บทที่ 3

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

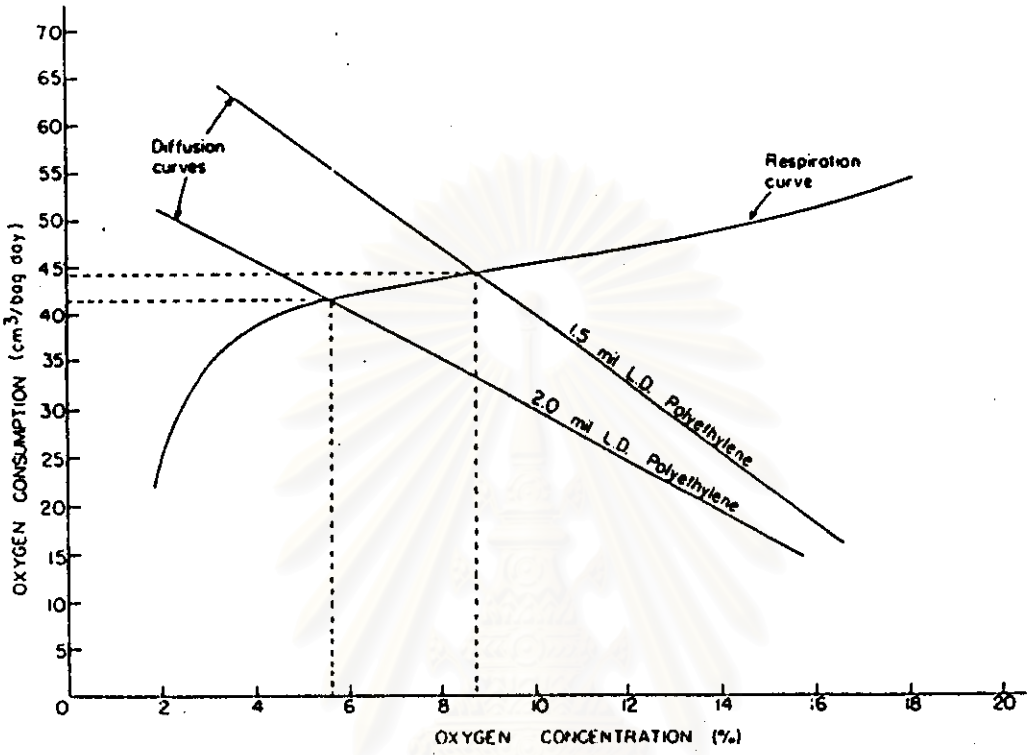
การยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดโดยใช้การบรรจุในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere packaging, MAP) ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ได้มีการศึกษากันมาอย่างแพร่หลายกับผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ จนกระทั่งในปัจจุบันมีการพัฒนาจนสามารถที่จะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้กับผักและผลไม้สดบางชนิด เช่น ผักสลัด ผักกาดขาว สตรอเบอรี่ (strawberry) และบรอคเคอลี่ (broccoli) เป็นต้น [14, 15, 16] งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม คือหาความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนที่สมดุล หาชนิดของพอลิเมอร์ ขนาดของบรรจุภัณฑ์และน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุที่เหมาะสม เป็นต้น เพื่อยืดอายุการเก็บผักและผลไม้สดให้ยาวนานขึ้น และนอกจากการทดลองแล้ว ยังได้มีผู้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่บรรจุผักและผลไม้สด เพื่อช่วยในการทำนายหาตัวแปรของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ ซึ่งจากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะช่วยลดเวลาการลองผิดลองถูกในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากการทดลอง หรือช่วยลดการทำการทดลองที่ไม่จำเป็น เช่น ฟิล์มที่นำมาใช้ทำการทดลองมีค่าการซึมผ่านของแก๊สไม่เพียงพอสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการบรรจุ [3] เป็นต้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ผู้พัฒนาบรรจุภัณฑ์เข้าใจในลำดับก่อนหลังในการเลือก การพัฒนา และการสังเคราะห์วัสดุที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ [3] สำหรับงานวิจัยนี้ได้สนใจถึงการพัฒนาแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่บรรจุผักและผลไม้สด ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะได้กล่าวถึงเฉพาะการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ผ่านมาสำหรับผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ การศึกษาส่วนที่หนึ่งคือการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการหายใจในรูปสมการถดถอย (regression equation) สำหรับทำนายปริมาณการใช้ออกซิเจนในการหายใจ (O_2 consumption) และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกผลิตขึ้นจากการหายใจ (CO_2 evolution) ของผักและผลไม้สดให้มีค่าที่แม่นยำที่สุด เพื่อว่าเมื่อนำสมการถดถอยที่อธิบายปริมาณแก๊สที่ใช้ในการหายใจมารวมกับสมการอนุพันธ์สำหรับคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ จะสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของแก๊สที่เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรเมื่อบรรจุผักและผลไม้สดได้ค่าที่ตรงกับผลการทดลองมากที่สุด [3] และการศึกษาส่วนที่สองคือการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ ชนิดของฟิล์มที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ความหนา และพื้นที่ผิวของฟิล์ม เป็นต้น ซึ่งช่วยในการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ

ในปี 1963 Jurin และ Karel [17] ได้ทำการทดลองหาอัตราการหายใจของแอปเปิ้ลแมคอินทอช (McIntosh apples) โดยวัดอัตราการใช้ออกซิเจนกับปริมาณออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตรกราฟฟี (gas chromatography) และศึกษาผลกระทบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับปริมาณแก๊สออกซิเจน ซึ่งพบว่าอัตราการใช้ออกซิเจนจะแปรผันตามปริมาณออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ โดยในช่วงที่ปริมาณออกซิเจนสูงกว่าร้อยละ 3.5 โดยปริมาตร (ในช่วงร้อยละ 18.5 ถึง 3.5 โดยปริมาตร) อัตราการใช้ออกซิเจนจะลดลงอย่างสม่ำเสมอตามปริมาณออกซิเจนจาก 9 ถึง 6 $cc.kg^{-1}.hr^{-1}$ แต่ถ้าออกซิเจนมีปริมาณน้อย (ต่ำกว่าร้อยละ 3.5 โดยปริมาตร) อัตราการใช้ออกซิเจนจะลด

