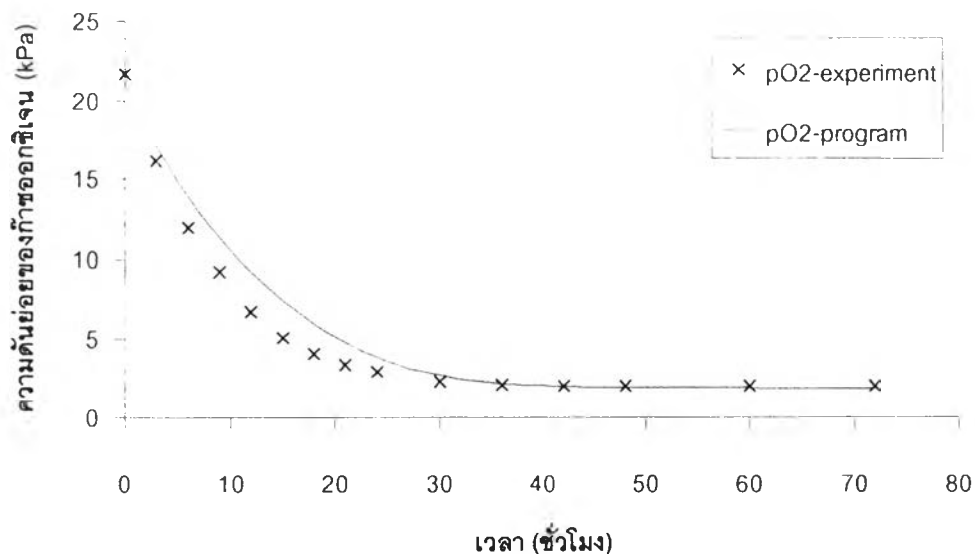


## บทที่ 5

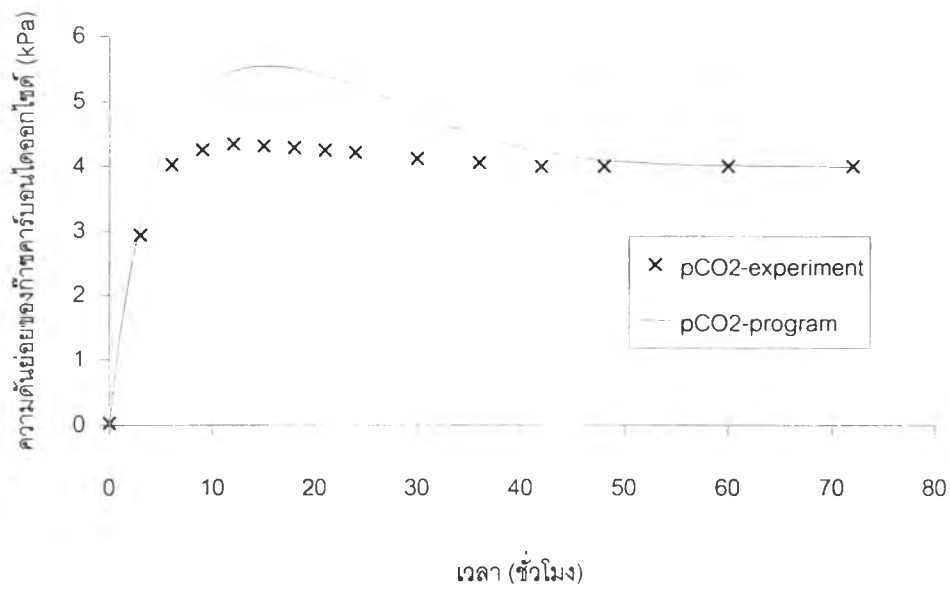
### ผลและบทวิเคราะห์ผล

#### 5.1 ผลการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

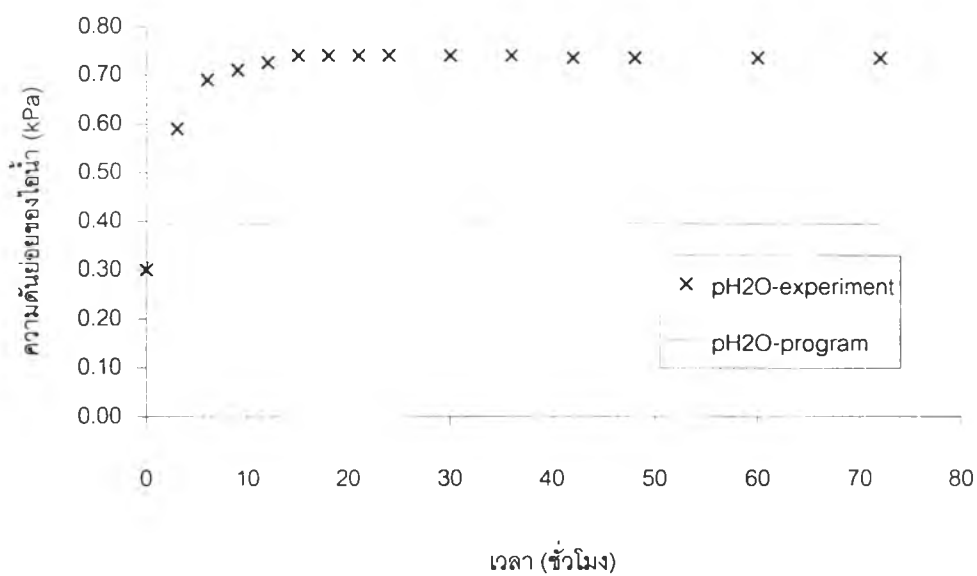
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาทดสอบความเหมาะสมโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากการทดลองหาความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งมีลักษณะของบรรจุภัณฑ์และสภาวะการเก็บรักษาดังตารางที่ 4.1 ด้วยวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ) โดยตัวอย่างแผนภูมิการเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ระหว่างข้อมูลจากงานวิจัยกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ถึง 5.4 สำหรับข้อมูลชุดที่ 1 รูปที่ 5.5 ถึง 5.8 สำหรับข้อมูลชุดที่ 2 รูปที่ 5.9 และ 5.10 สำหรับข้อมูลชุดที่ 3 และรูปที่ 5.11 สำหรับข้อมูลชุดที่ 4 (ข้อมูลดิบของการทดลองและการคำนวณของข้อมูลชุดต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก) และแสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากกรณีต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1



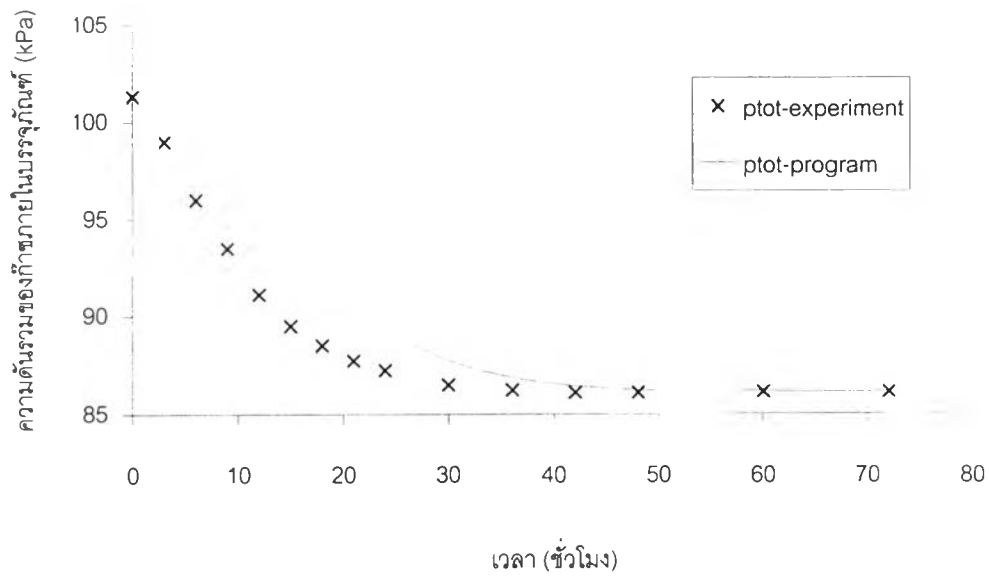
รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กัน ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 1



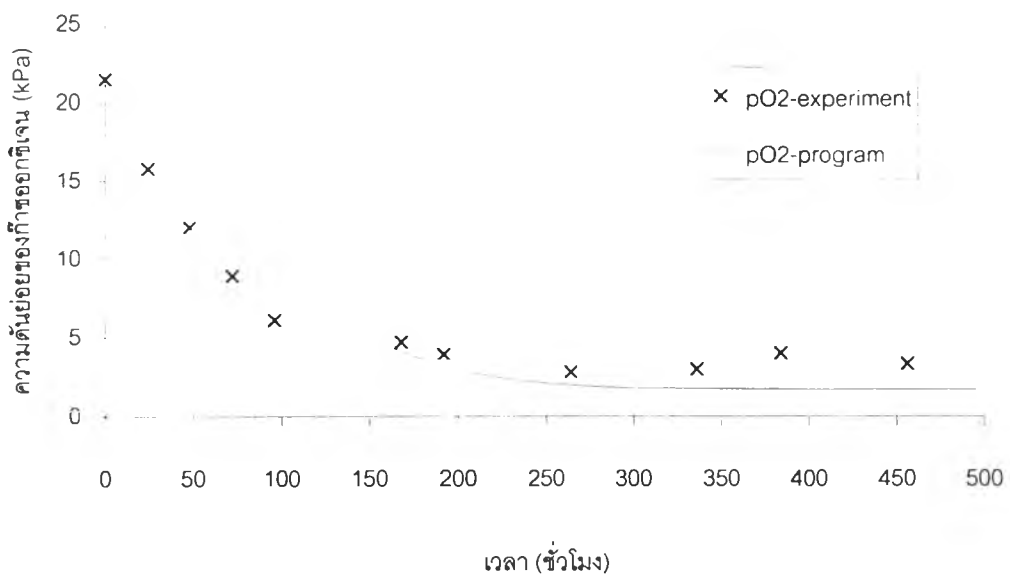
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 1



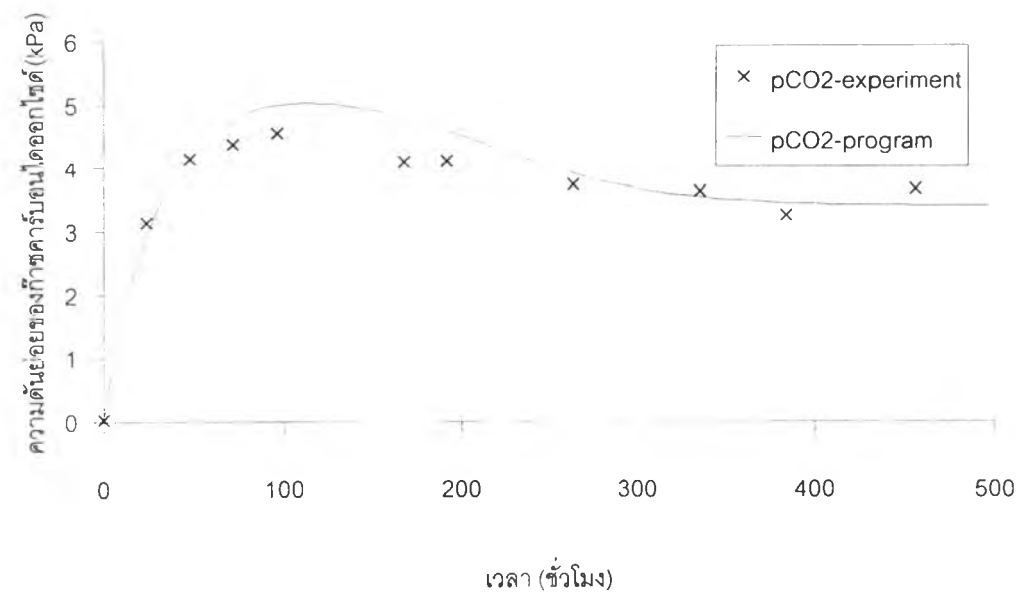
รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 1



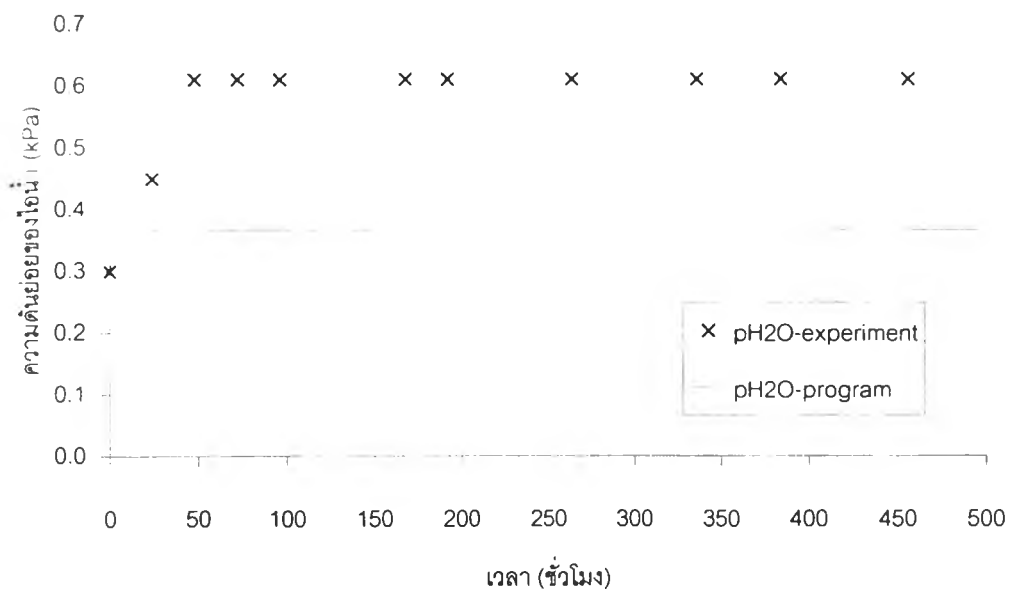
รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบความดันรวมของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 1



