บทที่ 5
กรณีศึกษาและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยฉบับนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดเพื่อนำมาทำเป็นฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซตามความต้องการสำหรับการจัดเก็บผักและผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (MAP) โดยมีหัวข้อในการศึกษาดังนี้

5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

5.2 การศึกษาผลกระทบของการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ กันต่อการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามต้องการ

5.3 การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่ใช้ในการการจัดเก็บผักและผลไม้ภายใต้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

โปรแกรมต้องคำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามสมการต่อไปนี้

5.1.1 อัตราการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ

$$R_{O_2} = \frac{a_O b_O p_{O_2}}{1 + a_O p_{O_2} + a_O i_O p_{O_2} p_{CO_2}} \tag{3.7}$$

$$R_{CO_2} = R_{O_2} RQ \tag{3.8}$$

5.1.2 อัตราการหายใจตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

$$R_{CO_2} = R^{\cdot}_{CO_2} \exp\left(-\frac{E_R}{RT}\right) \tag{2.3}$$

$$R_{O_2} = \frac{R_{CO_2}}{RQ}$$

$$R_{O_2} = \left[\frac{a_O b_O p_{O_2}}{1 + a_O p_O + a_O i_O p_{O_2} p_{CO_2}}\right]_{ref} \exp\left[\frac{-E_R}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \tag{3.9}$$

5.1.3 ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่สภาวะคงตัว

$$p_{O_2}^{pkg} = \left[\frac{0.79}{1 - \frac{V_{O_2}}{V} - \frac{V_{CO_2}}{V}} + \frac{RH^{pkg}}{100} p_{H_2O}^{sat} \right] \frac{V_{O_2}}{V} \quad (5.1)$$

$$p_{CO_2}^{pkg} = \left[\frac{0.79}{1 - \frac{V_{O_2}}{V} - \frac{V_{CO_2}}{V}} + \frac{RH^{pkg}}{100} p_{H_2O}^{sat} \right] \frac{V_{CO_2}}{V} \quad (5.2)$$

$$p_{H_2O}^{pkg} = \frac{RH^{pkg}}{100} p_{H_2O}^{sat} \quad (3.16)$$

5.1.4 อัตราการคายน้ำ

$$m = k(p_{H_2O}^{pro} - p_{H_2O}^{pkg}) \quad (3.11)$$

$$p_{H_2O}^{pro} = p_{H_2O}^{sat} = -5800T^{-1} + 1.391 - 0.04864T + 0.00004176T^2 - 0.00000001445T^3 + 6.545\ln(T) \quad (2.6)$$

5.1.5 ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำที่ต้องการ

$$P_{O_2} = \frac{R_{O_2} WX}{A(p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}^{pkg})} \quad (3.4)$$

$$P_{CO_2} = -\frac{R_{CO_2} WX}{A(p_{CO_2}^{ext} - p_{CO_2}^{pkg})} \quad (3.5)$$

$$P_{H_2O} = -\frac{mWX}{A(p_{H_2O}^{ext} - p_{H_2O}^{pkg})} \quad (3.6)$$

5.1.6 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

$$P = P_O \exp\left(-\frac{E_P}{RT}\right) \quad (3.23)$$

5.1.7 ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซและไอน้ำของบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์แบบหลายชั้น

$$P_T = \frac{x_T}{\frac{x_1}{P_1} + \frac{x_2}{P_2} + \cdots + \frac{x_n}{P_n}} \quad (5.3)$$

5.1.8 ค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) และฟังก์ชันข้อจำกัด (constraint function)

สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $0.00000254A_i\rho_i c_i$ (5.4)

สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันข้อจำกัดของ P_{O_2} เท่ากับ $\frac{1}{P_{O_2,i}}$ (5.5)

สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันข้อจำกัดของ P_{CO_2} เท่ากับ $\frac{1}{P_{CO_2,i}}$ (5.6)

สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันข้อจำกัดของ P_{H_2O} เท่ากับ $\frac{1}{P_{H_2O,i}}$ (5.7)

ค่าคงที่ด้านขวามือของฟังก์ชัน P_{O_2} เท่ากับ $\frac{x_T}{P_{O_2,T}}100$ (5.8)

ค่าคงที่ด้านขวามือของฟังก์ชัน P_{CO_2} เท่ากับ $\frac{x_T}{P_{CO_2,T}}100$ (5.9)

ค่าคงที่ด้านขวามือของฟังก์ชัน P_{H_2O} เท่ากับ $\frac{x_T}{P_{H_2O,T}}100$ (5.10)

ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องสำหรับสมการต่าง ๆ ในโปรแกรมจึงทำการตรวจสอบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่คำนวณจากโปรแกรมโดยเทียบกับผลการคำนวณด้วยเครื่องคิดเลข