ลงอย่างรวดเร็วจาก 6 เป็น 3 $cc.kg^{-1}hr^{-1}$ เมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงจากร้อยละ 3.5 ถึงร้อยละ 1 โดยปริมาตร แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าร้อยละ 3.5 โดยปริมาตรนั้น แอปเปิ้ลเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) ส่วนผลกระทบของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ต่อความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับปริมาณแก๊สออกซิเจนนั้นพบว่า ถ้าปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูง (มากกว่าร้อยละ 5-6 โดยปริมาตร) จะมีผลทำให้ปริมาณการใช้ออกซิเจนและปริมาณการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 1 ถึง 2 แต่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นี้จะไม่มีผลทำให้ค่าปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ำสุดที่แอปเปิ้ลยังสามารถใช้ในการหายใจแบบใช้ออกซิเจน (คือออกซิเจนประมาณร้อยละ 3.5 โดยปริมาตร) เปลี่ยนแปลงแต่อย่างไร ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ได้มาถูกนำมาใช้ทำนายสภาวะความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ที่เหมาะสมสำหรับแอปเปิ้ลด้วยการคำนวณโดยใช้กราฟ (เมื่อกำหนดค่าตัวแปรของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งได้แก่ ปริมาตร พื้นที่ผิว และค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของบรรจุภัณฑ์ทั้งหมดแล้ว) วิธีการคำนวณคือวาดกราฟอัตราการหายใจและการซึมผ่านของออกซิเจนลงในกราฟเดียวกัน และจะได้ความเข้มข้นสมดุลที่จุดตัดของกราฟดังรูป 3.1 ซึ่งการคำนวณนี้ได้สมมุติให้การสะสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีผลต่อการหายใจ และเศษส่วนการหายใจ (respiratory quotient, R.Q.) เท่ากับ 1 เมื่อนำผลการคำนวณที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นที่สมดุลจากผลการคำนวณและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน วิธีการคำนวณแบบนี้สามารถช่วยในการทำนายปริมาณออกซิเจนที่สมดุลได้โดยมิต้องทำการทดลอง แต่วิธีการคำนวณโดยใช้กราฟแบบนี้ไม่สามารถคำนวณสภาวะก่อนเข้าสมดุลและเวลาในการเข้าสู่สมดุลได้



รูป 3.1 การหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุลของแอปเปิ้ลที่บรรจุในถุงพอลิเอทธิลีนโดยวิธีการวาดกราฟ [17]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากการทำนายความเข้มข้นที่สมดุลโดยใช้กราฟแล้ว ในปีค.ศ. 1975 Henig และ Gilbert [18] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสมดุลมวลของแก๊สต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของแก๊สต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP กับเวลา โดยคิดว่าอัตราการหายใจขึ้นอยู่กับปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ดังรูป 3.2 แต่มิได้เขียนแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการไว้ในเอกสารงานวิจัย แบบจำลองนี้สามารถคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สต่าง ๆ ทั้งที่สภาวะสมดุลและที่สภาวะก่อนเข้าสมดุล และยังสามารถนำมาใช้เพื่อการออกแบบบรรจุภัณฑ์ได้ด้วย ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วยสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first order ordinary differential equation) 2 สมการ ดังนี้

$$\frac{dV_{oi}}{dt} = K_1 * A * \left(0.21 - \frac{V_{oi}}{V}\right) - f\left(\frac{V_{oi}}{V}, \frac{V_{ci}}{V}\right) \qquad (3.1)$$

$$\frac{dV_{ci}}{dt} = g\left(\frac{V_{oi}}{V}, \frac{V_{ci}}{V}\right) - K_2 * A * \left(\frac{V_{ci}}{V}\right) \qquad (3.2)$$

โดย V_{oi} คือ ปริมาตรของแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ (cc.)

V_{ci} คือ ปริมาตรของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ (cc.)

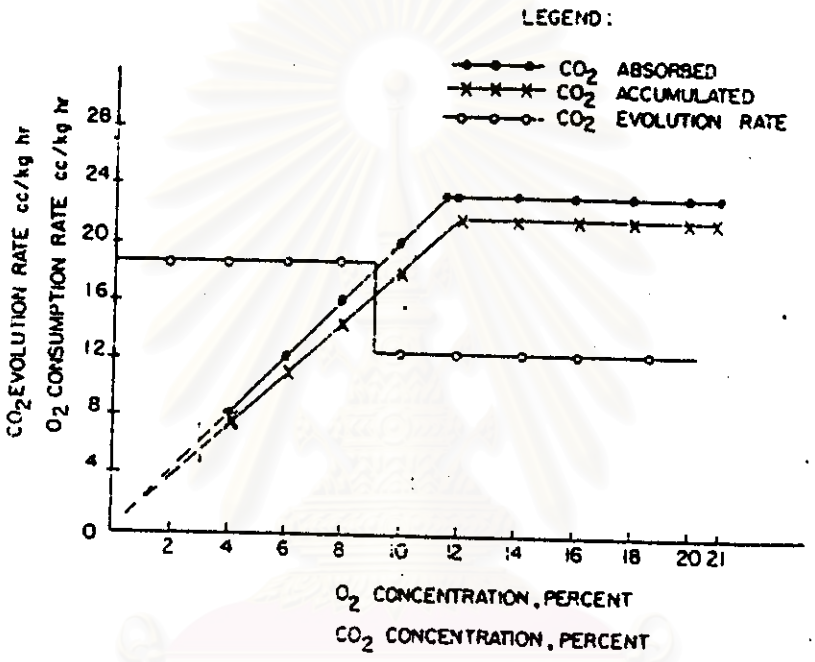
V คือ ปริมาตรอิสระทั้งหมดในบรรจุภัณฑ์ (cc.)

