		1	2	3	5	6	7
R_O	a_1	5.061	123.2	-21.32	1.59	-0.3593	70.30
	a_2	0.6244	6.58	5.19	1.257	1.933	-1.473
	a_3	-0.547	4.826	-0.08996	-0.1398	1.145	-4.797
	a_4	-0.0177	-0.07446	-0.1523	-0.02907	-0.06768	-0.0738
	a_5	0.03313	-0.5259	0.04372	0.00086	-0.0092	0.0826
	R^2	0.9145	0.8108	0.9884	0.9680	0.9855	0.7296
R_C	a_1	9.635	152.8	90.24	0.9038	0.07405	-7.061
	a_2	0.04577	2.575	5.95	2.056	0.924	1.246
	a_3	0.1815	-8.104	-14.58	-0.2995	1.274	0.3889
	a_4	-0.00305	0.029	-0.4472	-0.058	-0.026	-0.0289
	a_5	-0.0417	0.3806	0.5363	-0.00019	0.0178	0.00735
	R^2	0.9990	0.8697	0.7800	0.9406	0.9762	0.9396

ตาราง 5.3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราดอกเบี้ยแบบเอกโปเนนเชียล (แบบที่ 3)

สมการ	พารามิเตอร์	ข้อมูลอัตราดอกเบี้ย					
		1	2	3	4	5	6
R_o	a_1	-36.24	$3.10 \cdot 10^{-8}$	-102.4	-17.82	-16.00	-13.68
	a_2	-0.6538	-1.494	560.2	11.12	202.6	84.10
	a_3	10.5	173.6	-524	5.284	-187.1	4.852
	a_4	-1.462	1.298	-0.09084	-0.131	-0.1675	0.08483
	a_5	0.1532	0.2485	0.00442	-0.01247	0.00477	-0.08714
	R^2	0.9922	0.6469	0.9920	0.9415	0.9914	0.7596
R_c	a_1	$1.4 \cdot 10^{-8}$	251.4	-0.2818	-74.05	-10.9936	4.226
	a_2	-0.2105	50.15	49.5030	-274.4	326.846	1.537
	a_3	9.938	-144.4	9.3795	293.2	-316.553	0.7108
	a_4	0.7483	0.0113	0.2390	-0.4196	-0.0940	0.01047
	a_5	0.2471	-0.281	-0.1820	0.00109	0.0045	0.01411
	R^2	0.9999	0.8766	0.7195	0.9406	0.9770	0.8980

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 5.4 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเกลีสเมนเทนชนิดมีการ
ยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 4)

สมการ	พารามิเตอร์	ข้อมูลอัตราการหายใจ					
		1	2	3	4	5	6
R_O	v_m	11.7154	245	37.01	30.38	10.19	10.39
	k_m	2.7179	2.062	10.38	18.79	0.7943	4.307
	k_i	33.869	87.47	100	42.81	-12.15	105.9
	R^2	0.9502	0.7104	0.8496	0.9518	0.8758	0.6163
R_C	v_m	11.05	216.1	23.44	39.56	7.948	7.461
	k_m	$-2.7 \cdot 10^{-3}$	1.567	4.03	18.59	0.3524	-0.104
	k_i	18.3657	29.16	100	18.59	-12.66	218.4
	R^2	0.9326	0.8206	0.6461	0.8854	0.6706	0.8970

ตาราง 5.5 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเกลีสเมนเทนชนิดมีการ
ยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 5)

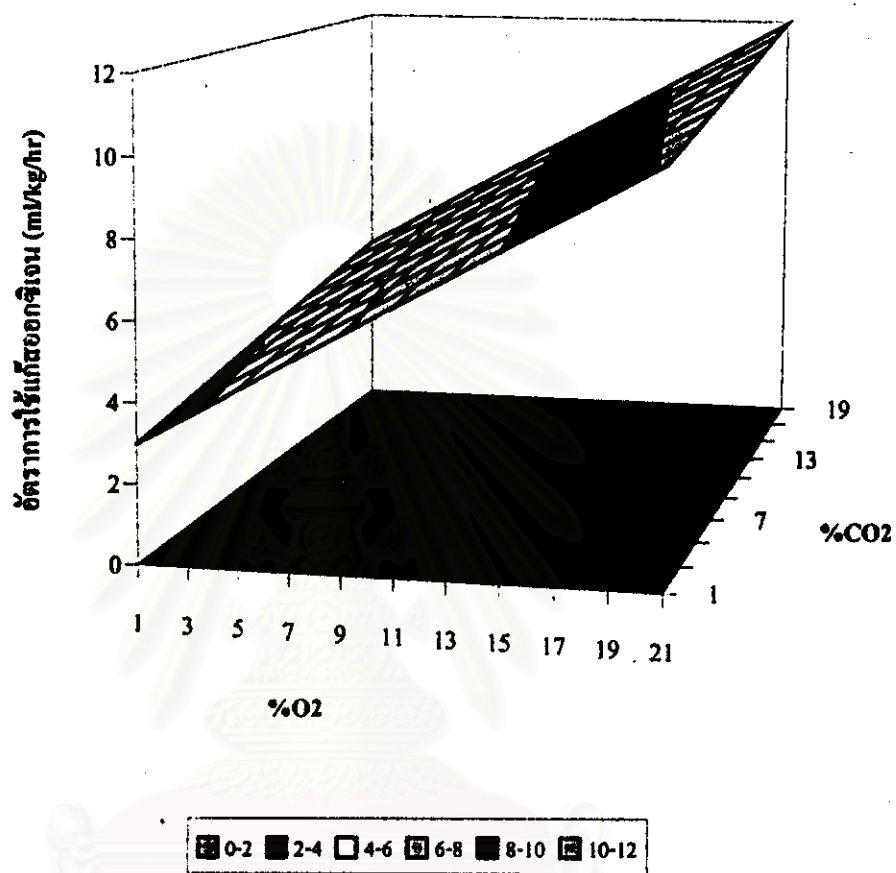
สมการ	พารามิเตอร์	ข้อมูลอัตราการหายใจ					
		1	2	3	4	5	6
R_O	v_m	11.28	242	34.18	27.86	16.11	10.02
	k_m	2.093	1.935	7.98	15.67	1.829	3.014
	k_i	41.06	112.3	100	85.97	-24.39	74.46
	R^2	0.9486	0.7071	0.8506	0.9585	0.9315	0.6200
R_C	v_m	11.05	208.7	22.67	35.4	9.729	7.469
	k_m	0.0163	1.29	3.23	14.46	0.658	-0.09881
	k_i	18.68	36.39	100	36.743	-16.88	211
	R^2	0.9329	0.7934	0.6441	0.9036	0.7463	0.8970

ตาราง 5.6 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราดอกเบี้ยแบบไมเคิลิสเมนเทนชนิดมีการ
ยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 6)

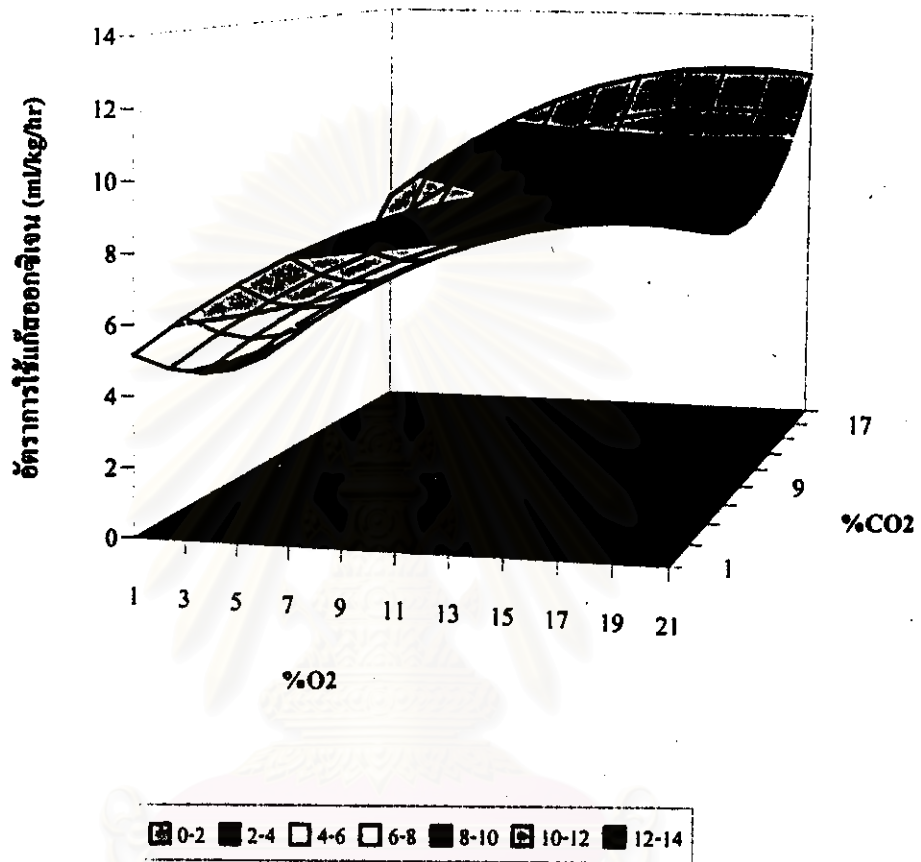
สมการ	พารามิเตอร์	ข้อมูลอัตราดอกเบี้ย					
		1	2	3	4	5	6
R_0	v_m	9.512	230.5	24.35	25.34	20.95	2.453
	k_m	0.3886	1.636	0.0818	12.81	3.757	-14.35
	k_i	2.006	29.43	0.2067	38.39	-12.05	-20.15
	R^2	0.9340	0.6876	0.8866	0.9615	0.9738	0.6339
R_c	v_m	8.27	182.3	23.86	30.26	14.90	7.294
	k_m	2.06×10^{-4}	0.6628	5.056	10.16	2.304	0.04788
	k_i	5.28×10^{-3}	5.297	418	14.65	-8.917	1810
	R^2	0.7893	0.5949	0.6490	0.9085	0.9562	0.8950

ตาราง 5.7 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราดอกเบี้ยแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7)

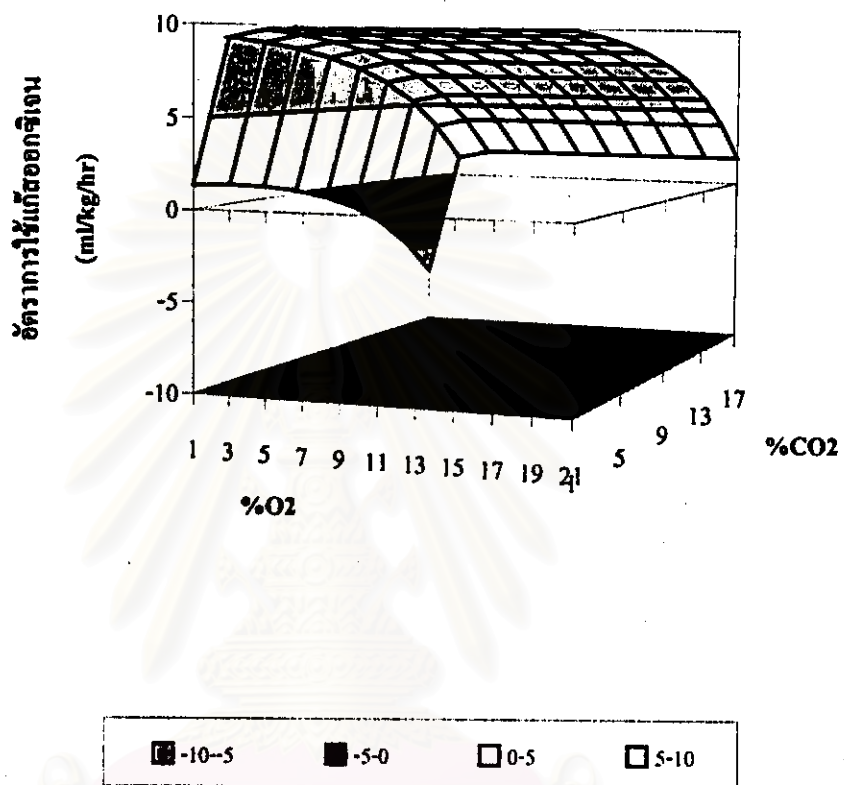
สมการ	พารามิเตอร์	ข้อมูลอัตราดอกเบี้ย					
		1	2	3	4	5	6
R_0	k_1	-700.1	0.6119	-94.58	0.0781	0.2661	134.0
	k_2	9.428	230.4	24.24	25.34	20.95	8.278
	k_3	-158.8	0.03383	-37.68	0.0260	-0.0830	23.49
	R^2	0.9333	0.6876	0.8868	0.9615	0.9738	0.6164
R_c	k_1	246.3	1.51	0.01329	0.0984	0.434	0.1705
	k_2	8.269	182.3	89.87	30.26	14.90	9.641
	k_3	9.515	0.1886	-0.0387	0.0682	-0.1121	-0.0404
	R^2	0.7889	0.5949	0.6852	0.9085	0.9562	0.9132



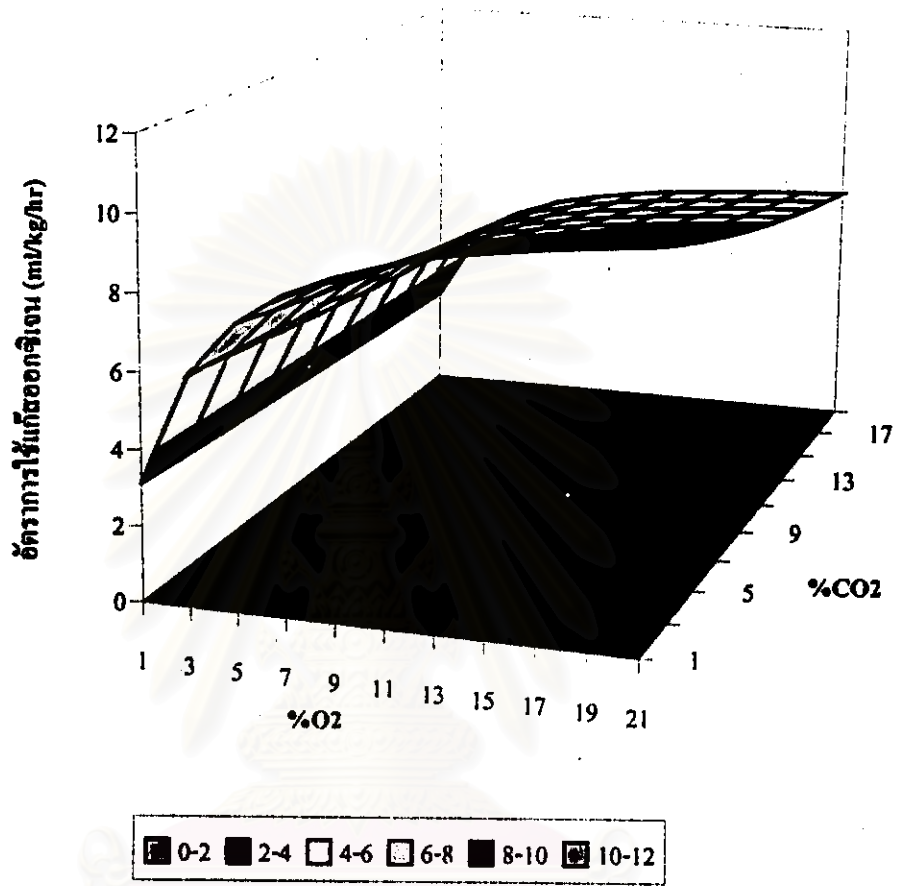
รูป 5.1 อัตราการใช้ออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 1



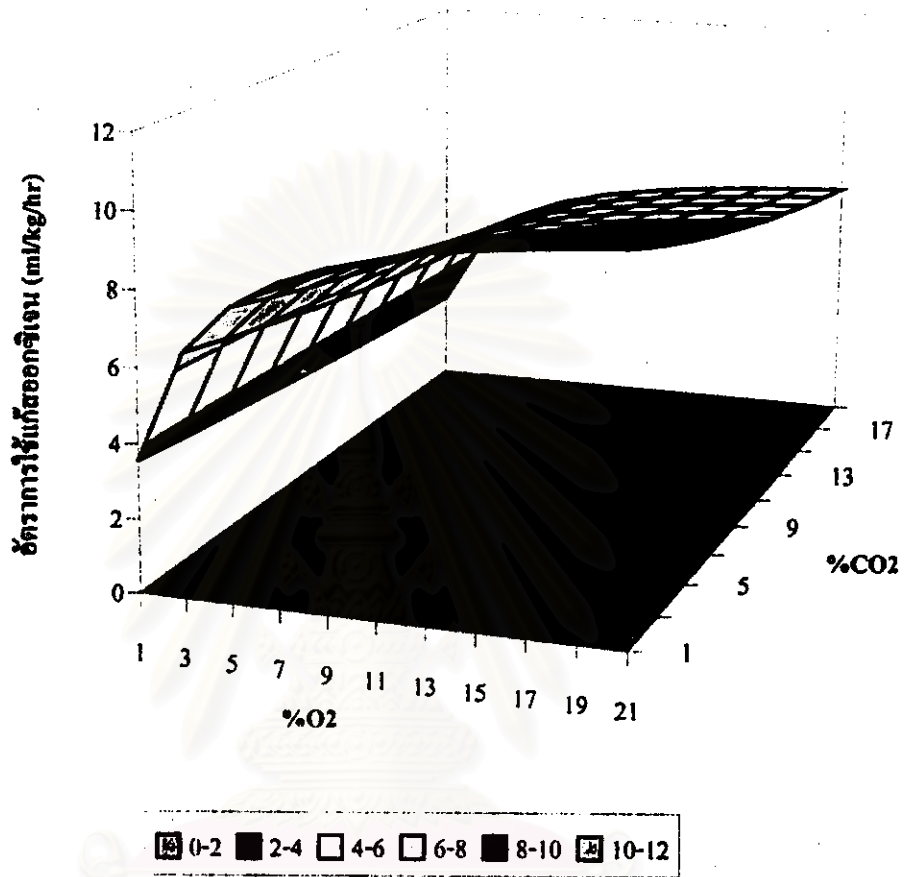
รูป 5.2 อัตราการใช้ออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการติดตามด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 2



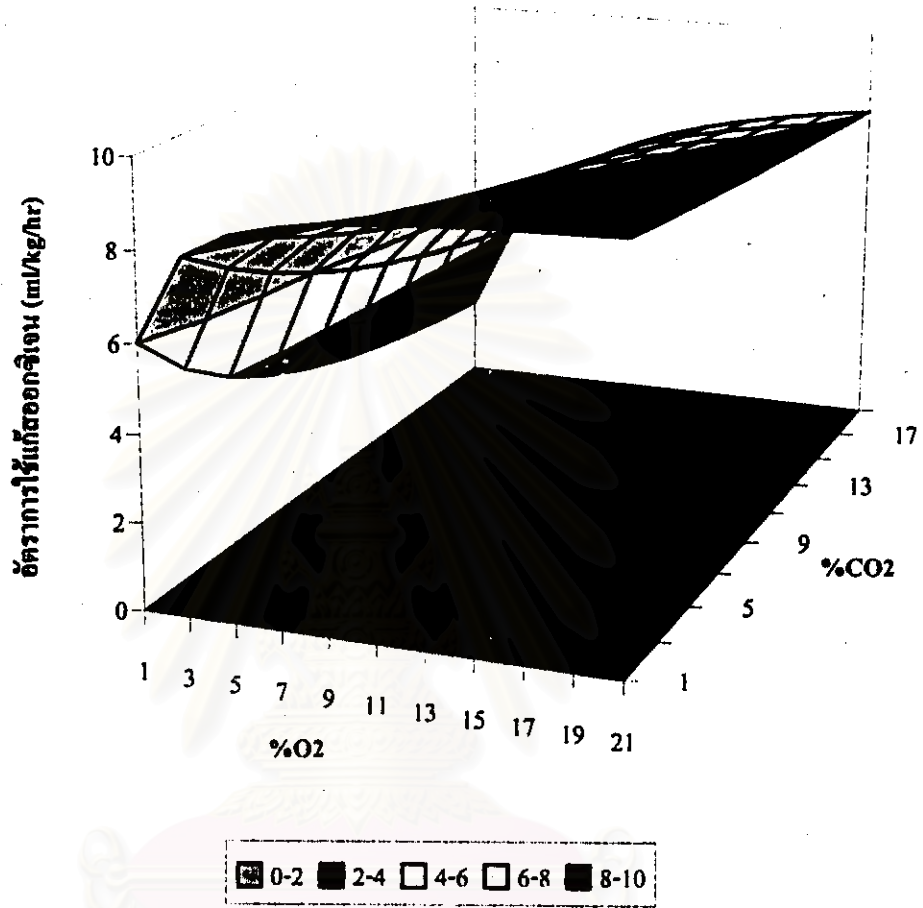
รูป 5.3 อัตราการใช้ออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการปิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 3