5.1.9 การทดสอบโปรแกรมการคำนวณ

ในการทดสอบโปรแกรมการคำนวณเพื่อเป็นการทวนสอบผลการคำนวณของโปรแกรมโดยการใช้ตัวอย่างข้อมูลการจัดเก็บผลกีวี่ น้ำหนัก 0.36 kg อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.058 ml kg^{-1} hr^{-1} ค่า RQ เท่ากับ 1 อุณหภูมิการจัดเก็บเท่ากับ 278.15 K พื้นที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์เท่ากับ 250 cm^2 ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เท่ากับ 0.5906 mil เมื่อใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ RMF61 เป็นบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.0134 และ 0.0803 ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1} ตามลำดับ ทำให้มีก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะคงตัวเท่ากับร้อยละ 1.96 และ 3.86 โดยปริมาตรตามลำดับ [17]

จากการนำข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ไปใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าซึ่งได้แก่ ชนิดผลไม้ น้ำหนักผลไม้ อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน ค่า RQ อุณหภูมิการจัดเก็บ พื้นที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ และร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการในสภาวะคงตัวให้กับโปรแกรมเพื่อทำการทวนสอบการคำนวณของโปรแกรม พบว่าโปรแกรมสามารถคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับ 0.0134 และ 0.0803 ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1} ตามลำดับซึ่งตรงกับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ RMF61 แสดงว่าโปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

5.1.10 ความถูกต้องของโปรแกรมโทรา (Tora programme)

โปรแกรมโทราเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) ถูกตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยการนำตัวอย่างโจทย์ทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณด้วยมือโดยวิธีการคำนวณสองระยะ (two phase method) และวิธีซิมเพล็กซ์ (simplex method) มาเทียบกับคำตอบที่ได้จากโปรแกรมโทรา พบว่าได้คำตอบที่ถูกต้องเหมือนกันดังแสดงในภาคผนวก ค.

5.2 ผลกระทบค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ต่าง ๆ ต่อการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

ในการกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นสำหรับนำมาทำเป็นฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำได้ตามต้องการนั้น ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซจะต้องสอดคล้องกับสมการ (3.29)-(3.31) และผลรวมของความหนาฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นซึ่งเท่ากับ ความหนารวมของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ต้องการดังสมการ (3.33) แต่เนื่องจากข้อมูลของค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์มีน้อย จึงเป็นการจำกัดการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น จนไม่สามารถกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่สอดคล้องตามสมการ (3.29)-(3.31) ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเพียงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น

การศึกษาอิทธิพลของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดต่อฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามต้องการได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กรณี (สำหรับตัวอย่างการจัดเก็บกะหล่ำปลีที่สภาวะการจัดเก็บดังแสดงในตารางที่ 3.4) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 กรณีศึกษาที่ 1 : การพิจารณาเลือกใช้เฉพาะฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซน้อยกว่าที่ต้องการ

ในการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นให้มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซที่ต้องการและมีต้นทุนด้านวัตถุดิบต่ำสุดโดยใช้เฉพาะฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดน้อยกว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซที่ต้องการของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นดังแสดงในตารางที่ 5.1 (สำหรับพิจารณาฟังก์ชันข้อจำกัดค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจนและความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นเท่านั้น) และตารางที่ 5.2 (สำหรับพิจารณาฟังก์ชันข้อจำกัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความหนารวมเท่านั้น) จะเห็นได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซน้อยกว่าที่ต้องการไม่สามารถนำมารวมทำเป็นฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซตามต้องการได้

ซึ่งในกรณีที่ $P_T > P_i$

ดังนั้น $\frac{1}{P_T} < \frac{1}{P_i}$

นำ x_i คูณทั้งสองข้างของอสมการ จะได้

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_T} < \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_i} \qquad (5.11)$$

ซึ่งเทอมด้านซ้ายมือของสมการ (5.11) คือ

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_T} = \frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{x_T}{P_T}$$

ดังนั้นจากสมการ (5.11) จะเห็นได้ว่า ถ้าเลือกใช้เฉพาะฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซน้อยกว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซที่ต้องการจะไม่สามารถนำฟิล์มเหล่านี้มารวมเป็นฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซได้ ซึ่งผลการคำนวณในตารางที่ 5.1 และ 5.2 สอดคล้องกับสมการ (5.11)

5.2.2 กรณีศึกษาที่ 2 : การพิจารณาเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซมากกว่าที่ต้องการ

ในการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์สำหรับใช้ในการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น โดยที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมากกว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซดังแสดงในตารางที่ 5.3 (สำหรับพิจารณาฟังก์ชันข้อจำกัดแสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นเท่านั้น) และตารางที่ 5.4 (สำหรับพิจารณาฟังก์ชันข้อจำกัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นเท่านั้น) จะเห็นได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมากกว่าที่ต้องการนั้นไม่สามารถนำมาทำเป็นฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซน้อยกว่าได้

ซึ่งในกรณีที่ $P_T < P_i$

ดังนั้น $\frac{1}{P_T} > \frac{1}{P_i}$

นำ x_i คูณทั้งสองข้างของอสมการ จะได้

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_T} > \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_i} \qquad (5.12)$$

ซึ่งเทอมด้านซ้ายมือของสมการ (5.12) คือ

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_T} = \frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{x_T}{P_T}$$