K_1, K_2 คือ ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม ตามลำดับ (cc. $hr^{-1}.in^{-2}$)

A คือ พื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ฟิล์มที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ($in.^2$)

t คือ เวลา (hr.)

f, g คือ ฟังก์ชันอัตราการใช้ออกซิเจนและอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สด ตามลำดับ

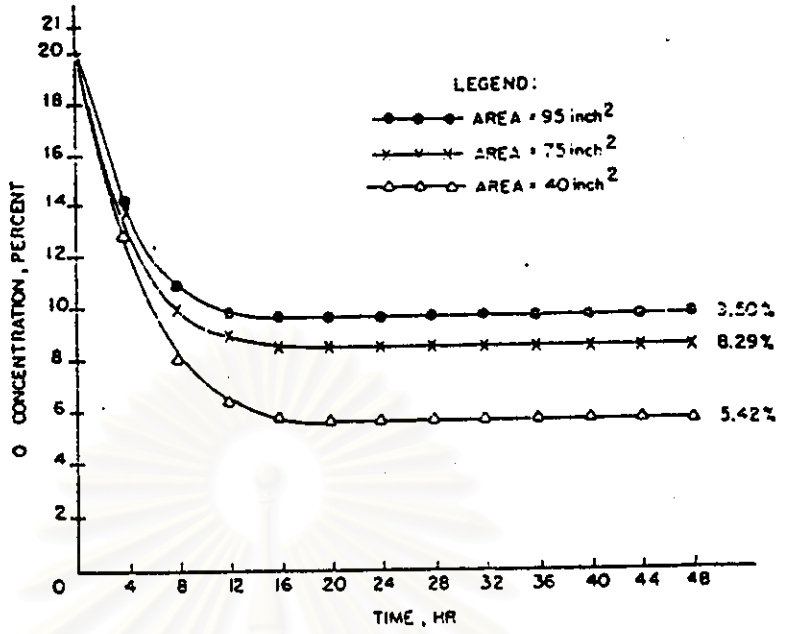


รูป 3.2 ผลกระทบของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการใช้แก๊สออกซิเจนและอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศที่ 23°ซ [18]

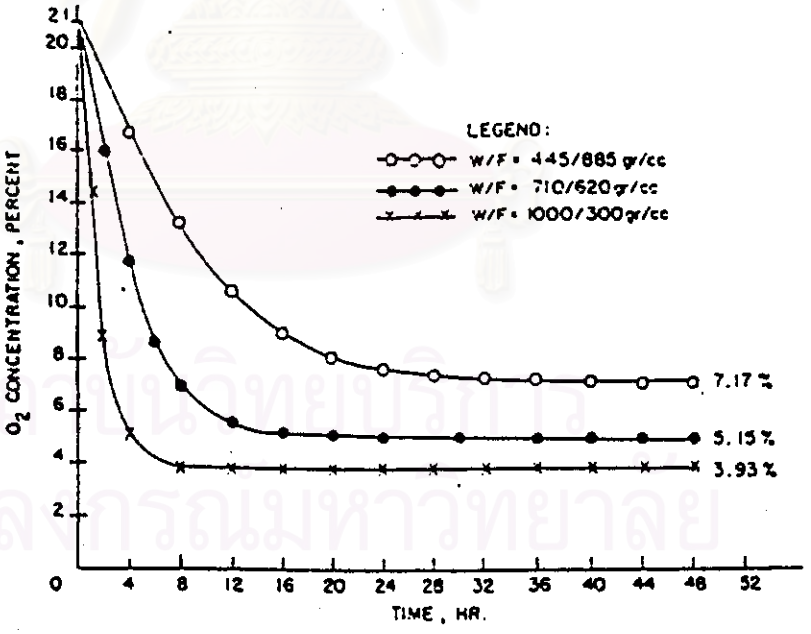
Henig และ Gilbert [18] ได้ใช้แบบจำลองนี้คำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สที่เปลี่ยนแปลงภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ที่บรรจุมะเขือเทศโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งแสดงผลออกมาในรูปของปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเวลา ผลที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง พบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นนี้มาช่วยวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรของบรรจุภัณฑ์บางตัว คือ พื้นที่ผิว และอัตราส่วนของน้ำหนักของมะเขือเทศต่อปริมาตรอิสระภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งพบว่าเมื่อพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์มากขึ้น ปริมาณของออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ก็สูงขึ้น ส่วนเวลาเข้าสู่สมดุลไม่แตกต่างมากนัก แต่ถ้าอัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตรอิสระภายในบรรจุภัณฑ์สูงขึ้น ปริมาณของออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์จะต่ำลง และเวลาเข้าสู่สมดุลมีแนวโน้มเร็วขึ้น ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4

จากการแก้สมการเชิงตัวเลข (numerical solution) โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณนี้ ช่วยให้สามารถทำนายผลการเปลี่ยนแปลงของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ได้เร็วขึ้นแม้ว่าตัวแปรของบรรจุภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม นอกจากนั้นยังช่วยในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ ได้รวดเร็วขึ้นและลดค่าใช้จ่ายมากกว่าการทำการทดลอง

ในปีเดียวกัน Hayakawa และคณะ [19] ทำการดัดแปลงสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ของ Henig and Gilbert [18] เล็กน้อยในด้านความสัมพันธ์ของสมการอัตราการหายใจ โดยเสนอว่าอัตราการหายใจขึ้นอยู่กับทั้งปริมาณของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบสมการเส้นตรง ส่วนสมการอนุพันธ์ยังคงคล้ายเดิม ดังแสดงในสมการ (3.3) ถึง (3.6)



รูป 3.3 ผลกระทบของพื้นที่ต่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์แบบ RMF- 61 [18]



รูป 3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์แบบ RMF- 61 [18]

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Sk_y}{Vl}(y_a - y) - \frac{W}{V}R_y \quad (3.3)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Sk_z}{Vl}(z_a - z) + \frac{W}{V}R_z \quad (3.4)$$

เมื่อ $R_y = oy + pz + q$ (3.5)

$R_z = dy + ez + f$ (3.6)

โดย y, z คือ ปริมาณของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ (ไม่มีหน่วย)

t คือ เวลาหลังจากการบรรจุ (hr)