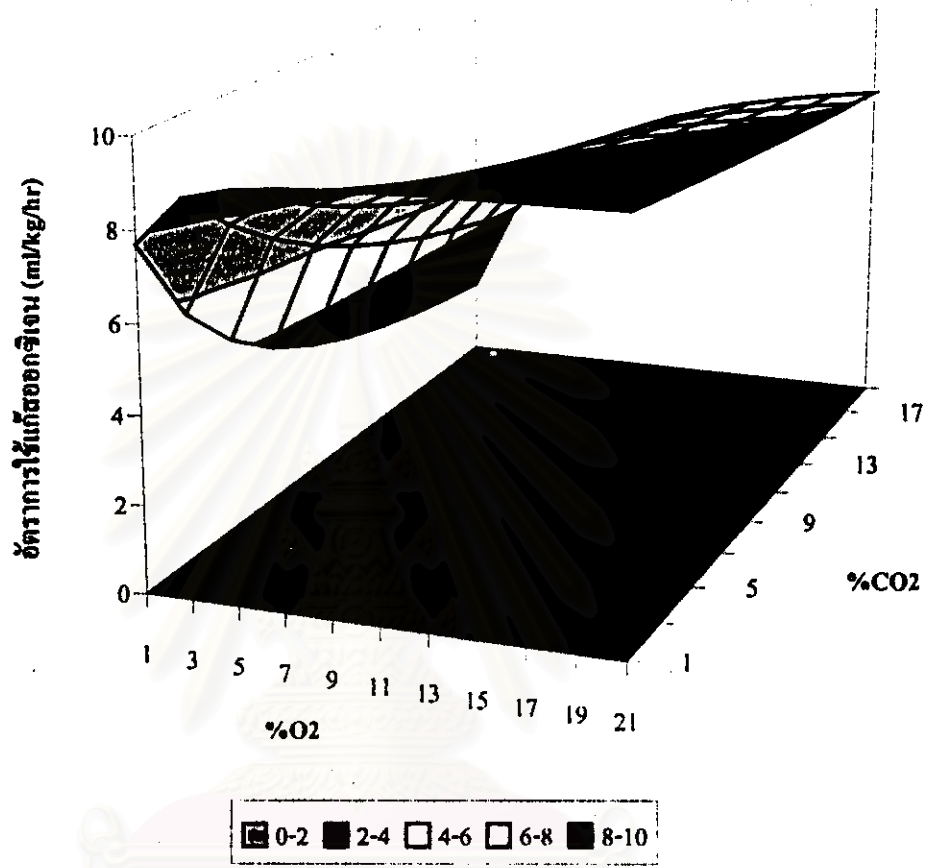
รูป 5.4 อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 4



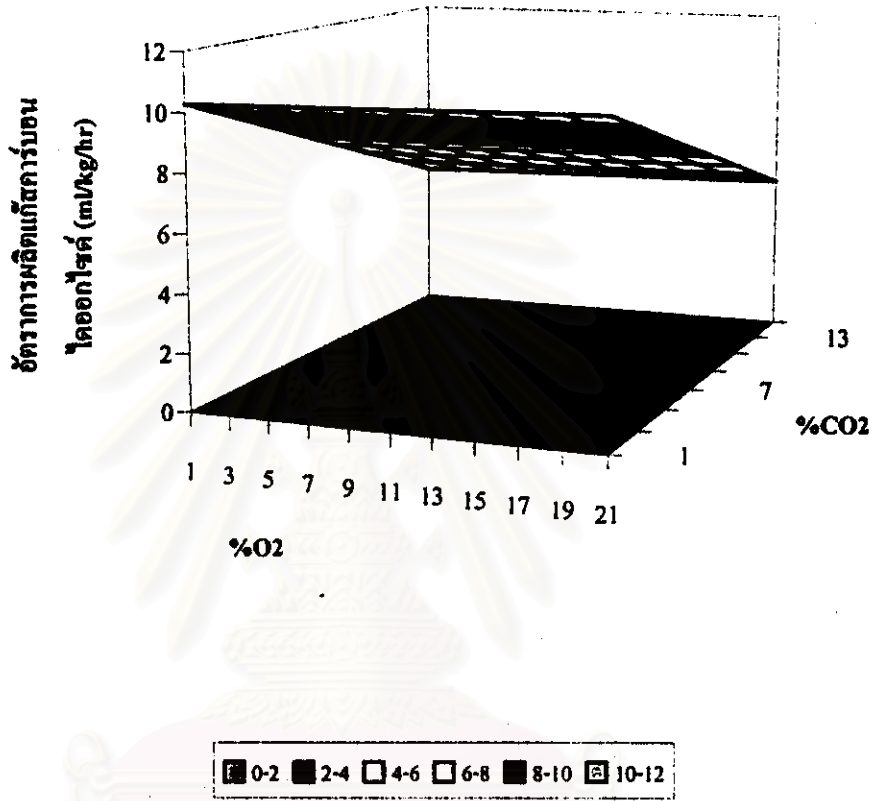
รูป 5.5 อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองอัตราหายใจแบบที่ 5



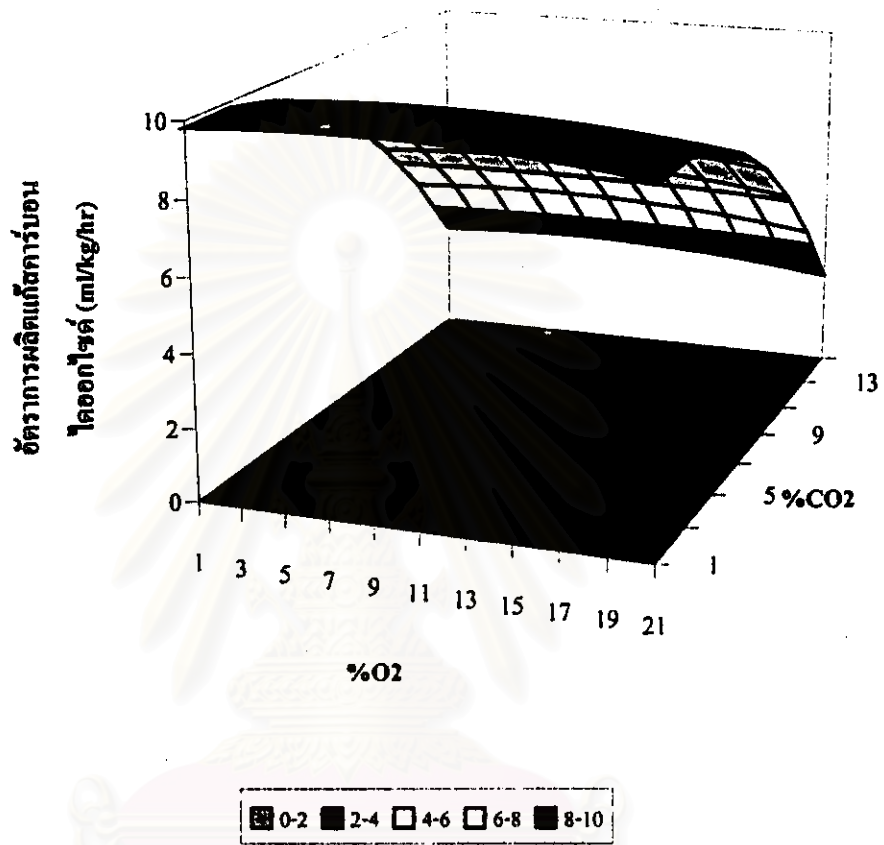
รูป 5.6 อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 6



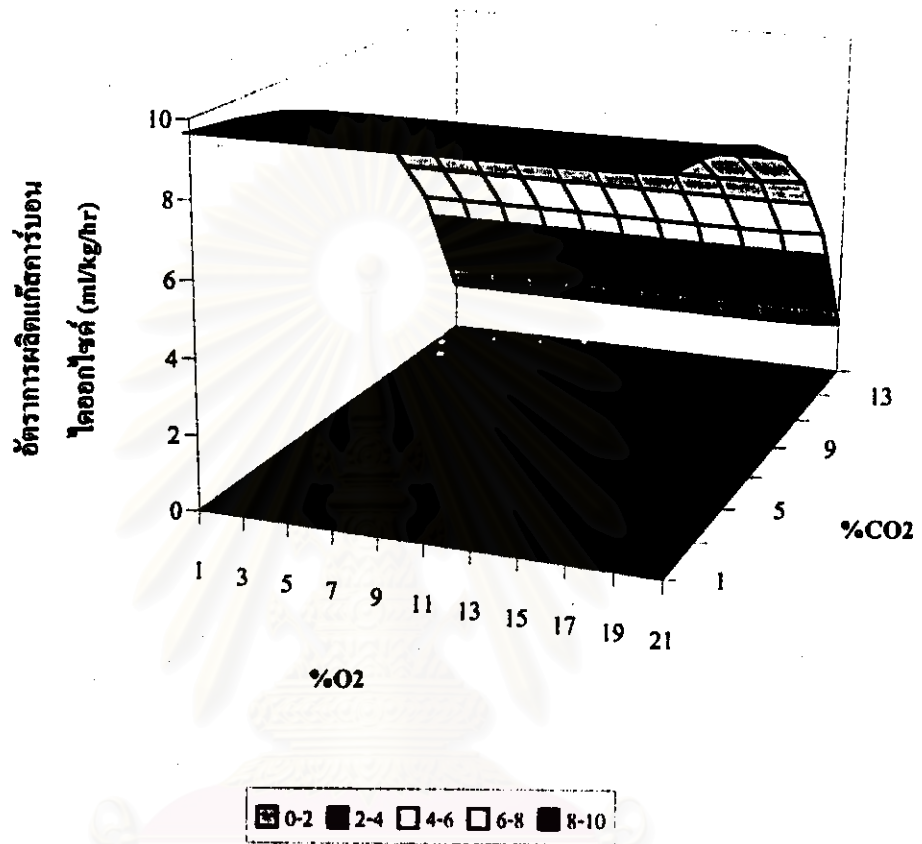
รูป 5.7 อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการปิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 7



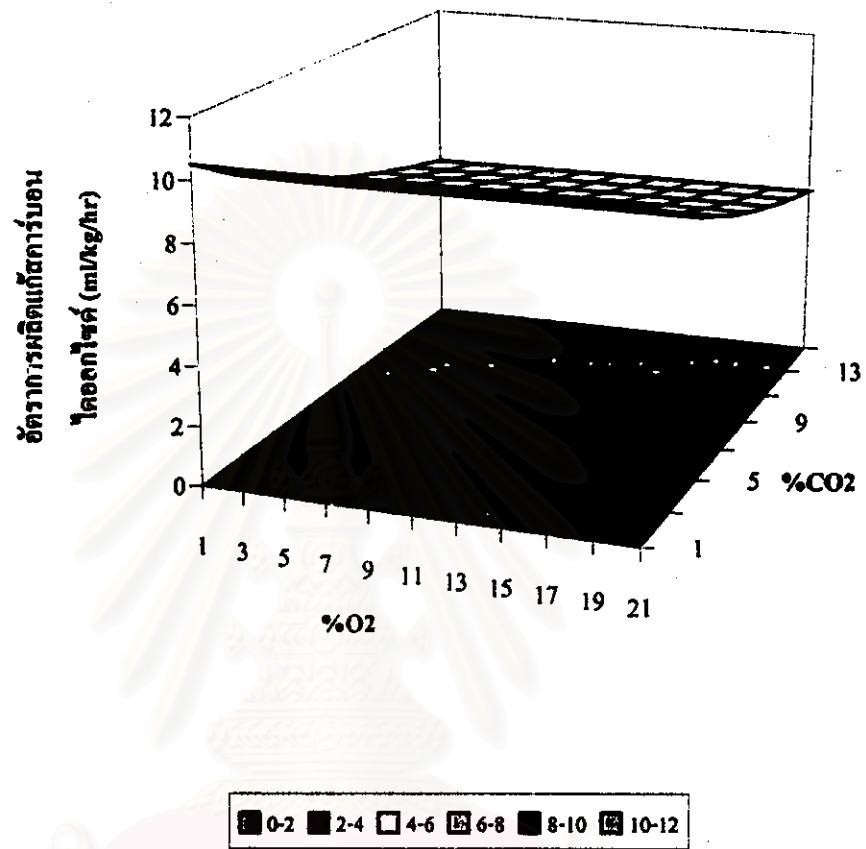
รูป 5.8 อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 1



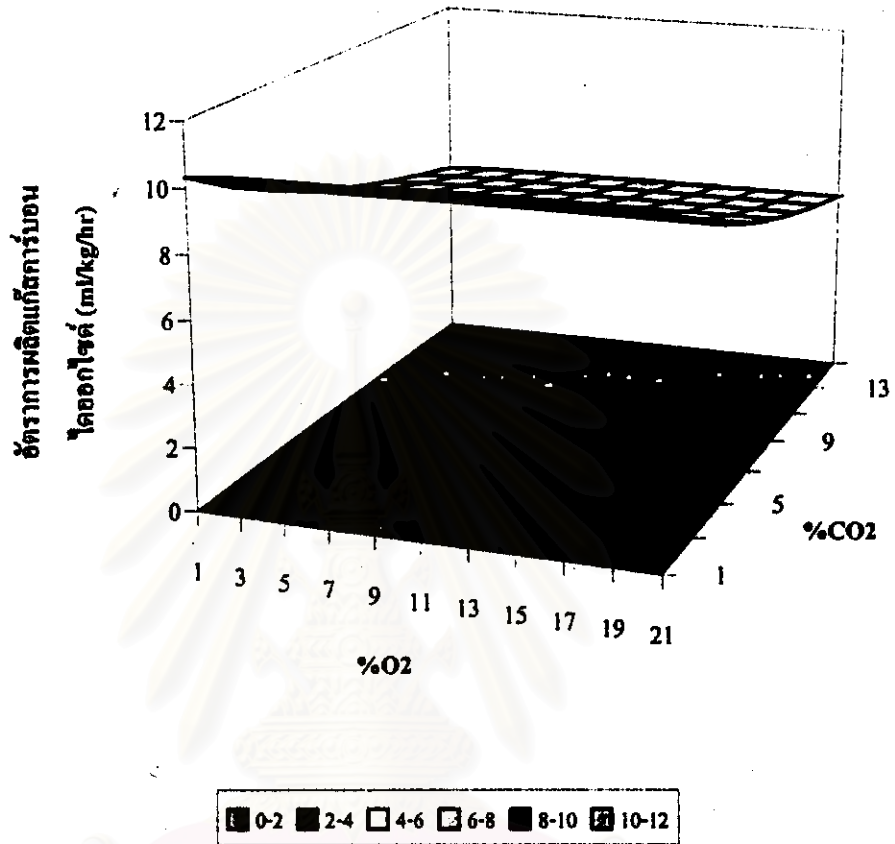
รูป 5.9 อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพืดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 2



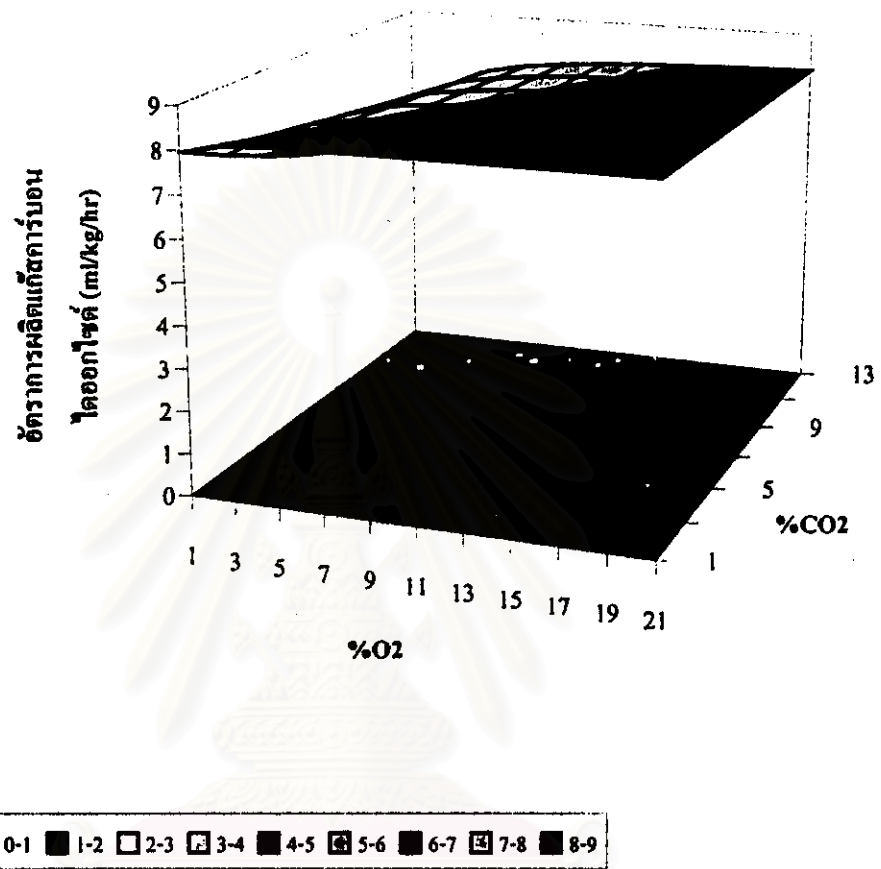
รูป 5.10 อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพืดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 3



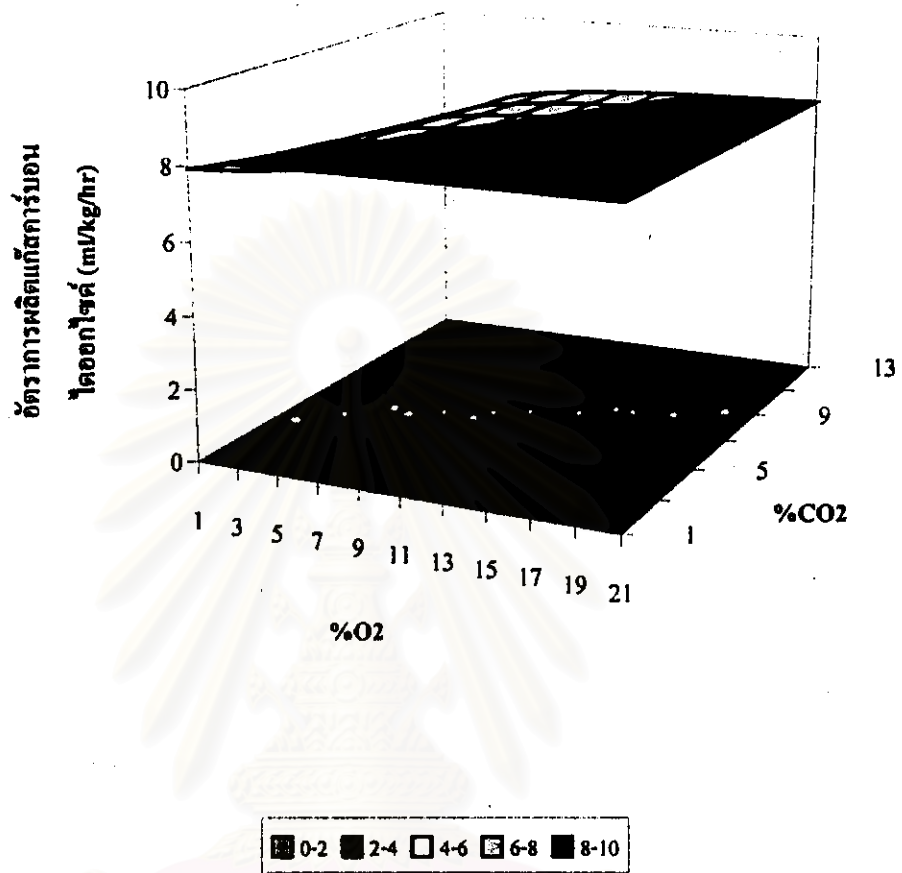
รูป 5.11 อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดย
คำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพืดด้วยแบบจำลองอัตราการ
หายใจแบบที่ 4