ดังนั้นจากสมการ (5.12) จะเห็นได้ว่า ถ้าเลือกใช้เฉพาะฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมากกว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซที่ต้องการจะไม่สามารถนำฟิล์มเหล่านี้มารวมเป็นฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซได้ ซึ่งผลการคำนวณในตารางที่ 5.3 และ 5.4 สอดคล้องกับสมการ (5.12)

5.2.3 กรณีศึกษาที่ 3 : การพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมากกว่าและน้อยกว่าที่ต้องการ

จากกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่าการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซน้อยกว่าหรือมากกว่าที่ต้องการทั้งหมดนั้นไม่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบเป็นฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นได้ ดังนั้นกรณีศึกษาที่ 3 นี้จึงทำการศึกษาผลกระทบฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าและน้อยกว่าที่ต้องการ เพื่อให้ได้ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามต้องการโดยมีราคาวัตถุดิบต่ำสุด ผลจากการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในการช่วยเลือกฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นที่เหมาะสมได้แสดงในภาคผนวก ง. และนำมาสรุปได้ดังในตารางที่ 5.5 ซึ่งพบว่าสามารถนำยางธรรมชาติ ความหนา 0.7794 mil ซึ่งมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมากกว่าที่ต้องการมาวางเรียงซ้อนกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซน้อยกว่าได้แก่ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ความหนา 0.0093 mil และพอลิโพรพิลีน ความหนา 0.3113 mil เพื่อให้ได้ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.0056 และ 0.0198 ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1} ตามลำดับตามที่ต้องการได้และมีต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุดเท่ากับ 0.0427 บาท

ตารางที่ 5.1 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนน้อยกว่าที่ต้องการเท่านั้น

ชนิดผักและผลไม้	กะหล่ำปลี	
น้ำหนักผักและผลไม้	0.5	kg
อุณหภูมิในการจัดเก็บ	273	K
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ	92	%
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	5.60E-03	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	1.98E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ชนิดพอลิเมอร์	$P(O_2)$	%dev.P(O2)
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.967)	1.40E-03	-75.00
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.955)	2.10E-03	-62.50
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.964)	1.23E-04	-97.80
พอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต (Mylar)	1.20E-04	-97.86
พอลิโพรพิลีน (molded)	3.13E-03	-44.11
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.907)	2.98E-03	-46.76
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	2.65E-03	-52.68
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)	2.34E-03	-58.21
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8998)	2.02E-03	-63.93
ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	ไม่สามารถให้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลี	

$P(O_2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

%dev. (percentage deviation) คือ $\left[\frac{P - P_{T,R}}{P_{T,R}}\right] \times 100$ (%)

P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิด (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

$P_{T,R}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่ต้องการ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

ตารางที่ 5.2 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าที่ต้องการเท่านั้น

ชนิดผักและผลไม้	กะหล่ำปลี	
น้ำหนักผักและผลไม้	0.5	kg
อุณหภูมิในการจัดเก็บ	273	K
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ	92	%
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	5.60E-03	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	1.98E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ชนิดพอลิเมอร์	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.967)	7.03E-03	-64.49
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.955)	1.05E-02	-46.97
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.964)	6.11E-04	-96.91
พอลิเอทิลีนทาเรฟทาเลต (Mylar)	4.03E-04	-97.97
พอลิโพรพิลีน (molded)	1.90E-02	-4.04
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.907)	1.77E-02	-10.61
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	9.49E-03	-52.07
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)	8.12E-03	-58.99
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8998)	7.05E-03	-64.39
ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	ไม่สามารถให้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลี	

$P(CO_2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

%dev. (percentage deviation) คือ $\left[\frac{P - P_{T,R}}{P_{T,R}}\right] \times 100$ (%)

P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิด (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

$P_{T,R}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่ต้องการ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

ตารางที่ 5.3 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมากกว่าที่ต้องการเท่านั้น

ชนิดผักและผลไม้	กะหล่ำปลี	
น้ำหนักผักและผลไม้	0.5	kg
อุณหภูมิในการจัดเก็บ	273	K
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ	92	%
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	5.60E-03	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	1.98E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ชนิดพอลิเมอร์	$P(O_2)$	%dev.P(O2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	7.81E-02	1294.64
พอลิบิวทาไดอีน	6.99E-02	1148.21
พอลิคลอโรพรีน	9.50E-03	69.64
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.914)	6.50E-03	16.07
พอลิบิวทาไดอีน-สไตรีน	6.20E-02	1007.14
ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	ไม่สามารถให้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลี	

$P(O_2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

%dev. (percentage deviation) คือ $\left[\frac{P - P_{T,R}}{P_{T,R}}\right] \times 100$ (%)

P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิด (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

$P_{T,R}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่ต้องการ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

ตารางที่ 5.4 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าที่ต้องการเท่านั้น