V คือ ปริมาตรอิสระทั้งหมดในบรรจุภัณฑ์ (cc.)

k_y, k_z คือ ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม ตามลำดับ (cc.mil.hr^{-1} $in.^{-2}$.atm^{-1})

S คือ พื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ฟิล์มที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ($in.^2$)

W คือ น้ำหนักของผักและผลไม้สดที่ถูกบรรจุ (kg)

l คือ ความหนาของฟิล์ม (mil)

R คือ อัตราการหายใจ ((cc of O_2 หรือ CO_2).hr^{-1}.kg^{-1})

o, p, q, d, e, f คือ ค่าคงที่

ตัวห้อย a คือ ตำแหน่งที่ภายนอกบรรจุภัณฑ์

Hayakawa และคณะ [19] ได้ทำการแก้สมการอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) โดยใช้วิธีแปลงรูปลาปลาซ (Laplace Transformation) ช่วยในการแก้ปัญหา ทำให้ได้สมการคำตอบที่มีตัวแปรของบรรจุภัณฑ์รวมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นข้อดีของการแก้สมการเชิงวิเคราะห์ จากนั้นได้ดัดแปลงสมการคำตอบให้อยู่ในรูปที่ง่าย โดยใช้สมมุติฐานว่าอัตราการใช้แก๊สออกซิเจนขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สออกซิเจนเท่านั้นและอัตราการหายใจใน

การผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้นเพื่อความสะดวกในการแสดงตัวอย่างการคำนวณ แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของการบรรจุมะเขือเทศใน MAP ของ Henig และ Gilbert [18] ซึ่งพบว่าให้ค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เพื่อยืนยันว่าอัตราการหายใจขึ้นอยู่กับทั้งปริมาณของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์จริง จึงได้ทำการฟิตข้อมูลจากผลการทดลองในรูปสมการเอกโปเนนเชียล (exponential equation) อย่างง่ายที่คล้ายคลึงกับรูปสมการที่ได้จากคำตอบจากการแก้สมการเชิงวิเคราะห์ข้างต้น ซึ่งพบว่าให้ค่าที่ถูกต้องใกล้เคียงมากกว่าการคำนวณแบบอย่างง่าย แสดงว่าอัตราการหายใจขึ้นอยู่กับทั้งปริมาณของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์สำหรับมะเขือเทศสด

ต่อมาในปีค.ศ. 1981 Deily และ Rizvi [20] ได้นำสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ของ Hayakawa และคณะ [19] มาใช้ โดยทำการคำนวณเชิงวิเคราะห์ และได้เสนอแบบจำลองอัตราการหายใจว่า อัตราการหายใจของลูกพีช (peach) มีค่าคงที่ตลอดไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของแก๊สใด ๆ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์กับเวลา ซึ่งช่วยในการทำนายความเข้มข้นที่สมดุล เวลาที่ใช้ในการเข้าสมดุล และช่วยเลือกชนิดของฟิล์มที่เหมาะสมที่สุดในการบรรจุลูกพีช นอกจากการคำนวณแล้ว Deily และ Rizvi [20] ได้ทำการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลจากการคำนวณด้วย โดยทำการทดลองศึกษาบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับบรรจุลูกพีชเพื่อหาปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดในการยืดอายุการเก็บ ลูกพีชสดได้ถูกบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรซึ่งถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ $5\pm1^{\circ}$ซ เป็นเวลา 30 วัน ตัวอย่างของลูกพีชจะถูกเก็บทุก ๆ 10 วัน นำมาวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพของลูกพีช จากผลการทดลองพบว่าที่ร้อยละ 10-15 ของแก๊สออกซิเจนโดยปริมาตร และร้อยละ 15-25 ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยปริมาตร เป็นความเข้มข้นแก๊สในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุด และไม่ก่อให้ลูกพีชเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณพบว่า ถ้าต้องการปริมาณแก๊สที่สมดุลตามที่ทำการ

ทดลองได้นั้น จะไม่สามารถใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีจำหน่ายอยู่แล้วในเชิงพาณิชย์ได้ เพราะว่าค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเมอร์ฟิล์มทั่วไปจะมีค่าสูงกว่าค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน แต่จากการคำนวณความเข้มข้นที่สมดุลกลับพบว่าต้องการค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเมอร์ฟิล์มต่ำกว่าค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน อย่างไรก็ตาม Deily และ Rizvi [20] ได้ทำการทดลองการบรรจุลูกพีชแบบ MAP ด้วยฟิล์มหลายชนิดเพิ่มเติมโดยศึกษาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแก๊สต่าง ๆ กับเวลา เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่เขียนขึ้น ซึ่งพบว่าแบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในบรรจุภัณฑ์ได้อย่างใกล้เคียง

ในปีค.ศ. 1988 Yang และ Chinnan [22, 23] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ที่คล้ายคลึงกับผลงานของ Hayakawa และคณะ [19] แต่ได้เปลี่ยนสมการรูปแบบอนุพันธ์มาเป็นสมการผลต่างเชิงตัวเลขดังแสดงในสมการ (3.7) และ (3.8) ดังนั้นการคำนวณจึงเป็นการคำนวณการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาระยะเวลาสั้น ๆ

$$\alpha = k_O A(0.21-C_O)\Delta T - R_O W\Delta T \qquad (3.7)$$

$$\beta = k_C AC_C\Delta T - R_C W\Delta T \qquad (3.8)$$

โดย α และ β คือ ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงระยะเวลา ΔT ตามลำดับ (cc)

k_O, k_C คือ ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม ตามลำดับ (cc of gas.hr^{-1}.m^{-2})

A คือ พื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ฟิล์มที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ (m^2)

R_O และ R_C คือ อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนและอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ((cc of O_2 หรือ CO_2).hr^{-1}.kg^{-1})

ΔT คือ ช่วงระยะเวลาหลังจากการบรรจุ (hr)

W คือ น้ำหนักของผักและผลไม้สดที่ถูกบรรจุ (kg)

C_O, C_C คือ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (cc)