รูป 5.12 อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 5



รูป 5.13 อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 6



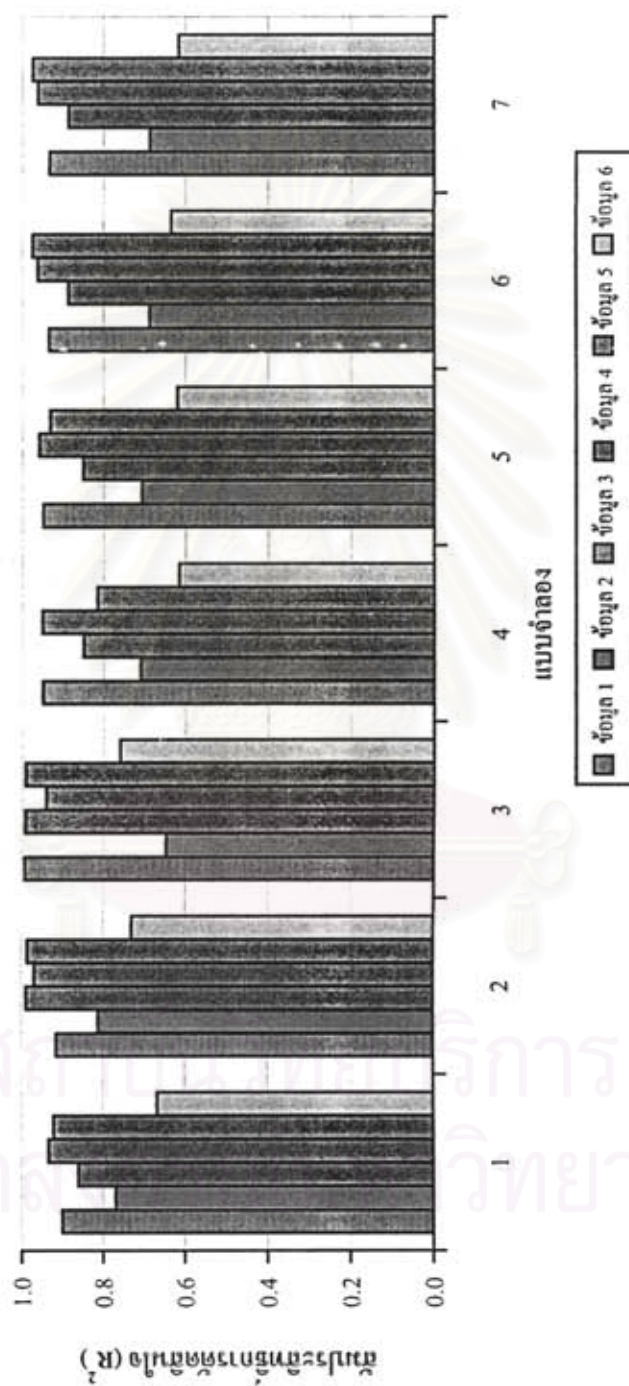
รูป 5.14 อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพืดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 7

ตาราง 5.8 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากผลของการฟีดอัตราการใช้แก๊สออกซิเจน
สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุดด้วยแบบจำลองอัตราการใช้แก๊สออกซิเจน 7 แบบ

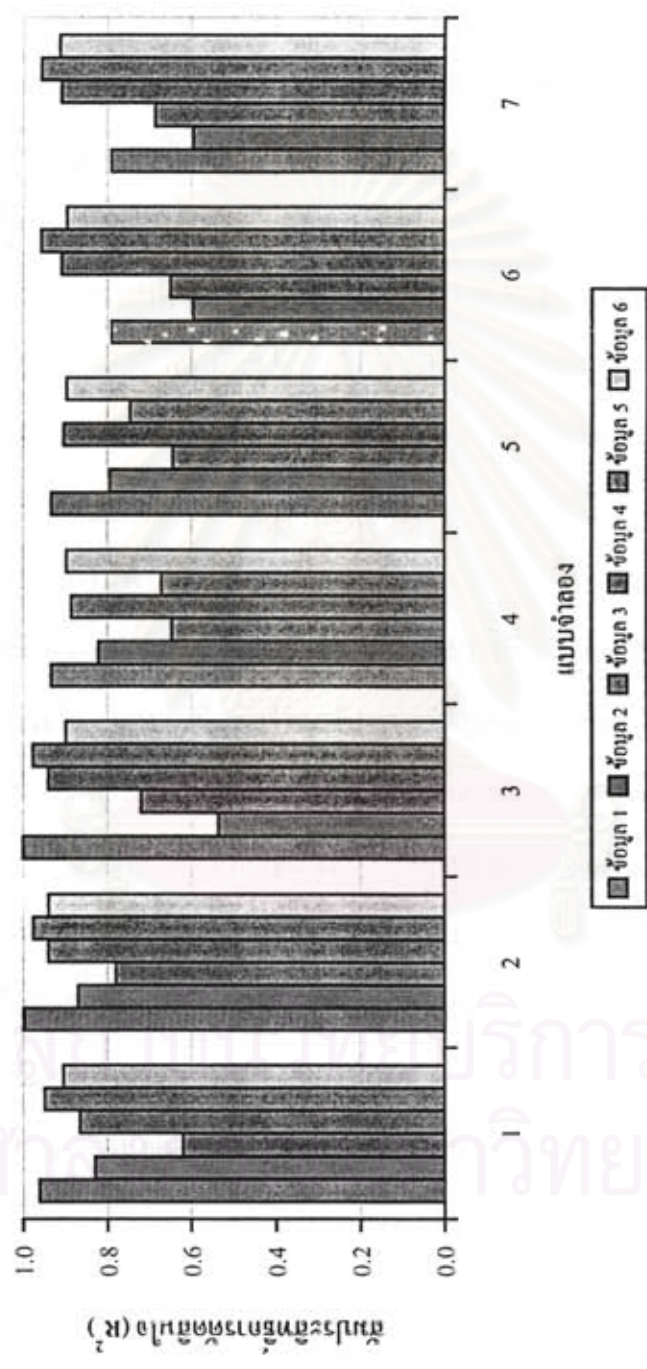
ข้อมูลที่	R^2 ของแต่ละแบบจำลอง						
	แบบ 1	แบบ 2	แบบ 3	แบบ 4	แบบ 5	แบบ 6	แบบ 7
1	0.9002	0.9145	0.9922	0.9502	0.9486	0.9340	0.9333
2	0.7687	0.8108	0.6469	0.7104	0.7071	0.6876	0.6876
3	0.8607	0.9884	0.9920	0.8496	0.8506	0.8866	0.8866
4	0.9343	0.9680	0.9415	0.9518	0.9585	0.9615	0.9615
5	0.9220	0.9855	0.9914	0.8758	0.9315	0.9738	0.9738
6	0.6672	0.7296	0.7596	0.6163	0.6200	0.6339	0.6164

ตาราง 5.9 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากผลของการฟีดอัตราการผลิตแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุดด้วยแบบจำลองอัตราการผลิต
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 7 แบบ

ข้อมูลที่	R^2 ของแต่ละแบบจำลอง						
	แบบ 1	แบบ 2	แบบ 3	แบบ 4	แบบ 5	แบบ 6	แบบ 7
1	0.9618	0.9990	0.9999	0.9326	0.9329	0.7893	0.7889
2	0.8294	0.8697	0.8766	0.8206	0.7934	0.5949	0.5949
3	0.6203	0.7800	0.7195	0.6461	0.6461	0.6490	0.6852
4	0.8656	0.9406	0.9406	0.8854	0.9036	0.9085	0.9085
5	0.9489	0.9762	0.9770	0.6706	0.7463	0.9562	0.9562
6	0.9034	0.9396	0.8980	0.8970	0.8970	0.8950	0.9132



รูป 5.15 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองอัตราการรั่วไหลของข้อมูลทั้ง 6 ชุด



รูป 5.16 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 7 แบบ สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุด

จากการเปรียบเทียบค่า R^2 ดังตารางที่ 5.8 และรูปที่ 5.15 ของการพืดอัดราการใช้แก๊สออกซิเจนของผักและผลไม้สดต่าง ๆ 6 ชนิดด้วยแบบจำลองอัดราการหายใจทั้ง 7 แบบ พบว่า ถ้าพิจารณาที่ละชุดข้อมูล จะเห็นได้ว่าแบบจำลองอัดราการหายใจแบบใด ๆ สามารถพืดข้อมูลชุดหนึ่ง ๆ ได้ในระดับที่ใกล้เคียงกัน เช่น สำหรับข้อมูลชุดที่ 1 ทุกแบบจำลองอัดราการใช้แก๊สออกซิเจนให้ค่า R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 90-100 หรือสำหรับข้อมูลชุดที่ 6 ทุกแบบจำลองให้ค่า R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 60-75 แต่จะสังเกตเห็นว่า แบบจำลองอัดราการใช้แก๊สออกซิเจนแบบโพลีโนเมียล (แบบที่ 2) และแบบเอกโปเนนเชียล (แบบที่ 3) จะให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองแบบอื่น ๆ เล็กน้อย และถ้าพิจารณาที่ละแบบจำลองจะเห็นได้ว่าแบบจำลองหนึ่ง ๆ สามารถพืดข้อมูลแต่ละชุดได้ดีไม่เท่ากัน เช่น แบบจำลองอัดราการหายใจแบบเส้นตรง (แบบที่ 1) พืดข้อมูลชุดที่ 1, 3, 4 และ 5 ได้ดี แต่พืดข้อมูลชุดที่ 2, 6 ได้พอใช้ สำหรับแบบจำลองชุดอื่น ๆ ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน

และจากการเปรียบเทียบค่า R^2 ดังตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.16 ของการพืดอัดราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเมื่อพิจารณาที่ละชุดข้อมูล ส่วนใหญ่แล้วค่า R^2 ของแบบจำลองทั้ง 7 แบบที่นำมาพืดให้ผลใกล้เคียงกัน ยกเว้นแต่แบบจำลองอัดราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบไมเคิลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 6) และแบบจำลองแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7) ของข้อมูล 1 และ 2 และแบบจำลองอัดราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบไมเคิลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 4) และแบบนอนคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 5) ของข้อมูล 5 เท่านั้นที่ให้ค่า R^2 แตกต่างไปจากแบบจำลองแบบอื่น ๆ ในชุดข้อมูลเดียวกัน และถ้าพิจารณาที่ละแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าแบบจำลองหนึ่ง ๆ สามารถพืดข้อมูลแต่ละชุดได้ดีไม่เท่ากัน เช่น แบบจำลองอัดราการหายใจแบบเส้นตรง (แบบที่ 1) พืดข้อมูลชุดที่ 1, 2, 4, 5 และ 6 ได้ดี แต่พืดข้อมูลชุดที่ 3 ได้พอใช้ แต่จะสังเกตเห็นว่า แบบจำลองอัดราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบโพลีโนเมียล (แบบที่ 2) และแบบเอกโปเนนเชียล (แบบที่ 3) จะให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบอื่น ๆ เล็กน้อยเช่นกัน

กล่าวโดยสรุปได้ว่าแบบจำลองอัตราการใช้แก๊สออกซิเจนและการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 7 แบบสามารถใช้พิดข้อมูลอัตราการใช้แก๊สออกซิเจนและอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 6 ชุดได้ดีใกล้เคียงกันเพราะค่า R^2 ที่ได้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน แม้ว่าแบบจำลองอัตราการหายใจแบบแบบโพลีโนเมียล (แบบ 2) และแบบเอกโปเนนเชียล (แบบ 3) จะให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบอื่น ๆ บ้างเล็กน้อย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำแบบจำลองอัตราการหายใจทั้ง 7 แบบนี้ไปใช้ในขั้นการคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ต่อไป



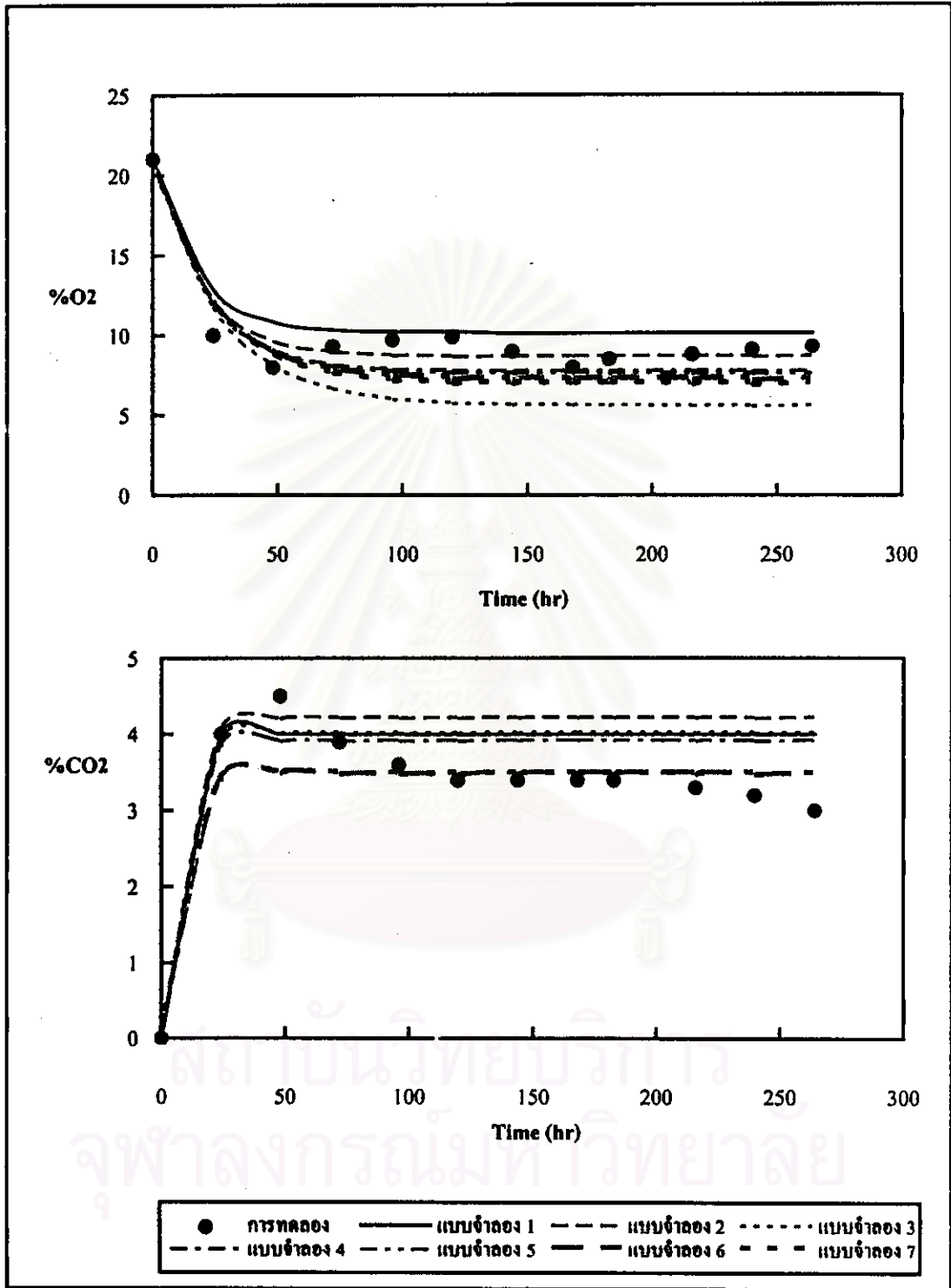
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2. ผลการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP เมื่อใช้แบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบ

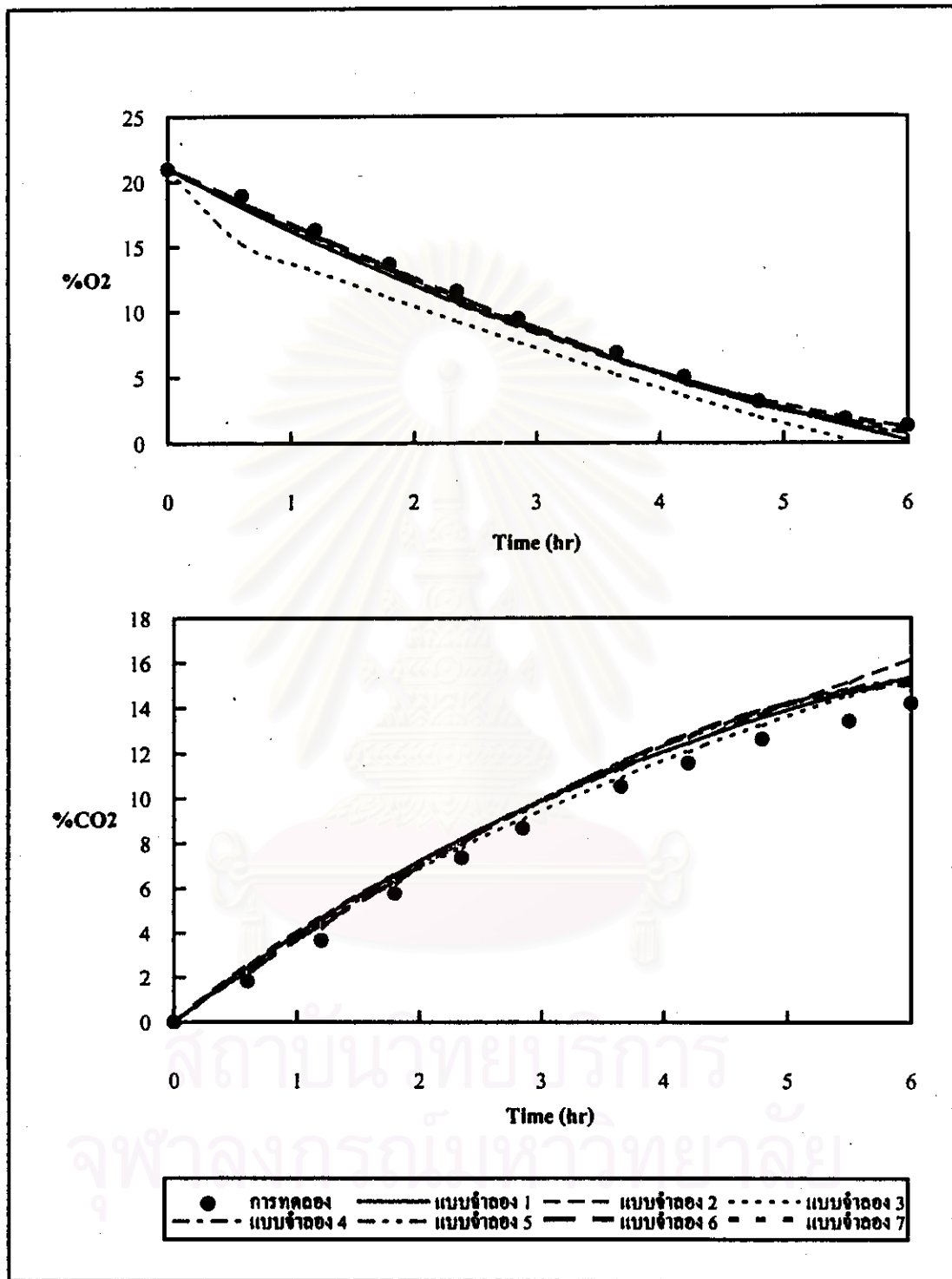
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการ 4.17 และ 4.18) สำหรับคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP เทียบกับเวลาเมื่อพจน์อัตราการหายใจได้ถูกแทนด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ ตามความเหมาะสม

ได้ถูกนำมาคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามขั้นตอนและวิธีที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.2.4 ถึง 4.2.2.5 ผลการคำนวณที่ได้ถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองทั้ง 6 ชุดดังแสดงในตารางที่ ค.7 ถึง ค.12 ในภาคผนวก ค. และแสดงดังในรูปที่ 5.17 ถึง 5.22 ตามลำดับ