ชนิดผักและผลไม้	กะหล่ำปลี	
น้ำหนักผักและผลไม้	0.5	kg
อุณหภูมิในการจัดเก็บ	273	K
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ	92	%
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	5.60E-03	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	1.98E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ชนิดพอลิเมอร์	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	5.72E-01	2788.89
พอลิบิวทาไดอีน	7.01E-01	3440.40
พอลิคลอโรพรีน	7.23E-02	265.15
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.914)	3.21E-02	62.12
พอลิบิวทาไดอีน-สไตรีน	5.75E-01	2804.04
ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	ไม่สามารถให้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลี	

$P(CO_2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

%dev. (percentage deviation) คือ $\left[\frac{P - P_{T,R}}{P_{T,R}}\right] \times 100$ (%)

P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิด (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

$P_{T,R}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่ต้องการ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

ตารางที่ 5.5 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าและมากกว่าที่ต้องการ

ชนิดผักและผลไม้		กะหล่ำปลี			
น้ำหนักผักและผลไม้		0.5		kg	
อุณหภูมิในการจัดเก็บ		273		K	
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ		92		%	
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน		5.60E-03		ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}	
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		1.98E-02		ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}	
ชนิดพอลิเมอร์		$P(O_2)$	%dev.P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)		7.81E-02	1294.64	5.72E-01	2787.89
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9140)		6.45E-03	15.18	3.21E-02	62.12
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9670)		1.40E-03	-75.00	7.03E-03	-64.49
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9550)		2.10E-03	-62.50	1.05E-02	-46.97
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9220)		9.18E-03	63.93	6.51E-02	228.79
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9640)		1.22E-04	-97.82	6.11E-04	-96.91
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท (Mylar)		1.19E-04	-97.88	4.03E-04	-97.96
พอลิโพรพิลีน (molded)		3.13E-03	-44.11	1.90E-02	-4.04
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)		3.62E-03	-35.36	4.76E-02	140.40
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.9070)		2.99E-03	-46.61	1.77E-02	-10.61
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)		2.65E-03	-52.68	9.49E-03	-52.07
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)		2.34E-03	-58.21	8.12E-03	-58.99
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8998)		2.02E-03	-63.93	7.05E-03	-64.39
บรรจุภัณฑ์ที่ได้ออกแบบ	ความหนา	$P(O_2)$	%dev.P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	0.7794	5.60E-02	0.00	1.98E-02	0.00
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Mylar)	0.0093				
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)	0.2113				

$P(O_2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (ml mil cm^{2} hr^{1} atm^{1})

$P(CO_2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ml mil cm^{2} hr^{1} atm^{1})

%dev. (percentage deviation) คือ $\left[\frac{P - P_{T,R}}{P_{T,R}}\right] \times 100$ (%)

5.3 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้น

กรณีศึกษาที่ 6 : การเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดในฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนารวม

สำหรับกรณีศึกษาที่ 6 จะใช้ข้อมูลการเก็บรักษาพริกไทยสดที่สภาวะการจัดเก็บดังแสดงในตารางที่ 3.4 เป็นตัวอย่างในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นตั้งแต่ 2 – 5 มิล (mil) โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นดังแสดงผลในภาคผนวก ง. ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 5.6 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บพริกไทยสดในบรรจุภัณฑ์ที่มีความหนารวมต่าง ๆ กัน

ความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	$P(O_2)$	$P(CO_2)$	ชนิดพอลิเมอร์	ความหนา
1	0.0075	0.0541	ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	0.1198
			พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	0.0713
			พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.8089
2	0.0150	0.1083	ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	1.1777
			พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	0.0635
			พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.7588
3	0.0224	0.1624	ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	2.2307
			พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	0.0543
			พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.7150
4	0.0299	0.2165	ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	3.2902
			พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	0.0476
			พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.6622
5	0.0374	0.2706	ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	4.3491
			พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	0.0407
			พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.6102

$P(O_2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจนโดยรวมที่ต้องการ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

$P(CO_2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

ความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้น (mil)

จากตารางที่ 5.6 พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซที่ต้องการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น แต่ความหนาของพอลิเมอร์แต่ละชนิดไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากสมการ (5.3) จะเห็นได้ว่าแม้ว่าความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นเพิ่มขึ้นแต่ผลรวมของอัตราส่วนความหนาต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์แต่ละชนิด จะมีค่าเท่าเดิมเสมอ คือ

สำหรับความหนา 1 mil
$$\frac{x_1^{(1)}}{P_1} + \frac{x_2^{(1)}}{P_2} + \frac{x_3^{(1)}}{P_3} = \frac{1}{P_T^{(1)}} \qquad (5.13)$$

สำหรับความหนา 2 mil
$$\frac{x_1^{(2)}}{P_1} + \frac{x_2^{(2)}}{P_2} + \frac{x_3^{(2)}}{P_3} = \frac{2}{P_T^{(2)}} = \frac{2}{2P_T^{(1)}} \qquad (5.14)$$

สำหรับความหนา 3 mil
$$\frac{x_1^{(3)}}{P_1} + \frac{x_2^{(3)}}{P_2} + \frac{x_3^{(3)}}{P_3} = \frac{3}{P_T^{(3)}} = \frac{3}{3P_T^{(1)}} \qquad (5.15)$$