นอกจากนั้น Yang และ Chinnan [22, 23] ได้เสนอแบบจำลองอัตราการหายใจที่ขึ้นอยู่กับ 3 ตัวแปร คือปริมาณแก๊สออกซิเจน ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลา ในรูปของสมการโพลิโนเมียล ซึ่งเมื่อทำการฟิตข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาผลของปริมาณแก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาต่ออัตราการหายใจของมะเขือเทศ พบว่าสามารถใช้ได้อย่างเหมาะสม แล้วเมื่อนำผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ข้างต้น (สมการ (3.7) และ (3.8)) มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับการเก็บมะเขือเทศในฟิล์ม 2 ชนิดคือ ฟิล์ม Cryovac แบบ E และ D-955 ที่ 21°ซ พบว่า แบบจำลองสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สได้ดีในช่วงระยะเวลาการเก็บนาน ๆ แต่ไม่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้นได้ (transient state)

ในปีค.ศ. 1989 Cameron และคณะ [24] ได้เสนอแบบจำลองอัตราการหายใจของการใช้ออกซิเจนของมะเขือเทศว่า อัตราการหายใจของการใช้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ในรูปของสมการเอกโปเนนเชียล (exponential equation)

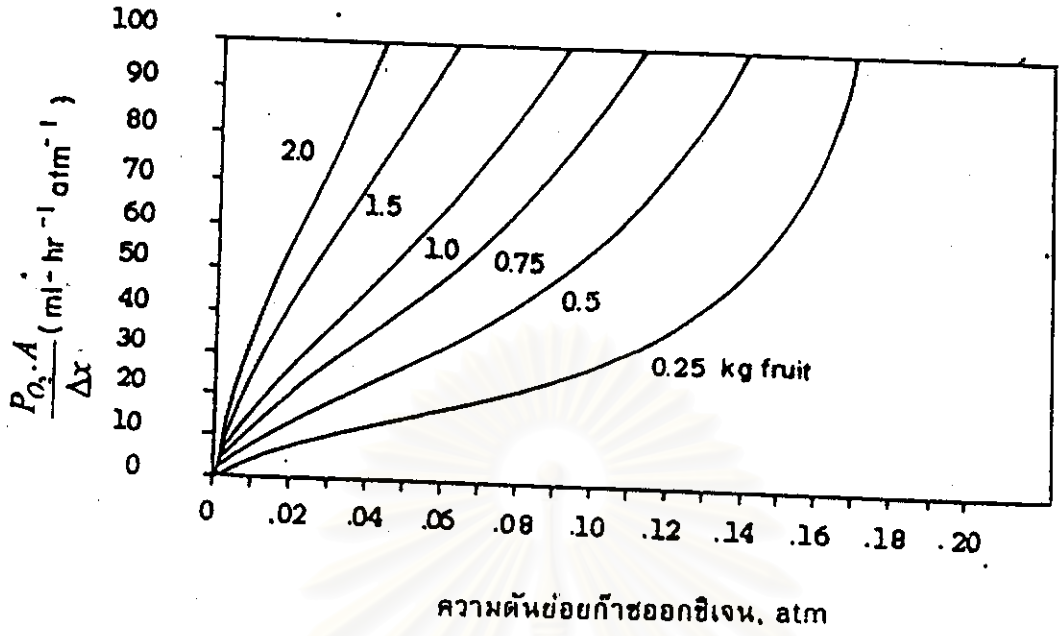
$$RR_{O2} = q(1-e^{-r[O2]_s}) \qquad (3.9)$$

โดย RR_{O2} คือ อัตราการหายใจ ($ml.kg^{-1}.hr^{-1}$)

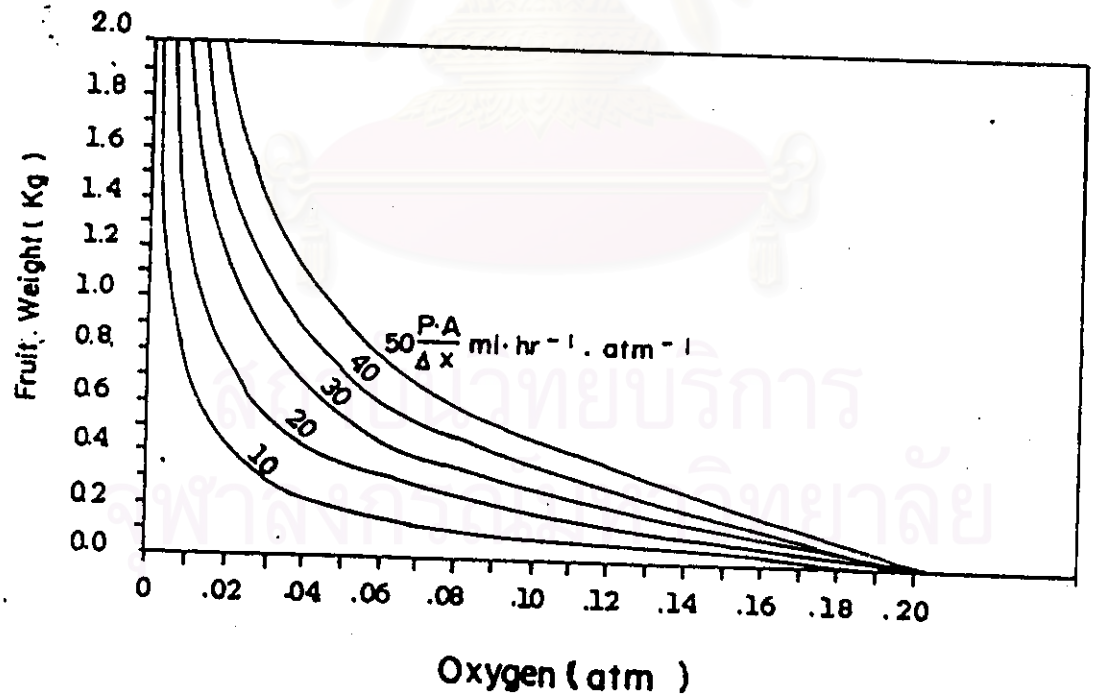
q, r และ s คือ ค่าคงที่ของสมการ

[O2] คือความดันย่อยของออกซิเจน (atm)