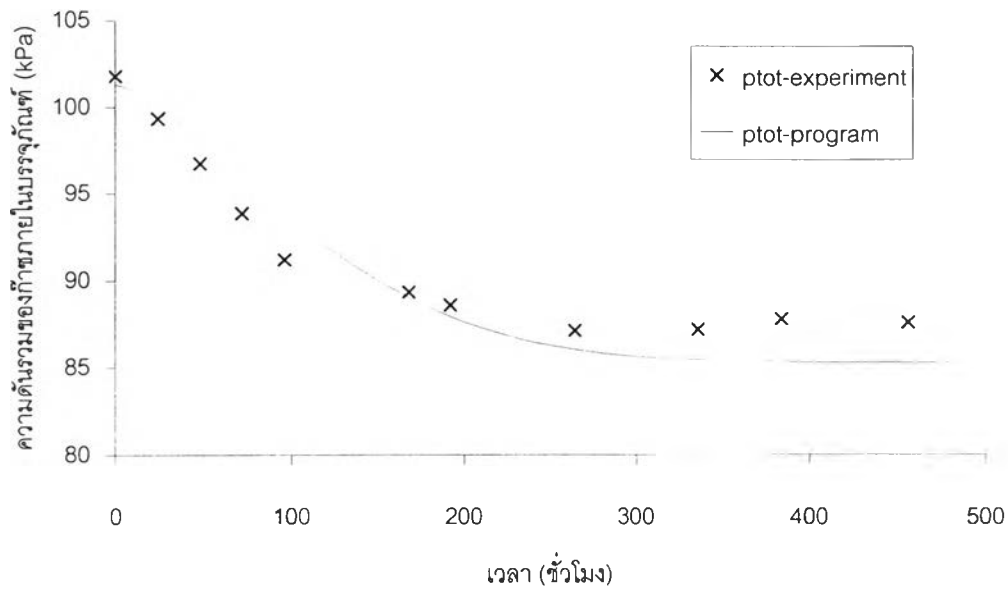
รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 2



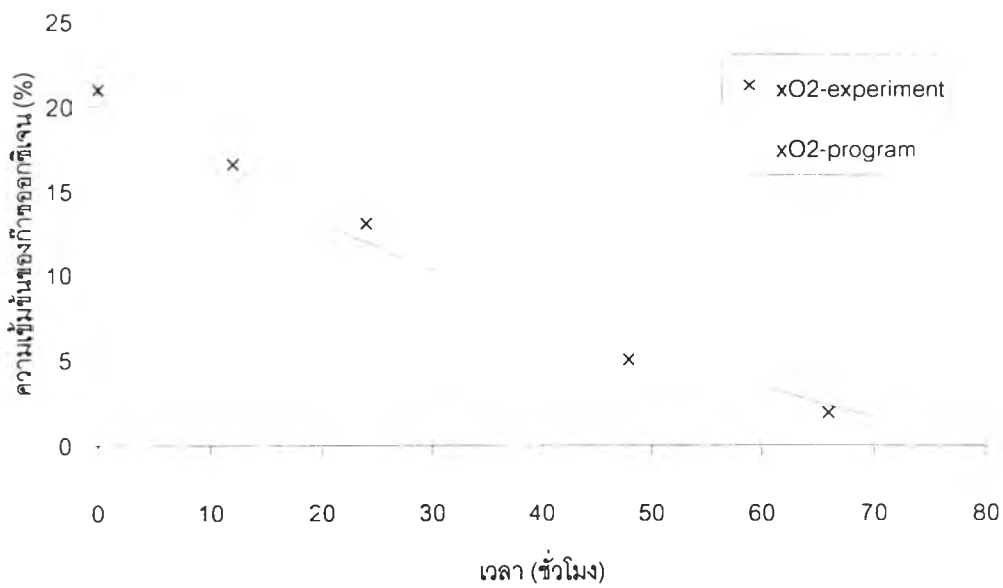
รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรยากาศแบบบรรยากาศตัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 2



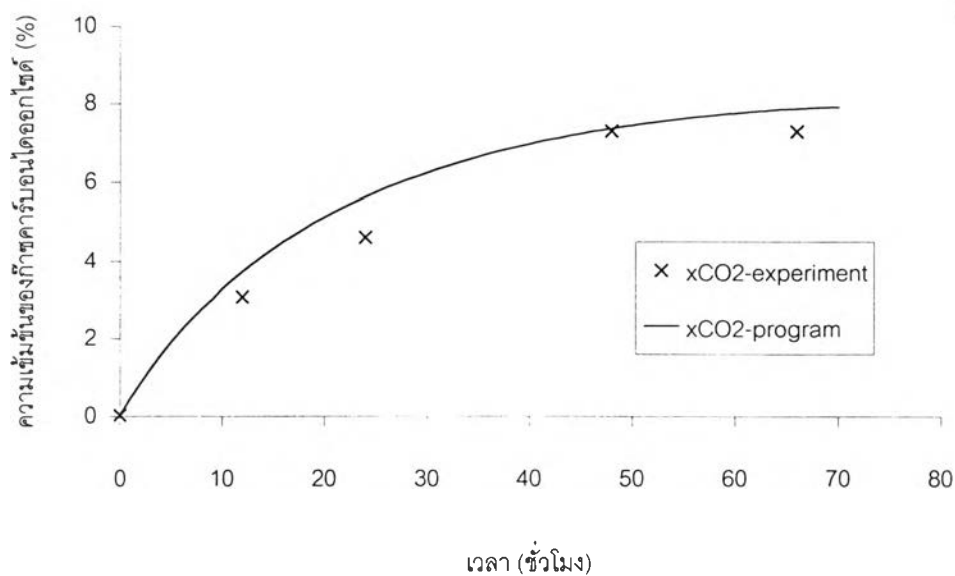
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรยากาศแบบบรรยากาศตัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 2



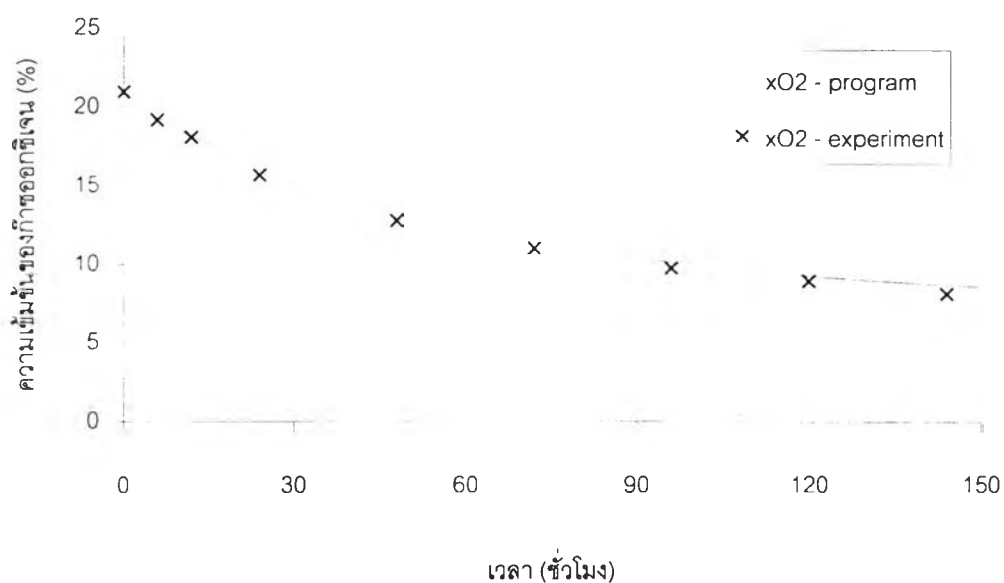
รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบความดันรวมของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 2



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 3



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 3



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 4

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการทำนายความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งข้อมูลที่น่ามาศึกษา

ข้อมูล	ชนิดของผักและผลไม้	อุณหภูมิในการเก็บรักษา (°C)	ชนิดของพอลิเมอร์	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )			
				$P_{O_2}$	$P_{CO_2}$	$P_{H_2O}$	$P_{tot}$
1	บรอกโคลี	0	LDPE	0.972	0.923	0.886	0.933
2	บรอกโคลี	0	LDPE	0.955	0.922	0.775	0.941
3	กะหล่ำปลี	15	-	0.992	0.982	-	-
4	ผักกาดหอม	10	LDPE	0.999	-	-	-

การเปรียบเทียบผลการคำนวณความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ 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

จากเกณฑ์ข้างต้นสามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ละข้อมูลได้ดังนี้

จากรูป 5.1 ถึงรูปที่ 5.11 พบว่าโดยรวมแล้วผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไป ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์จะลดลงจนเข้าสู่ภาวะคงตัว ในขณะที่ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแล้วเข้าสู่ภาวะคงตัว ส่วนความดันย่อยของไอน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ภาวะคงตัวในเวลาสั้น ๆ สำหรับความดันรวมของก๊าซต่าง ๆ จะมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่ภาวะคงตัว โดยอาจพิจารณาแยกเป็นกรณีต่าง ๆ ได้ดังนี้

ข้อมูลชุดที่ 1 จากรูปที่ 5.1 ถึง 5.4 ซึ่งเป็นการทำนายความดันย่อยของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่เวลาต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลไปในแนวทางเดียวกับผลการทดลอง โดยในกรณีความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งความดันรวมของก๊าซต่าง ๆ ได้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองในเกณฑ์ดีมาก ( $R^2 = 0.972, 0.923, 0.933$  ตามลำดับ) ส่วนกรณีความดันย่อยของไอน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี ( $R^2 = 0.886$ )

ข้อมูลชุดที่ 2 สำหรับรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.8 เป็นการเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่เวลาต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 โดยพบว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายความดันย่อยได้ดีมาก คือในกรณีความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งความดันรวมของก๊าซต่าง ๆ ได้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองในเกณฑ์ดีมาก ( $R^2 = 0.955, 0.922, 0.941$  ตามลำดับ) แต่การทำนายในกรณีความดันย่อยของไอน้ำอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ( $R^2 = 0.775$ ) เท่านั้น

ข้อมูลชุดที่ 3 สำหรับรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 เป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ซึ่งกำหนดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์เป็น  $1.24 \times 10^{-6}$ ,  $5.13 \times 10^{-6}$  และ  $4.50 \times 10^{-7} \frac{\text{mmol} \cdot \text{m}}{\text{hr} \cdot \text{kPa}}$  ตามลำดับ (ดั่งแจ้งไว้ในเอกสารอ้างอิง [17]) ที่เวลาต่าง ๆ ของกะหล่ำปลี ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 โดยพบว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีมาก ( $R^2 = 0.992$  และ  $0.982$  ตามลำดับ)

ข้อมูลชุดที่ 4 สำหรับรูปที่ 5.11 แสดงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สำหรับผักกาดหอม ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 พบว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองมีความสอดคล้องกันอย่างมาก คือมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.999



จากข้อมูลข้างต้นแสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงปรากฏการณ์ในการเกิดบรรยากาศตัดแปรได้ถูกต้อง และโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถทำนายความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ภายในบรรยากาศแบบบรรยากาศตัดแปรได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 90 เพราะมีงานวิจัยเป็นจำนวนมากศึกษาในเกี่ยวกับอัตราการหายใจ และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำ ส่วนกรณีของความดันย่อยของไอน้ำยังคำนวณได้ไม่ถูกต้องแต่มีแนวโน้มเดียวกับผลการทดลอง ทั้งนี้เพราะยังขาดงานวิจัยที่ศึกษาถึงการคายน้ำของผักและผลไม้สด ข้อมูลที่นำมาคำนวณอาจไม่ถูกต้อง หรือรูปแบบของสมการการคายน้ำที่อาจมีรูปแบบของสมการที่ง่าย ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การคายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.2 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปร สำหรับผักและผลไม้สด

### 5.2.1 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเก็บรักษา

กรณีศึกษาที่ 1 การเก็บรักษาบรอกโคลีหนัก 0.04 กิโลกรัม ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ทำจากฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับบรรยากาศ 600 ตารางเซนติเมตร ปริมาตรของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร และฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์หนา 0.029 มิลลิเมตร โดยทำการเก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร้อยละ 50 อุณหภูมิในการเก็บรักษาต่าง ๆ กัน

ผลกระทบของอุณหภูมิในการเก็บรักษา (T) ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ ของกรณีศึกษาที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ตามลำดับ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวและความดันย่อยที่ภาวะคงตัวของก๊าซต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิใด ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนจะลดลงในช่วงแรกแล้วจะเข้าสู่ภาวะคงตัว ซึ่งอธิบายได้จากสมการที่ 4.2 ซึ่งเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ค่าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรขึ้นอยู่กับ 2 กระบวนการคือการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์และการหายใจของผักและผลไม้ โดยในช่วงเริ่มเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกับภายนอกบรรจุภัณฑ์ ทำให้อัตราการซึมผ่านเข้าออกของก๊าซออกซิเจน (พจน์แรกทางขวาของสมการที่ 4.2) มีค่าน้อย แต่ปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจ (พจน์ที่สองทางขวาของสมการที่ 4.2) มีค่าสูง เพราะความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนมีมากพอ (และขึ้นกับความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย) ดังนั้นความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์จึงลดลง (การสะสมของก๊าซออกซิเจนเป็นลบ) ต่อมาเมื่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนลดลงทำให้อัตราการหายใจลดลงด้วย รวมทั้งเริ่มมีความแตกต่างระหว่างความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายนอกและภายในบรรจุภัณฑ์ ทั้งสองพจน์จึงมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ทำให้อัตราการลดลงของความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนลดลง (การสะสมของก๊าซออกซิเจนเป็นลบน้อยลง) และเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งปริมาณการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

เท่ากับปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจนไปในการหายใจ ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรก็จะเข้าสู่ภาวะคงตัว (การสะสมของก๊าซออกซิเจนเป็นศูนย์)

$$\frac{dn_{O_2}^{pkg}}{dt} = \frac{P_{O_2} A}{d} (p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}^{pkg}) - R_{O_2} W \quad (4.2)$$

นอกจากนั้นแล้วรูปที่ 5.12 ยังแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้น อัตราการลดลงของความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนจะมีค่ามากขึ้นด้วย (กล่าวคืออัตราการสะสมมีค่าเป็นลบมากขึ้น) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cameron และคณะ [18] ที่ได้ทดลองเก็บบลูเบอร์รี่ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ผลกระทบของอุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากการพิจารณาสมการที่ 4.19 ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษา โดยเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้นค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะมีค่าสูงขึ้น ส่วนผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะขึ้นอยู่กับชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ สำหรับกรณีตัวอย่างนี้ใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (กล่าวคือ  $n$  มีค่าเป็นศูนย์)

$$P = P_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right) + n(RH^{pkg} - RH^{ref})} \quad (4.19)$$

ดังนั้นในกรณีศึกษาที่ 1 นี้ ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสเท่ากับ  $7.22840 \times 10^{-8} \frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}}$  ส่วนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ  $3.50300 \times 10^{-7} \frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}}$  ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 400

ส่วนอุณหภูมิในการเก็บรักษามีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดเป็นไปตามสมการที่ 4.16 โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการหายใจของผักและผลไม้ก็จะสูงขึ้น ในกรณีนี้อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนจากการหายใจเริ่มต้น ( $t=0$ ) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 1.521

$\frac{\text{mmol}}{\text{kg} \cdot \text{hr}}$  และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 11.997  $\frac{\text{mmol}}{\text{kg} \cdot \text{hr}}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 700

$$R_{O_2} = \frac{abp_{O_2}}{1 + ap_{O_2} + aip_{O_2} p_{CO_2}} \times e^{-\frac{E_{af}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (4.16)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนจากการหายใจของบรอกโคลีลงในสมการที่ 4.2 จะได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้น อัตราการลดลงของความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเพราะผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจมีค่ามากกว่าผลต่ออัตราในการซึมผ่านของก๊าซในกรณีนี้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cameron และคณะ [18] และ งานวิจัยของ Exama และคณะ [15] ที่สรุปไว้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้นอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนจากการหายใจของผักและผลไม้จะเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

จากรูปที่ 5.13 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิใด ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วจะเข้าสู่ภาวะคงตัว ซึ่งอธิบายได้จากสมการที่ 4.4 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรขึ้นอยู่กับ 2 กระบวนการคือการซึมผ่านฟิล์มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์และการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจของผักและผลไม้สด โดยในช่วงเริ่มเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกับภายนอกบรรจุภัณฑ์ ทำให้อัตราการซึมผ่านเข้าออกของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (พจน์แรกทางขวาของสมการที่ 4.4) มีค่าน้อย แต่ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจ (พจน์ที่สองทางขวาของสมการที่ 4.4) มีค่าสูง (เห็นได้จากสมการที่ 4.14) ดังนั้นความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้น (การสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นบวก) ต่อมาเมื่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการหายใจลดลง รวมทั้งเริ่มมีความแตกต่างระหว่างความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายนอกและภายในบรรจุภัณฑ์ ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (การสะสมของก๊าซออกซิเจนเป็นบวกน้อยลง) และเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งปริมาณการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับปริมาณการผลิตก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจ ระบบบรรยากาศแบบบรรยากาศตัดแปรก็จะเข้าสู่ภาวะคงตัว (การสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นศูนย์)

$$\frac{dn_{\text{CO}_2}^{\text{pkg}}}{dt} = \frac{P_{\text{CO}_2} A}{d} (p_{\text{CO}_2}^{\text{ext}} - p_{\text{CO}_2}^{\text{pkg}}) + R_{\text{CO}_2} W \quad (4.4)$$

$$R_c = RQ \times R_o \quad (4.14)$$

นอกจากนั้นแล้วรูปที่ 5.13 ยังแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่ามากขึ้นด้วย (กล่าวคืออัตราการสะสมมีค่าเป็นบวกมากขึ้น)

สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 พิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสเท่ากับ  $3.59245 \times 10^{-7} \frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}}$  ส่วนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ  $1.51284 \times 10^{-6} \frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 200

ในกรณีนี้อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจเริ่มต้น ( $t=0$ ) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ  $1.278 \frac{\text{mmol}}{\text{kg} \cdot \text{hr}}$  และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ  $11.355 \frac{\text{mmol}}{\text{kg} \cdot \text{hr}}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 700

จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้น อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจของผักและผลไม้ และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซก็จะสูงขึ้น แต่เนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าผลต่ออัตราในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้น จึงทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้น

รูปที่ 5.14 สรุปข้อมูลจากรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 และแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้น เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวของความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (ในที่นี้เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวหมายถึงเวลาที่ความแตกต่างของความดันย่อยของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ กับความดันย่อยที่เวลาที่เพิ่มขึ้นหนึ่งช่วงการคำนวณมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.5 เป็นค่าแรก) ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของอุณหภูมิต่ออัตราการลดลงของความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน และต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 นี้ เมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้น เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวสำหรับช่วงอุณหภูมิต่ำ (จาก 0 - 15 องศาเซลเซียส) จะลดลงค่อนข้างเร็วกว่าการลดลงในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น (จาก 15 - 25 องศาเซลเซียส) โดยในกรณีศึกษาที่ 1 นี้เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวลดลงโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 25 เมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นทุก 5 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ความดันย่อยที่ภาวะคงตัวของก๊าซออกซิเจนลดลง ส่วนความดันย่อยที่ภาวะคงตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเพิ่มขึ้น

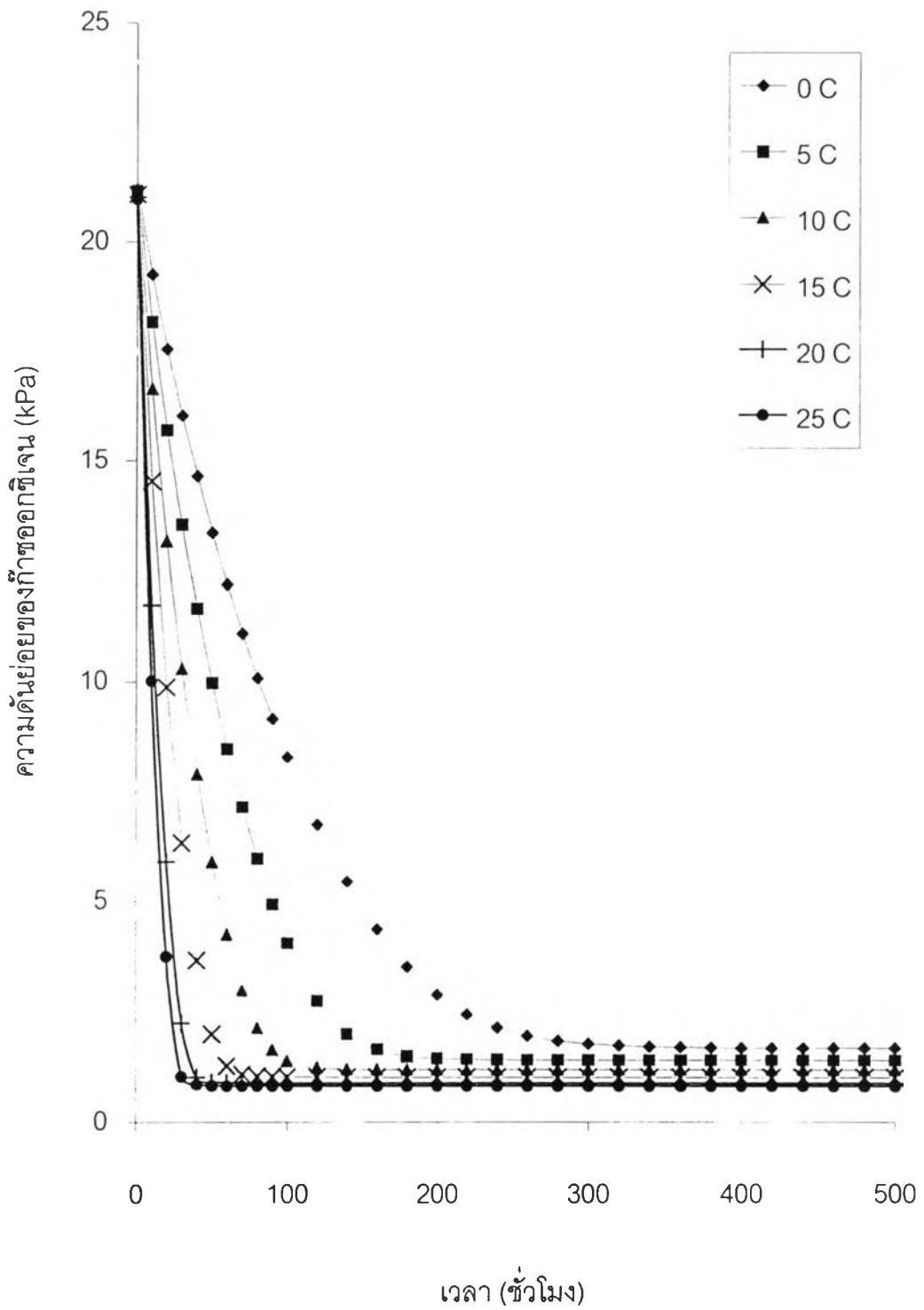
จากผลกระทบของอุณหภูมิในการเก็บรักษา (T) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ ผลกระทบที่สำคัญคือผลกระทบต่อเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัว และความดันย่อยที่ภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากการเก็บรักษาผักและผลไม้สดโดยการใช้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรให้ได้ผลดี จะต้องคำนึงถึงความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์ที่ผักและผลไม้สดนั้น ๆ ยอมรับได้ อีกทั้งเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัว ถ้าสามารถทำให้บรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรเข้าสู่ภาวะคงตัวได้เร็ว ก็จะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้นได้ ดังนั้นในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของสภาวะการเก็บรักษาต่อผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ โดยถึงแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการเก็บรักษาให้สูงขึ้นจะทำให้เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวลดลง แต่ก็จะทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าลดลง ซึ่งอาจต่ำกว่าขอบเขตที่ผักและผลไม้ชนิดนั้น ๆ จะทนได้ ส่วนกรณีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความเข้มข้นที่ภาวะคงตัวสูงขึ้น ก็อาจเกิดผลต่อผักและผลไม้ได้เช่นกัน

ในงานวิจัยนี้มีได้คำนึงถึงผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผักและผลไม้ และต่อบทบาทของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นผักและผลไม้บางชนิดจะมีการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วทำให้ผักและผลไม้เน่าหรือสูญเสียรสชาติที่ผู้บริโภคยอมรับ [1,2,3,4,28] รวม

ทั้งอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้นด้วย แต่โดยทั่วไปแล้วบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรจะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียได้เนื่องจากส่วนใหญ่แบคทีเรียพวกนี้จะเป็นแบคทีเรียที่ใช้อากาศในการหายใจ ซึ่งภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง [1,4]

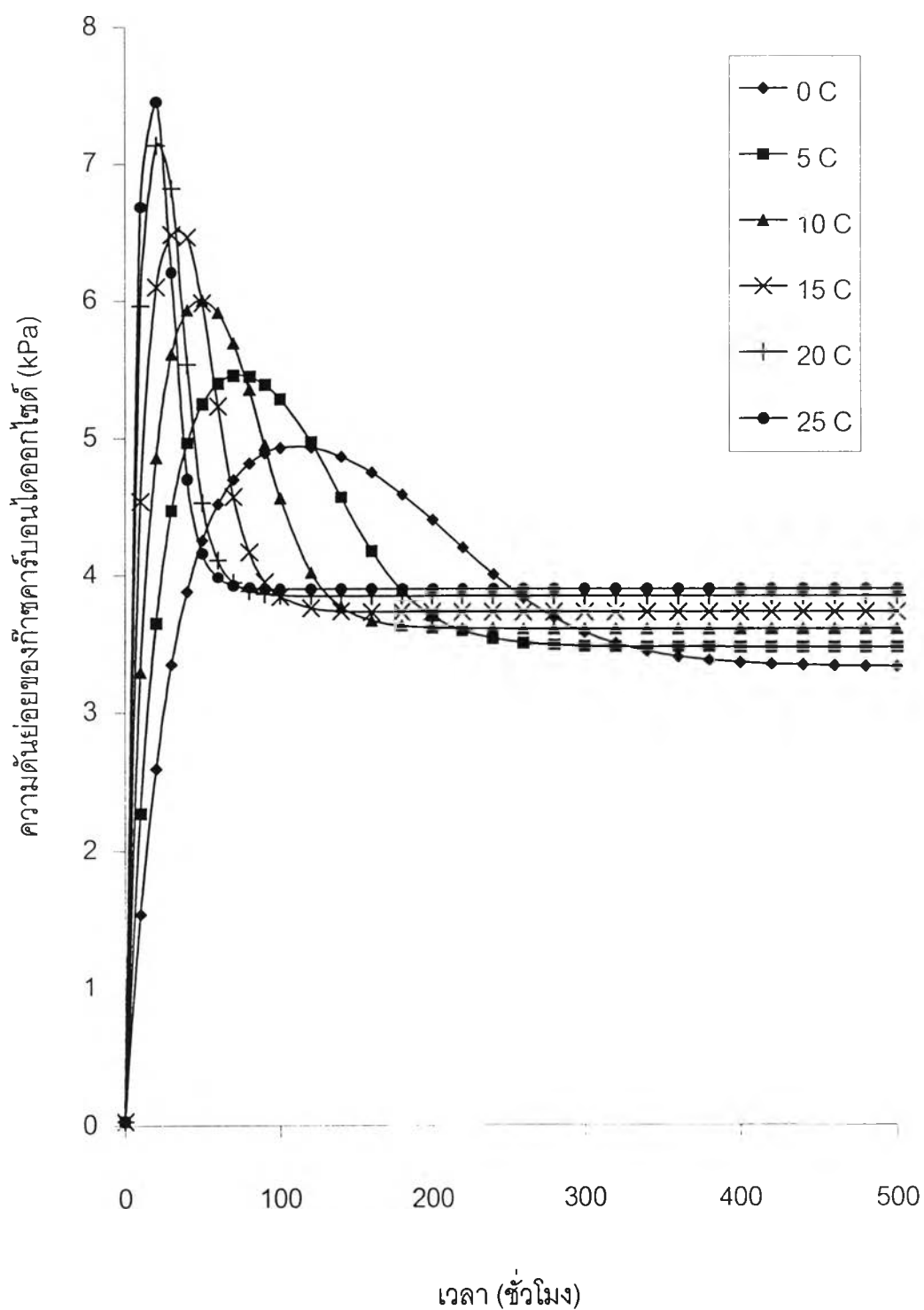
อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บรักษาจะแตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้สด ดังแสดงในตารางที่ 2.9 [16,23,25,36] จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บรักษานั้น คือ อุณหภูมิประมาณ 0-15 องศาเซลเซียส แต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปอาจทำให้เกิดการเสียหายจากความเย็น (chilling injury) รวมทั้งการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำยังทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น

แม้ว่ากรณีศึกษาที่ 1 นี้จะแสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวลดลง แต่ในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรให้ได้ผลดีต้องใช้ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (ดังรูปที่ 3.1 [24]) โดยเมื่อทำการเก็บรักษาด้วยบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่อุณหภูมิที่เหมาะสม จะสามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาได้ประมาณ 4 เท่าของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิและบรรยากาศปกติ

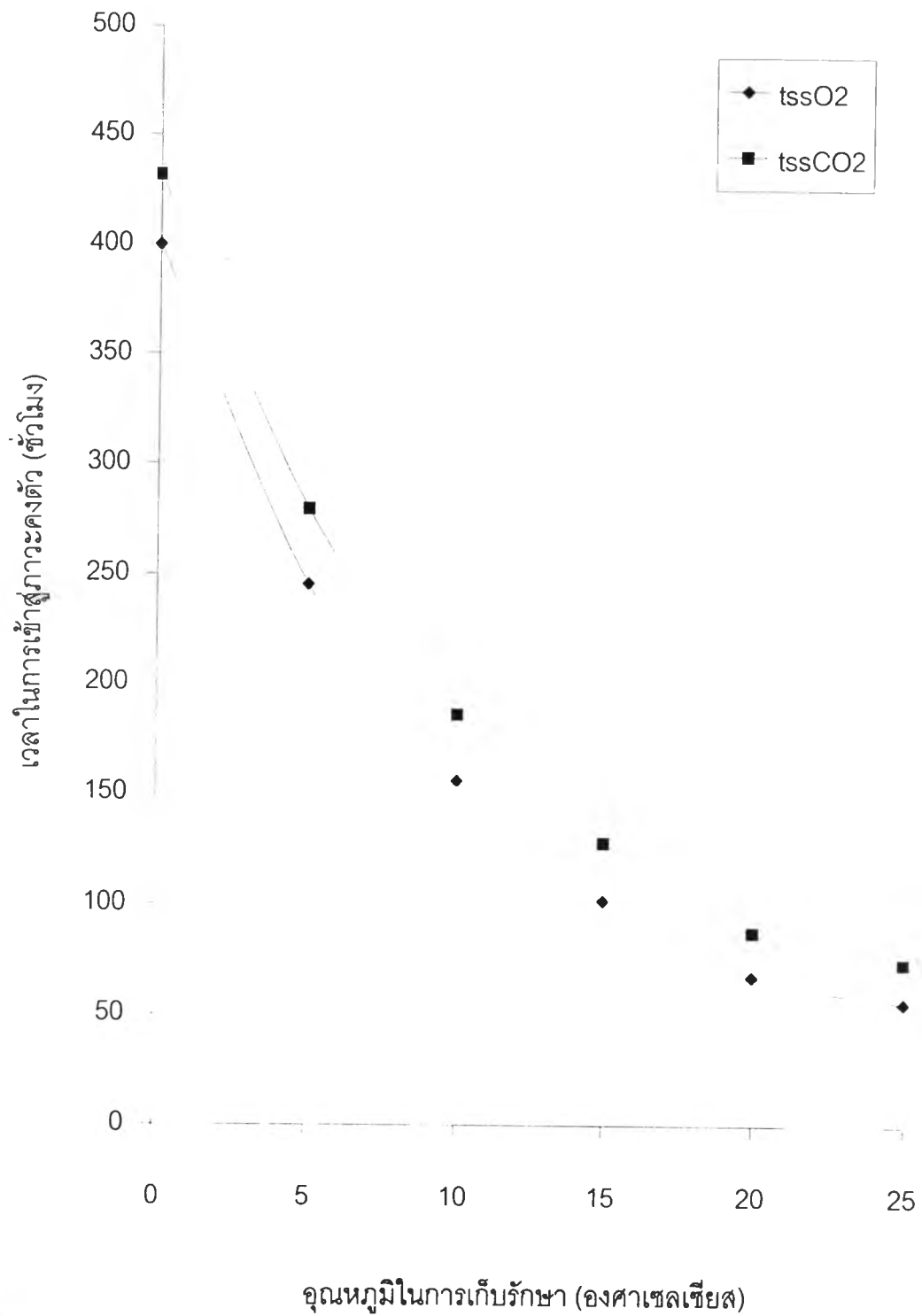


รูปที่ 5.12 ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1

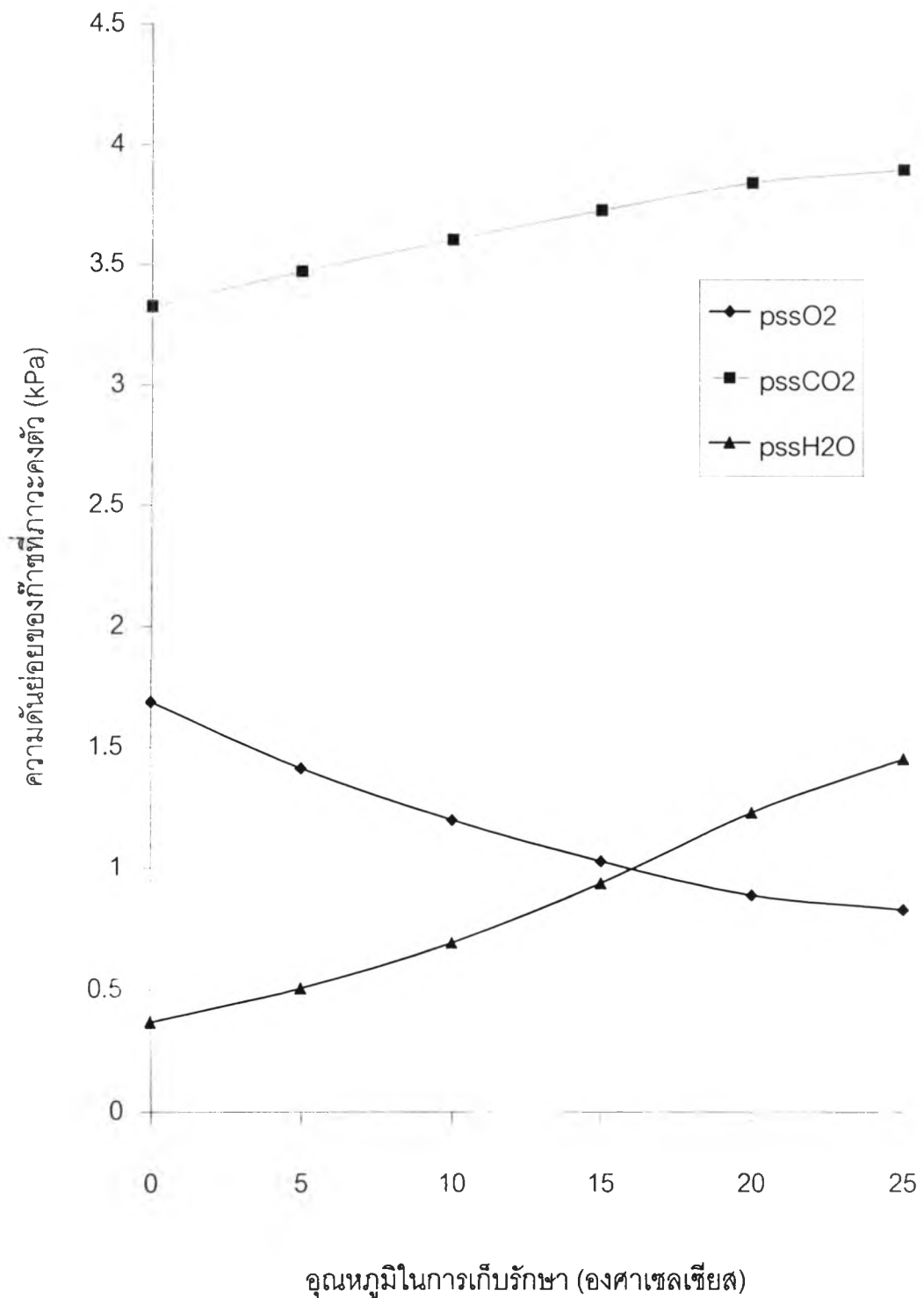




รูปที่ 5.13 ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 5.14 ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวสำหรับกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 5.15 ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อความดันย่อยที่ภาวะคงตัวของก๊าซต่าง ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1

## 5.2.2 การศึกษาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นในการเก็บรักษา

กรณีศึกษาที่ 2 การเก็บรักษาบรอกโคลีหนัก 0.01 กิโลกรัม ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ทำจากฟิล์มเซลโลเฟน (Cellophane) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับบรรยากาศ 750 ตารางเซนติเมตร ปริมาตรของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร และฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์หนา 0.025 มิลลิเมตร โดยทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 16 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ กัน

ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นในการเก็บรักษา (%RH) ต่อความดันย่อยของไอน้ำก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.16, 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ

อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้สดขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์และอุณหภูมิในการเก็บรักษาดังสมการที่ 3.10 และ 3.11

$$m = K(p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{pro}} - p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{pkg}}) \quad (3.10)$$

$$\ln(p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}) = \frac{-5.8 \times 10^3}{T} + 1.391 - 4.864 \times 10^{-2} T + 4.176 \times 10^{-5} T^2 - 1.445 \times 10^{-8} T^3 + 6.545 \ln(T) \quad (3.11)$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิใด ๆ สำหรับผักและผลไม้ชนิดหนึ่ง ๆ อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้ชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ โดยอัตราการคายน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น

จากรูปที่ 5.16 พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นใด ๆ เมื่อเวลาผ่านไปความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์จะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้น แล้วเข้าสู่ภาวะคงตัว โดยสำหรับกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นในการเก็บรักษาต่ำ จะทำให้ความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ ( $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{pkg}}$ ) ต่ำ ส่งผลให้อัตราการคายน้ำมีค่าสูง จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่วนเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นในการเก็บรักษาสูง จะทำให้ความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์สูง ส่งผลให้อัตราการคายน้ำมีค่าต่ำ จึงทำให้การเปลี่ยนแปลง

ความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์เป็นไปอย่างช้า ๆ และเมื่อความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น อัตราคายน้ำของผักและผลไม้ก็จะลดลงจนระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศตัดแปรเข้าสู่ภาวะคงตัว

ผลกระทบของค่าความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศตัดแปรเกิดจากการที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ดังสมการที่ 4.19

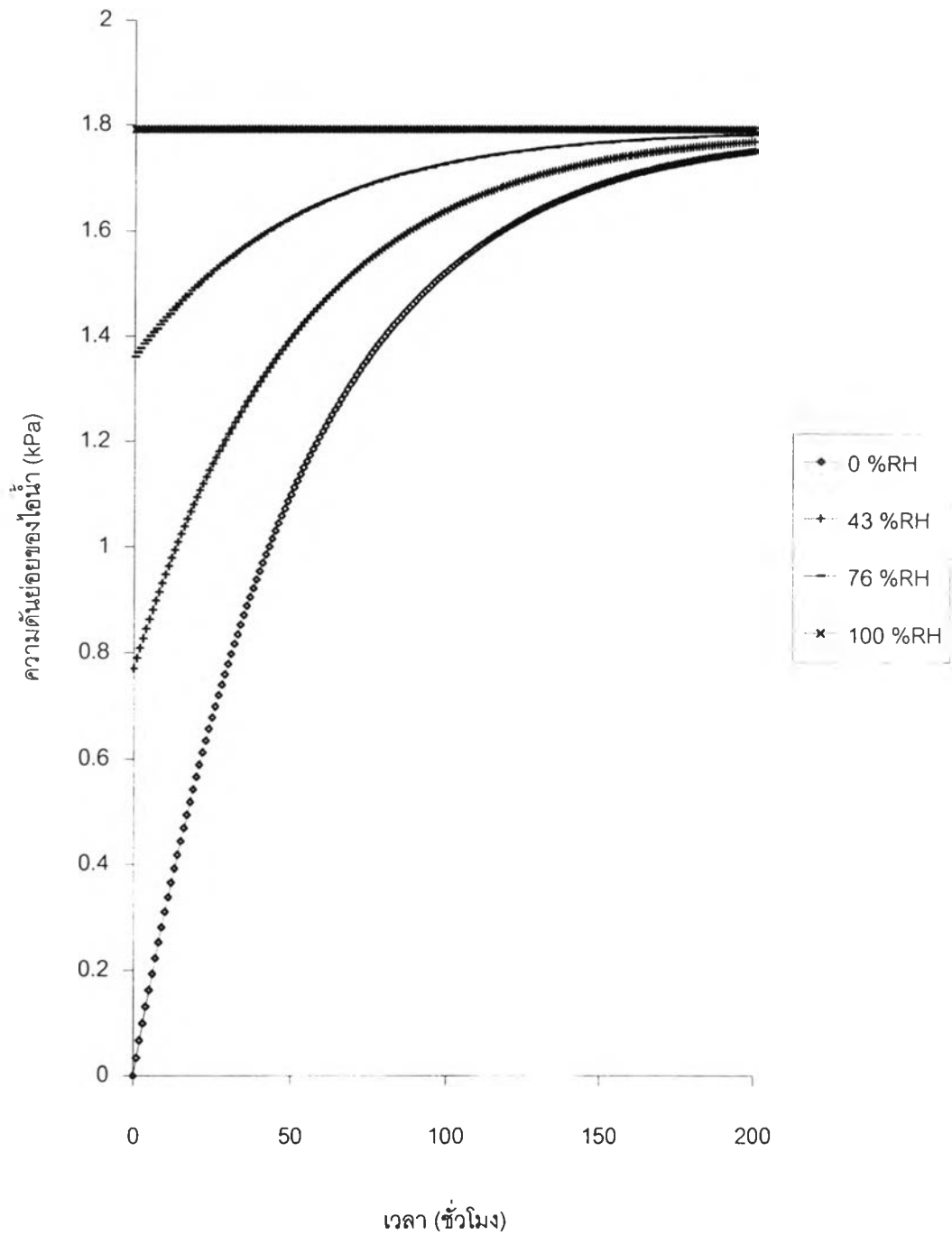
$$P = P_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right) + n(RH^{pkg} - RH^{ref})} \quad (4.19)$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซอันเนื่องมาจากความชื้นขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ โดยมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงมี 3 ลักษณะ คือค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น คงที่ หรือลดลง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ (n) มีค่าเป็นบวก ศูนย์ หรือลบได้ โดยขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์

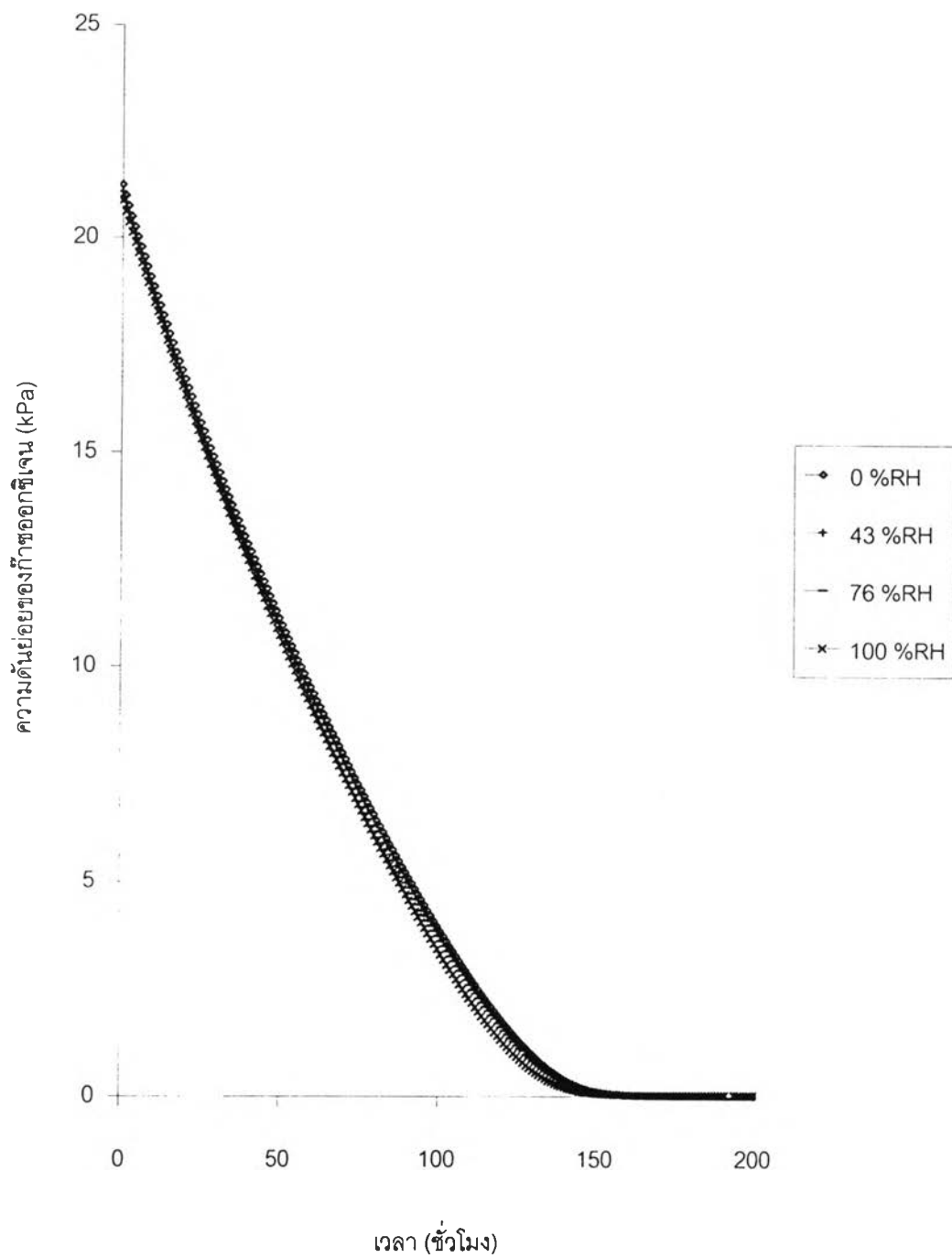
สำหรับฟิล์มเซลโลเฟนที่ใช้ในกรณีตัวอย่างที่ 2 นั้น ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ เทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 0.1096, 2.6944 และ 0.1575  $\frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \%RH}$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.17 พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นในการเก็บรักษาต่าง ๆ กัน ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่เวลาใด ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เพราะค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มเซลโลเฟนมีค่าต่ำ และความชื้นสัมพัทธ์มีผลกระทบต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนน้อยมาก (n = 0.1096) ทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เปลี่ยนแปลงมาก และเนื่องจากสำหรับบรรจุภัณฑ์ อัตรการใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจขึ้นกับความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนเป็นหลัก ดังนั้นโดยรวมแม้ความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นเปลี่ยนไป แต่อัตรการสะสมความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 5.18 พบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าน้อยลง และความดันย่อยสูงสุดจะลดลง ทั้งนี้เพราะค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มเซลโลเฟนมีค่าสูง ( $n = 2.6944$ ) ดังนั้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์ ( $RH^{pkg}$ ) สูงขึ้น ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็มีค่าสูงขึ้นด้วย แต่อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการหายใจมีค่าค่อนข้างคงที่ (เพราะอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจขึ้นกับความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนเป็นหลัก) จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ได้ดีขึ้น ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ลดลง

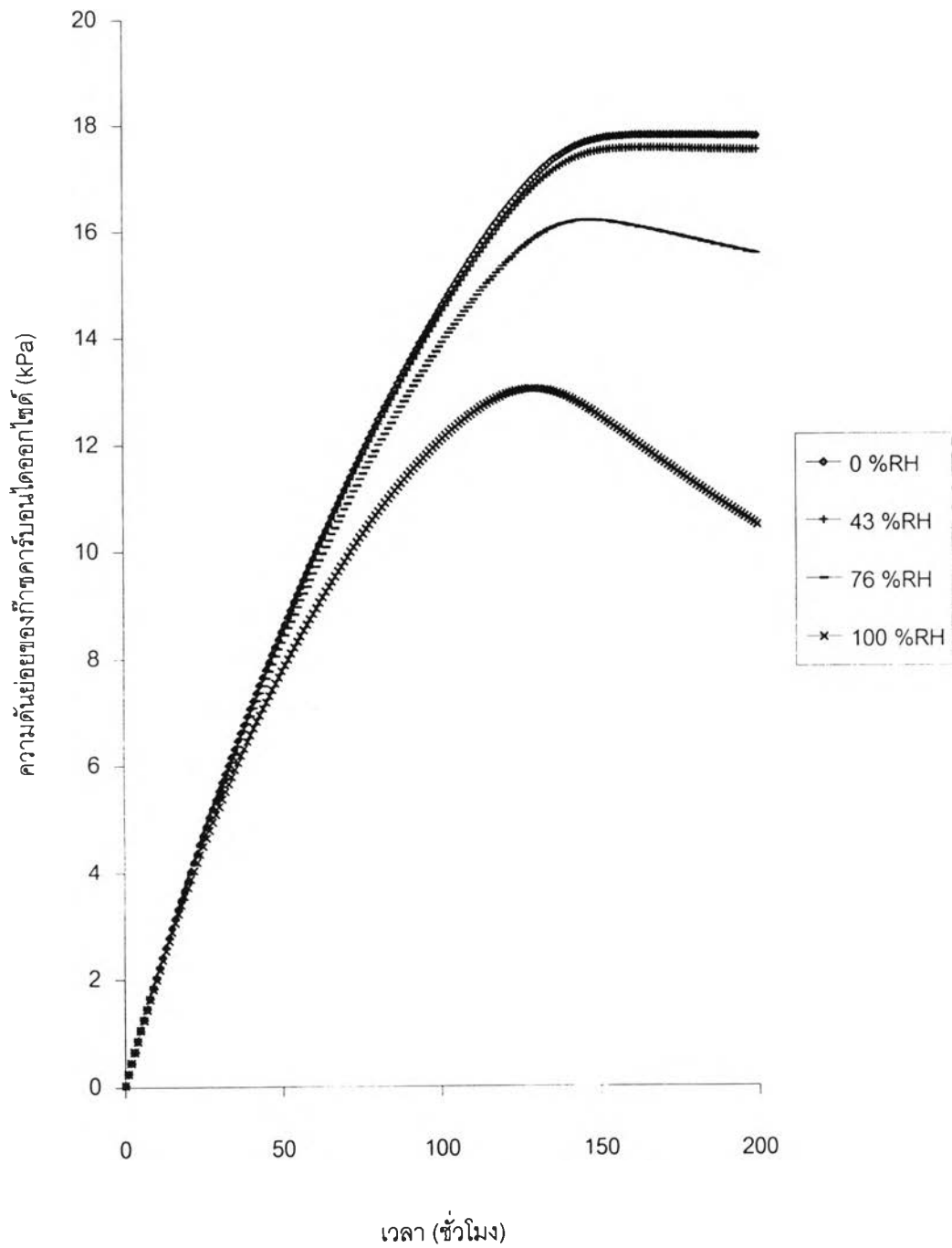


รูปที่ 5.16 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ต่อความดันย่อยของไอน้ำ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 5.17 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2





รูปที่ 5.18 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2

### 5.2.3 การศึกษาผลกระทบของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

กรณีศึกษาที่ 3 การเก็บรักษาบรรจุภัณฑ์ 0.1 กิโลกรัม ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับบรรยากาศ 750 ตารางเซนติเมตร ปริมาตรของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร และฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์หนา 0.025 มิลลิเมตร โดยทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 16 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 โดยปรับเปลี่ยนค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

รูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 แสดงผลกระทบของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ ตามลำดับ โดยที่ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ คงที่ ที่  $10 \times 10^{-7}$ ,  $5 \times 10^{-8}$  และ  $5 \times 10^{-6} \frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{hr}}$  ตามลำดับ

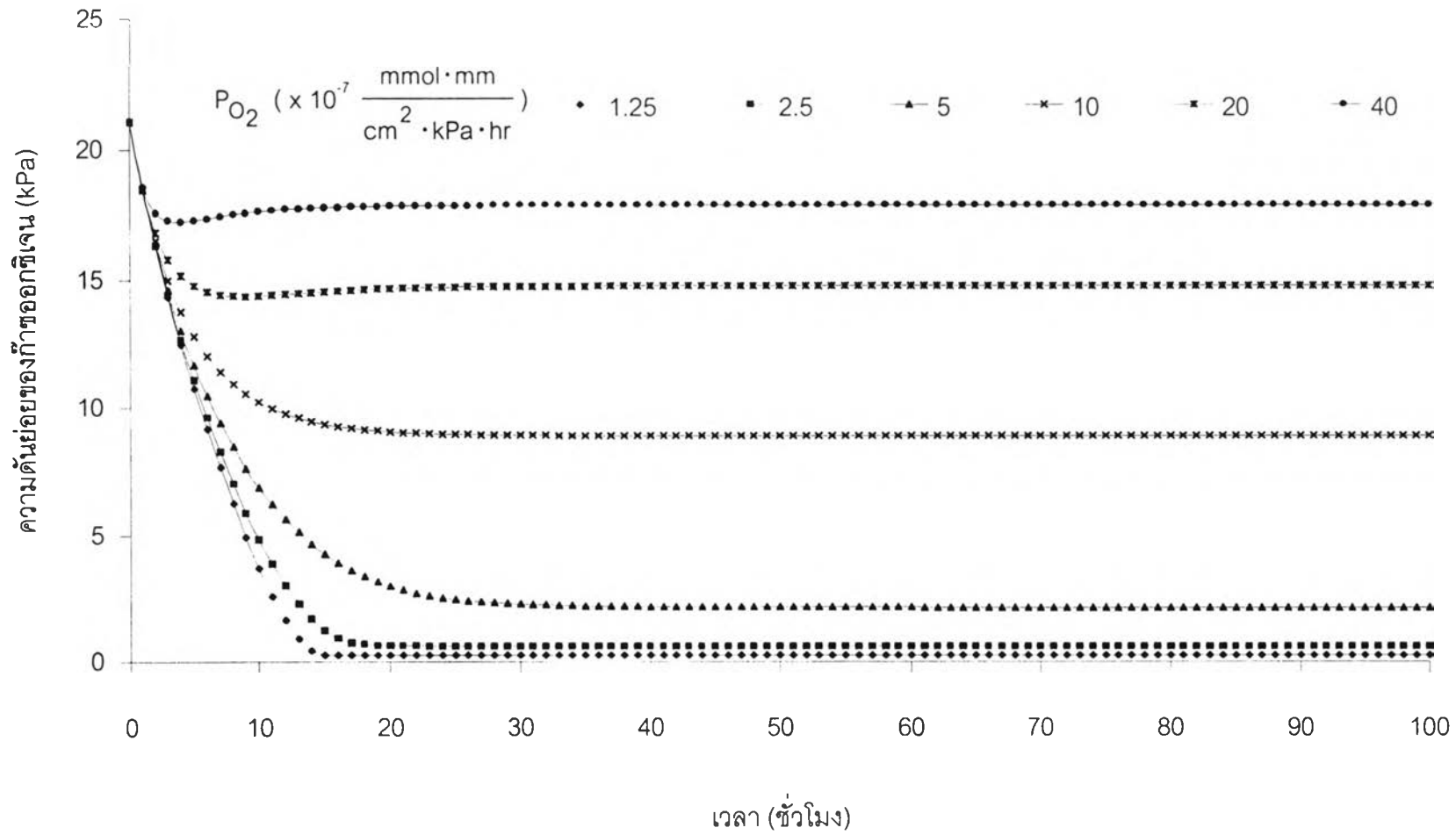
จากรูปที่ 5.19 พบว่าเมื่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ผลต่างระหว่างอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนกับอัตราการใช้ออกซิเจนเนื่องจากการหายใจมีค่าลดลง ทำให้อัตราการสูญเสียก๊าซออกซิเจนของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ลดลง และทำให้ความดันย่อยที่ภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นว่าผลของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเริ่มของการเก็บรักษามีน้อยมาก ส่วนในช่วงที่เกิดภาวะคงตัว ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนสูงขึ้น

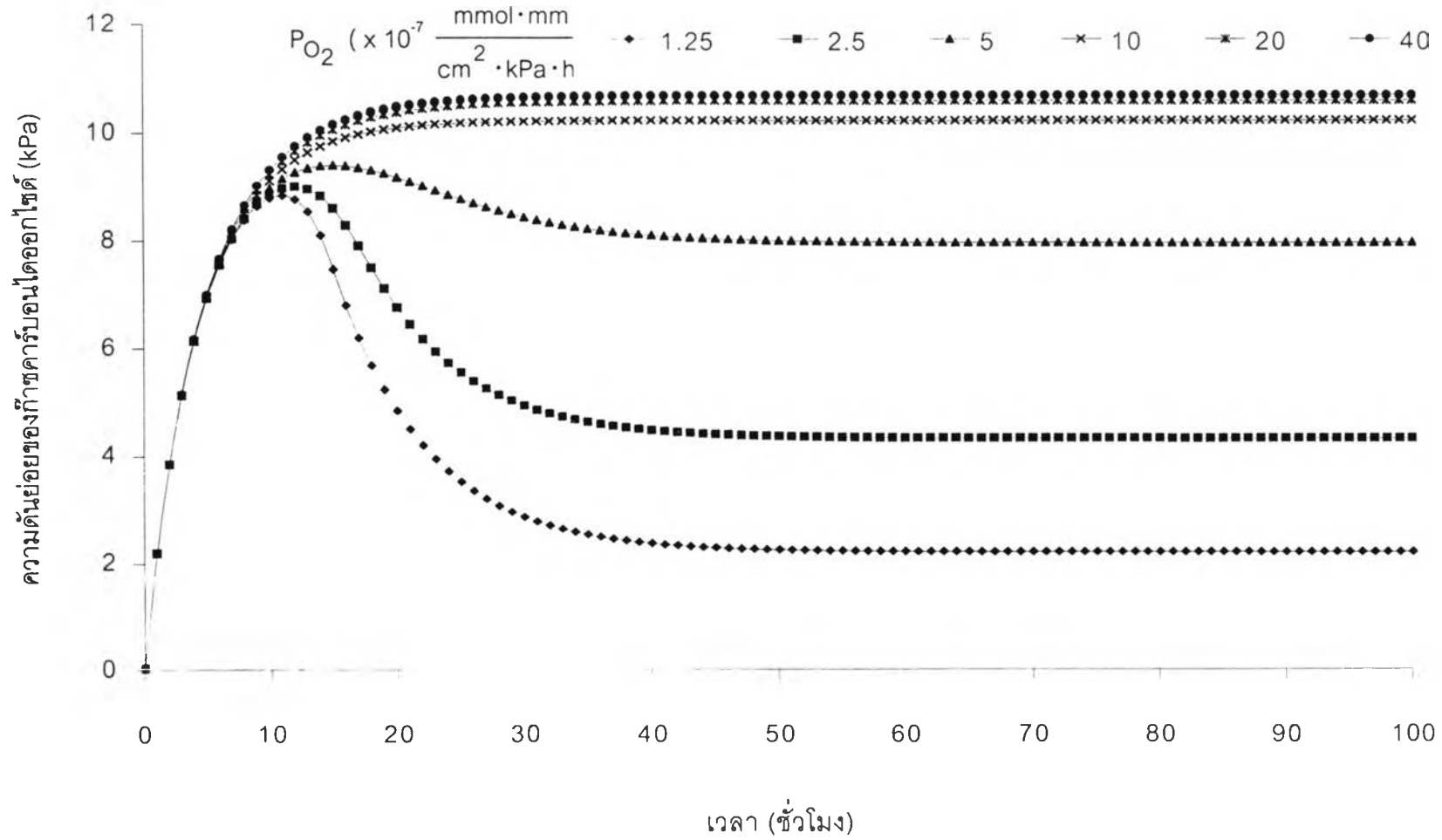
ส่วนรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 แสดงผลกระทบของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ ตามลำดับ โดยที่ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ คงที่ ที่  $5 \times 10^{-7}$ ,  $5 \times 10^{-8}$  และ  $5 \times 10^{-6} \frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{hr}}$  ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.21 พบว่าผลของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนในช่วงเริ่มของการเก็บรักษามีน้อยมาก ส่วนในช่วงที่เกิดภาวะคงตัว ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวจะลดลง เมื่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมผ่านออกจากบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ได้มากขึ้น นั่นคือตัวยับยั้งในปฏิกิริยาการหายใจลดลง ดังนั้นอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนจากการหายใจจึงมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวมีค่าลดลง

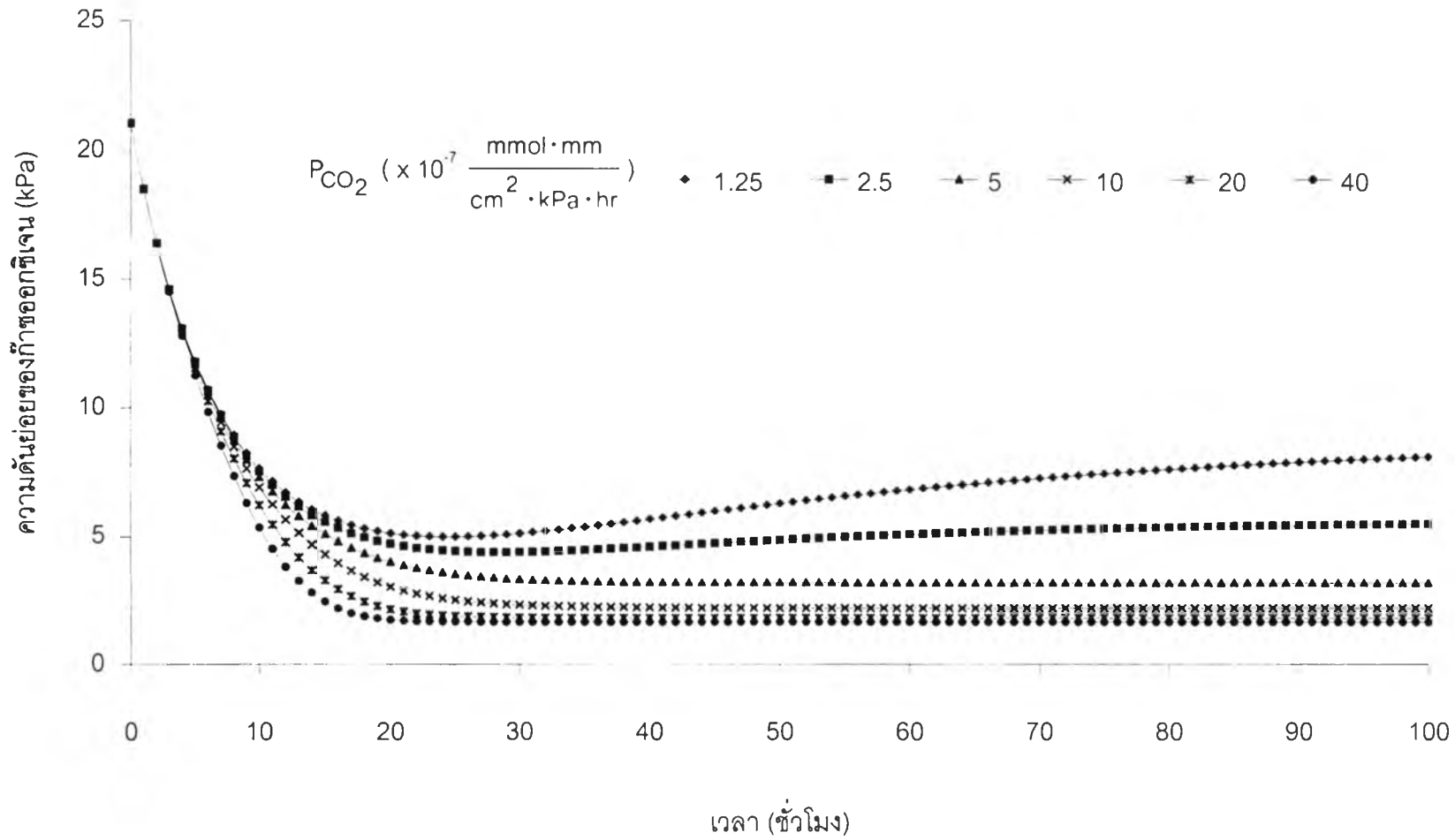
และจากรูปที่ 5.22 พบว่าเมื่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวจะลดลง เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ออกจากบรรจุภัณฑ์ได้มากขึ้น



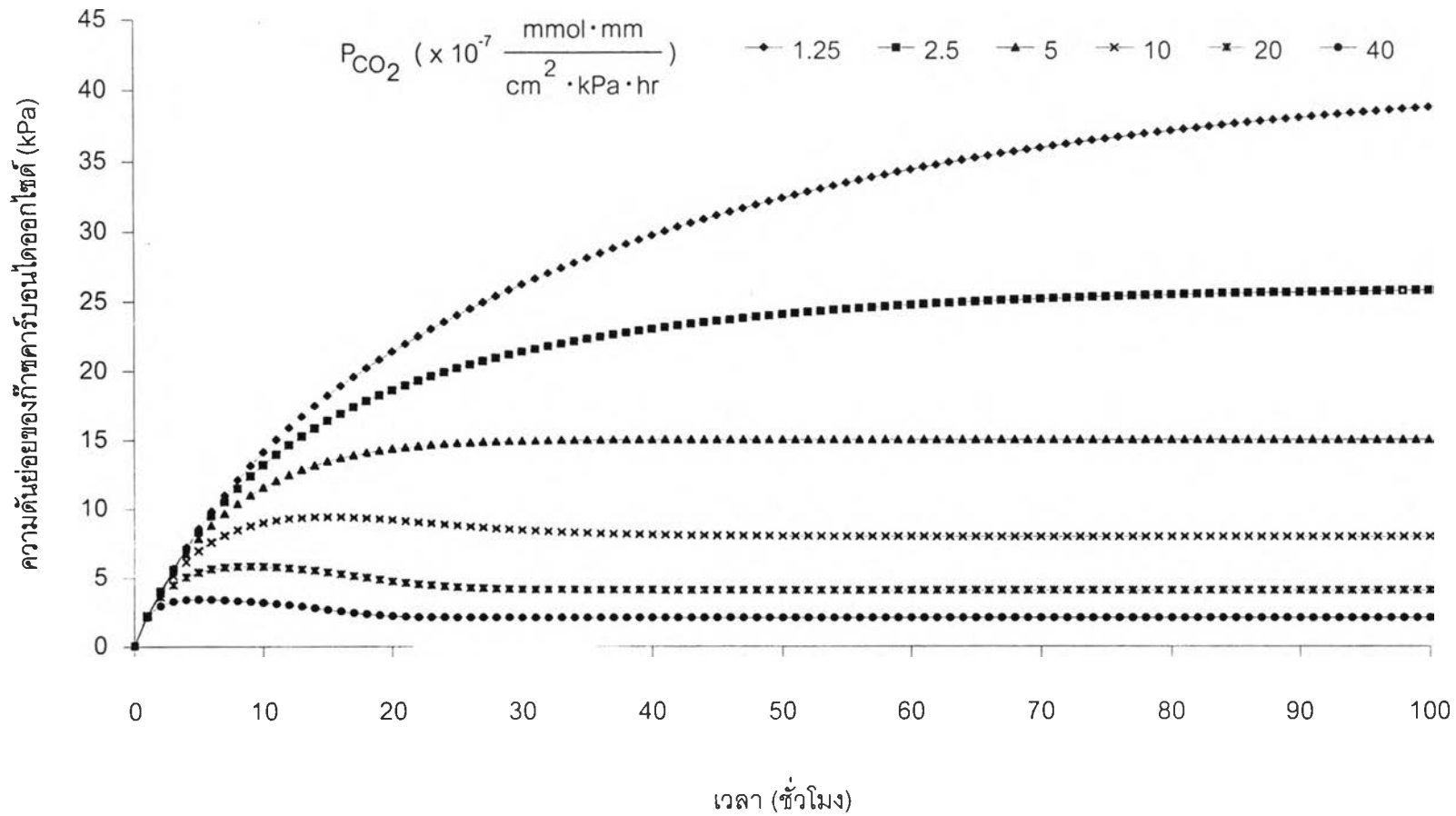
รูปที่ 5.19 ผลกระทบของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ( $P_{O_2}$ ) ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 5.20 ผลกระทบของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ( $P_{O_2}$ ) ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 5.21 ผลกระทบของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $P_{CO_2}$ ) ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 5.22 ผลกระทบของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $P_{CO_2}$ )  
 ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3

#### 5.2.4 การศึกษาผลกระทบของสภาวะในการบรรจุและสภาวะในการเก็บรักษา

กรณีศึกษาที่ 4 การเก็บรักษาบรอกโคลีหนัก 0.05 กิโลกรัม ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ทำจากฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับบรรยากาศ 750 ตารางเซนติเมตร ปริมาตรของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร และฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์หนา 0.025 มิลลิเมตร

การศึกษาเปรียบเทียบสภาวะในการบรรจุ 3 สภาวะ ได้แก่ 1) ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ซึ่งเป็นสภาวะการเก็บรักษาในตู้เย็น 2) ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ซึ่งเป็นการเก็บรักษาตามตู้แบบขายปลีก และ 3) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 ซึ่งเป็นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิและบรรยากาศปกติของประเทศไทย และสภาวะในการเก็บรักษา 3 สภาวะเช่นเดียวกันกับสภาวะการบรรจุ คือเป็นการศึกษาคู่สภาวะของการบรรจุและสภาวะการเก็บรักษาต่าง ๆ กันรวม 9 คู่

ผลกระทบของสภาวะในการบรรจุต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ของกรณีศึกษาที่ 4 แสดงได้ดังรูปที่ 5.23 และ 5.24 ตามลำดับ ส่วนผลกระทบของสภาวะในการเก็บรักษาต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ของกรณีศึกษาที่ 4 แสดงได้ดังรูปที่ 5.25 และ 5.26 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.23 และ 5.24 พบว่าสำหรับการเก็บรักษาที่สภาวะแบบที่ 1 โดยมีสภาวะในการบรรจุต่าง ๆ กัน ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงตามเวลาไปในลักษณะเดียวกัน และที่เวลาหนึ่ง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อสภาวะในการบรรจุเปลี่ยนแปลงไปโดยอุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าน้อย คือที่สภาวะการบรรจุแบบที่ 1 ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนและไอน้ำเป็น 21.1526, 0.0303, 79.6878 และ 0.4294 kPa ตามลำดับ ที่สภาวะการบรรจุแบบที่ 2 เป็น 21.0665, 0.0301, 79.3635 และ 0.8399 ตามลำดับ ส่วนที่สภาวะการบรรจุแบบที่ 3 เป็น 20.7514, 0.0297, 78.1763 และ 2.3427 ตามลำดับ ประกอบกับอัตราการหายใจ อัตราการคายน้ำและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซขึ้นอยู่กับสภาวะในการเก็บรักษา คืออุณหภูมิและความชื้นเป็นหลัก



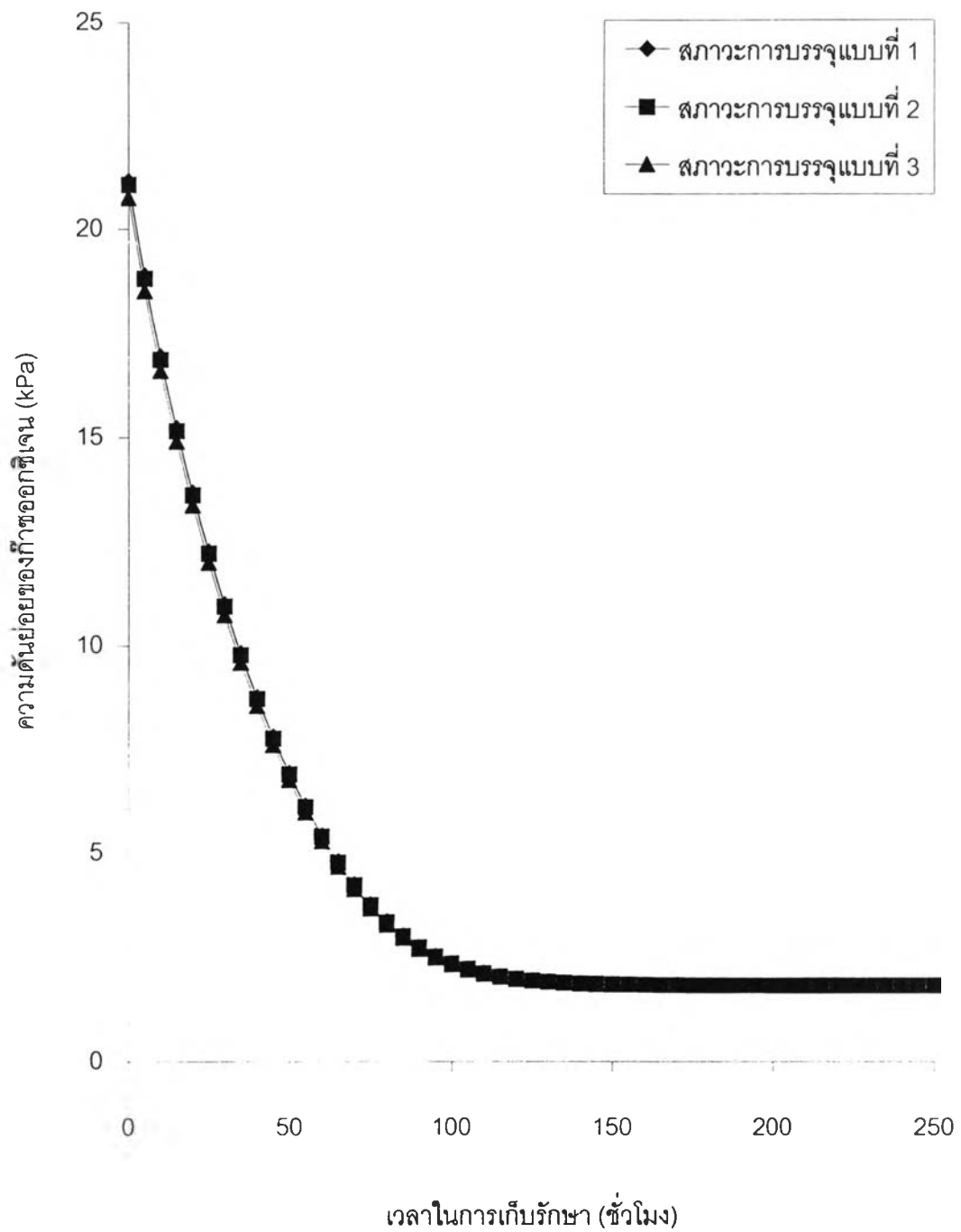
อนึ่ง สำหรับผลของสภาวะการบรรจุต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ของการเก็บรักษาที่สภาวะการเก็บรักษาแบบที่ 2 และ 3 ก็ให้ผลกระทบไปในทำนองเดียวกันกับที่สภาวะการเก็บรักษาแบบที่ 1 คือความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงตามเวลาไปในลักษณะเดียวกัน และที่เวลาหนึ่ง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 5.25 และ 5.26 จะเห็นได้ชัดว่าสำหรับการบรรจุที่ภาวะแบบที่ 1 เมื่อสภาวะในการเก็บรักษาเปลี่ยนแปลงไป ที่เวลาหนึ่ง ๆ ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเก็บรักษา คือสำหรับสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวจะมีค่ามาก ส่วนความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวจะมีค่าน้อย ในขณะที่เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวจะมีค่าสูง และเมื่อเก็บรักษาที่สภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวจะมีค่าต่ำ ส่วนความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวจะมีค่าสูง ในขณะที่เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวจะมีค่าต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปรดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.2.1

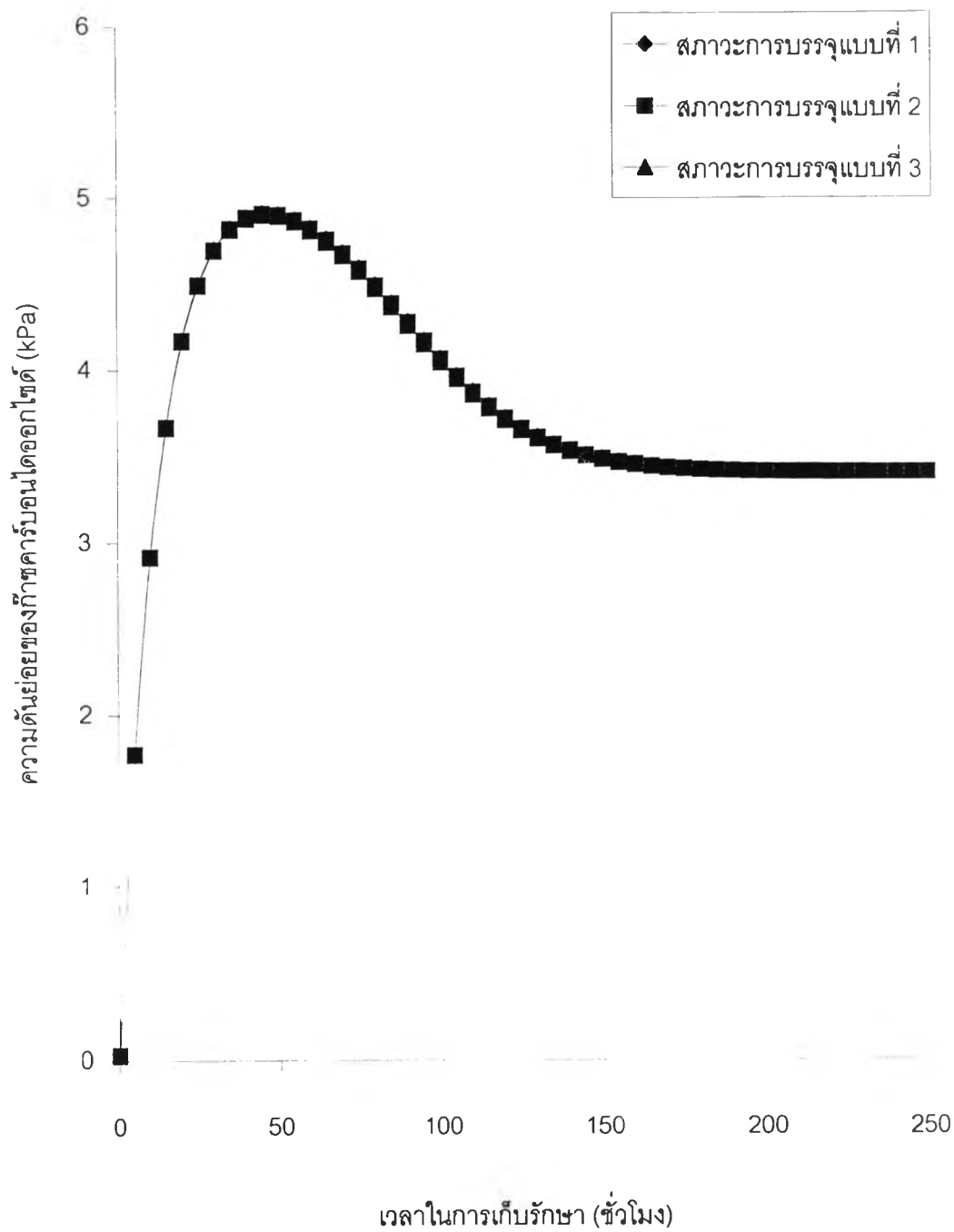
ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ของการเก็บรักษาที่สภาวะการเก็บรักษาแบบที่ 2 และ 3 ก็ให้ผลกระทบไปในทำนองเดียวกัน

สรุปได้ว่าการเก็บรักษาผักและผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรนั้น สภาวะที่บรรจุผักและผลไม้สดมีผลกระทบต่อบรรยากาศดัดแปรที่เกิดขึ้นน้อยมาก ในขณะที่ผลกระทบของสภาวะในการเก็บรักษามีมาก ดังนั้นในการเก็บรักษาด้วยวิธีการนี้จึงควรพิจารณาถึงสภาวะในการเก็บรักษามากกว่าสภาวะในการบรรจุ

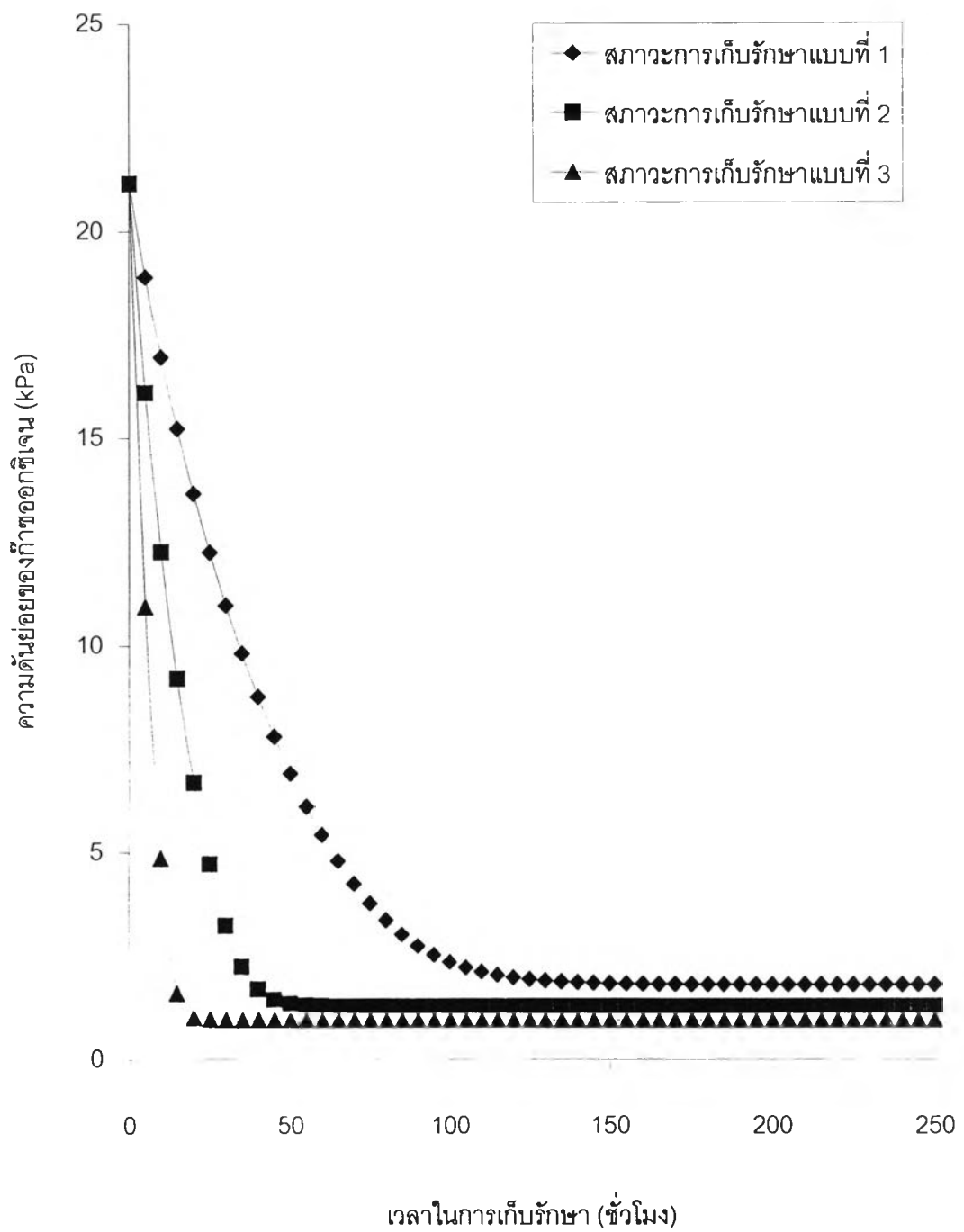
อนึ่ง ผลสรุปที่ได้จากกรณีศึกษาข้างต้น โดยเฉพาะในกรณีที่อุณหภูมิของสภาวะในการเก็บรักษาต่ำกว่าอุณหภูมิของสภาวะในการบรรจุ ไม่ได้คำนึงถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์อันเนื่องมาจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่อุณหภูมิของสภาวะในการบรรจุอาจมีค่ามากกว่าความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิของสภาวะการเก็บรักษา ซึ่งอาจมีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ และค่าความดันย่อยเริ่มต้นของไอน้ำที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



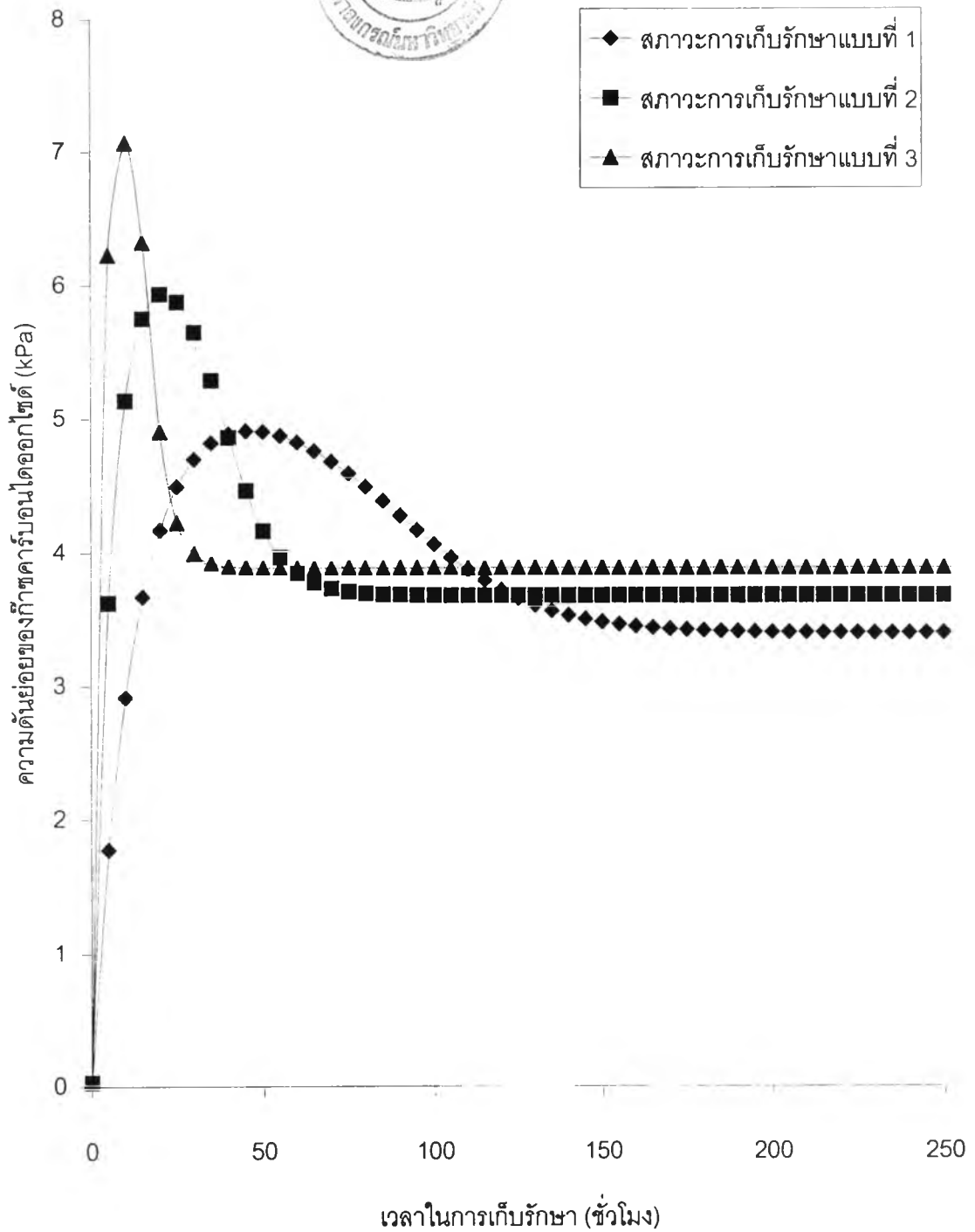
รูปที่ 5.23 ผลกระทบของสภาวะในการบรรจุมต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 โดยเก็บรักษาที่สภาวะแบบที่ 1



รูปที่ 5.24 ผลกระทบของสภาวะในการบรรจุต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 โดยเก็บรักษาที่สภาวะแบบที่ 1



รูปที่ 5.25 ผลกระทบของสภาวะในการเก็บรักษาต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 โดยทำการบรรจุที่สภาวะแบบที่ 1



รูปที่ 5.26 ผลกระทบของสภาวะในการเก็บรักษาต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 โดยทำการบรรจุที่สภาวะแบบที่ 1

## 5.2.5 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

กรณีศึกษาที่ 5 การเก็บรักษาบรอกโคลีหนัก 0.05 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 16 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ในบรรยากาศปกติ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ทำจากฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับบรรยากาศ 750 ตารางเซนติเมตร ปริมาตรของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร และฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์หนา 0.025 มิลลิเมตร โดยทำการบรรจุที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นเป็นร้อยละ 0.03, 5, 10 และ 20 ส่วนความเข้มข้นของก๊าซอื่น ๆ จะเปลี่ยนแปลงลดลงตามอัตราส่วน

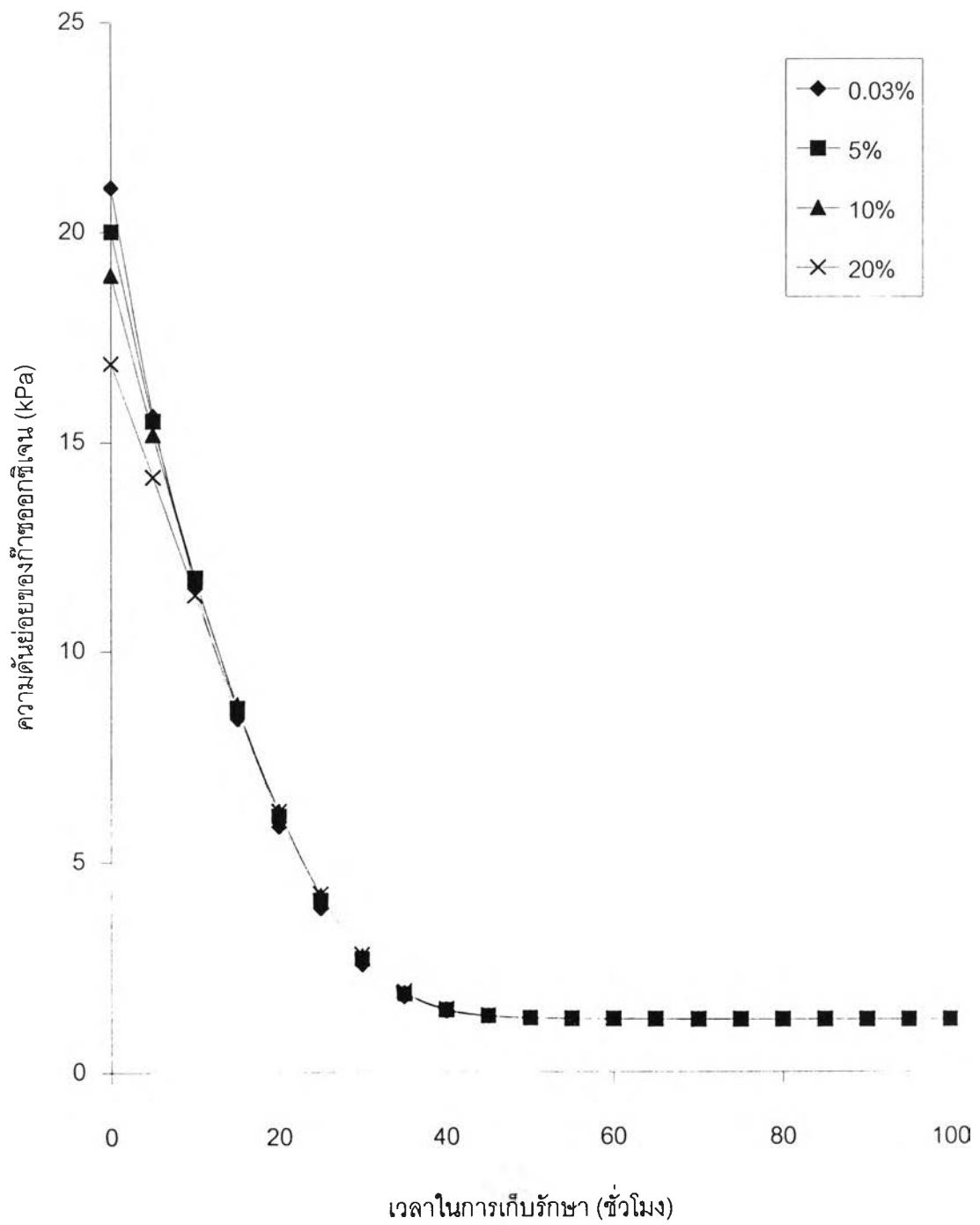
ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ ของกรณีศึกษาที่ 5 แสดงได้ดังรูปที่ 5.27 และ 5.28 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.27 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีผลกระทบต่อค่าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่เวลาใด ๆ โดยรวม เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะส่งผลให้ความดันย่อยเริ่มต้นของก๊าซออกซิเจนลดลงเพียงเล็กน้อย (ดังเช่นที่บรรยากาศปกติความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำมีค่าเท่ากับ 21.0548, 0.0301, 79.3195 และ 0.8956 kPa ตามลำดับ ส่วนที่บรรยากาศที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นร้อยละ 20 มีค่าความดันย่อยเป็น 16.8489, 20.0809, 63.4746 และ 0.8956 kPa ตามลำดับ) ประกอบกับเมื่อระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวขึ้นอยู่กับอัตราหายใจและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นในการเก็บรักษาเป็นหลัก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงไม่มีผลต่อค่าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัว

ส่วนรูปที่ 5.28 พบว่าผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ มีเพียงเฉพาะในช่วงแรกของการเก็บรักษาเท่านั้น โดยถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับค่าที่ภาวะคงตัว ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้น แล้วค่อยลดลง

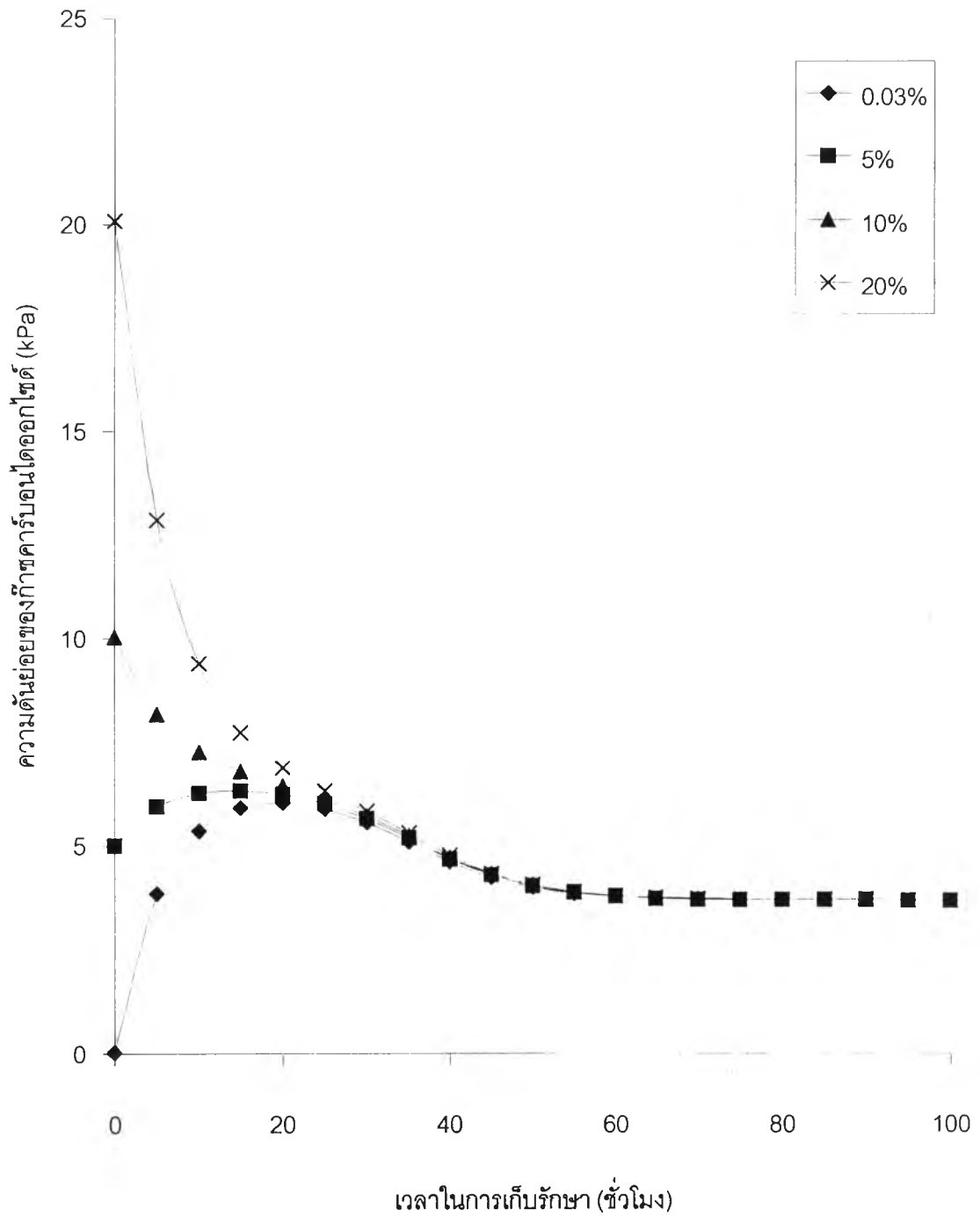
เข้าสู่ภาวะคงตัว ส่วนถ้าในกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่าค่าที่ภาวะคงตัวพอควร ความดันย่อยในช่วงแรกจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลง แล้วค่อยๆ เข้าสู่ภาวะคงตัว และไม่ว่าจะเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่าใด ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวจะมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ค่าเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

สรุปได้ว่าการเก็บรักษาผักและผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศตัดแปรนั้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะที่บรรจุผักและผลไม้สดไม่มีผลกระทบต่อบรรยากาศตัดแปรที่ภาวะคงตัวที่เกิดขึ้น และค่าเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 5.27 ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 5





รูปที่ 5.28 ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 5

### 5.3 กรณีศึกษาของการเลือกหาสภาวะและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

กรณีศึกษาที่ 6 การเลือกหาสภาวะและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาบรอกโคลีภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

จากข้อมูลในตารางที่ 2.11 พบว่าบรอกโคลีมีอุณหภูมิการเก็บรักษาที่เหมาะสมอยู่ที่ 0-5 องศาเซลเซียส ระดับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 1-2 และ 5-10 โดยปริมาตร ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าอุณหภูมิในการเก็บรักษา และความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาลงในสมการที่ 4.27 และ 4.28 จะได้กลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  และ  $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาบรอกโคลีในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.2

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 0 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยปริมาตรมีค่าเป็น 0.02740-0.04039  $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$  และเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยปริมาตร ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมในการเก็บรักษามีค่าเป็น 0.02506-0.03571  $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$  ดังนั้นที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 0 องศาเซลเซียส ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาที่ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยปริมาตรและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงร้อยละ 5-10 โดยปริมาตรจะอยู่ที่ 0.02740-0.03571  $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$

ตารางที่ 5.2 กลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  และ  $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาบรอกโคลี  
ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศตัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ

อุณหภูมิในการเก็บรักษา (°C)	ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสม (ร้อยละโดยปริมาตร)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม (ร้อยละโดยปริมาตร)	$\frac{P_{O_2} A}{dW}$ $\left( \frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}} \right)$	$\frac{P_{CO_2} A}{dW}$ $\left( \frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}} \right)$
0	1	5	0.02740	0.09347
0	1	10	0.02506	0.04261
0	2	5	0.04039	0.13093
0	2	10	0.03571	0.05770
5	1	5	0.04273	0.14556
5	1	10	0.03908	0.06635
5	2	5	0.06299	0.20390
5	2	10	0.05569	0.08986

และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยปริมาตรมีค่าเป็น  $0.04273-0.06299 \frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$  และเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยปริมาตร ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมในการเก็บรักษามีค่าเป็น  $0.03908-0.05569 \frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$  ดังนั้นที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5 องศาเซลเซียส ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาที่ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยปริมาตรและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงร้อยละ 5-10 โดยปริมาตร จะอยู่ที่  $0.04273-0.05569 \frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$

เช่นเดียวกับการพิจารณากลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  ช่วงที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$  สามารถหาได้โดยพิจารณาจากช่วงของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ที่ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมเป็นต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 0 องศาเซลเซียส ได้ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเป็น 0.05770-0.09347  $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$  และที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5 องศาเซลเซียส ได้ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเป็น 0.08986-0.14556  $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$

**กรณีศึกษาที่ 5** การเลือกหาสภาวะและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

จากข้อมูลในตารางที่ 2.11 พบว่าบรอกโคลีมีอุณหภูมิการเก็บรักษาที่เหมาะสมอยู่ที่ 0-5 องศาเซลเซียส ระดับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 3-5 และ 5-7 โดยปริมาตร ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าอุณหภูมิในการเก็บรักษา และความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาลงในสมการที่ 4.27 และ 4.28 จะได้กลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  และ  $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.3

เมื่อพิจารณาตารางที่ 5.3 จะได้ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 0 องศาเซลเซียส เป็น 0.00140-0.00148  $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$  และช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$  มีค่าเป็น 0.00292-0.00437  $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \text{kg}}$  ส่วนที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสได้ช่วงของกลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2} A}{dW}$  และ

$\frac{P_{CO_2 A}}{dW}$  ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาเป็น 0.00215-0.00227 และ 0.00449-0.00671  
 $\frac{mmol}{hr \cdot kPa \cdot kg}$  ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 กลุ่มตัวแปร  $\frac{P_{O_2 A}}{dW}$  และ  $\frac{P_{CO_2 A}}{dW}$  ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลี  
 ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ

อุณหภูมิในการเก็บรักษา (°C)	ความเข้มข้นของ ก๊าซออกซิเจนที่ เหมาะสม (ร้อยละโดย ปริมาตร)	ความเข้มข้นของ ก๊าซคาร์บอนได ออกไซด์ที่เหมาะสม (ร้อยละโดย ปริมาตร)	$\frac{P_{O_2 A}}{dW}$ $\left( \frac{mmol}{hr \cdot kPa \cdot kg} \right)$	$\frac{P_{CO_2 A}}{dW}$ $\left( \frac{mmol}{hr \cdot kPa \cdot kg} \right)$
0	3	5	0.00140	0.00437
0	3	7	0.00128	0.00284
0	5	5	0.00162	0.00450
0	5	7	0.00148	0.00292
5	3	5	0.00215	0.00671
5	3	7	0.00197	0.00437
5	5	5	0.00249	0.00692
5	5	7	0.00227	0.00449