สำหรับความหนา 4 mil
$$\frac{x_1^{(4)}}{P_1} + \frac{x_2^{(4)}}{P_2} + \frac{x_3^{(4)}}{P_3} = \frac{4}{P_T^{(4)}} = \frac{4}{4P_T^{(1)}} \qquad (5.16)$$

สำหรับความหนา 5 mil
$$\frac{x_1^{(5)}}{P_1} + \frac{x_2^{(5)}}{P_2} + \frac{x_3^{(5)}}{P_3} = \frac{5}{P_T^{(5)}} = \frac{5}{5P_T^{(1)}} \qquad (5.17)$$

โดยที่ ตัวยก (1), (2), (3), (4), (5) คือ ความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

ถ้าตั้งสมมติฐานว่าความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นแปรผันโดยตรงกับความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น คือ

เมื่อ $x_i^{(2)} = 2x_i^{(1)}$

ดังนั้น
$$\frac{x_1^{(2)}}{P_1} + \frac{x_2^{(2)}}{P_2} + \frac{x_3^{(2)}}{P_3} = \frac{2x_1^{(1)}}{P_1} + \frac{2x_2^{(1)}}{P_2} + \frac{2x_3^{(1)}}{P_3} = \frac{2}{P_T^{(1)}} \qquad (5.18)$$

เมื่อ $x_i^{(3)} = 3x_i^{(1)}$

ดังนั้น
$$\frac{x_1^{(3)}}{P_1} + \frac{x_2^{(3)}}{P_2} + \frac{x_3^{(3)}}{P_3} = \frac{3x_1^{(1)}}{P_1} + \frac{3x_2^{(1)}}{P_2} + \frac{3x_3^{(1)}}{P_3} = \frac{3}{P_T^{(1)}} \qquad (5.19)$$

เมื่อ $x_i^{(4)} = 4x_i^{(1)}$

ดังนั้น $$\frac{x_1^{(4)}}{P_1} + \frac{x_2^{(4)}}{P_2} + \frac{x_3^{(4)}}{P_3} = \frac{4x_1^{(1)}}{P_1} + \frac{4x_2^{(1)}}{P_2} + \frac{4x_3^{(1)}}{P_3} = \frac{4}{P_T^{(1)}} \qquad (5.20)$$

เมื่อ $x_i^{(5)} = 5x_i^{(1)}$

ดังนั้น $$\frac{x_1^{(5)}}{P_1} + \frac{x_2^{(5)}}{P_2} + \frac{x_3^{(5)}}{P_3} = \frac{5x_1^{(1)}}{P_1} + \frac{5x_2^{(1)}}{P_2} + \frac{5x_3^{(1)}}{P_3} = \frac{5}{P_T^{(1)}} \qquad (5.21)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อให้ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ในแต่ละชั้นแปรผันตรงกับความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นจะทำให้ค่าคงที่ด้านขวามือของสมการ (5.18) – (5.21) ไม่เท่ากับสมการ (5.14) – (5.17) จึงสรุปได้ว่าสมมติฐานที่กำหนดไม่เป็นจริง ดังนั้นความหนาของพอลิเมอร์แต่ละชั้นจึงไม่แปรผันตรงกับความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

5.4 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บผักและผลไม้ภายใต้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

5.4.1 กรณีศึกษาที่ 7 : การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บ ลีค (Leek) พริกไทยสด แอปเปิ้ล (*golden delicious*) ขึ้นฉ่ายหั่นเป็นชิ้น (celery) ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (MAP)

สำหรับการจัดเก็บผักและผลไม้ทั้ง 4 ชนิดในสภาวะการจัดเก็บแบบบรรยากาศดัดแปรดังแสดงในตารางที่ 3.4 สามารถใช้โปรแกรมในการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ตามต้องการดังแสดงภาคผนวก ง. ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ดังในตารางที่ 5.7-5.10 พบว่า ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่เลือกพิจารณานั้นไม่สามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ชั้นเดียวที่เหมาะสมได้โดยมีความคลาดเคลื่อนของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสำหรับ ลีค (Leek) พริกไทยสด แอปเปิ้ล (*golden delicious*) และขึ้นฉ่ายหั่นเป็นชิ้น เท่ากับร้อยละ 42.49-376.01, 8.38-1481.66, 2.58-711.63 และ 4.94-768.59 ตามลำดับ และมีความคลาดเคลื่อนของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 3.16-732.90, 1.62-1367.56, 15.22-632.77 และ 7.79-1491.66 ตามลำดับ

ดังนั้นจึงต้องนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาวางเรียงซ้อนกันเป็นพอลิเมอร์แบบหลายชั้น จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามต้องการโดยมีต้นทุนด้านวัตถุดิบต่ำสุดได้ดังนี้

(1) สำหรับการจัดเก็บลีค (Leek) สามารถออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสมได้ดังนี้

(1.1) ยางธรรมชาติ (Natural rubber) มีความหนาเท่ากับ 0.8592 mil

(1.2) พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871) มีความหนาเท่ากับ 0.1271 mil