เมื่อทำการฟิตสมการข้างต้นกับผลการทดลองหาอัตราการหายใจของมะเขือเทศ 3 ชนิด พบว่าสมการข้างต้นสามารถใช้เป็นแบบจำลองอัตราการหายใจของมะเขือเทศได้อย่างดี จากนั้นจึงได้นำสมการแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้มาแทนในอัตราการหายใจในสมการอนุพันธ์ของ Hayakawa และคณะ [19] เพื่อใช้ในการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยได้วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรของบรรจุภัณฑ์ (ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนผ่านฟิล์ม พื้นที่ผิว และความหนา) กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุลที่น้ำหนักของมะเขือเทศต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6

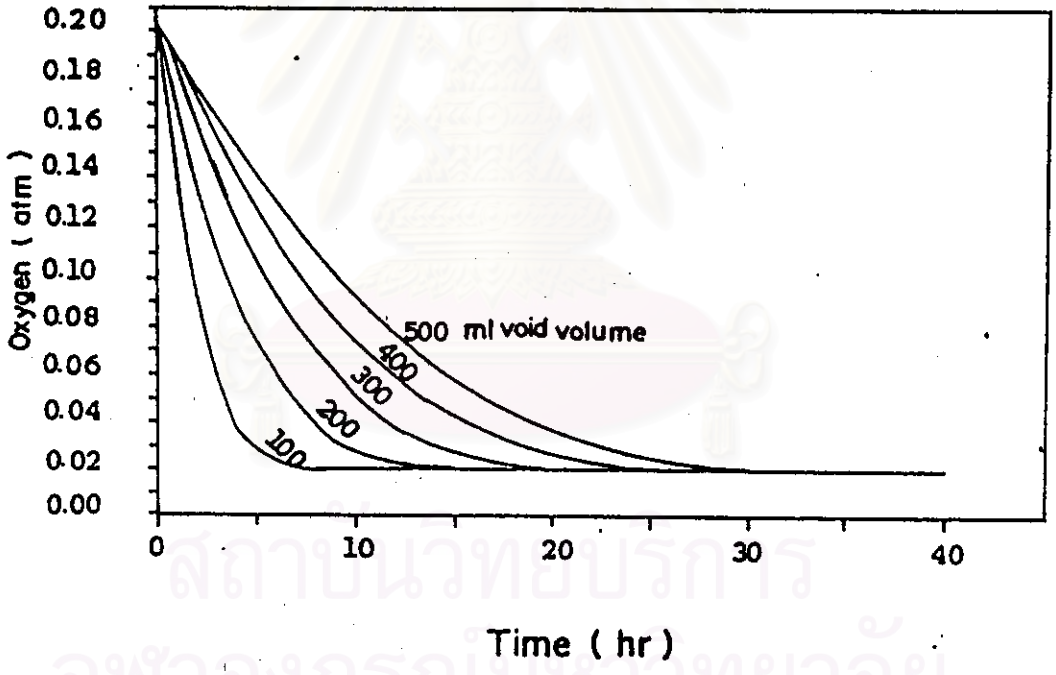


รูป 3.5 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมกับการบรรจุมะเขือเทศน้ำหนักต่าง ๆ กันภายใต้ MAP ที่มีความดันย่อยแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ [24]



รูป 3.6 การคาดคะเนน้ำหนักมะเขือเทศที่เหมาะสมในการบรรจุภายใต้ MAP ที่มีความดันย่อยแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ โดยใช้ฟิล์มที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ [24]

กราฟเหล่านี้ช่วยในการทำนายหาบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับมะเขือเทศได้ จากกราฟเหล่านี้ทำให้พบคุณลักษณะอย่างหนึ่งที่น่าสนใจคือ ระบบบรรจุภัณฑ์มีความยืดหยุ่นอย่างมากในการที่จะได้ระดับแก๊สออกซิเจนที่สมดุล เช่น ถ้าต้องการความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุล 0.02 ถึง 0.04 atm สามารถที่จะใช้น้ำหนักของมะเขือเทศที่แตกต่างกันถึงเกือบ 2 เท่าได้โดยใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ชุดเดียวกัน แสดงว่าน้ำหนักมะเขือเทศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่สมดุลค่อนข้างน้อย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สกับเวลาที่ปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์มีค่าลดลง เวลาก่อนเข้าสมดุลจะลดลงด้วยดังรูป 3.7



รูป 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยแก๊สออกซิเจนกับเวลาที่แก๊สถึงสมดุลในการบรรจุมะเขือเทศ 500 กรัมด้วยฟิล์มที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สเท่ากับ 13.43 $cc.hr^{-1}.atm^{-1}$ โดยมีปริมาตรอิสระภายในบรรจุภัณฑ์แตกต่างกัน [24]

ต่อมาในปีค.ศ. 1991 Lee และคณะ [25] ได้เปลี่ยนมุมมองในการจำลองอัตราการหายใจ โดยแทนที่จะจำลองในรูปสมการคณิตศาสตร์ทั่วไป เขาได้เสนอแบบจำลองสมการอัตราการหายใจในมุมมองทางชีวเคมีในรูปของการทำงานของเอนไซม์ (enzyme kinetics) เนื่องจากความคิดที่ว่าการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นมีการทำงานของเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องอย่างมากดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ดังนั้นพวกเขาจึงสมมุติว่า คาร์บอนไดออกไซด์มีบทบาทในฐานะเป็นตัวยับยั้งในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ และใช้สมการการทำงานของเอนไซม์ของ Michaelis-Menten แบบ uncompetitive แทนอัตราการหายใจได้ดังนี้

$$r = \frac{V_m C_1}{\left[K_m + \left(1 + C_2 / K_i\right)\right]} \qquad (3.10)$$

โดย r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการหายใจ

C_1 คือ ความเข้มข้นของซับสเตรท (substrate) (ซึ่งก็คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนในกรณีของการหายใจ)

V_m คือ ค่าสูงสุดของอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้เอนไซม์

K_m คือ ค่าคงที่ Michaelis

C_2 คือ ความเข้มข้นของตัวยับยั้ง (ซึ่งก็คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีของการหายใจ)

K_i คือ ค่าคงที่ของสมดุลระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์และซับสเตรท และตัวยับยั้งอิสระ

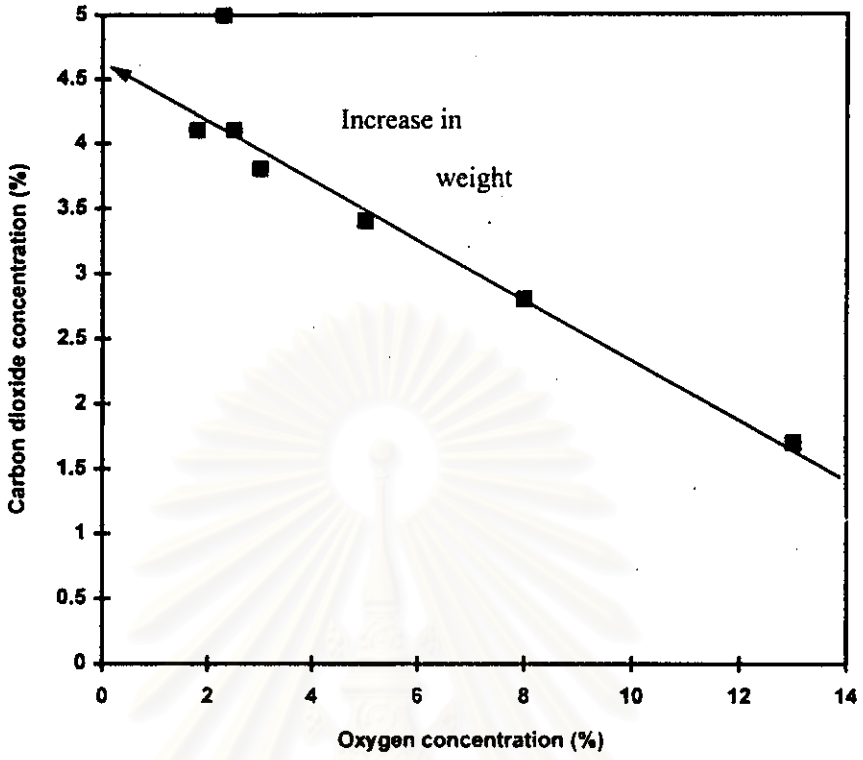
Lee และคณะ [25] ได้นำผลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นมาใช้ในการพิสูจน์แบบจำลองอัตราการหายใจของพวกเขา ซึ่งพบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจที่เสนอนี้สามารถใช้แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการหายใจกับปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างใกล้เคียง และเมื่อรวมสมการนี้เข้ากับกฎของฟิก (Fick's law) สำหรับการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ก็จะได้ชุดสมการอนุพันธ์ที่แสดงถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบ MAP ซึ่งคล้ายกับแบบจำลอง

ของ Hayakawa และคณะ [19] ต่อจากนั้นได้ทำการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของแก๊สกับเวลาและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่ง Lee และคณะ [25] ได้ทดลองบรรจุบรอคเคอลี่ใน MAP พบว่าการคำนวณและการทดลองให้กราฟที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงก่อนเข้าภาวะสมดุล

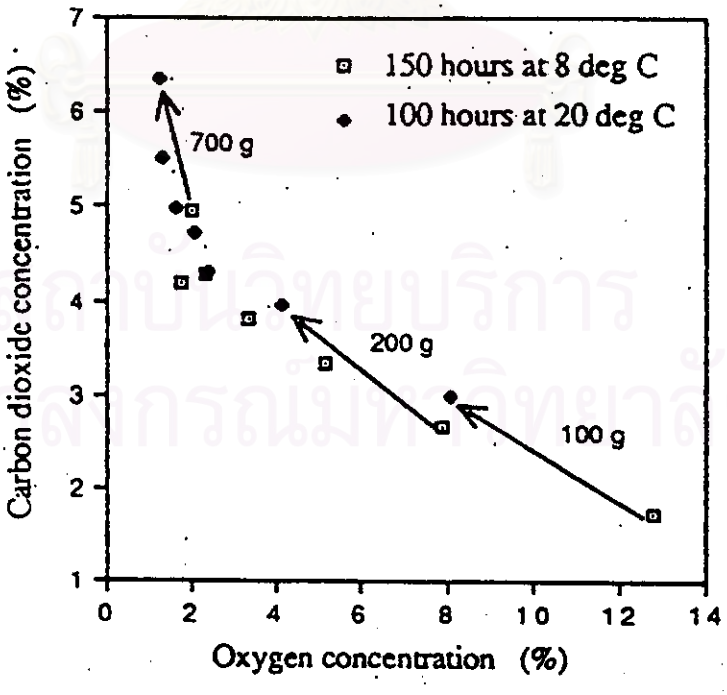
ในปีค.ศ. 1994 Pospisil และคณะ [26] ได้ศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการหายใจของผักเพื่อหาฟิล์มพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer film) ที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP โดยสนใจในการนำฟิล์มพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่สามารถย่อยสลายได้นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับกระหล่ำปลีสับ และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการหายใจ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่งในการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ MAP โดยเสนอว่าอัตราการหายใจของกระหล่ำปลีสับขึ้นอยู่กับปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของสมการโพลิโนเมียล (polynomial equation) ประสิทธิภาพของแบบจำลองที่เสนอได้ถูกตรวจสอบกับการทดลองโดย Pospisil และคณะ [26] ได้ทำการทดลองกับบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากฟิล์ม LDPE ผสมแป้ง (แป้งร้อยละ 10 โดยน้ำหนักโดยศึกษาฟิล์มที่มีความหนา 0.030 และ 0.060 มิลลิเมตร) และฟิล์ม LDPE ธรรมดา (ความหนา 0.060 มิลลิเมตร) ที่บรรจุกระหล่ำปลีสับ ภายใต้อุณหภูมิ 6 °ซ และติดตามผลการทดลองโดยการวัดความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา วัดค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนก่อนทดลอง และวัดค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์หลังการทดลอง นอกจากนี้ยังวัดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของกระหล่ำปลีสับหลังจากถูกเก็บไว้เป็นเวลา 10 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ผสมแป้งจะให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สสูงขึ้น โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และให้คุณภาพของกระหล่ำปลีฝอยที่ถูกเก็บไว้เป็นเวลา 10 วันดีกว่ากระหล่ำปลีที่ถูกบรรจุในฟิล์มที่ไม่ผสมแป้ง ส่วนแบบจำลองอัตราการหายใจที่ถูกเสนอนั้นพบว่าสามารถใช้ได้ดีแม้เมื่อปริมาณออกซิเจนหรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า