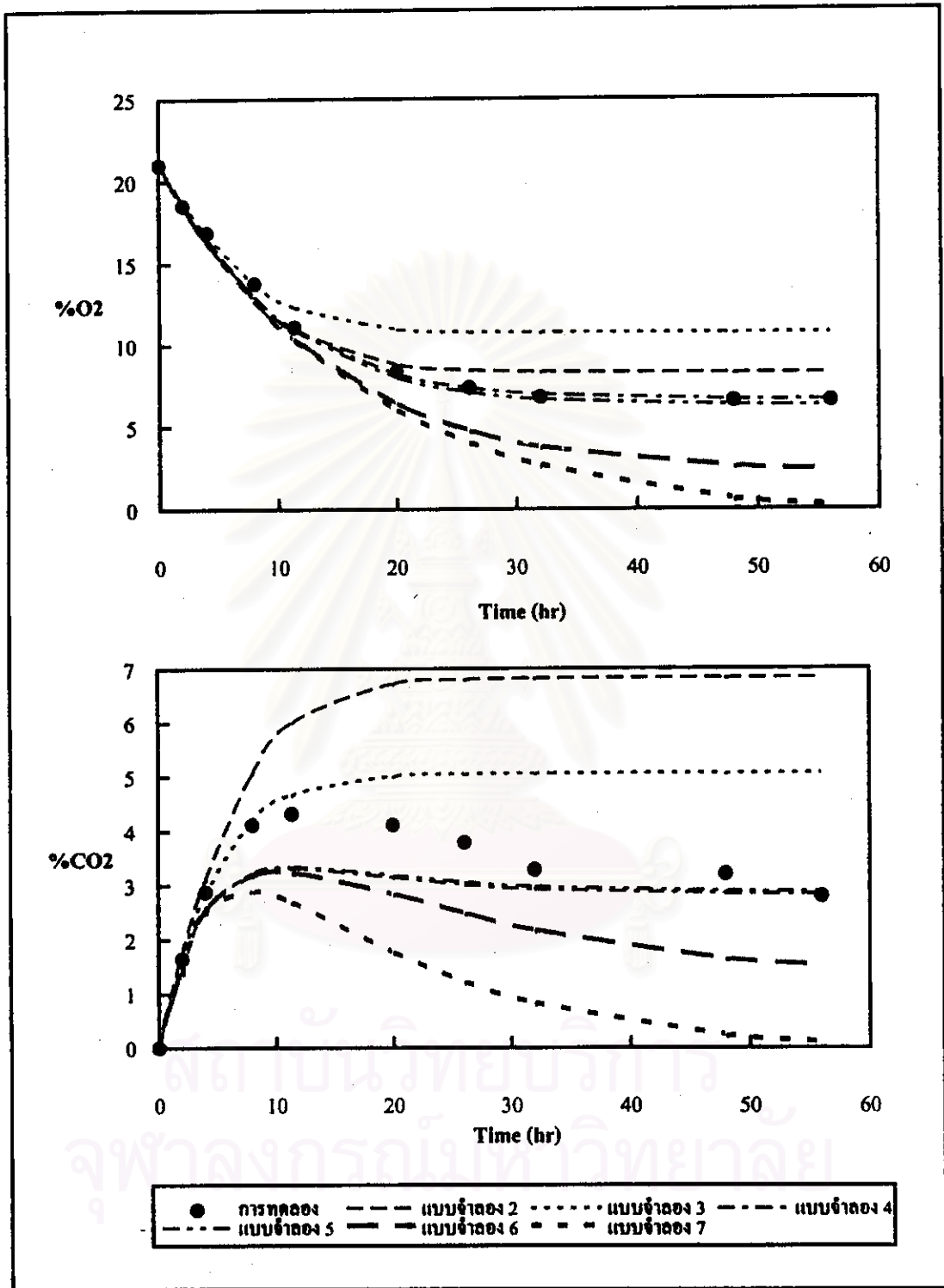
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) (ตามสมการ (4.28)) ที่คำนวณได้จากการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP กับค่าจากการทดลองได้ถูกแสดงไว้ในตาราง 5.10 ถึง 5.11 ตามลำดับ และได้ถูกนำมาเปรียบเทียบโดยกราฟแท่งดังรูป 5.23 ถึง 5.24 สำหรับอัตราการใช้แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP เมื่อใช้แบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบกับข้อมูลทั้ง 6 ชุด



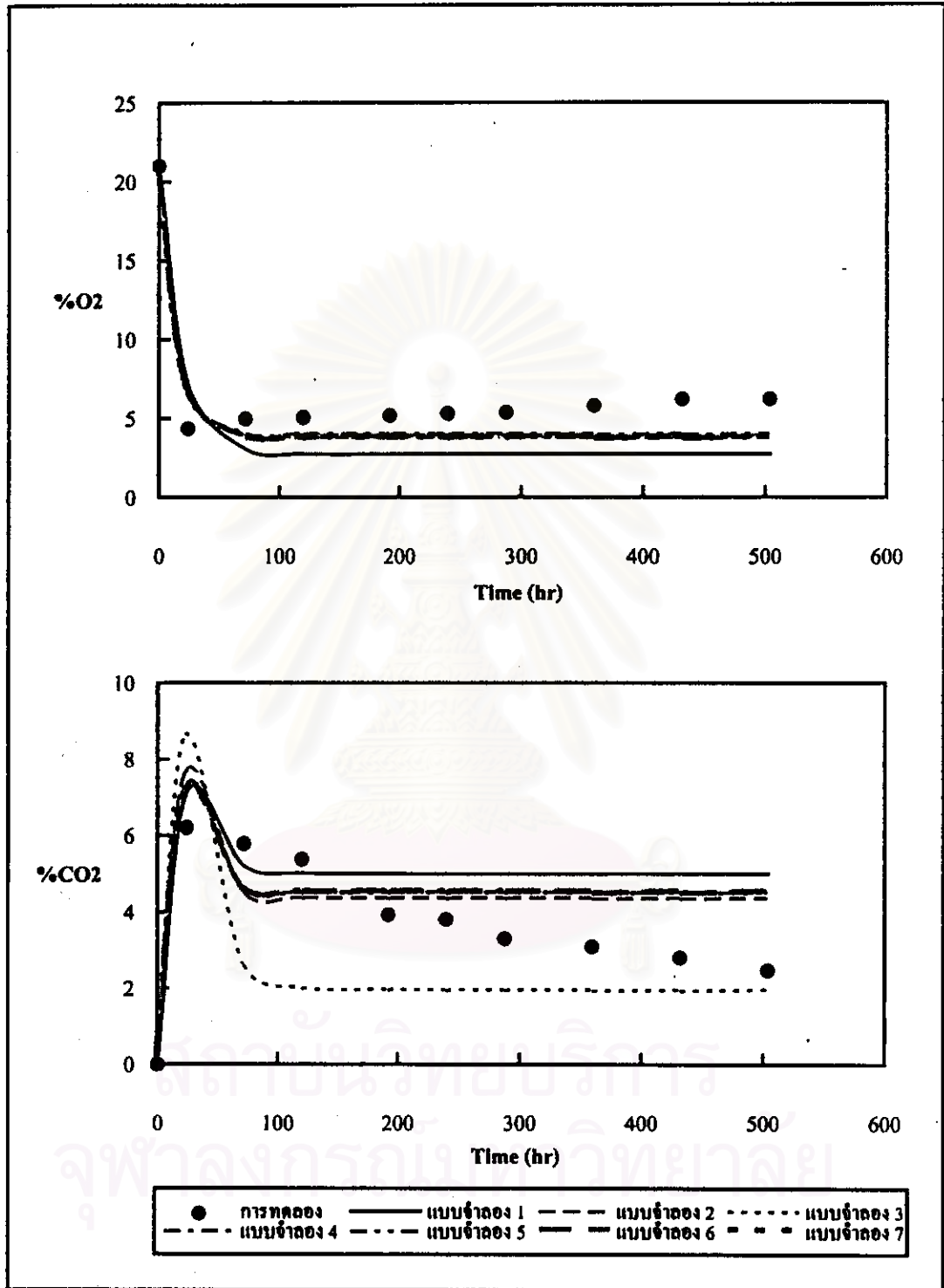
รูป 5.17 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของ
 แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP
 ของข้อมูล 1



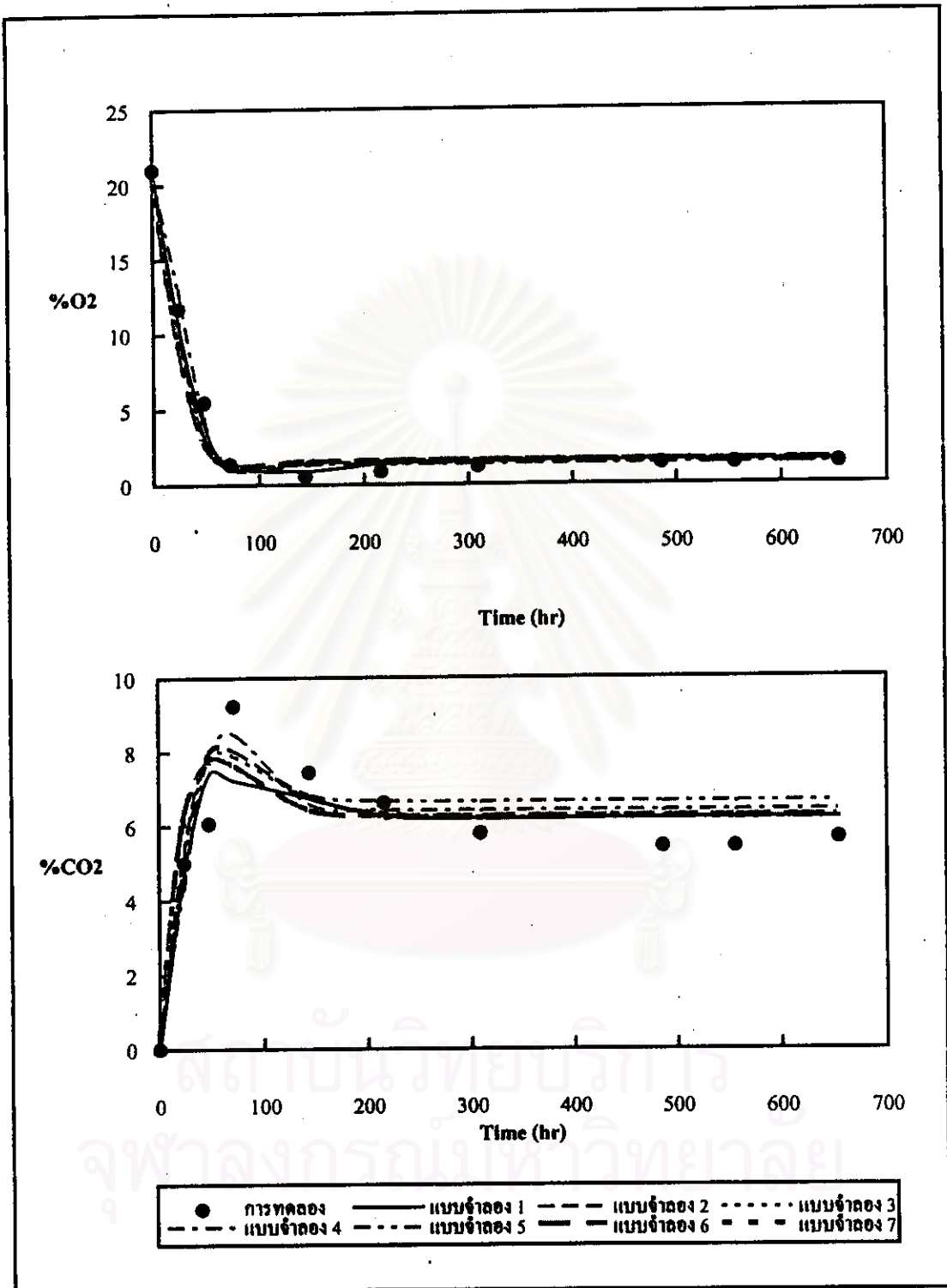
รูป 5.18 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของ
แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP
ของข้อมูล 2



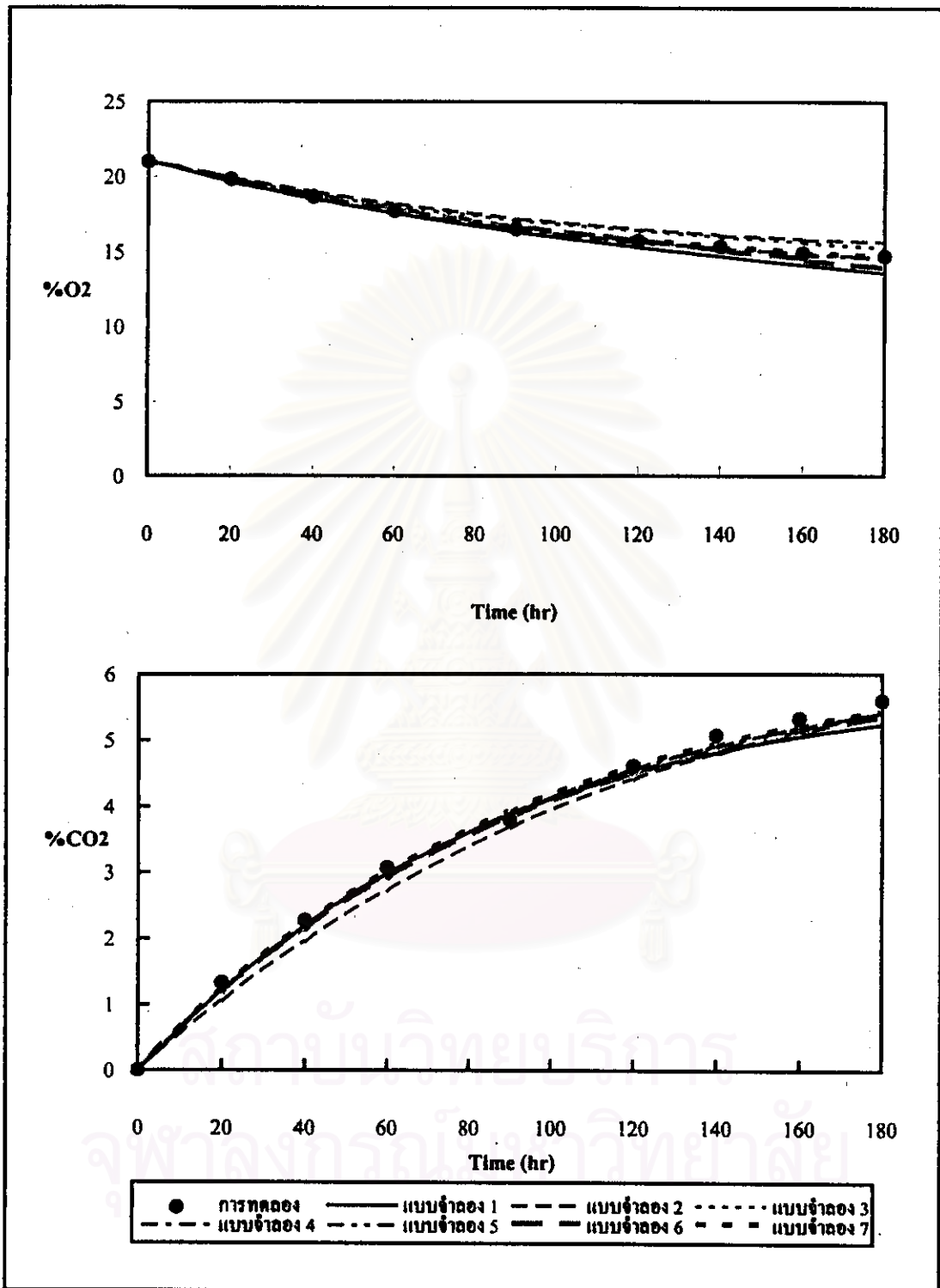
รูป 5.19 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของ แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของข้อมูล 3



รูป 5.20 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของ
แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP
ของข้อมูล 4



รูป 5.21 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของ
 แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP
 ของข้อมูล 5



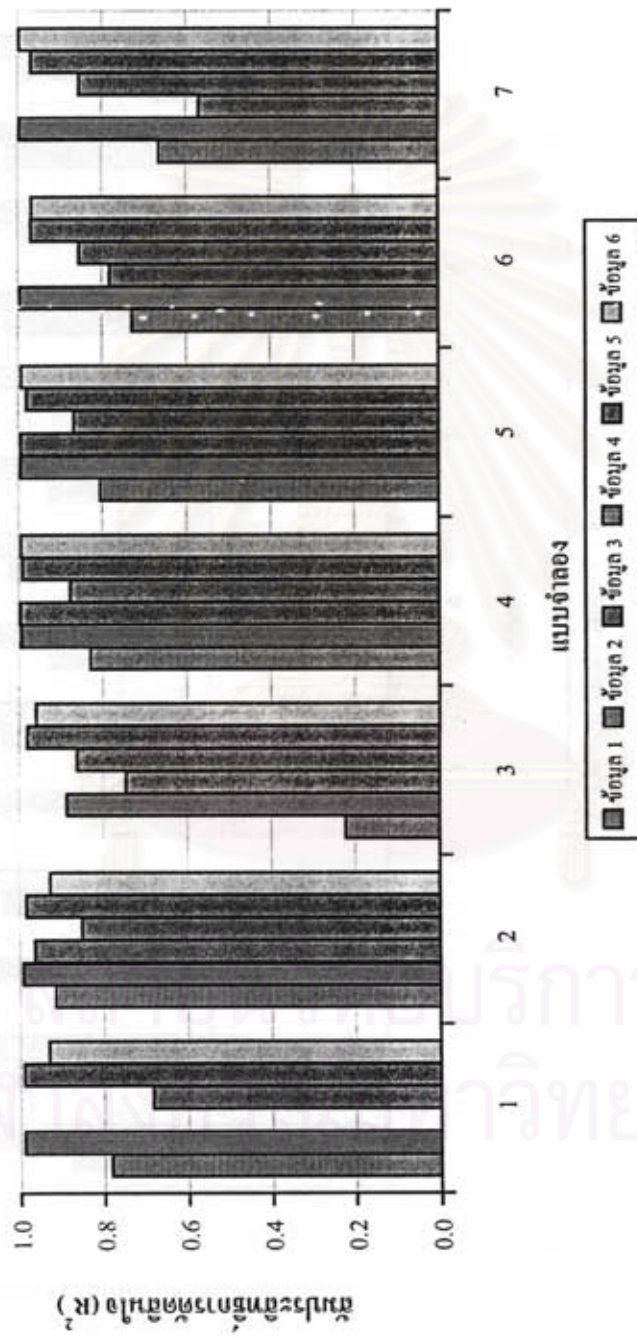
รูป 5.22 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของ
แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP
ของข้อมูล 6

ตาราง 5.10 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของการทำนายความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน
ที่เวลาใด ๆ ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการ
หายใจ 7 แบบ

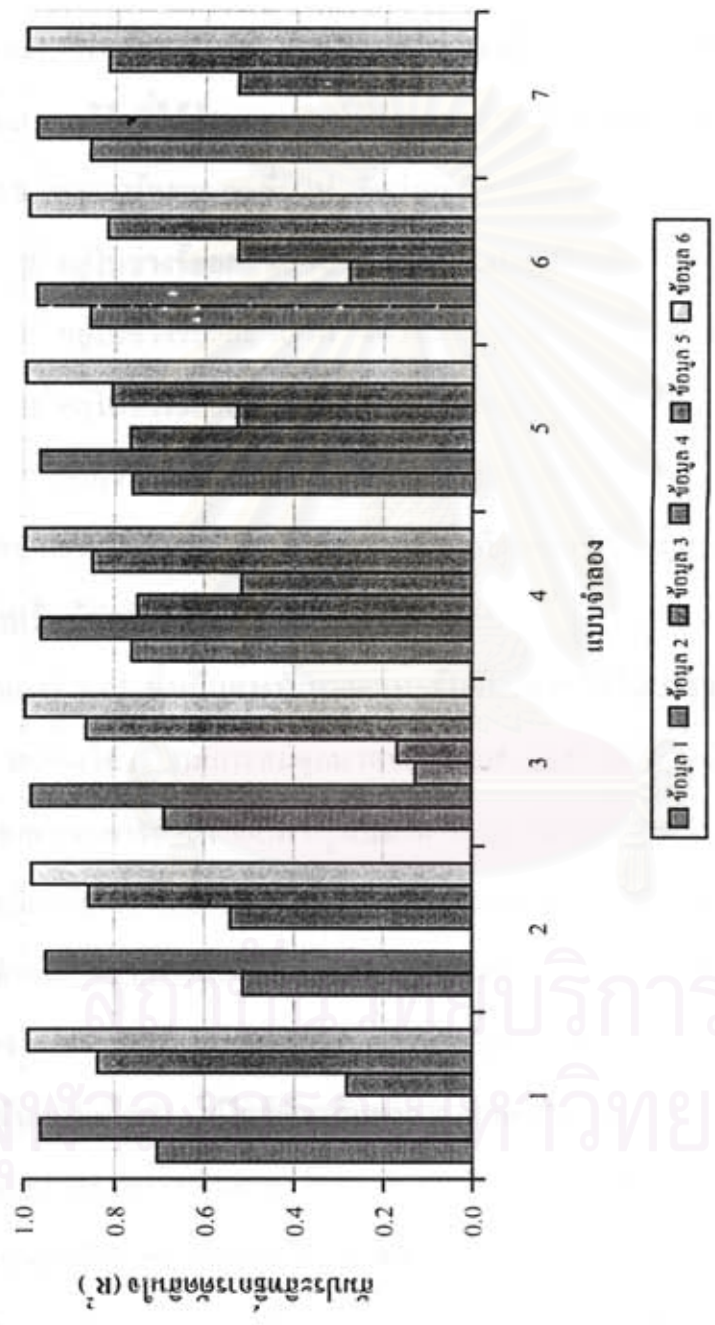
ข้อมูลที่	R^2 ของแต่ละแบบจำลอง						
	แบบ 1	แบบ 2	แบบ 3	แบบ 4	แบบ 5	แบบ 6	แบบ 7
1	0.7821	0.9142	0.2223	0.8288	0.8047	0.7284	0.6626
2	0.9890	0.9913	0.8868	0.9940	0.9943	0.9957	0.9957
3	-	0.9642	0.7457	0.9962	0.9938	0.7812	0.5694
4	0.6830	0.8510	0.8610	0.8770	0.8670	0.8540	0.8540
5	0.9901	0.9842	0.9802	0.9911	0.9804	0.9686	0.9686
6	0.9312	0.9270	0.9590	0.9940	0.9920	0.9670	0.9970

ตาราง 5.11 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่
ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบ

ข้อมูลที่	R^2 ของแต่ละแบบจำลอง						
	แบบ 1	แบบ 2	แบบ 3	แบบ 4	แบบ 5	แบบ 6	แบบ 7
1	0.7052	0.5148	0.6894	0.7616	0.7610	0.8547	0.8548
2	0.9626	0.9505	0.9817	0.9609	0.9643	0.9717	0.9715
3	-	0.0000	0.1266	0.7475	0.7654	0.2773	0.0000
4	0.2820	0.5420	0.1677	0.5170	0.5280	0.5270	0.5270
5	0.8367	0.8560	0.8610	0.8472	0.8058	0.8160	0.8160
6	0.9890	0.9810	0.9940	0.9940	0.9940	0.9880	0.9950



รูป 5.23 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบสำหรับการ
ทำนายความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนภายในบรรยากาศที่เวลาใด ๆ สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุด



รูป 5.24 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองทางเทคนิคศาสตร์ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบสำหรับการ
 ทำนายความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ภายในบรรยากาศที่เวลาใด ๆ สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุด

การเปรียบเทียบผลการคำนวณความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศตัดแปร (MAP) ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP เมื่อใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ 7 แบบ กับผลการทดลองของงานวิจัยทั้ง 6 ชุด โดยใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นตัวแปรในการพิจารณานั้น งานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์พิจารณาความแม่นยำออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

ถ้า R^2 สูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ดีมาก

R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 80-90 จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ดี

R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 70-80 จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง

R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 60-70 จัดว่าอยู่ในเกณฑ์พอใช้

R^2 ต่ำกว่าร้อยละ 60 ลงมา จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำ

จากเกณฑ์ข้างต้นสามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบผลทีละข้อมูลได้ดังนี้

สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

จากรูป 5.17 ซึ่งเป็นการทำนายความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของแอปเปิ้ล จะเห็นได้ว่า สมการสมมูลมวลของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจสำหรับแก๊ส O_2 แบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ได้ในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง และจากการเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการสมมูลมวลที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแต่ละแบบ (จากตาราง 5.10) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบโพลีโนเมียล (แบบที่ 2) จะทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ($R^2 = 0.9142$) รองลงมาคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 4) แบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 5) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดี ถัดมาคือแบบจำลองแบบเส้นตรง (แบบที่ 1) และแบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 6) ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตรา

การหายใจแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7) จะทำนายได้อยู่ในเกณฑ์พอใช้ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบเอกโปเนนเชียล (แบบที่ 3) ให้ความแม่นยำในการทำนายต่ำสุดและจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ($R^2 = 0.2223$)

สำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ (ดูรูป 5.17) จะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ นั้นให้ความเข้มข้นของ CO_2 โดยรวมมีทิศทางคล้ายกับผลการทดลอง แต่จะสังเกตเห็นว่า ผลจากการคำนวณให้การเปลี่ยนแปลงในช่วงคืน ๆ แตกต่างจากผลการทดลองคือ ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 จากผลการทดลองจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดก่อนแล้วความเข้มข้นจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล แต่ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่ได้จากการคำนวณจะไม่มีค่าสูงสุด ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ข้อมูลอัตราการหายใจที่นำมาใช้พิดแบบจำลองอัตราการหายใจไม่มีความละเอียดเพียงพอ ซึ่งทำให้ความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ในข้อมูลนี้มีความแม่นยำไม่อยู่ในเกณฑ์ดีมาก (ดูตาราง 5.11) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 6) และแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7) ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดและจัดอยู่ในเกณฑ์ดี ($R^2 = 0.8547$ และ 0.8548) รองลงมาคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 4) แบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 5) และแบบเส้นตรง (แบบที่ 1) ตามลำดับซึ่งให้ความแม่นยำในการทำนายอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ถัดมาคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบเอกโปเนนเชียล (แบบที่ 3) ให้ความแม่นยำในการทำนายอยู่ในเกณฑ์พอใช้ ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบโพลิโนเมียล (แบบที่ 2) ให้ความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ต่ำ

ดังนั้น เมื่อพิจารณาทั้งแก๊ส O_2 และ CO_2 ร่วมกันแล้วจะสามารถจัดลำดับความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊สที่เวลาใด ๆ ได้ดังนี้คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ

MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบไม่เกิดลิสเมนเทนชนิดมีการขับขี้แบบอันคอมเพททิฟ (แบบที่ 4) แบบไม่เกิดลิสเมนเทนชนิดมีการขับขี้แบบนอนคอมเพททิฟ (แบบที่ 5) แบบไม่เกิดลิสเมนเทนชนิดมีการขับขี้แบบคอมเพททิฟ (แบบที่ 6) และแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7) ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดและจัดอยู่ในเกณฑ์ดี รองลงมาคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบเส้นตรง (แบบที่ 1) และแบบโพลีโนเมียล (แบบที่ 2) ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบเอกโปเนนเชียล (แบบที่ 3) จะให้ความแม่นยำในการทำนายต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบอื่น ๆ ขอให้สังเกตว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบโพลีโนเมียล (แบบที่ 2) ทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ที่เวลาใด ๆ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมาก แต่ให้ความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ อยู่ในเกณฑ์ต่ำ และในทางกลับกันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7) ให้ผลการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ อยู่ในเกณฑ์ดี แต่ให้ผลการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ที่เวลาใด ๆ อยู่ในเกณฑ์พอใช้ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบโพลีโนเมียล (แบบที่ 2) และแลงเมียร์ (แบบที่ 7) จึงไม่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีความแม่นยำในการทำนายมากที่สุด

สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

จากรูป 5.18 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ MAP สำหรับบรรจุเนื้อสัตว์หั่นระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง โดยผลการทดลองของข้อมูลชุดนี้จะมีเฉพาะช่วงแรกของการบรรจุเท่านั้น เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ที่ทำการทดลองถูกออกแบบไม่เหมาะสมจึงทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้แก๊ส O_2 เกิดขึ้นภายหลังการบรรจุเพียง 6 ชั่วโมง [25] จากการเปรียบเทียบพบว่าการเปลี่ยนแปลงช่วงต้นนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของ

แก๊ส O_2 ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมาก (R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 99) ยกเว้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 3 ที่ให้ความแม่นยำต่ำกว่าเล็กน้อย ($R^2 = 0.8868$)

และสำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ จะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ นั้นสามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมากเช่นกัน (R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 95-97)

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าสมการสมมูลมวลที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ ในช่วงต้น ๆ ของการบรรจุได้ดีมาก

สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

จากรูป 5.19 ซึ่งเป็นการทำนายความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของมะเขือเทศแบบฟิล์ม จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ที่เวลาใด ๆ ได้ในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแต่ละแบบ (ดูตาราง 5.10) พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 4 แบบ 5 และแบบ 2 สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ($R^2 = 0.9962$ 0.9938 และ 0.9642 ตามลำดับ) รองลงมาคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 3 และแบบ 6 ซึ่งให้ความแม่นยำในการทำนายอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ($R^2 = 0.7457$ และ 0.7812 ตามลำดับ) ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 7 ให้ความแม่นยำในการทำนายต่ำสุดและจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ($R^2 = 0.5694$)

สำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ จะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ นั้นสามารถทำนายความเข้มข้นของ CO_2 ที่เวลาใด ๆ มีทิศทางคล้ายกับผลการทดลอง คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อย ๆ เข้าสู่สมดุล แต่จะสังเกตเห็นว่า ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 จากผลการทดลองจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดก่อนแล้วความเข้มข้นจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลเหมือนกับผลการทดลองของข้อมูล 1 แต่ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่ได้จากการคำนวณไม่มีค่าสูงสุด ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ข้อมูลอัตราการหายใจที่นำมาใช้ฝึกแบบจำลองอัตราการหายใจไม่มีความละเอียดเพียงพอ [19] จึงทำให้ความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ในข้อมูลนี้มีความแม่นยำไม่อยู่ในเกณฑ์ดีมาก จากการเปรียบเทียบความแม่นยำของการทำนายความเข้มข้นของ CO_2 ที่เวลาใด ๆ (ดูตาราง 5.11) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 4 และแบบ 5 ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองจัดอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ($R^2 = 0.7475$ และ 0.7675 ตามลำดับ) ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบอื่น ๆ ทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ในบรรทัดต่างจากผลการทดลองมาก ซึ่งให้ความแม่นยำในการทำนายอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (R^2 อยู่ในช่วง $0 - 0.3$)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งแก๊ส O_2 และ CO_2 แล้ว จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 4 และ 5 สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในบรรทัดที่เวลาใด ๆ ได้แม่นยำที่สุด รองลงมาคือสมการสมดุลมวลที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 2 แบบ 6 แบบ 3 และแบบ 7 ตามลำดับ

อนึ่งจะสังเกตเห็นว่า สำหรับข้อมูลชุดนี้ไม่มีผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 1 เพราะว่าการคำนวณนี้ไม่สามารถให้ค่าความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ให้ครอบคลุมเวลาที่ใช้ในการทดลองได้ ซึ่ง

อาจจะมีสาเหตุมาจากแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 1 นี้ถูกนำมาใช้นอกขอบเขตของข้อมูลอัตราการหายใจที่นำมาพิต จึงให้ค่าอัตราการหายใจที่ผิดพลาด

สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

จากรูป 5.20 เป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ MAP สำหรับมะเขือเทศพันธุ์ Sunny ระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง โดยผลการทดลองของข้อมูลชุดนี้จะทำการทดลองในช่วงระยะเวลาถึง 21 วัน ที่ 21^๒ซ และทำการวัดผลในช่วงระยะเวลาค่อนข้างห่างคือ ประมาณ 1 วัน

จากรูป 5.20 ซึ่งเป็นการทำนายความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของมะเขือเทศพันธุ์ Sunny จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ที่เวลาใด ๆ ได้ในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง และจากการเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแต่ละแบบ (ดูตาราง 5.10) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 2 ถึงแบบ 7 ทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดี (R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 85-88) ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบ 1 ให้ความแม่นยำในการทำนายอยู่ในเกณฑ์พอใช้ ($R^2 = 0.6830$)

แต่สำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ (ดูรูป 5.20) จะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ ให้แนวโน้มในช่วงต้น ๆ ของการบรรจุคล้ายกับผลการทดลอง แต่แนวโน้มในช่วงหลังจากการบรรจุนาน ๆ จะต่างจากผลการทดลอง คือความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่ได้จากการทดลองจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดแล้วความเข้มข้นจึงค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ ตลอดการบรรจุ ส่วนผลการคำนวณนั้นความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 จะเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดเช่นกัน แต่ความเข้มข้นจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของผลการ

สมมูลมวลที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ จึงอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ (R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 50) (ดูตาราง 5.11)

ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าอัตราการหายใจนั้นไม่ได้ขึ้นกับเพียงแก๊ส O_2 และ CO_2 แต่ยังขึ้นกับปัจจัยภายในของผลไม้เช่น ความแก่อ่อนของผลไม้ด้วย และเมื่อระยะเวลาในการศึกษาของการทดลองในข้อมูลนี้นานถึง 21 วัน มะเขือเทศได้เปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่เริ่มบรรจุ (มะเขือเทศขณะเริ่มแก่) จนกระทั่งถึงสุกเต็มที่ แต่อัตราการหายใจที่ขึ้นกับความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ที่นำมาใช้นั้นได้ทำการวัดอัตราการหายใจที่ความเข้มข้นของแก๊สต่าง ๆ ในขณะที่มะเขือเทศอยู่ในช่วงเริ่มแก่เท่านั้น ดังนั้นเมื่อทำการทำนายผลในช่วงระยะเวลาการบรรจุนาน ๆ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ จึงทำนายความเข้มข้นของแก๊สที่เปลี่ยนแปลงไปในบรรจุภัณฑ์ไม่ค่อยตรงกับผลการทดลอง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจที่เป็นฟังก์ชันกับแก๊ส O_2 และ CO_2 ไม่สามารถใช้ในการทำนายความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ได้เมื่อผักและผลไม้สดมีสภาพทางกายภาพแตกต่างไปจากสภาพในขณะที่เก็บข้อมูลอัตราการหายใจ

สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

จากรูป 5.21 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ MAP สำหรับบรอกเคอส์พันธุ์มารารอนระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมาก โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจทุก ๆ แบบให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 96 - 99 (ดูตาราง 5.10)

สำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ นั้นทำนายความเข้มข้นของ CO_2 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง คือความเข้มข้นของ CO_2 จะเพิ่มอย่างรวดเร็วใน

ช่วงแรก ๆ จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดแล้วจึงค่อย ๆ ลดลงมาจนกระทั่งคงที่ที่สมดุล และให้ความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของ CO_2 ที่เวลาใด ๆ อยู่ในเกณฑ์ดี (R^2 อยู่ในช่วงร้อยละ 80-85) ทุก ๆ แบบจำลองอัตราการหายใจ (ดูตาราง 5.11)

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในบรรทัดของข้อมูลนี้ได้อยู่ในเกณฑ์ดีใกล้เคียงกันทุกแบบจำลองอัตราการหายใจ

สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

จากรูป 5.22 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรทัด MAP สำหรับพืชแบบ Crest Haven ระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ที่เวลาใด ๆ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมาก โดยสมการสมดุลมวลที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจทุก ๆ แบบให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 90 - 99 (ดูตาราง 5.10)

สำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เวลาใด ๆ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมากเช่นเดียวกัน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจทุก ๆ แบบให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 98 - 99 (ดูตาราง 5.11)

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในบรรทัดของข้อมูลนี้ได้อยู่ในเกณฑ์ดีมากใกล้เคียงกันทุกแบบจำลองอัตราการหายใจ

จากการพิจารณาผลการคำนวณและการศึกษาข้างต้นที่ได้จากงานวิจัยนี้ดังที่อธิบายมาแล้วนี้ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP สามารถใช้ทำนายแนวโน้มความเข้มข้น

ของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ตั้งแต่เริ่มต้นบรรจุจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลได้ดี ยกเว้นในกรณีที่ผักและผลไม้สดที่ถูกบรรจุเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือผักและผลไม้สดที่บรรจุเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพจากเริ่มบรรจุมากเกินไป และผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของการใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ ในพจน์อัตราการหายใจของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ของการทำนายความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ของทั้ง 6 ข้อมูลสามารถสรุปได้ดังตาราง 5.12

ตาราง 5.12 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊สของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ ของ 6 ข้อมูล

ข้อมูล	ความแม่นยำของผลการคำนวณเมื่อใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแต่ละแบบ						
	แบบ 1	แบบ 2	แบบ 3	แบบ 4	แบบ 5	แบบ 6	แบบ 7
1	ปานกลาง	ปานกลาง	พอใช้	ดี	ดี	ดี	ดี
2	ดีมาก	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
3	-	ปานกลาง	พอใช้	ดี	ดี	พอใช้	ต่ำ
4	ต่ำ	ปานกลาง	พอใช้	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
5	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
6	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก

จากตาราง 5.12 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองอัตราการหายใจมีผลต่อความสามารถในการทำนายความเข้มข้นของแก๊สที่เวลาใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP และพบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสมันเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 4) และแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสมันเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 5) เป็นแบบจำลองอัตราการหายใจที่เมื่อนำไปใช้แทนใน

พจน์อัตราการหายใจในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP แล้วจะได้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับผลการทดลองโดยรวมมากที่สุด รองลงมาคือ แบบจำลองอัตราการหายใจแบบไม่เกิดลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 6) แบบจำลองอัตราการหายใจแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7) แบบจำลองอัตราการหายใจแบบโพลิโนเมียล (แบบที่ 2) ส่วนแบบจำลองอัตราการหายใจแบบเส้นตรง (แบบที่ 1) และแบบเอกโปเนนเชียล (แบบที่ 3) ให้ความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊สในบรรยากาศต่ำสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการหายใจของผักและผลไม้สดเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีหลายปฏิกิริยา ซึ่งส่วนใหญ่แล้วปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีเอนไซม์เป็นตัวกระตุ้นตั้งต้นที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 จึงคาดว่าสมการไม่เกิดลิสเมนเทนซึ่งอธิบายปฏิกิริยาเอนไซม์ (enzyme reactions) สามารถจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดได้ดีเช่นกัน [10] ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณในงานวิจัยนี้ แม้ว่าค่าความแม่นยำของผลการพิตอัตราการหายใจจากแบบจำลองอัตราการหายใจกลุ่มไม่เกิดลิสเมนเทนจะไม่ให้ผลที่ดีที่สุด ส่วนแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 2 และแบบที่ 3 แม้ว่าให้ค่าความแม่นยำของผลการพิตอัตราการหายใจสูงกว่าแบบอื่น ๆ แต่เมื่อนำมาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP แล้วกลับพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ไม่ได้ให้ค่าความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊สในบรรยากาศใกล้เคียงกับผลการทดลองมากนักเมื่อเทียบกับแบบจำลองอัตราการหายใจกลุ่มไม่เกิดลิสเมนเทน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในการคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สในบรรยากาศที่เวลาใด ๆ นั้นต้องใช้แบบจำลองอัตราการหายใจที่พิตได้นั้น นอกขอบเขตของข้อมูลอัตราการหายใจที่นำมาพิต ดังเห็นได้จากรูป 5.1 ถึง 5.14 ที่เป็นตัวอย่างกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองอัตราการหายใจทั้ง 7 แบบ จะเห็นว่าอัตราการหายใจที่ถูกพิตโดยรูปสมการแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7) ให้รูปกราฟที่มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับแบบไม่เกิดลิสเมนเทน ทำให้แบบจำลองแบบนี้สามารถทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงของแก๊สในบรรยากาศได้ค่อนข้างดีเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวของแบบ

จำลองอัตราการใช้แบบเส้นตรง แบบพหุนาม และแบบเอกโปเนนเชียลแล้วพบว่า
รูปกราฟความสัมพันธ์ที่ได้มีแนวโน้มที่แตกต่างไปจากแบบไม่เกิดลิสแมนเทน ซึ่งถ้าเกิดการ
ใช้อัตราการใช้นอกข้อมูลที่นำมาพิดแล้วอาจทำให้ได้ค่าอัตราการใช้ไม่ถูกต้องนัก จึง
ทำให้ไม่สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊สได้ถูกต้องเท่าที่ควรจะเป็น



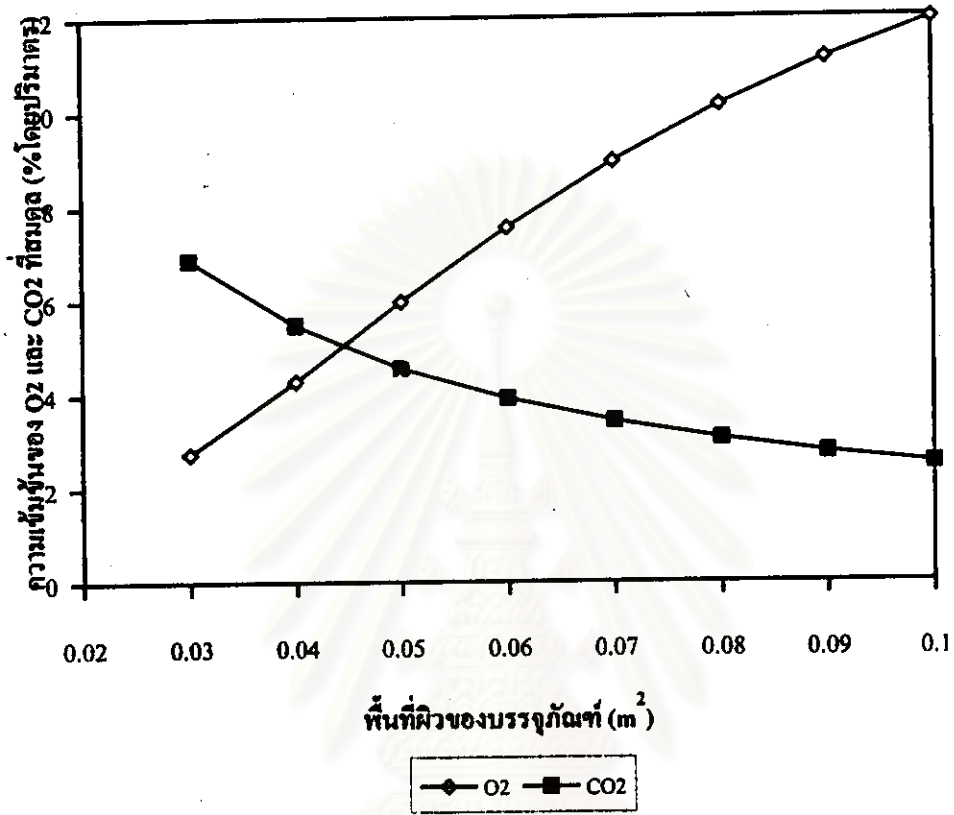
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรบรรจุภัณฑ์ต่อบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สด

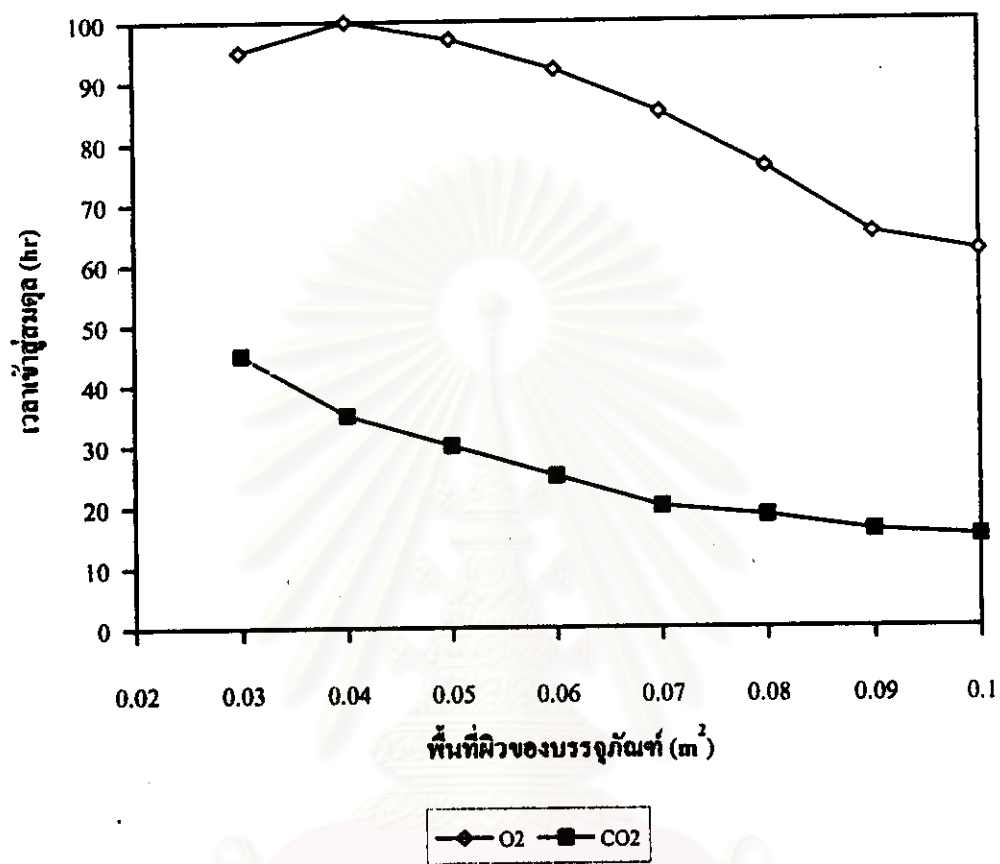
แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบสมการไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทิฟ (แบบที่ 4) ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรในส่วนนี้ เพื่อหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ การนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบสมการไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทิฟมาใช้ในการศึกษาส่วนนี้ เนื่องจากผลการศึกษาในหัวข้อ 5.2 ซึ่งให้เห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบสมการไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทิฟ (แบบที่ 4) และแบบนอนคอมเพทิทิฟ (แบบที่ 5) นี้เป็นสมการที่ให้ความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ที่เวลาต่าง ๆ สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุดได้ดีที่สุด

5.3.1 ผลกระทบของพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (A)

ผลกระทบของพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (A) ต่อการบรรจุแบบ MAP ของผักและผลไม้สดแสดงได้ดังรูปที่ 5.25 และ 5.26 ตามลำดับ รูป 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์กับความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล และรูป 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล



รูป 5.25 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของบรรจุกิ่งชำกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)



รูป 5.26 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของบรรจุกัญช์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)

จากรูป 5.25 จะเห็นได้ว่า เมื่อพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (A) เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุล ($\%O_{2(eq)}$) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล ($\%CO_{2(eq)}$) ลดลงอย่างชัดเจน (สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.25 พบว่า เมื่อพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์เพิ่มจาก 0.03 ตร.ม. ไปเป็น 0.1 ตร.ม. ทำให้ $\%O_{2(eq)}$ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3 ไปเป็นร้อยละ 12 โดยปริมาตร และ $\%CO_{2(eq)}$ ลดลงจากร้อยละ 7 ไปเป็นร้อยละ 3 โดยปริมาตร) ถ้าพิจารณาสมการ (4.19) และ (4.20) ซึ่งเป็นสมการที่สมดุลและทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการ (5.1) และ (5.2) ดังนี้

$$y_O = 0.21 - \frac{WLR_O(y_O, y_C)}{P_{OA}} \quad (5.1)$$

$$y_C = 0.0003 + \frac{WLR_C(y_O, y_C)}{P_{CA}} \quad (5.2)$$

จากสมการทั้งสองนี้ทำให้สามารถคาดการณ์แนวโน้มได้ว่าเมื่อ A เพิ่มขึ้น $\%O_{2(eq)}$ หรือ y_O จะเพิ่มขึ้น และ $\%CO_{2(eq)}$ หรือ y_C จะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Henig และ Gilbert [18] ที่รายงานว่า เมื่อ A เพิ่มขึ้น $\%O_{2(eq)}$ จะเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้จากรูปที่ 5.26 จะเห็นได้ว่า เมื่อ A เพิ่มขึ้น เวลาเข้าสู่สมดุลของทั้งแก๊ส O_2 และ CO_2 จะลดลง (เวลาเข้าสู่สมดุลคือเวลาที่ O_2 และ CO_2 มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 95 ของความเข้มข้นที่สมดุล)

จากผลกระทบของ A ดังที่กล่าวมาแล้วนี้ จะเห็นได้ว่าค่า A มีผลต่อทั้งความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลและเวลาในการใช้เข้าสู่สมดุล ดังนั้นการเลือกรูปแบบของบรรจุภัณฑ์เพื่อให้ได้ค่า A ที่เหมาะสมนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งในการออกแบบบรรจุภัณฑ์

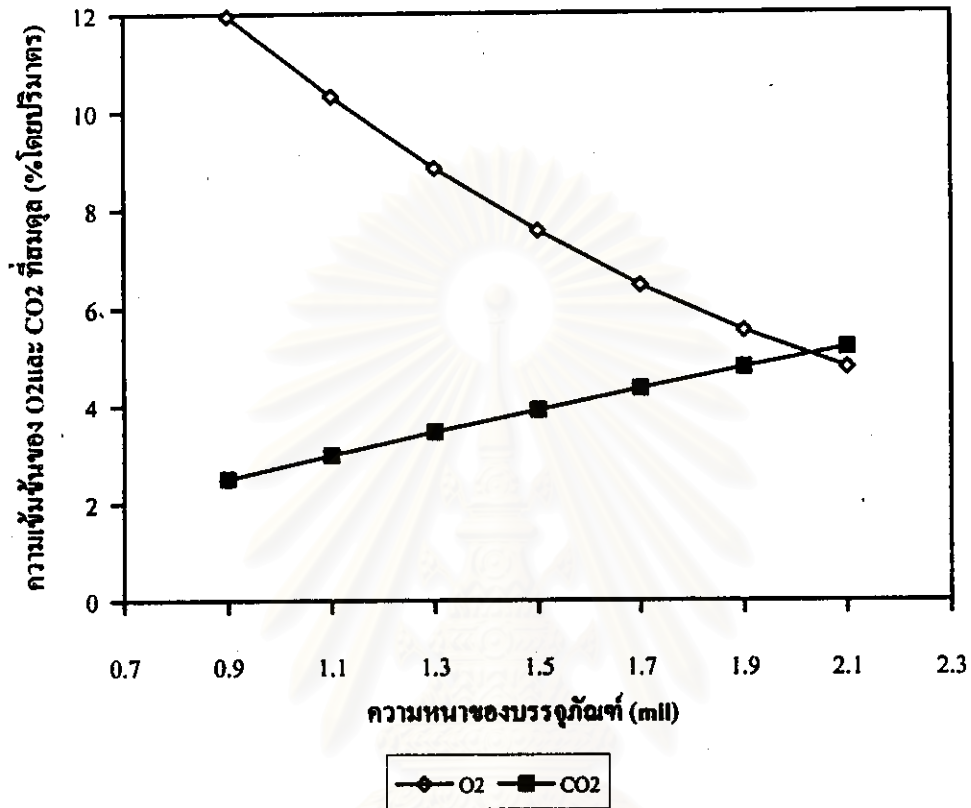
5.3.2. ผลกระทบของความหนาของบรรจุภัณฑ์ (L)

ผลกระทบของความหนาของบรรจุภัณฑ์ (L) ต่อการบรรจุแบบ MAP ของผักและผลไม้สดแสดงได้ดังรูปที่ 5.27 และ 5.28 รูป 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของบรรจุภัณฑ์กับความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล และรูป 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของบรรจุภัณฑ์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล

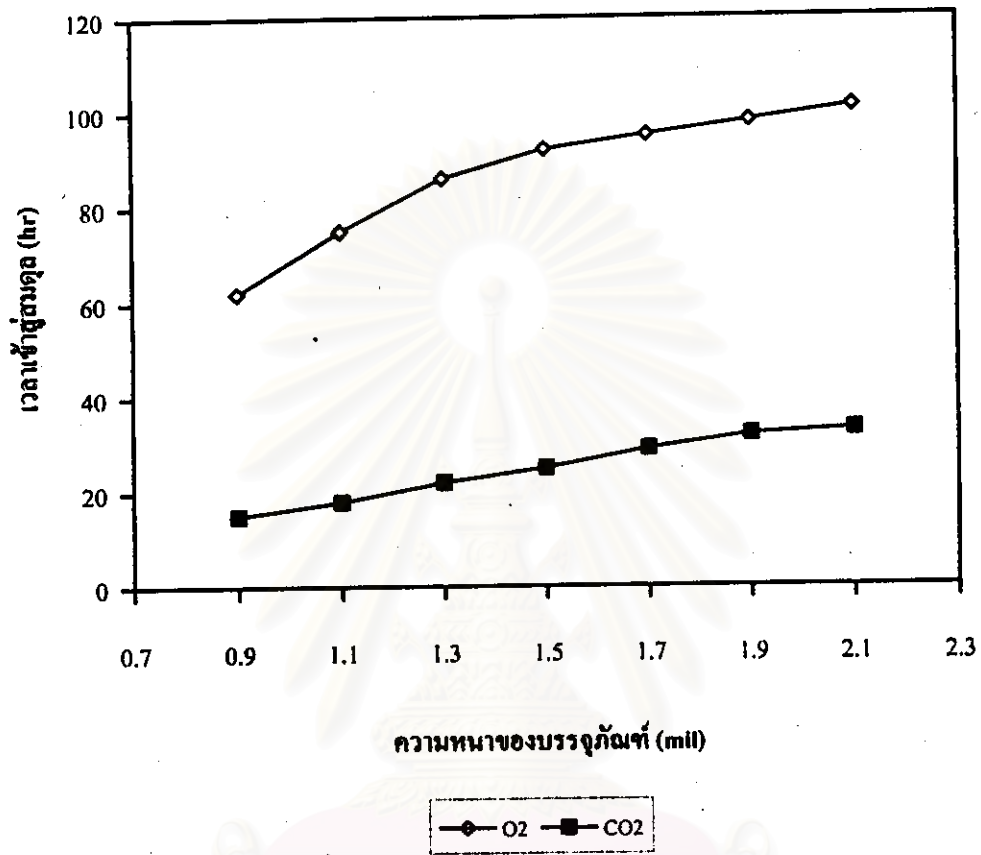
จากรูป 5.27 จะเห็นได้ว่าความหนาของบรรจุภัณฑ์ (L) มีผลต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลในทิศทางตรงข้ามกับพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ คือเมื่อความหนาของบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้น $\%O_{2(eq)}$ มีค่าลดลง ในขณะที่ $\%CO_{2(eq)}$ มีค่าเพิ่มขึ้น และจากรูปจะเห็นได้ว่า L มีผลกระทบต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลอย่างชัดเจน (สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.27 พบว่า เมื่อ L เพิ่มจาก 0.9 มิล (1 มิลเท่ากับ 0.001 นิ้ว) ไปเป็น 2.1 มิล ทำให้ $\%O_{2(eq)}$ ลดลงจากร้อยละ 12 ไปเป็นร้อยละ 4 โดยปริมาตร และ $\%CO_{2(eq)}$ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2 ไปเป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร) ที่เป็นเช่นนี้จะเห็นได้จากสมการที่ (5.1) และ (5.2) ว่าเมื่อ L เพิ่มขึ้น $\%O_{2(eq)}$ หรือ y_O จะมีแนวโน้มลดลง และ $\%CO_{2(eq)}$ หรือ y_C จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้จากรูปที่ 5.28 จะเห็นได้ว่า เมื่อ L เพิ่มขึ้น เวลาเข้าสู่สมดุลของทั้งแก๊ส O_2 และ CO_2 จะเพิ่มขึ้น

จากผลกระทบของ L ดังที่กล่าวมาแล้วนี้ จะเห็นได้ว่าค่า L มีผลต่อทั้งความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลและเวลาในการใช้เข้าสู่สมดุล ดังนั้นการเลือกความหนาที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งในการออกแบบบรรจุภัณฑ์



รูป 5.27 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของบรรจุภัณฑ์กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลจากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)



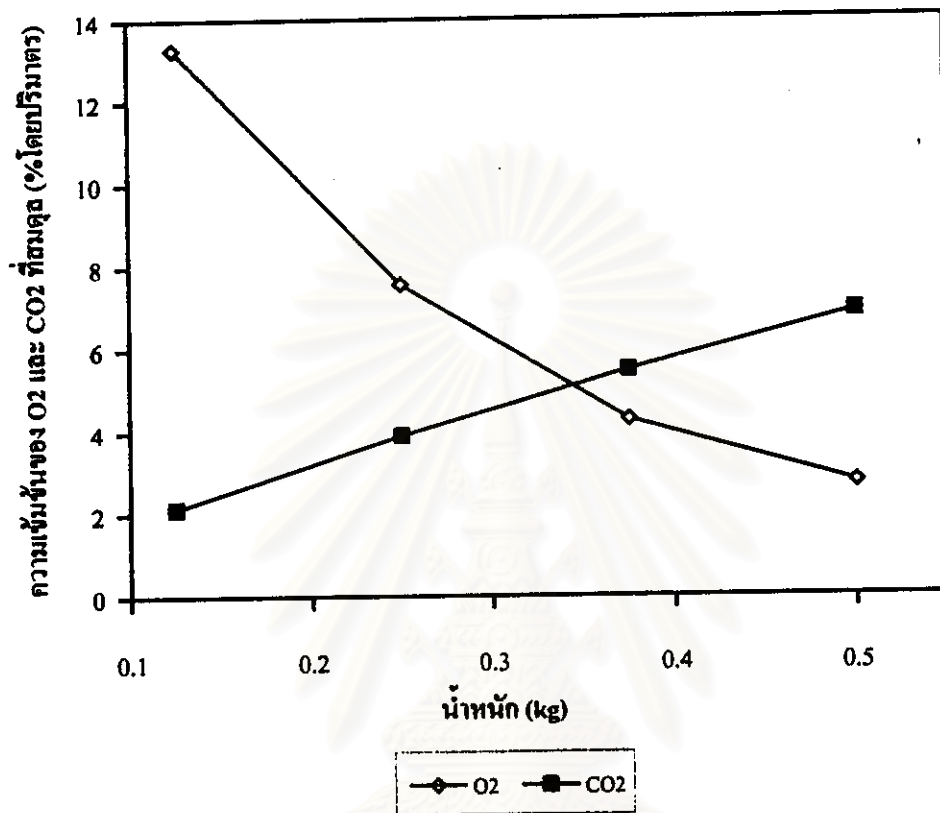
รูป 5.28 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของบรอมด์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)

5.3.3. ผลกระทบของน้ำหนักของผักและผลไม้สด (W)

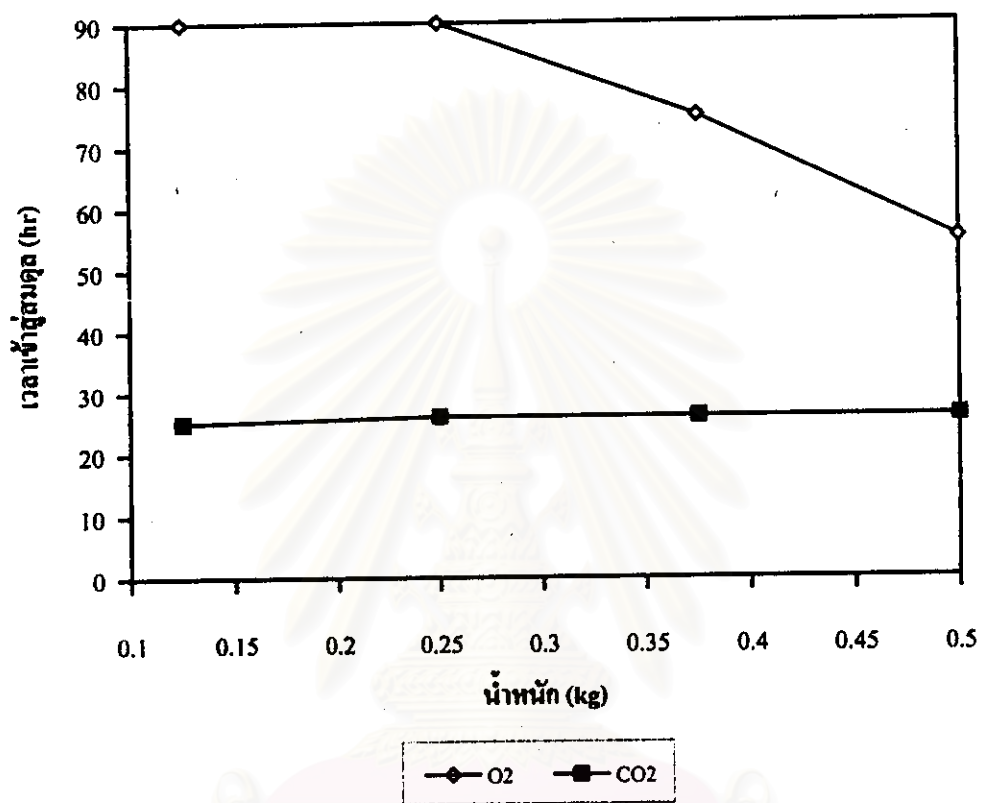
ผลกระทบของน้ำหนักของผักและผลไม้สด (W) ต่อการบรรจุแบบ MAP ของผักและผลไม้สดแสดงได้ดังรูปที่ 5.29 และ 5.30 รูป 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของผักและผลไม้สดกับความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล และรูป 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของผักและผลไม้กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล

จากรูป 5.29 จะเห็นได้ว่า เมื่อน้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุ (W) เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุล ($\%O_{2(eq)}$) จะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล ($\%CO_{2(eq)}$) จะเพิ่มขึ้น และจากรูปจะเห็นได้ว่า W มีผลกระทบต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลอย่างชัดเจน (สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.29 พบว่า เมื่อ W เพิ่มจาก 0.125 กก.(หรือแอปเปิ้ล 1 ลูก) ไปเป็น 0.5 กก. (หรือแอปเปิ้ล 4 ลูก) ทำให้ $\%O_{2(eq)}$ ลดลงจากร้อยละ 13 ไปเป็นร้อยละ 2 โดยปริมาตร และ $\%CO_{2(eq)}$ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2 ไปเป็นร้อยละ 6 โดยปริมาตร) ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อ W เพิ่มขึ้น ปริมาณการใช้แก๊สออกซิเจนและการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5.1) และ (5.2) ว่าเมื่อ W เพิ่มขึ้น $\%O_{2(eq)}$ หรือ y_o จะมีแนวโน้มลดลง และ $\%CO_{2(eq)}$ หรือ y_c จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Mannaperuma [27] ที่รายงานว่าเมื่อ W เพิ่มขึ้น $\%O_{2(eq)}$ จะลดลง ในขณะที่ $\%CO_{2(eq)}$ จะเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้จากรูปที่ 5.30 พบว่าช่วงน้ำหนักบรรจุสูง ๆ (0.25 ถึง 0.5 กิโลกรัม) น้ำหนักมีผลต่อเวลาเข้าสู่สมดุลของแก๊สออกซิเจนค่อนข้างมาก (เวลาเข้าสู่สมดุลลดลงประมาณ 40 ชั่วโมง เมื่อน้ำหนักเพิ่มจาก 0.25 เป็น 0.5 กิโลกรัม) แต่เกือบไม่มีผลต่อเวลาเข้าสู่สมดุลของแก๊สออกซิเจนเมื่อน้ำหนักบรรจุน้อยกว่า 0.25 กิโลกรัม ส่วนเวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างคงที่ เมื่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น



รูป 5.29 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุ
กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่
สมดุลจากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)



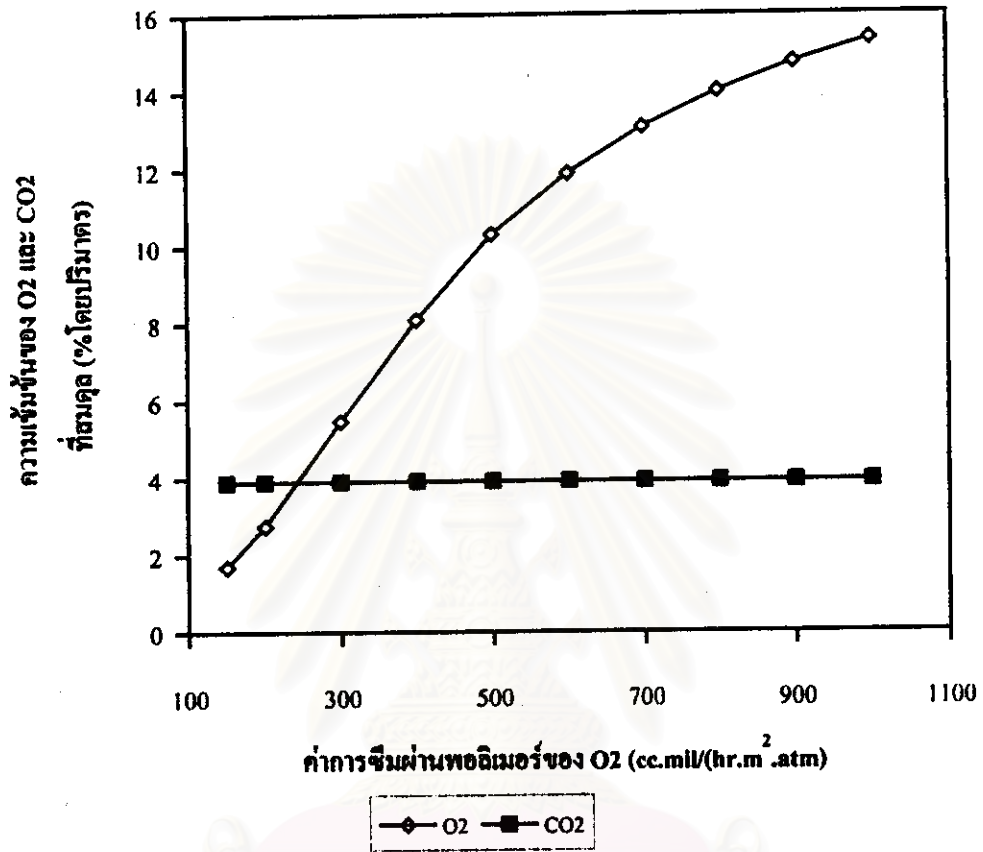
รูป 5.30 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุกับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุ จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)

5.3.4 ผลกระทบของค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สออกซิเจน (P_o)

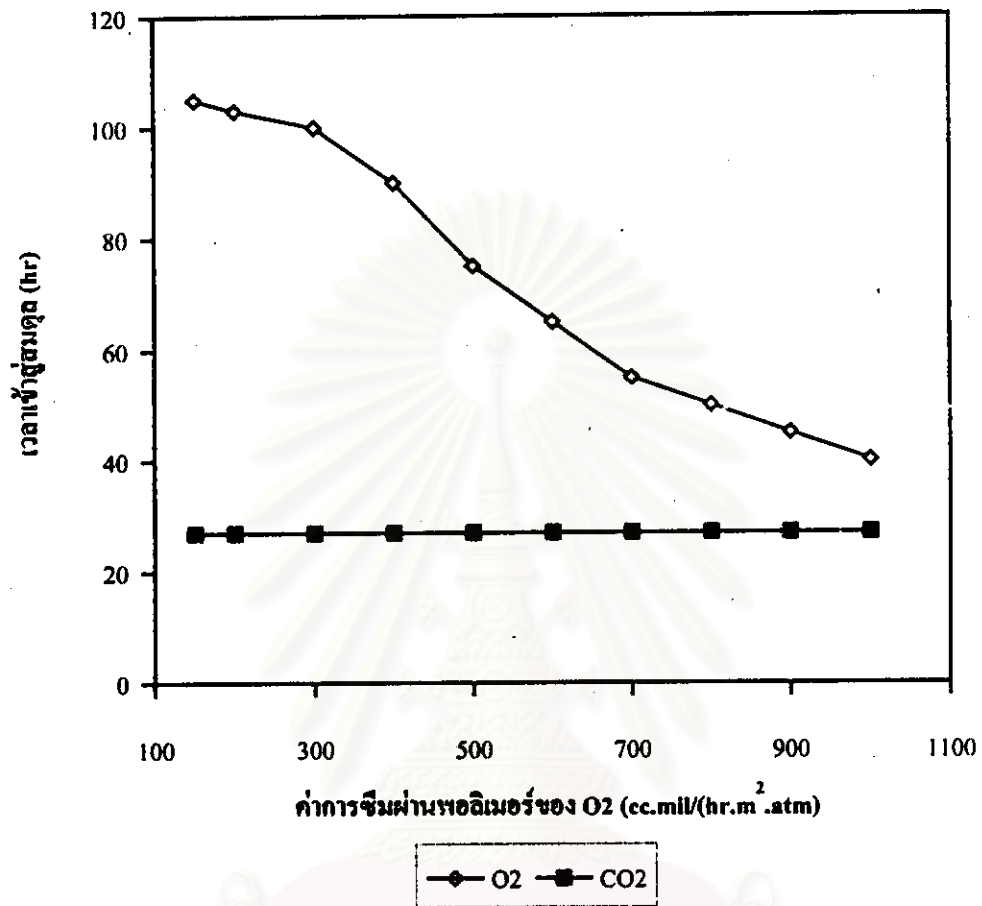
ผลกระทบของค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สออกซิเจน (P_o) ต่อการบรรจุแบบ MAP ของผักและผลไม้สดถูกแสดงดังรูปที่ 5.31 และ 5.32 รูป 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สออกซิเจนกับความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล และรูป 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สออกซิเจนกับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล

จากรูป 5.31 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สออกซิเจน (P_o) เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (P_c) มีค่าคงที่นั้น ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุล ($\%O_{2(eq)}$) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยในช่วงที่ค่า P_o ต่ำ $\%O_{2(eq)}$ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.31 เมื่อ P_o เพิ่มขึ้นจาก 150 ไปเป็น $600 \text{ cc.mil.hr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ ทำให้ $\%O_{2(eq)}$ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2 ไปเป็นร้อยละ 12 โดยปริมาตร) แต่จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลง เมื่อ ค่า P_o สูงขึ้น (สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.31 เมื่อ P_o เพิ่มขึ้นจาก 600 ไปเป็น $1000 \text{ cc.mil.hr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ ทำให้ $\%O_{2(eq)}$ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12 ไปเป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตร) ส่วนความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล ($\%CO_{2(eq)}$) มีค่าคงที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5.1) และ (5.2) แล้วพบว่าเมื่อ P_o เพิ่มขึ้น จะทำให้ $\%O_{2(eq)}$ หรือ y_o เพิ่มขึ้น และจากการที่ไม่ตัวแปร P_o ในสมการ (5.2) ก็จะพบว่า การเพิ่มค่า P_o จะไม่มีผลต่อ $\%CO_{2(eq)}$

นอกจากนี้พบว่า P_o มีผลต่อเวลาเข้าสู่สมดุลของแก๊สออกซิเจนอย่างเฉียว ดังรูป 5.32 โดยเวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับแก๊สออกซิเจนจะลดลง เมื่อ P_o เพิ่มขึ้น สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.32 จะเห็นว่าเวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับแก๊สออกซิเจนนี้ลดลงค่อนข้างเร็ว เมื่อ P_o มีค่าสูงกว่า $300 \text{ cc.mil.hr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ แต่ที่ P_o ต่ำกว่า $300 \text{ cc.mil.hr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ เวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับแก๊สออกซิเจนค่อนข้างจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



รูป 5.31 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)



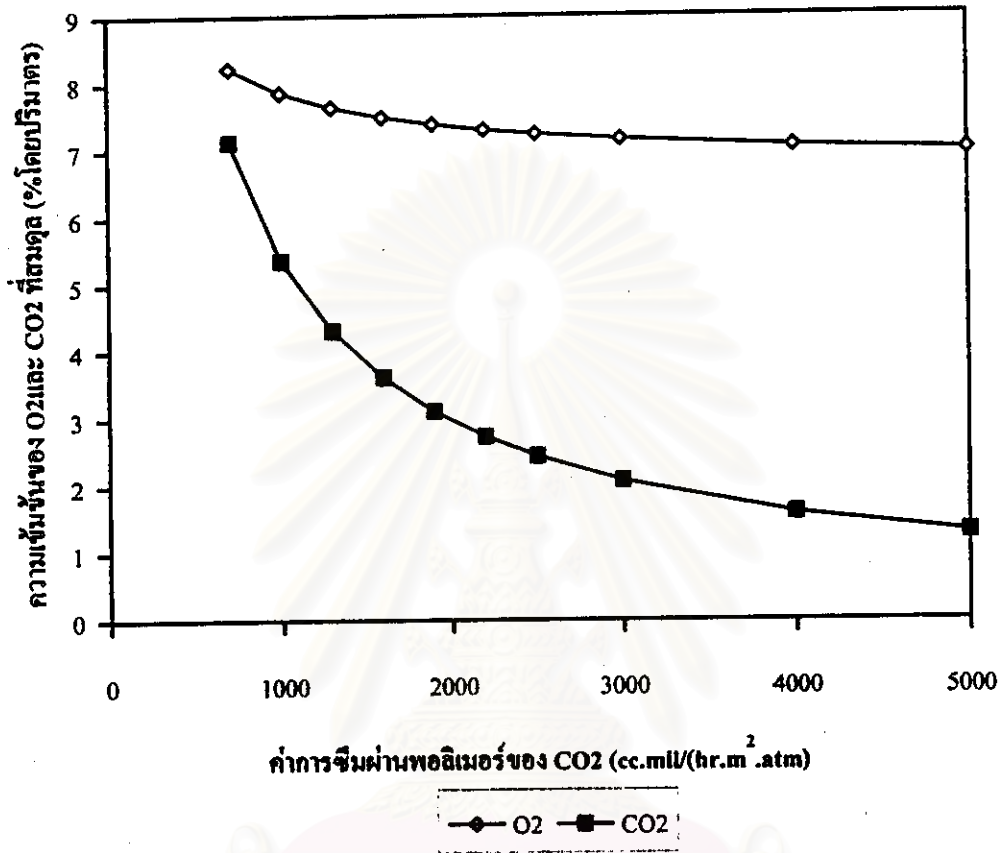
รูป 5.32 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนกับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)

5.3.5 ผลกระทบของค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (P_c)

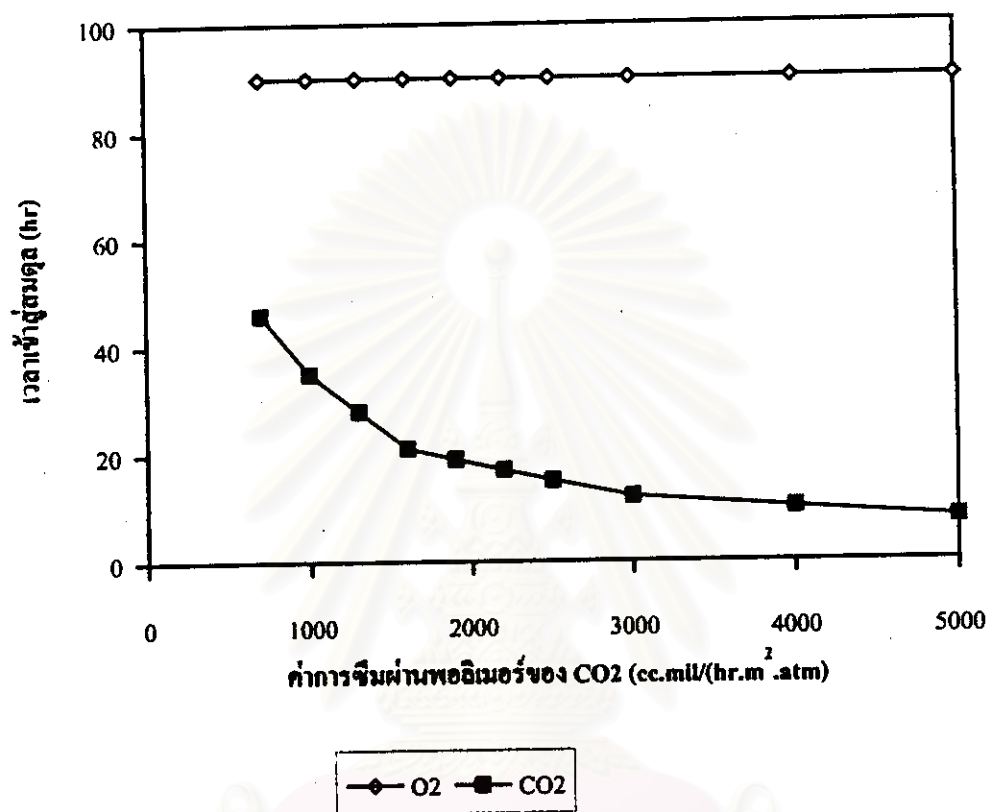
ผลกระทบของค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (P_c) ต่อการบรรจุแบบ MAP ของผักและผลไม้สดถูกแสดงดังรูปที่ 5.33 และ 5.34 รูป 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าในการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล และรูป 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล

จากรูป 5.33 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (P_c) เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สออกซิเจน (P_o) มีค่าคงที่นั้น ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล ($\%CO_{2(eq)}$) มีค่าลดลง สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.33 พบว่าในช่วงที่ P_c มีค่าต่ำ $\%CO_{2(eq)}$ มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างรวดเร็ว คือ P_c เพิ่มขึ้นจาก 900 ไปเป็น 1500 cc.mil.hr⁻¹.m⁻².atm⁻¹ ทำให้ $\%CO_{2(eq)}$ ลดลงจากร้อยละ 7 ไปเป็นร้อยละ 3.5 โดยปริมาตร แต่จะลดลงในอัตราที่ช้าลง เมื่อค่า P_c สูงขึ้น คือ เมื่อ P_c มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1500 ไปเป็น 5000 cc.mil.hr⁻¹.m⁻².atm⁻¹ ทำให้ $\%CO_{2(eq)}$ ลดลงจากร้อยละ 3.5 ไปเป็นร้อยละ 1.5 โดยปริมาตร ส่วนความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุล ($\%O_{2(eq)}$) มีค่าลดลงเล็กน้อยซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 5.2 แล้วพบว่าเมื่อ P_c เพิ่มขึ้น จะทำให้ $\%CO_{2(eq)}$ หรือ y_c ลดลง

นอกจากนี้พบว่า P_c มีผลต่อเวลาเข้าสู่สมดุล (t_{eq}) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่าง เดียว ดังรูป 5.34 คือเมื่อ P_c เพิ่มขึ้น ทำให้ t_{eq} สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.34 เห็นว่า t_{eq} สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงค่อนข้างเร็ว ในช่วงที่ P_c มีค่าต่ำกว่า 1500 cc.mil.hr⁻¹.m⁻².atm⁻¹ แต่ช่วงที่ P_c มีค่าสูงกว่า 1500 cc.mil.hr⁻¹.m⁻².atm⁻¹ t_{eq} สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



รูป 5.33 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมมูล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)



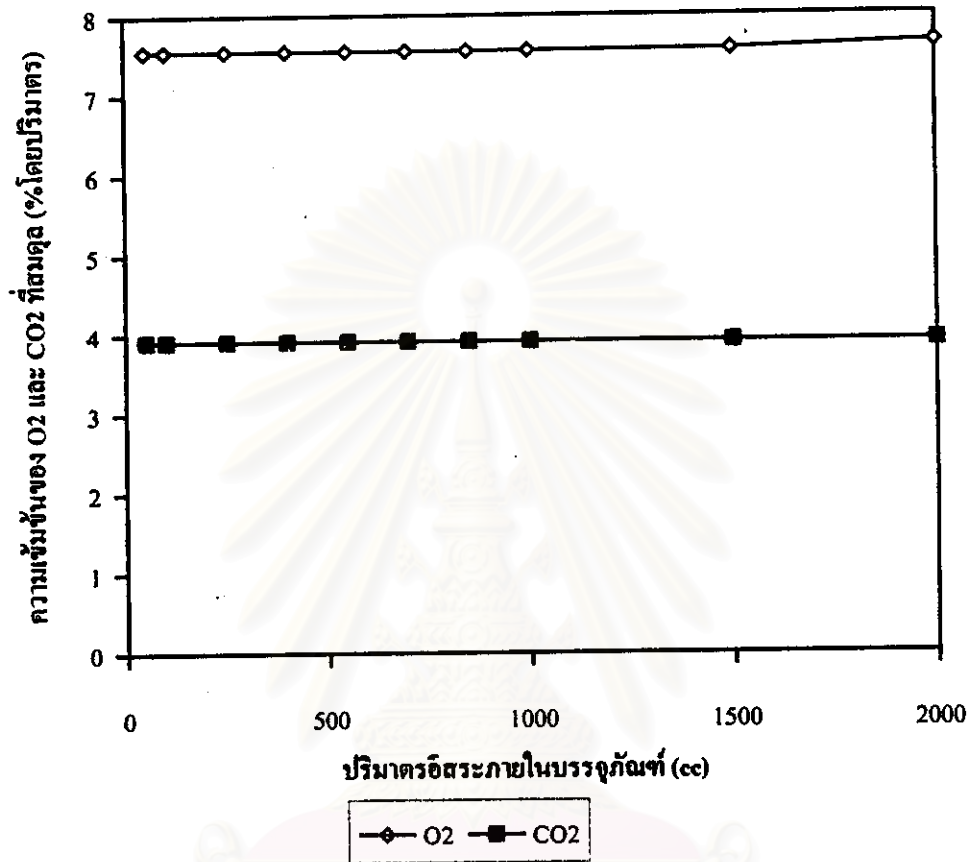
รูป 5.34 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของ
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการ
คำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)

5.3.6 ผลกระทบของปริมาณอิสระในบรรจุภัณฑ์ (V)

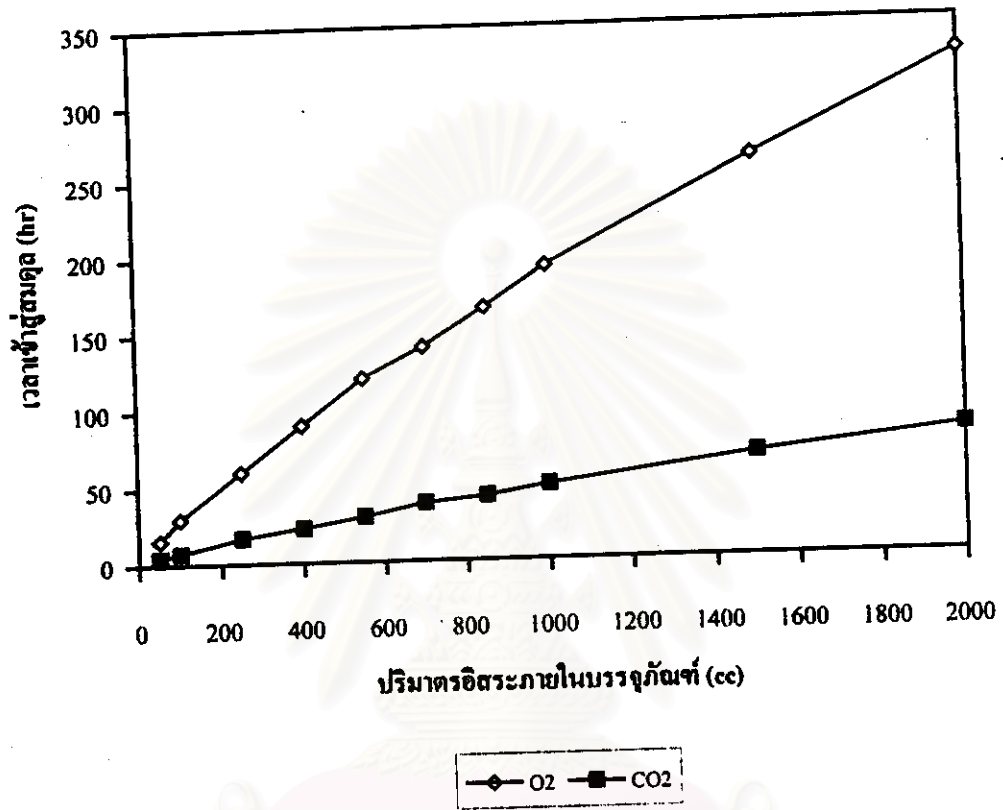
ผลกระทบของปริมาณอิสระในบรรจุภัณฑ์ (V) ต่อการบรรจุแบบ MAP ของผักและผลไม้สดแสดงได้ดังรูปที่ 5.35 และ 5.36 รูป 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิสระในบรรจุภัณฑ์กับความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล และรูป 5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิสระในบรรจุภัณฑ์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล

จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณอิสระภายในบรรจุภัณฑ์ (V) ต่อ $\%O_{2(eq)}$ และ $\%CO_{2(eq)}$ ในบรรจุภัณฑ์ พบว่าปริมาณอิสระในบรรจุภัณฑ์ไม่มีผลต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล ดังจะเห็นได้จากรูป 5.35 แต่จะมีผลกระทบต่อเวลาเข้าสู่สมดุลอย่างมากดังรูป 5.36 โดยเวลาเข้าสู่สมดุลทั้งของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มตามปริมาณอิสระในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Cameron [24] ที่กล่าวว่าเมื่อปริมาณอิสระเพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น (สำหรับกรณีตัวอย่างดังรูป 5.36 เมื่อปริมาณอิสระในบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 50 ไปเป็น 2000 มล. ทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 20 ชม. ไปเป็น 320 ชม. และเวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 10 ชม. ไปเป็น 80 ชม.) ทั้งนี้จะเห็นว่าสอดคล้องกับสมการ (4.19) และ (4.20) (สมการที่สมดุล) ที่ไม่มีตัวแปร V เข้ามาเกี่ยวข้องในสมการสมดุล แต่จะเกี่ยวข้องกับสมการ (4.17) และ (4.18) ซึ่งเป็นสมการที่คำนวณการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาดังนี้: ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ การเลือกเวลาเข้าสู่สมดุลให้เหมาะสมสามารถทำได้โดยการปรับค่าปริมาณอิสระในบรรจุภัณฑ์โดยไม่มีผลกระทบต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 5.35 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)



รูป 5.36 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18)

5.4 ตัวอย่างการเลือกชนิดพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาเป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของ ผักและผลไม้สด

ในการคำนวณเพื่อเลือกชนิดของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุผักและผลไม้สดนั้น ในขั้นตอนแรกต้องทำการกำหนดค่าสภาวะหรือตัวแปรต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ คือน้ำหนักของผักและผลไม้สดที่ต้องการบรรจุ พื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ และความหนาของบรรจุภัณฑ์ก่อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำเป็นกรณีตัวอย่างดังแสดงในตาราง 5.13 โดยในคอลัมน์ที่ 1 เป็นชื่อของผักและผลไม้สดที่ต้องการบรรจุ คอลัมน์ที่ 2 แสดงค่าความเข้มข้นที่สมดุลของแก๊ส O_2 และ CO_2 ที่เหมาะสมและต้องการให้เกิดในบรรจุภัณฑ์ (ซึ่งได้รวบรวมจากตาราง 2.9 และ 2.10) คอลัมน์ที่ 3 แสดงน้ำหนักตัวอย่างของผักและผลไม้สด โดยเลือกกำหนดให้เป็นน้ำหนักในช่วงขาปลีกในท้องตลาดทั่วไป คอลัมน์ที่ 4 เป็นค่าพื้นที่ผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องการใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ส่วนคอลัมน์ที่ 5 เป็นค่าความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าการซึมผ่านที่เหมาะสมของบรรจุภัณฑ์ด้วยโปรแกรม MAP 2 ที่เขียนขึ้น (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง) โดยใช้สภาวะของบรรจุภัณฑ์ดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งค่าที่คำนวณได้ถูกแสดงในคอลัมน์ที่ 6 และ 7 ตามลำดับในตาราง 5.13 นอกจากนี้โปรแกรมได้นำข้อมูลของสภาวะบรรจุภัณฑ์และค่าการซึมผ่านที่คำนวณได้มาคำนวณหาปริมาณอัตราของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยในกรณีตัวอย่างนี้ได้กำหนดปริมาณอัตราที่เหมาะสม คือปริมาณที่ทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลเกิดขึ้นภายใน 15 ชม.หรือน้อยกว่า ผลการคำนวณหาปริมาณอัตราที่เหมาะสมถูกแสดงดังคอลัมน์ 10 ในตาราง 5.13

เมื่อนำค่า P_0 และ P_c ที่คำนวณได้ (ดังแสดงในตารางที่ 5.13) ไปเปรียบเทียบกับค่า P_0 และ P_c ของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ (เช่น ดังแสดงในตารางที่ 2.7) จะทำให้สามารถเลือกพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ได้ดังแสดงในคอลัมน์ที่ 8 และ 9 ของตารางที่ 5.13

จากตาราง 5.13 จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ที่ใช้ทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เช่น พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) สามารถนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของผักและผลไม้สดหลายชนิดได้อย่างเหมาะสม (โดยอาจจะมีการปรับค่าพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์หรือความหนาเพียงเล็กน้อย) แต่สำหรับผักและผลไม้สดบางชนิด เช่น แอปเปิ้ล มะเขือเทศแบบฟิลด์ และลูกพีช เป็นต้น การเลือกชนิดพอลิเมอร์ให้มีค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของทั้งแก๊สออกซิเจน (P_O) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (P_C) ที่เหมาะสมกับค่าที่คำนวณได้นั้นไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากผักและผลไม้บางชนิดต้องการอัตราส่วนของค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สออกซิเจน (selectivity, S) สูงกว่าค่า S ของพอลิเมอร์ที่ใช้ทั่วไป (ดังตาราง 2.7) นั่นก็คือถ้าทำการเลือกชนิดพอลิเมอร์ให้มีค่า P_O ที่เหมาะสมกับผักและผลไม้สด ค่า P_C ของพอลิเมอร์ชนิดนั้นจะมีค่าที่ต่ำกว่าค่า P_C ที่ผักและผลไม้สดนั้นต้องการจริง ซึ่งการแก้ปัญหาก็กล่าวมานี้สามารถทำได้โดยการพัฒนาพอลิเมอร์ที่มีค่า P_O และ P_C ตามต้องการชนิดใหม่ขึ้นมา และด้วยเทคโนโลยีในการผลิตพอลิเมอร์ที่พัฒนาไปอย่างมากในปัจจุบัน เช่นการทำพอลิเมอร์ผสม (blending) การทำการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ (orientation) ตลอดจนการทำโคพอลิเมอร์ (copolymerization) เป็นต้น จะทำให้สามารถผลิตพอลิเมอร์ให้มีค่า P_O และ P_C ตามต้องการ

แต่ถ้าต้องการทำการเลือกบรรจุภัณฑ์จากที่มีใช้ทั่วไปในเชิงพาณิชย์ ค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนควรจะถูกค่านึงถึงก่อน เนื่องจากถ้าทำการเลือกบรรจุภัณฑ์ให้มีค่า P_O ที่เหมาะสม เช่น เลือก LDPE สำหรับแอปเปิ้ล แล้ว P_C จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ต้องการจริง ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ซึ่งระดับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง ๆ จะช่วยลดอัตราการหายใจ ลดผลกระทบของแก๊สเอทิลีนและยับยั้งการเติบโตของเชื้อโรคบางชนิดได้ (ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2) แต่ถ้าทำการเลือกบรรจุภัณฑ์ให้มีค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม เช่นเลือกเอทิลทริลเซลลูโลสสำหรับบรรจุแอปเปิ้ลแล้ว ค่า P_O จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ต้องการจริง ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนนั้น

มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสม ซึ่งความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่มีค่าสูง ๆ นี้จะทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดเกิดเร็วขึ้นซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการบรรจุผักและผลไม้สด เพราะจะทำให้เกิดการเน่าเสียได้เร็วขึ้น [1, 6] ดังนั้นในการเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์ การพิจารณาค่า P_0 ที่เหมาะสมเป็นเกณฑ์จึงเหมาะสมกว่า ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ที่ถูกเลือกสำหรับผักและผลไม้สด 6 ชนิดโดยพิจารณา P_0 ที่เหมาะสมเป็นเกณฑ์ถูกแสดงดังตาราง 5.14 แต่อย่างไรก็ตามในการบรรจุผักและผลไม้สดใน MAP ควรคำนึงถึงผลดีและผลเสียของการมีความเข้มข้นของ CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ที่สูงกว่าค่าที่เหมาะสมด้วย โดยทั่วไปแล้ว พบว่าผลดีของการมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินไปในบรรจุภัณฑ์จะน้อยกว่าผลดีของการมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับที่เหมาะสม [28]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 5.13 สภาวะบรรจุภัณฑ์ที่ใช้เป็นกรณีตัวอย่าง ค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สที่คำนวณได้ และชนิดของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมเป็นบรรจุภัณฑ์

แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สดตัวอย่าง 6 ชนิด

ผักและผลไม้สด	ความเข้มข้นของแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุ (%)	น้ำหนักของผักและผลไม้สด, W (kg)	พื้นที่ผิว, A (m ²)	ความหนาของฟิล์ม, L (mil)	ค่าการซึมผ่านของฟิล์ม, P ₀ จากการศึกษา (cc.mil.hr ⁻¹ .m ⁻² .atm ⁻¹)	ค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม, P _c จากการศึกษา (cc.mil.hr ⁻¹ .m ⁻² .atm ⁻¹)	ชนิดของพอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับค่า P ₀₂ และ P _{CO2} จากการศึกษาเกี่ยวกับจากพอลิเมอร์ในเชิงพาณิชย์		ปริมาณก๊าซในบรรจุภัณฑ์, V (cc) ที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบเข้าสมดุลภายใน 15 ชม.
							O ₂	CO ₂	
แอปเปิ้ลพันธุ์แมคอินทอช	2-3 O ₂ 1-2 CO ₂	0.50	0.06 0.12	1 1	212.50-280.23 106.25-140.11	4155.54-8744.35 2077.77-4372.17	PVC,P(VC-VAC) LDPE	ยางธรรมชาติ,PB,SBR EC	< 150
คอกบรอกเคลลี่	1-2 O ₂ 5-10 CO ₂	0.30	0.08	1	1446.25-2315.68	2784.856-8290.418	EC	ยางธรรมชาติ, EC,PB,SBR	< 1000
มะเขือเทศแบบพีค	3-5 O ₂ 5-15 CO ₂	0.50	0.05 0.12	1 1	446.01-739.96 185.84-308.32	626.74-2525.86 261.14-1052.44	SBR PVC,P(VC-VAC)	LDPE,PVC,P(VC-VAC) LDPE,CA	< 200 < 200
มะเขือเทศพันธุ์จันนี่	3-5 O ₂ 5-15 CO ₂	0.65	0.07 0.15	1.0 1.0	205.84-361.68 96.06-168.78	305.98-1473.21 142.79-687.50	P(VC-VAC),PVC LDPE	CE,LDPE,PVC CE,PIB	< 150 < 150
บรอกเคลลี่พันธุ์มาราฮอน	1-2 O ₂ 5-10 CO ₂	1.0	0.25	1.0	155.64-265.75	510.749-866.11	PVC,P(VC-VAC), LDPE	LDPE	< 300
พีชแบบ Crest Haven	1-2 O ₂ 3-5 CO ₂	0.44	0.07 0.12	2 2	121.98-216.06 71.15-126.03	1932.15-3436.73 1127.08-2004.76	LDPE LDPE,PVC	P(VC-VAC),PVC EC,P(VC-VAC)	< 100 < 100

หมายเหตุ : LDPE คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ, EC คือ เอทิลเซลลูโลส, PVC คือ พอลิไวนิลคลอไรด์, P(VC-VAC) คือ โคพอลิเมอร์ของไวนิลคลอไรด์กับไวนิลอซีเตต
PB คือ พอลิบิวตะไคเอิน, SBR คือ พอลิบิวตะไคเอินสไตรีน, CA คือ เซลลูโลสอะซิเตต, PIB คือ ยางบิวทิล

ตาราง 5.14 ชนิดบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณา P_0 เป็นเกณฑ์เพียงค่าเดียว

ผักและผลไม้สด	ความเข้มข้นของแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุ (%)	น้ำหนักของผักและผลไม้สด, W (kg)	พื้นที่ผิวฟิล์ม, A (m ²)	ความหนาของฟิล์ม, L (mil)	ชนิดของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาค่า P_0 เป็นเกณฑ์	ปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์, V (cc.) ที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลภายใน 15 ชม.
แอปเปิ้ลพันธุ์แมคอินทอช	2-3 O ₂ 1-2 CO ₂	0.50	0.06	1	PVC,P(VC-VAC)	< 150
			0.12	1	LDPE	
ดอกบรอกเคอเล่ย์	1-2 O ₂ 5-10 CO ₂	0.30	0.08	1	EC	< 1000
มะเขือเทศแบบพีตต์	3-5 O ₂ 5-15 CO ₂	0.50	0.05	1	SBR	< 200
			0.12	1	PVC,P(VC-VAC)	< 200
มะเขือเทศพันธุ์ซันนี่	3-5 O ₂ 5-15 CO ₂	0.65	0.07	1.0	P(VC-VAC),PVC	< 150
			0.15	1.0	LDPE	< 150
บรอกเคอเล่ย์พันธุ์มารารอน	1-2 O ₂ 5-10 CO ₂	1.0	0.25	1.0	PVC,P(VC-VAC), LDPE	< 300
พีชแบบ Crest Haven	1-2 O ₂ 3-5 CO ₂	0.44	0.07	2	LDPE	< 100
			0.12	2	LDPE,PVC	< 100

หมายเหตุ : LDPE คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ, EC คือ เอทิลเซลลูโลส, PVC คือ พอลิไวนิลคลอไรด์,

P(VC-VAC) คือ โคพอลิเมอร์ของ ไวนิลคลอไรด์กับ ไวนิลอะซิเตด, PB คือ พอลิบิวตะไคอิน,

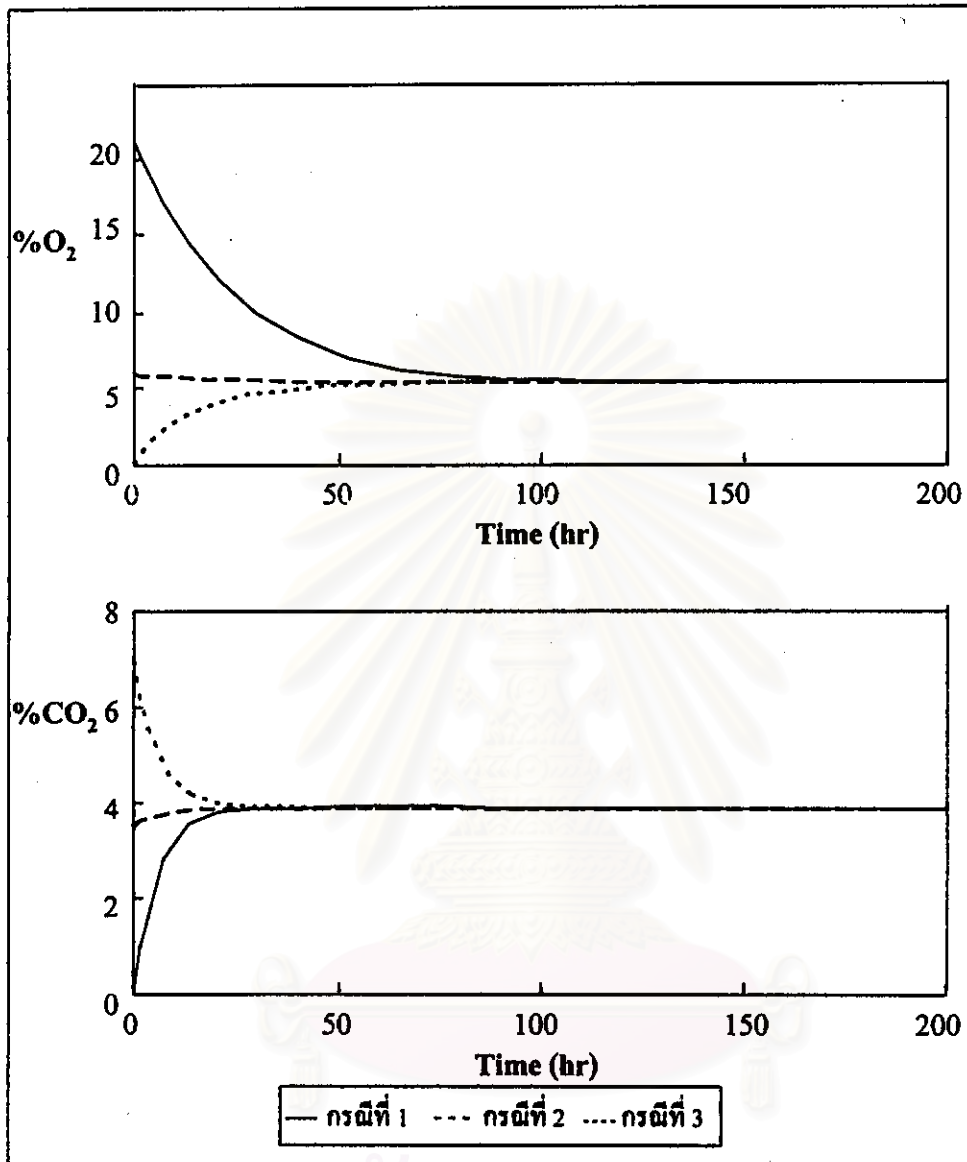
SBR คือ พอลิบิวตะไคอินสไตรีน, CA คือ เซลลูโลสอะซิเตด, PIB คือ ยางบิวทิล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.5 ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์

ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ต่อการบรรจุแบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สดได้ถูกแสดงดังรูปที่ 5.37 รูป 5.37 แสดงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ถูกเปลี่ยนแปลง

จากรูป 5.37 เห็นได้ว่า สำหรับระบบบรรจุภัณฑ์เดียวกันแล้ว ความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล กล่าวคือความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลมีค่าเท่ากัน (กรณีตัวอย่างดังรูป 5.37 $\%O_{2(eq)}$ เท่ากับร้อยละ 5.47 โดยปริมาตรและ $\%CO_{2(eq)}$ เท่ากับร้อยละ 3.90 โดยปริมาตร) ไม่ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล อย่างไรก็ตามพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล คือถ้าความเข้มข้นของแก๊สเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุล (เช่น กรณีตัวอย่างดังรูป 5.37 ถ้ากำหนดให้ $\%O_2$ และ $\%CO_2$ เริ่มต้นในบรรจุภัณฑ์เท่ากับร้อยละ 6 และร้อยละ 3.5 โดยปริมาตร ตามลำดับ) เวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลจะน้อยลง ซึ่งผลของความเข้มข้นที่สมดุลและเวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการศึกษานักวิจัยหลายท่าน [2, 9] ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP สามารถใช้คำนวณความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ ได้ เมื่อสภาวะเริ่มต้นแตกต่างจากสภาวะเริ่มต้นของอากาศปกติ ($\%O_2$ เท่ากับร้อยละ 21 โดยปริมาตรและ $\%CO_2$ เท่ากับร้อยละ 0.03 ปริมาตร ตามลำดับ) ทำให้สามารถนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับการบรรจุผักและผลไม้สดแบบ MAP ชนิดที่มีการสร้างบรรยากาศคัดแปรแบบโดยตรง (active MA) ได้ ดังรายละเอียดการบรรจุในหัวข้อ 2.2.3.2



รูป 5.37 ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18) เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สไนโตรเจนที่ 3 กรณี