(1.3) พอลิโพรพิลีน (extruded quench film) มีความหนาเท่ากับ 0.0137 mil

โดยมีราคาต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 0.0609 บาท

(2) สำหรับการจัดเก็บพริกไทยสด สามารถออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสมได้ดังนี้

(2.1) ยางธรรมชาติ (Natural rubber) มีความหนาเท่ากับ 0.1198 mil

(2.2) พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871) มีความหนาเท่ากับ 0.0713 mil

(2.3) พอลิโพรพิลีน (extruded quench film) มีความหนาเท่ากับ 0.8089 mil

โดยมีราคาต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 0.0440 บาท

(3) สำหรับการจัดเก็บแอปเปิ้ล (*golden delicious*) สามารถออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสมได้ดังนี้

(3.1) ยางธรรมชาติ (Natural rubber) มีความหนาเท่ากับ 0.6643 mil

(3.2) พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871) มีความหนาเท่ากับ 0.0561 mil

(3.3) พอลิโพรพิลีน (extruded quench film) มีความหนาเท่ากับ 0.2796 mil

โดยมีราคาต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 0.0877 บาท

(4) สำหรับการจัดเก็บขึ้นฉ่ายหั่นเป็นชิ้น สามารถออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสมได้ดังนี้

(4.1) ยางธรรมชาติ (Natural rubber) มีความหนาเท่ากับ 0.7117 mil

(4.2) พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871) มีความหนาเท่ากับ 0.2584 mil

(4.3) พอลิโพรพิลีน (extruded quench film) มีความหนาเท่ากับ 0.0299 mil

โดยมีราคาต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 0.0808 บาท

จากตารางที่ 5.7 – 5.10 พบว่าองค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสมในการจัดเก็บตัวอย่างผลิตผลสดดังกล่าวนี้ประกอบด้วย ยางธรรมชาติซึ่งเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดเดียวในฐานข้อมูลที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าที่ต้องการ และฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าที่ต้องการ (สอดคล้องกับกรณีศึกษาที่ 3) โดยฟิล์มพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาดังกล่าวในฐานข้อมูลได้แก่ พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871) และพอลิโพรพิลีน (extruded quench film) โดยฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีความหนาแตกต่างกันเพื่อให้ได้ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการและมีราคาต้นทุนด้านวัตถุดิบต่ำสุดได้

ตารางที่ 5.7 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษาลีค (Leek)

ชนิดผักและผลไม้	ลีค (Leek)	
น้ำหนักผักและผลไม้	0.3	kg
ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน	2.2	%
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	4.9	%
อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน	10	ml kg^{-1} hr^{-1}
อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	9	ml kg^{-1} hr^{-1}
อุณหภูมิในการจัดเก็บ	274.50	K
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ	95	%
พื้นที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์	888	cm^2
ความหนารวมบรรจุภัณฑ์ฟิลม์พอลิเมอร์	1	mil
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	1.77E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	7.25E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}

ชนิดพอลิเมอร์	$P(O_2)$	%dev.P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	8.43E-02	376.27	6.08E-01	738.51
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9140)	7.15E-03	-59.60	3.52E-02	-51.45
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9220)	1.02E-02	-42.37	7.07E-02	- 2.48
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9550)	2.27E-03	-87.18	1.12E-02	-84.55
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9640)	1.33E-04	-99.25	6.57E-04	-99.09
พอลิเอทีนความนหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9670)	1.52E-03	-91.41	7.54E-03	-89.60
พอลิโพรพิลีน (molded)	3.51E-03	-80.17	2.08E-02	-71.31
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	4.07E-03	-77.00	4.92E-02	-32.14
พอลิเอทีลีนเทอเรฟทาเลท (Mylar)	1.27E-04	-99.28	4.28E-04	-99.41
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	2.96E-03	-83.28	1.05E-02	-85.52
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)	2.61E-03	-85.25	9.02E-03	-87.56
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8998)	2.26E-03	-87.23	7.84E-03	-89.19
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.9070)	3.35E-03	-81.07	1.94E-02	-73.24

องค์ประกอบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	ความหนา	$P(O_2)$	%dev.P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	0.8592	1.77E-03	0.00	7.25E-02	0.00
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	0.1271				
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.0137				

ตารางที่ 5.8 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษาพริกไทยสด

ชนิดผักและผลไม้	พริกไทยสด	
น้ำหนักผักและผลไม้	0.2	kg
ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน	3	%
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	3	%
อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน	5	ml kg^{-1} hr^{-1}
อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	5	ml kg^{-1} hr^{-1}
อุณหภูมิในการจัดเก็บ	281.50	K
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ	85	%
พื้นที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์	725	cm^2
ความหนารวมบรรจุภัณฑ์ฟิลม์พอลิเมอร์	1	mil
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	7.5E-03	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	5.41E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}

ชนิดพอลิเมอร	$P(O_2)$	%dev.P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	1.19E-01	1486.67	8.03E-01	1384.29
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9140)	1.14E-02	52.00	5.38E-02	-0.55
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9220)	1.63E-02	117.33	1.03E-01	90.39
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9550)	3.27E-03	-56.40	1.55E-02	-71.35
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9640)	1.95E-04	-97.40	9.12E-04	-98.31
พอลิเอทีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9670)	2.22E-03	-70.40	1.03E-02	-80.96
พอลิเอทีลีนเทอเรฟทาเลท (Mylar)	1.71E-04	-97.72	5.68E-04	-98.95
พอลิโพรพิลีน (molded)	5.90E-03	-21.33	3.15E-02	-41.77
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	6.87E-03	-8.40	5.72E-02	5.73
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	4.89E-03	-34.80	1.70E-02	-68.58
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)	4.31E-03	-42.53	1.46E-02	-73.01
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8998)	3.73E-03	-50.27	1.27E-02	-76.52
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.9070)	5.63E-03	-24.93	2.94E-02	45.66

องค์ประกอบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	ความหนา	$P(O_2)$	%dev.P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	0.1198	7.50E-03	0.00	5.41E-02	0.00
พอลิโพรพิลีน (ความหนาแน่น 0.8871)	0.0713				
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.8089				

ตารางที่ 5.9 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษาแอปเปิ้ล

ชนิดผักและผลไม้	แอปเปิ้ล	
น้ำหนักผักและผลไม้	2.27	kg
ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน	3	%
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	3	%
อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน	1.1	ml kg^{-1} hr^{-1}
อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	1.2	ml kg^{-1} hr^{-1}
อุณหภูมิในการจัดเก็บ	274.15	K
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ	85	%
พื้นที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์	1320	cm^2
ความหนารวมบรรจุภัณฑ์ฟิลม์พอลิเมอร์	1	mil
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	1.02E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	8.14E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}

ชนิดพอลิเมอร์	$P(O_2)$	%dev,P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	8.28E-02	711.7	5.99E-01	635.87
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9140)	6.98E-03	-31.57	3.45E-02	-56.51
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9220)	9.94E-03	-2.55	6.94E-02	-14.74
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9550)	2.23E-03	-78.14	1.11E-02	-86.36
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9640)	1.31E-04	-98.72	6.46E-04	-99.21
พอลิเอทีนความนหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9670)	1.49E-03	-85.40	7.42E-03	-90.88
พอลิเอทีลีนเทอเรฟทาเลท (Mylar)	1.26E-04	-98.76	4.22E-04	-99.48
พอลิโพรพิลีน (molded)	3.42E-03	-66.47	2.03E-02	-75.06
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	3.96E-03	-61.18	4.88E-02	-40.05
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	2.89E-03	-71.67	1.03E-02	-87.35
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)	2.54E-03	-75.10	8.80E-03	-89.19
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8998)	2.20E-03	-78.43	7.65E-03	-90.60
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.9070)	3.26E-03	-68.04	1.90E-02	-76.66

องค์ประกอบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	ความหนา	$P(O_2)$	%dev.P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	0.6643	1.02E-02	0.00	8.14E-02	0.00
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	0.0552				
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.2808				

ตารางที่ 5.10 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษาขึ้นฉ่าย

ชนิดผักและผลไม้	ผักขึ้นฉ่าย (หั่นเป็นชิ้น)	
น้ำหนักผักและผลไม้	0.7	kg
ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน	5	%
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	3	%
อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน	2.8	ml kg^{-1} hr^{-1}
อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	1.7	ml kg^{-1} hr^{-1}
อุณหภูมิในการจัดเก็บ	274.50	K
ความชื้นสัมพัทธ์ในการจัดเก็บ	92	%
พื้นที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์	1210	cm^2
ความหนารวมบรรจุภัณฑ์ฟิลม์พอลิเมอร์	1	mil
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	9.70E-03	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	3.79E-02	ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1}

ชนิดพอลิเมอร์	$P(O_2)$	%dev.P(O2)	$P(CO_2)$	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	8.43E-02	769.07	6.08E-01	1504.22
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9140)	7.15E-03	-26.29	3.52E-02	-7.12
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.9220)	1.02E-02	5.15	7.07E-02	86.54
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9550)	2.27E-03	-76.60	1.12E-02	-70.45
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9640)	1.33E-04	98.63	6.57E-04	-98.27
พอลิเอทีนความนหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.9670)	1.52E-03	84.33	7.54E-03	-80.11
พอลิเอทีลีนเทเรฟทาเลต (Mylar)	1.27E-04	98.69	4.28E-04	-98.87
พอลิโพรพิลีน (molded)	3.51E-03	63.81	2.08E-02	-45.12
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	4.07E-03	58.04	4.92E-02	29.82
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.887 :)	2.96E-03	69.48	1.05E-02	-72.30
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)	2.61E-03	73.09	9.02E-03	-76.20
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8998)	2.26E-03	76.70	7.84E-03	-79.31
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.9070)	3.35E-03	65.46	1.94E-02	-48.81

องค์ประกอบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น	ความหนา	P(O2)	%dev.P(O2)	P(CO2)	%dev.P(CO2)
ยางธรรมชาติ	0.7117	9.70E-03	0.00	3.79E-02	0.00
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ0.8871)	0.2584				
PP extruded quench film	0.0299				

5.4.2 กรณีศึกษาที่ 8 : ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการจัดเก็บต่อบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรชนิดฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสม

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการจัดเก็บและการจำหน่ายอาจส่งผลกระทบต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสมที่อุณหภูมิการจัดเก็บหนึ่ง ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงจนอาจจะทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ ดังในกรณีศึกษาที่ 8 ซึ่งศึกษาการจัดเก็บกะหล่ำปลีหั่นละเอียดน้ำหนัก 0.06 กิโลกรัมที่ช่วงอุณหภูมิ 278.15-298.15 เคลวิน โดยกำหนดให้มีความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวในทุก ๆ อุณหภูมิการจัดเก็บเท่ากับร้อยละ 3 และ 5 โดยปริมาตรตามลำดับ อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการการหายใจแบบยับยั้งชนิดอันคอมเพททิทีฟ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 พื้นที่ผิวพอลิเมอร์เท่ากับ 720 ตารางเซนติเมตร ความหนาบรรจุภัณฑ์โดยรวมเท่ากับ 0.9843 mil ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในการกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นที่เหมาะสมได้ดังแสดงภาคผนวก ง. ซึ่งสามารถนำมาสรุปดังในตารางที่ 5.11

จากตารางที่ 5.11 พบว่าที่อุณหภูมิการจัดเก็บต่าง ๆ จะได้ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสมแตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่เหมาะสมที่จะสามารถใช้การจัดเก็บกะหล่ำปลีหั่นละเอียดได้ตลอดช่วงอุณหภูมิ 278.15-298.15 เคลวิน จึงเป็นสิ่งสำคัญเพราะจะส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวซึ่งสามารถคำนวณได้จากการแก้สมการที่สภาวะสมดุลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.12

จากตารางที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์แบบหลายชั้นชุดที่ 4 และชุดที่ 5 เหมาะสมที่จะนำมาเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับกะหล่ำปลีหั่นละเอียดในช่วงอุณหภูมิ 278.15-298.15 เคลวิน เนื่องจากมีความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนที่สภาวะคงตัวไม่ต่ำกว่าระดับความทนทานต่ำสุดซึ่งเท่ากับร้อยละ 1 โดยปริมาตร และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สูงกว่าระดับความทนทานสูงสุดซึ่งเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร [32] มิเช่นนั้นจะทำให้ผลิตผลสดเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนและเกิดการเน่าเสียได้ แต่การเลือกฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นชุดที่ 4 มีความเหมาะสมที่สุดเพราะมีราคาต้นทุนต่ำสุด มีความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนต่ำกว่าและความเข้มข้นก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ชุดที่ 5 ทำให้ผักและผลไม้ในฟิล์มพอลิเมอร์ชุดที่ 4 มีอัตราการหายใจต่ำกว่าการเก็บผักและผลไม้ในฟิล์มพอลิเมอร์ชุดที่ 5

โดยสรุปเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ให้ยาวนานที่สุดตามที่ได้ออกแบบไว้ ควรใช้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ใกล้เคียงกับสภาวะการจัดเก็บที่ได้ถูกออกแบบไว้มากที่สุด

ตารางที่ 5.11 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีหั่นละเอียด

อุณหภูมิการจัดเก็บ (K)	278.15	283.15	288.15	293.15	298.15
อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)	12.877	22.013	36.951	60.851	98.590
อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)	10.752	18.381	30.854	50.811	82.323
ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจนที่ต้องการ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})	5.70E-03	9.80E-03	1.64E-02	2.71E-02	4.39E-02
ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการ (ml mil cm^{-2} hr^{-1}	2.05E-02	3.51E-02	5.89E-02	9.71E-02	1.57E-01
ความหนาของพอลิเมอร์ที่ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซตามต้องการได้ (mil)	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	0.3257	0.4467	0.5368	0.6131	0.6584
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)	0.6426	0.5159	0.4113	0.3232	0.2179
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)	0.0159	0.0217	0.0362	0.0480	0.1079

ตารางที่ 5.12 ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีหั่นละเอียดในฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิการจัดเก็บตั้งแต่ 278.15 ถึง 298.15 เคลวิน

อุณหภูมิการจัดเก็บ (เคลวิน)	ร้อยละความเข้มข้นก๊าซโดยปริมาตรที่สภาวะคงตัวของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น					
	ชนิดของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5
278.15	O_2	3.00	5.34	7.36	9.59	11.12
	CO_2	5.00	4.28	3.58	2.95	2.20
283.15	O_2	1.36	3.00	5.21	7.45	10.64
	CO_2	5.53	5.00	4.29	3.58	2.43
288.15	O_2	0.72	1.44	3.00	5.16	7.16
	CO_2	5.79	5.53	5.00	4.29	3.42
293.15	O_2	0.45	0.76	1.46	3.00	5.03
	CO_2	5.97	5.81	5.53	5.00	4.18
298.15	O_2	0.31	0.05	0.78	1.50	3.00
	CO_2	6.11	6.13	5.85	5.57	5.00
ราคาของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น (บาท)		0.0442	0.0452	0.0460	0.0467	0.0471