อยู่ในช่วงกว้าง และได้นำแบบจำลองอัตราการหายใจนี้มารวมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบ MAP โดยใช้สมการของ Hayakawa และคณะ [19] ที่ใช้สำหรับคำนวณที่จุดสมดุล แล้วนำมาคำนวณหาค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับกระหล่ำปลีสับ (ซึ่งกำหนดว่าแก๊สออกซิเจนร้อยละ 3 โดยปริมาตรและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 9.88 โดยปริมาตรเหมาะสมสำหรับการเก็บกระหล่ำปลีสับมากที่สุด) พบว่าค่าการซึมผ่านของแก๊สที่คำนวณได้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าการซึมผ่านของฟิล์มที่นำมาทดลอง

นอกเหนือจากการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองที่ถูกเสนอแล้ว ยังได้มีการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการออกแบบบรรจุภัณฑ์ โดยในปี ค.ศ. 1989 Mannapperuma และคณะ [27] ได้ทำการทดลองวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการออกแบบบรรจุภัณฑ์ คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ขนาดของรู (micropores) ของบรรจุภัณฑ์ และอุณหภูมิ จากการทดลองการบรรจุบรอคเคอลี่ในถุงพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีการเจาะรูเล็ก ๆ ที่ถุง พบว่าเมื่อน้ำหนักของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นดังรูป 3.8 ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่สมดุลมีค่าลดลง แต่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อลดขนาดของรูบนบรรจุภัณฑ์ ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่สมดุลมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนผลของอุณหภูมิพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่สมดุลมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูป 3.9 แสดงว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปรในบรรจุภัณฑ์ ซึ่ง Mannapperuma และคณะ [27] เสนอว่าน่าจะเกิดจากบรอคเคอลี่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจหรือค่าการซึมผ่านฟิล์มของแก๊สเปลี่ยนไป



รูป 3.8 ผลกระทบของน้ำหนักของบรอดเคอลี่ต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์ [27]



รูป 3.9 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์ [27]

ในปี ค.ศ. 1993 Exama และคณะ [28] ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hayakawa และคณะ [19] มาคำนวณการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP โดยให้อัตราการหายใจมีค่าคงที่ เพื่อทำการศึกษาความเหมาะสมของฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในเชิงพาณิชย์กับการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผักและผลไม้สดหลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล บรอคเคอลี่ กระหล่ำปลี แครอท เห็ด กระหล่ำดอก เป็นต้น ซึ่งพบว่าฟิล์มส่วนใหญ่ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์นั้นเหมาะสำหรับการบรรจุผักและผลไม้สดที่มีอัตราการหายใจสูง ๆ (เช่น เห็ดที่มีอัตราการใช้ออกซิเจน 13 $cc.kg^{-1}.hr^{-1}$ ที่ 2.5 ^{o}ซ) แต่ผักและผลไม้สดที่มีอัตราการหายใจต่ำและปานกลาง (เช่น แอปเปิ้ล แครอท กระหล่ำดอก ที่มีอัตราการใช้ออกซิเจน 1.1 1.7 และ 5.1 $cc.kg^{-1}.hr^{-1}$ ตามลำดับที่ 1.0 ^{o}ซ) จะได้ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมเพียงค่าเดียวเท่านั้น ส่วนค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ได้ค่าที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อการเก็บรักษาแบบ MAP โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า Q_{10} (ค่าQ_{10} คือค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติใด ๆ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 10 ^{o}ซ) ของอัตราการหายใจ (Q_{10}^{R}) และของค่าการซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ของแก๊ส (Q_{10}^{P}) ซึ่งพบว่าค่า Q_{10}^{R} ของผักและผลไม้สดต่าง ๆ มีค่าประมาณ 2 ถึง 3 ในขณะที่ ค่า Q_{10}^{P} ของผักและผลไม้สดต่าง ๆ มีค่าประมาณ 1 ถึง 2 แสดงให้เห็นว่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิมากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มกับอุณหภูมิ ดังนั้นในการเก็บรักษาผักและผลไม้สด ถ้าไม่มีการรักษาอุณหภูมิให้คงที่แล้วอาจจะเกิดการเน่าเสียได้อย่างง่าย เนื่องจากอัตราการหายใจและค่าการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิทำให้ความเข้มข้นที่สมดุลของแก๊สในบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนไป

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นพอสรุปได้ว่า ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ โดยแบบจำลองจะอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ที่ประกอบด้วยพจน์ที่เกี่ยวข้องกับการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ และพจน์ที่เกี่ยวกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้

สดเป็นหลัก นอกจากนั้นอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดยังถูกจำลองด้วยสมการคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่าง ๆ กัน ต่อจากนั้นแบบจำลองที่ได้ถูกนำมาทำนายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สก่อนเข้าสภาวะสมดุลจนถึงสภาวะสมดุล และเพื่อการทำนายเฉพาะความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ที่สมดุล ซึ่งแต่ละรูปแบบก็ให้ความแม่นยำในการทำนายผลที่แตกต่างกัน และแบบจำลองยังถูกนำมาใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ ค่าความเข้มข้นที่สมดุลของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ และเวลาที่เข้าสู่สมดุลของแก๊สในบรรจุภัณฑ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย