อภิปรายและวิจารณ์ผล

1) การศึกษาสูตรและสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างเอ็นไซม์และเอทานอล

1.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ ที่เก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้แบบดัดแปลงบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ ที่เก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้แบบดัดแปลงบรรยากาศ ที่มีการเจาะรูบรรจุภัณฑ์ 5 แบบคือ 2, 4, 6, 8 และ 10 รู และเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ได้ทำการศึกษาโดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของพีเอชอินดิเคเตอร์ ในตัวอย่างมะม่วงที่เก็บจากต้นวันแรกไปจนกระทั่งมะม่วงเสื่อมคุณภาพ ในระดับที่ไม่สามารถวางจำหน่ายในท้องตลาดได้ ซึ่งพบว่าตัวอย่างทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ในทำนองเดียวกัน (ภาพที่ 2) และพบว่ามะม่วงในทุกสิ่งทดลองจะเสื่อมคุณภาพ ในระดับที่ไม่สามารถวางจำหน่ายในท้องตลาดได้ประมาณวันที่ 10 ของการเก็บรักษา ทั้งนี้ค่าพีเอชของบรรยากาศจะลดลงเล็กน้อยจาก 7.5 เป็น 7 ในวันที่ 1-5 วัน และมีค่าลดลงเป็นพีเอช 5 – 5.5 อย่างรวดเร็วในวันที่ 6 ซึ่งแสดงว่ามะม่วงน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางชีวเคมีอย่างมีนัยสำคัญในวันที่ 6 ของการเก็บรักษา และในสิ่งทดลองที่เก็บในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศแบบเจาะน้อยรู จะค่าพีเอชลดลงต่อไปอีกเล็กน้อยถึงที่พีเอช 5 ในวันที่ 9 ของการเก็บรักษา

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศแบบต่างๆ ด้านสีของเปลือก ความแน่นเนื้อ และตำหนิ โดยใช้สายตาและการสัมผัสพบว่าในวันที่ 1 ของการเก็บรักษา ทุกสิ่งทดลองจะมีเปลือกที่มีความสว่างของสีสูงสุด และค่าความสว่างของสีจะลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งในวันที่ 10 ของการเก็บรักษาพบว่า มะม่วงจะมีสีที่คล้ำมากที่สุด โดยสิ่งทดลองที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศแบบเจาะ 2, 4, 8 และ 10 รู จะมีผลที่เริ่มช้ำ มีความแน่นเนื้อของมะม่วงลดลง และบริเวณหัวเริ่มเน่า (ภาพที่ 3-5) ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าการบรรจุมะม่วงในบรรจุภัณฑ์ที่มี O_2 น้อยมาก จะส่งผลให้มีการสร้าง CO_2 ออกมามาก จนทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้น และในทางกลับกัน ถ้ามีปริมาณ O_2 มากเกินไป ก็จะเร่งอัตราการหายใจของมะม่วง ส่งผลทำให้คุณภาพของมะม่วงเสื่อมลง ดังนั้นการควบคุมปริมาณ O_2 ในอากาศให้เหมาะสม จะสามารถช่วยชะลอการหายใจ การสร้างเอทิลีน และกระบวนการออกซิเดชันอื่นๆ ซึ่งจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงออกไปได้ ในขณะที่สิ่งทดลองที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศแบบเจาะรู 6 รู มีลักษณะทางกายภาพเป็นที่ยอมรับมากกว่าสิ่งทดลองอื่น เนื่องจากยังคงความสด มีสีของเปลือกและความแน่นเนื้อมากกว่าสิ่งทดลองอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ที่มีการเจาะรู 6 รู (ภาพที่ 4 ค) เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์มีการเจาะรู 6 รู พบว่ามะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีอย่างรวดเร็วในวันที่ 6 ดังนั้น แถบชี้วัดที่จะทำการพัฒนาในการศึกษาลำดับต่อไป จึงควรมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ ในวันที่ 6 ของการเก็บรักษามะม่วง

1.2 การศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างเอ็นไซม์และเอทานอล

จากการศึกษาสูตรและสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส (AOX) เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส (POX) และเอทานอล โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีย้อม DCIP พบว่า DCIP ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 และ 0.05 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายซึ่งประกอบด้วยเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส และเอทานอล จะได้สารประกอบที่มีสีน้ำเงิน ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงจะสูงสุดเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยา หลังจากนั้นสีน้ำเงินจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอ่อนอย่างถาวร (ภาพที่ 6 และ 7) โดยค่าการดูดกลืนแสงจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 8 และ 9)

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า สีย้อม DCIP ตั้งต้นอยู่ในรูปออกซิไดซ์ ($DCIP_{ox}$) เมื่อ DCIP ในรูปออกซิไดซ์ละลายในสารละลายที่มีเอทานอล และเอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดสอยู่ จะทำปฏิกิริยาได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(hydrogen peroxide; H2O2) เกิดขึ้น จากนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเปลี่ยนสีของสีย้อม $DCIP_{ox}$ ไปเป็นรูปที่สลายตัว ($DCIP_{decomp}$) ซึ่งทำให้สารละลายเกิดการเปลี่ยนสี ทั้งนี้ DCIP ในรูปรีดิวซ์สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศได้อย่างช้าๆ แต่ถ้าระบบอยู่ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จะไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้สีของสารละลายไม่เปลี่ยนแปลง (Barzana *et al.,* 1989)

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสที่ระดับต่างกัน พบว่าความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แต่เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้การดูดกลืนแสงของทุกสิ่งทดลอง มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ตารางที่ 2) ทั้งนี้เนื่องจากเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสจะทำหน้าที่เปลี่ยนแอลกอฮอล์สายสั้นให้เป็นแอลดีไฮด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเปลี่ยนสีของ DCIP จากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อน จากการถูกออกซิไดส์โดยเอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฉดสีนี้ มีผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง

ในการศึกษาความเข้มข้นของเอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส ได้ผลการศึกษาในทำนองเดียวกับการศึกษาเรื่องความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส โดยความเข้มข้นของเอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดสที่เพิ่มขึ้น จะไม่มีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แต่เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของทุกสิ่งทดลองลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ความเข้มข้นของสีย้อม DCIP มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสีย้อม DCIP ที่มีความเข้มข้นสูง จะทำให้สารละลายเกิดการเปลี่ยนสีอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 6) ซึ่งจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนเฉดสีได้ชัดเจนกว่าการใช้สีย้อม DCIP ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสีย้อม DCIP จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนั้นถ้าหากในสารละลายที่ศึกษามีความเข้มข้นของสีย้อม DCIP น้อย ทำให้ปฏิกิริยาถึงจุดยุติอย่างรวดเร็ว เน่องจาก DCIP ถูกทำลายหรือสลายตัวเปลี่ยนไปอยู่ในรูป DCIPdecomp อย่างรวดเร็ว สารประกอบจึงเปลี่ยนเป็นสีม่วงอ่อนอย่างถาวรในระยะเวลาที่สั้น ส่งผลให้ไม่สามารถแยกเฉดสีได้ง่ายด้วยสายตา (ภาพที่ 7) เหมือนการใช้สีย้อม DCIP ที่มีความเข้มข้นสูง

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส และสีย้อม DCIP พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้มีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยจะเห็นได้ว่าสิ่งทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของสีย้อม DCIP ปริมาณ 0.05 mM มีค่าการดูดกลืนแสงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส และเอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดสเพิ่มขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงอย่างรวดเร็วในช่วง 0 ถึง 10 นาทีแรก และจะเริ่มคงที่ในระยะเวลาต่อมา (ตารางที่ 2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และหลังจากนั้นจะเกิดได้ช้าลง

สำหรับสิ่งทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของสีย้อม DCIP ปริมาณ 0.1 mM พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส และเอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดสเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แต่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ตารางที่ 2) นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงเฉดสีได้อย่างชัดเจนด้วยสายตา อย่างไรก็ตาม การเกิดปฏิกิริยาที่สังเกตได้จากการลดลงของค่าดูดกลืนแสง และการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีในแต่ละเวลาของแต่ละสิ่งทดลอง ยังคงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0 ถึง 10 นาทีแรก และหลังจากนั้นปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง ยกเว้นสิ่งทดลองที่ใช้เอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสปริมาณ 9.0 µg เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดสปริมาณ 20 µg และสีย้อม DCIP ความเข้มข้น 0.1 mM (สิ่งทดลอง 9.0×20×0.1 ในตารางที่ 2) ซึ่งพบว่า ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและยังคงดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงเวลา 25 นาที ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง (ตารางที่ 2) และเฉดสีที่เกิดขึ้น (ภาพที่ 6: sample E) แต่การเปลี่ยนแปลงของเฉดสี และความคมชัดของเฉดสีในแต่ละช่วงเวลายังชัดเจน และสามารถสังเกตได้ง่ายด้วยสายตา

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ที่ระดับความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส 9.0 µg เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส 20 µg และสีย้อม DCIP 0.1 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M. ที่พีเอช 7.5 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการศึกษาในลำดับต่อไป ทั้งนี้ความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสจากการศึกษานี้ มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่ได้จากการศึกษาของ Barzana et al. (1989) ซึ่งศึกษาการตรวจวัดปริมาณเอทานอลที่ออกมาจากลมหายใจของผู้ขับยวดยานพาหนะ ซึ่งพบว่าการใช้เอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสที่ระดับความเข้มข้นระหว่าง 6 -12 mg/g สามารถทำให้เครื่องชี้วัดเอทานอลเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างชัดเจน ภายในเวลา 1 นาทีเมื่อสัมผัสกับเอทานอลที่ออกมากจากลมหายใจของผู้ขับยวดยานพาหนะ ความแตกต่างนี้เนื่องมาจากการใช้เอทานอลที่มีสถานะแตกต่างกัน โดยการศึกษาในขั้นตอนนี้ของงานวิจัยนี้ ใช้เอทานอลในสภาวะของเหลว แต่การศึกษาของ Barzana et al. (1989) เป็นการตรวจวัดเอทานอลที่มีสถานะเป็นแก๊ส ซึ่งความไวในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอ็นไซม์และเอทานอลในสภาวะของเหลว จะดีกว่าการใช้เอทานอลที่มีสถานะเป็นแก๊ส ดังนั้น ความเข้มข้นของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสจากการศึกษานี้ จึงมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณจากการศึกษาของ Barzana et al. (1989)

2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลและกิจกรรมของเอ็นไซม์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลและกิจกรรมของเอ็นไซม์ ได้ใช้เอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสปริมาณ 9.0 µg เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดสปริมาณ 20 µg และ DCIP ความเข้มข้น 0.1 mM ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ที่คัดเลือกได้จากการศึกษาในตอนที่ 1.2 โดยนำสารละลายเอ็นไซม์ที่ได้มา

ศึกษาความเข้มข้นของเอทานอล 7 ระดับ คือ 1000, 800, 600, 400, 200, 100 และ 50 ppm. จากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมเอทานอลลงในสารละลายเอ็นไซม์ จะสังเกตเห็นว่าสารละลายเอ็นไซม์ทุกตัวอย่างมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 10) โดยมีการเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อนอมชมพู สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า (ภาพที่ 11 – 16)

ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้ปริมาณเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส 9.0 µg เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส 20 µg และสีย้อม DCIP เข้มข้น 0.1 mM เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับนำไปศึกษาและพัฒนากรรมวิธีการผลิตแถบชี้วัดเอทานอลในการศึกษาตอนที่ 2 ต่อไป เนื่องจากการใช้สูตรนี้ น่าจะสามารถตรวจวัดปริมาณเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์มะม่วงที่มีการดัดแปลงบรรยากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) การพัฒนากรรมวิธีการผลิตแถบชี้วัดเอทานอล

การผลิตแถบชี้วัดเอทานอลสำหรับติดตามการเสื่อมเสียของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ได้เปรียบเทียบการผลิตแถบชี้วัดเอทานอลโดยใช้ฟิล์มเมทิลเซลลูโลส กับการผลิตกับการผลิตแถบชี้วัดเอทานอลโดยใช้แผ่นดูดซับ เนื่องจากเมทิลเซลลูโลสเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการทำฟิล์มและมีความปลอดภัยกับผลิตภัณฑ์อาหาร (Atchareeya et al., 2010) ส่วนแผ่นดูดซับ เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องตลาด ปลอดภัย เตรียมได้ง่าย และมีราคาถูก ซึ่งหากผลการศึกษาพบว่ามีประสิทธิภาพดี ก็จะสามารถลดขั้นตอนการผลิต และลดต้นทุนการผลิตแถบชี้วัดได้

3.1 การผลิตแถบชี้วัดเอทานอลโดยใช้ฟิล์มเมทิลเซลลูโลส

การทำฟิล์มเมทิลเซลลูโลส ได้ประยุกต์จากผลการศึกษาของ Atchareeya et al. (2010) และเมื่อนำไปผสมกับเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส 9.0 µg เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส 29.0 µg. และสีย้อม DCIP 2 ระดับความเข้มข้น คือ 1 และ 2 M จะได้ฟิล์มสีฟ้าอ่อน (ภาพที่ 17A) และฟิล์มสีฟ้าเข้ม ตามลำดับ (ภาพที่ 17B)

3.2 การผลิตแถบชี้วัดเอทานอลโดยใช้แผ่นดูดซับ

การตรียมแผ่นดูดซับ ได้ดำเนินการตามวิธีการในข้อ 3.2 ของวิธีดำเนินการวิจัย และได้เตรียมสารละลายเอ็นไซม์และสีย้อมตามสูตรที่ได้จากการศึกษาในตอนที่ 2 แล้วทำการแช่แผ่นดูดซับในสารละลายเอ็นไซม์เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นวางแถบชี้วัดไว้ที่อุณหภูมิห้อง ให้มีความชื้นประมาณไม่เกินร้อยละ 30 พบว่าแผ่นดูดซับที่ได้มีสีฟ้าอ่อน ซึ่งคาดว่าจะไม่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีได้ชัดเจนเมื่อทำปฏิกิริยากับเอทานอล การที่สีฟ้าเข้มของสารละลายเอ็นไซม์และสีย้อม มีสีที่อ่อนลงเมื่ออยู่ในแผ่นดูดซับ อาจเนื่องมาจากการที่แผ่นดูดซับมีสีขาว เมื่อรวมกับสารละลายเอ็นไซม์และสีย้อมที่มีสีฟ้าเข้ม ทำให้ได้สีฟ้าอ่อนลง

เพื่อปรับสีของแผ่นดูดซับให้มีสีฟ้าที่เข้มเพียงพอ ที่จะสังเกตการเปลี่ยนสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการศึกษาโดยเตรียมสารละลายเอ็นไซม์และสีย้อม 2 สูตร ที่มีการใช้สารละลายเอ็นไซม์ความเข้มข้นสูง ซึ่งประกอบด้วยเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสร้อยละ 0.3 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (0.3 g ในสารละลายบัฟเฟอร์

100 มิลลิลิตร) เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส ร้อยละ 0.04 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (0.04 g ในสารละลายบัฟเฟอร์ 100 มิลลิลิตร) และใช้ความเข้มข้นของ DCIP 2 M และการใช้สารละลายเอ็นไซม์ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งประกอบด้วย เอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสร้อยละ 0.15 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (0.15 g ในสารละลายบัฟเฟอร์ 100 มิลลิลิตร) เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส ร้อยละ 0.02 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (0.02 g ในสารละลายบัฟเฟอร์ 100 มิลลิลิตร)และใช้ความเข้มข้นของ DCIP 2 M พบว่าแผ่นดูดซับที่ได้ทั้งสองมีสีฟ้าเข้ม (ภาพที่ 18A และ 18B) น่าจะสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีได้อย่างชัดเจนเมื่อทำปฏิกิริยากับเอทานอล อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของสารละลายเอ็นไซม์ที่เหมาะสม ต่อการใช้ผลิตแถบชี้วัดเพื่อติดตามคุณภาพของมะม่วง ต้องทำการศึกษาในลำดับต่อไป

3.3 การศึกษาสมบัติของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสและแผ่นดูดซับ

3.3.1 ฟิล์มเมทิลเซลลูโลส

3.3.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส พบว่ามี O-H stretching เท่ากับ 3442 cm^{-1}, $-CH_3$ stretching เท่ากับ 2902 cm^{-1}, $-CH_2$ stretching เท่ากับ 2844 cm^{-1}, C-O stretching เท่ากับ 1654 cm^{-1}, C-OH stretching เท่ากับ 1456 cm^{-1} และ C-O stretching เท่ากับ 1056 cm^{-1} (ภาพที่ 19) ซึ่งฟิล์มที่ได้จากการศึกษานี้ มีสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Rimdusit *et al*., (2012) ที่พบว่ามี O-H stretching ที่ 3447 cm^{-1} มี $-CH_3$ stretching บน anhydroglucose unit ที่ 2962 cm^{-1} มี $-CH_2$ stretching บน anhydroglucose unit ที่ 2860 cm^{-1} มี C-O stretching บน anhydroglucose unit ที่ 1643 cm^{-1} มี C-OH stretching ที่ 1440 cm^{-1} และ C-O stretching ที่ 1163 cm^{-1}

3.3.1.2 สมบัติเชิงกล แรงดึง ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ และค่าความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

จากการศึกษาสมบัติของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส พบว่ามีสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความยืด (Elongation) เท่ากับร้อยละ 39.00±3.54 และมีค่ามอดุลัสของยัง (Young Modulus) เท่ากับ 766.88±87.86 MPa และมีค่าแรงดึง (Tensile Strength) เท่ากับ 24.29±4.07 MPa (ตารางที่ 3) ซึ่งจากการศึกษาของ Espino-Herrera et al. (2011) พบว่าค่าความยืดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10 มีค่ามอดุลัสของยังประมาณ 800 MPa และค่าแรงดึงของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 3 มีค่าเท่ากับ 30.16 MPa และจากการวิเคราะห์ค่า OP และ WVP ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส (ตารางที่ 3) พบว่ามีค่าเท่ากับ 159.12±2.95 $cc/m^2.day$ และ 18.03±0.32 $g.mm/day.m^2.kPa$ ตามลำดับ นอกจากนี้ Khan *et al*., (2010) ยังพบว่าค่า WVP ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 1 มีค่าประมาณ 6.3 $g.mm/day.m^2.kPa$ ซึ่งความแตกต่างระหว่างผลการศึกษานี้และผลการศึกษาที่ผ่านมา น่าจะเป็นเพราะมีการใช้สัดส่วนของส่วนผสมที่ใช้ทำฟิล์มเมทิลเซลลูโลสที่แตกต่างกัน

3.3.1.2 สมบัติเชิงความร้อน อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และความเสถียรเชิงความร้อน

จากการทดลองหาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิค DMA ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 3.33 และมีพลาสติกไซเซอร์ร้อยละ 30 พบว่าค่า Storage modulus (E') มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่มีอุณหภูมิ

กลาสทรานซิชัน (T_g) เท่ากับ 134 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 20) ซึ่งจากการศึกษาของ Rimdusit *et al*. (2012) พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 2 มีค่าเท่ากับ 147 องศาเซลเซียส และจากการทดลองของ Park and Ruckenstein (2001) พบว่าฟิล์มเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 5 ที่ไม่มีพลาสติกไซเซอร์ มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส และพบว่าเมื่อเพิ่มพลาสติกไซเซอร์ถึงร้อยละ 24 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีค่าเท่ากับ 130 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาความเสถียรเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetric analysis (DSC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วัดอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนที่วัสดุดูดหรือคาย เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมี พบว่า DSC thermograms ของการ scan ครั้งที่ 1 มีพีคของการดูดความร้อน (endo peak) หรือพีคของการหลอมเหลว (melting peak) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 154 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่สามารถมองเห็นพีคของการดูดความร้อนนี้ได้จากการ Scan ครั้งที่ 2 ซึ่งช่วงนี้จะเป็นช่วงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (T_m) ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส และพบว่าโครงสร้างที่เป็นส่วนของโครงสร้างผลึกจะไม่ปรากฏทั้ง 2 Scan (ภาพที่ 21) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสลายตัวด้วยความร้อน และการระเหยของส่วนประกอบต่างๆ ในระหว่าง first scan ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Khan *et al*. (2010) ซึ่งทดลองเติมสารนาโนเซลลูโลส (nanocellulose) ลงไปในเมทิลเซลลูโลสพบว่ามีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 150 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 0.25 และ 0.1 มีผลทำให้พีคของการหลอมเหลว (T_m) หายไป ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการเติมสารนาโนเซลลูโลสช่วยทำให้ฟิล์มเมทิลเซลลูโลสมีความเสถียรมากขึ้น

การศึกษาความเสถียรเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์ความเสถียรของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยใช้การวัดน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างฟิล์ม จึงสามารถหาอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มได้จากค่าน้ำหนักที่ลดลง ซึ่งพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 376.33 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 22) โดยฟิล์มเมทิลเซลลูโลสมีน้ำหนักลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงแรก เนื่องจากการระเหยของน้ำที่อยู่ในตัวอย่างฟิล์มเป็นไปอย่างช้าๆ เมื่อเริ่มให้ความร้อน และน้ำหนักของฟิล์มจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างของฟิล์มเกิดการสลายตัว ซึ่งผลการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์ม พบว่าได้ค่าใกล้เคียงกับผลจากการศึกษาของ Rimdusit *et al*. (2012) ซึ่งใช้ฟิล์มเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 2 และพบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วง 310 – 339 องศาเซลเซียส

3.3.2 แผ่นดูดซับ

จากการศึกษาสมบัติของแผ่นดูดซับก่อนแช่ในสารละลายเอ็นไซม์ พบว่ามีความหนาเท่ากับ 180.14 µm และมีความต้านทางต่อแรงดึงเท่ากับ 39.10 MPa เมื่อนำไปแช่ในสารละลายเอ็นไซม์ และวางแถบชี้วัดไว้ที่อุณหภูมิห้อง จนมีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 35.18 พบว่าแถบชี้วัดมีค่าความสว่าง (L) เท่ากับ 48.45 ค่าสีเขียว – แดง (a) มีค่าเท่ากับ -2.30 ซึ่งโน้มไปทางค่าสีเขียว และค่าสีน้ำเงิน – เหลือง (b) เท่ากับ -9.68 ซึ่งโน้มไปทางค่าสีน้ำเงิน (ตารางที่ 4)

4) การศึกษาประสิทธิภาพของแถบชี้วัดเอทานอล

4.1 ใช้แถบชี้วัดเอทานอลในการตรวจติดตามคุณภาพมะม่วง โดยการสังเกตลักษณะปรากฏของมะม่วงที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ

4.1.1 แถบชี้วัดเอทานอลที่ผลิตโดยใช้ฟิล์มเมทิลเซลลูโลส

เมื่อนำแถบชี้วัดชนิดนี้ไปติดไว้ในบรรจุภัณฑ์ของมะม่วงที่ดัดแปลงบรรยากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 23) พบว่าแถบชี้วัดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ แม้จะเก็บรักษาเป็นเวลา 14 วัน จนกระทั่งมะม่วงเกิดการเน่าเสีย จึงแสดงให้เห็นว่าแถบชี้วัดที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ฟิล์มเมทิลเซลลูโลส ไม่เหมาะสมสำหรับการติดตามการเสื่อมเสียของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ

4.1.2 แถบชี้วัดเอทานอลที่ผลิตโดยใช้แผ่นดูดซับ

4.1.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพของแถบชี้วัดเอทานอลที่ใช้สารละลายเอ็นไซม์ความเข้มข้นสูง

การศึกษานี้ใช้แถบชี้วัดที่ผลิตจากเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสร้อยละ 0.3 เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดสร้อยละ 0.04 และความเข้มข้นของ DCIP 2 M พบว่าเมื่อนำแถบชี้วัดไปติดในบรรจุภัณฑ์ของมะม่วงที่ดัดแปลงบรรยากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สังเกตได้ว่าแถบชี้วัดเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อนอย่างสมบูรณ์ ในวันที่ 2 ของการเก็บรักษา (ภาพที่ 24) ซึ่งยังสังเกตไม่พบว่า มะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพ ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลายเอ็นไซม์ที่ใช้สูงเกินไป ทำให้มีความไวต่อสภาวะภายในบรรจุภัณฑ์มะม่วงหรือสารระเหยอื่นๆ ที่มะม่วงสร้างขึ้นนอกเหนือจากเอทานอล จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีอย่างรวดเร็ว

4.1.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของแถบชี้วัดเอทานอลที่ใช้สารละลายเอ็นไซม์ความเข้มข้นต่ำ

จากผลการศึกษาในตอนที่ 4.2.1 ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสารละลายเอ็นไซม์ที่ใช้สูงเกินไป การศึกษานี้จึงได้ปรับลดความเข้มข้นลง โดยใช้เอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสร้อยละ 0.15 เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส ร้อยละ 0.02 และความเข้มข้นของ DCIP 2 M พบว่าเมื่อนำแถบไปติดในบรรจุภัณฑ์ของมะม่วงที่ดัดแปลงบรรยากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แถบชี้วัดเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อนอย่างสมบูรณ์ ในที่ 6 วันหลังจากการเก็บรักษา (ภาพที่ 25) ซึ่งเป็นวันที่มะม่วงเริ่มสุก ซึ่งการสุกของมะม่วงสอดคล้องกับการศึกษาของ Kumpoun and Uthaibutra (2010) ที่พบว่าการบรรจุผลมะม่วงแบบทีละผลแล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส สามารถเก็บรักษาในสภาพผลดิบได้นาน 28 วัน และสามารถทำให้สุกที่อุณหภูมิ 25 เซลเซียส ในวันที่ 6-7 วัน

การที่แถบชี้วัดเปลี่ยนแปลงสีเมื่อผลมะม่วงเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุก น่าจะเป็นเพราะว่าในระยะนี้ผลมะม่วงจะมีอัตราการหายใจสูง และมีการผลิตสารระเหยหลายชนิดในปริมาณสูง ซึ่งแม้ว่าการเปลี่ยนสีของแถบชี้วัดเมื่อมะม่วงเริ่มสุกไม่ได้เกิดจากเอทานอล แต่ข้อมูลที่ได้ก็มีประโยชน์มากสำหรับการเก็บมะม่วงในบรรจุภัณฑ์ที่ดัดแปลงบรรยากาศ เนื่องจากเมื่อมะม่วงเริ่มสุก ผู้ประกอบการหรือผู้บริโภคควรทำการเปิดบรรจุ

ภัณฑ์ เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนก๊าซมากขึ้น มิฉะนั้นมะม่วงจะมีกระบวนการสุกที่ผิดปกติจากการหมักได้ นอกจากนี้การเปิดบรรจุภัณฑ์เมื่อมะม่วงเริ่มสุก ยังไม่มีผลทำให้อายุการเก็บของมะม่วงลดลง จากการเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ได้ทำการเปิดถุง

5) การศึกษาประสิทธิภาพของแถบชี้วัดเอทานอล ในการตรวจติดตามคุณภาพมะม่วง โดยการวัดสี ปริมาณกรด ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และการสังเกตลักษณะปรากฏของมะม่วงที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ

การศึกษาผลของเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของแถบชี้วัด ที่ผลิตโดยใช้แผ่นดูดซับและสารละลายเอ็นไซม์ความเข้มข้นต่ำ และการเปลี่ยนแปลงของมะม่วงน้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ดำเนินการโดยทำการวิเคราะห์ค่าสี L, a, b ของแถบชี้วัด และการวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (%tatal acidity; TA) และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid, TSS; ºBrix) ของมะม่วง เพื่อคำนวณสัดส่วนของ TSS/TA โดยค่าของ TSS/TA จะแสดงถึงรสชาติของมะม่วง ซึ่งค่าที่มากขึ้นแสดงว่าผลมะม่วงมีรสหวานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับรสเปรี้ยว

จากการวิเคราะห์ค่าสี L, a, b ของแถบชี้วัด พบว่า การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแถบชี้วัด (ภาพที่ 32-42) และเมื่อนำแถบชี้วัดมาวิเคราะห์ค่าสี พบว่า เมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แถบชี้วัจะดมีค่าความสว่าง (L) เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 48.45 – 71.86 (ภาพที่ 26) มีค่าสีเขียว – แดง (a) เพิ่มขึ้น โดยโน้มไปทางค่าสีแดง เนื่องจากค่า a เป็นบวก อยู่ในช่วง -2.30 ถึง 4.48 (ภาพที่ 27) และมีค่าสีน้ำเงิน – เหลือง (b) ลดลง โดยโน้มไปทางค่าสีน้ำเงิน เนื่องจากค่า b ติดลบ อยู่ในช่วง -2.50 ถึง -9.68 (ภาพที่ 28)

จากการวิเคราะห์ปริมาณ TA และปริมาณ TSS ของมะม่วง เพื่อคำนวณสัดส่วนของ TSS/TA พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ผลมะม่วงมีการสุกเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ โดยปริมาณกรดที่สามารถไทเทรตได้ มีค่าลดลงเมื่อการสุกเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 29) ซึ่งค่า TA จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 8 วันแรกของการเก็บรักษา จากนั้นจะลดลงเหลือปริมาณที่น้อยมากจนเกือบเป็น 0 และจากการสังเกตพบว่าปริมาณกรดที่สามารถไทเทรตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมะม่วงเริ่มเสีย

สำหรับปริมาณ TSS จะแปรผกผันกับปริมาณ TA คือ ในช่วง 1-10 วันของการเก็บรักษา จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะสูงมากเมื่อมะม่วงสุกเต็มที่ในวันที่ 10 ของการเก็บรักษา (ภาพที่ 30) จากนั้นจะเริ่มลดลงเล็กน้อย เมื่อนำค่า TSS และ TA มาคำนวณหาอัตราส่วน TSS/TA พบว่า ลักษณะของกราฟค่อนข้างคงตัวในช่วงแรก จากนั้นวันที่ 6-12 ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอย่างมาก และลดลงในวันที่ 13 (ภาพที่ 31) คาดว่าการลดลงนี้เกิดจากการใช้น้ำตาลของเชื้อจุลินทรีย์ที่เปลี่ยนคุณภาพของมะม่วงขณะเน่าเสีย

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแถบชี้วัด (ภาพที่ 32-42) ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อมะม่วงดิบอยู่นั้น แถบชี้วัดจะยังคงมีสีน้ำเงิน (ภาพที่ 32) และจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อนเมื่อมะม่วงเริ่มสุก (โดยอิงจากค่า TSS/TA) ในวันที่ 6 ของการเก็บรักษา (ภาพที่ 33) และหลังจากนั้นแถบชี้วัดสีม่วงอ่อน จะมีสีม่วงอ่อนลงเรื่อยๆ เมื่อเก็บนานขึ้น และจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนในวันที่ 10-15 (ภาพที่ 37-42) ซึ่งมะม่วงมีลักษณะเสีย

ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน และยังมีกลิ่นหมักของแอลกอฮอล์เกิดขึ้นด้วย ซึ่งการเก็บรักษามะม่วงในบรรจุภัณฑ์ที่มีการดัดแปลงบรรยากาศ จะทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงของสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ คือมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และมีปริมาณออกซิเจนลดลง ส่งผลทำให้มะม่วงเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน และมีเอทานอลเกิดขึ้น

ผลการศึกษาในขั้นตอนนี้สรุปได้ว่า แถบชี้วัดสามารถใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่มีการดัดแปลงบรรยากาศได้ โดยสีของแถบชี้วัดจะยังคงมีสีน้ำเงินเมื่อมะม่วงดิบอยู่ ต่อมาเมื่อมะม่วงเริ่มสุก สีของแถบชี้วัดจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อน และเมื่อมะม่วงเริ่มเสีย หรือเมื่อมีการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะได้มะม่วงที่มีกลิ่นผิดปกติ พบว่าสีของแถบชี้วัดจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู ดังนั้น เมื่อผู้ใช้พบว่าแถบชี้วัดเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อน ก็ควรทำการเปิดบรรจุภัณฑ์เพื่อให้มะม่วงได้สุกต่อไปตามปกติ และหากพบว่าแถบชี้วัดเปลี่ยนเป็นสีชมพู ก็ไม่ควรนำมะม่วงนั้นมาบริโภค เนื่องจากเป็นมะม่วงเสีย หรือมีสภาวะการหมักเกิดขึ้น ทำให้ได้มะม่วงที่มีกลิ่นรสที่ผิดปกติ

อย่างไรก็ตาม มีข้อสังเกตว่าแถบชี้วัดที่ติดในบรรจุภัณฑ์มะม่วงแต่ละถุง อาจมีการเปลี่ยนสีในระยะเวลาที่แตกต่างกันได้ จากหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดของมะม่วง โดยมะม่วงที่มีขนาดใหญ่ จะทำให้แถบชี้วัดเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพูก่อนมะม่วงที่มีผลเล็ก นอกจากนี้สภาวะการเก็บรักษา เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ของบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ ก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแถบชี้วัด เช่น ถ้าเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูง เช่น มากกว่า 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลามากกว่า 1 วัน จะมีผลทำให้แถบชี้วัดเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อน และถ้าภายในบรรจุภัณฑ์มีสภาพเป็นกรด จากการปนเปื้อนหรือจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของมะม่วงเอง จะมีผลทำให้แถบชี้วัดเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีส้มอ่อน ดังนั้น การเก็บรักษาแถบชี้วัด ควรเก็บในตู้เย็น ที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส และควรเก็บในถุงลูมิเนียมฟอยด์หรือขวดแก้วสีชา เพื่อป้องกันไม่ให้สัมผัสกับสภาวะภายนอก ที่อาจมีความเป็นกรดสูง

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแถบชี้วัดคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ที่มีการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดขึ้น และมีการสะสมของเอทานอลภายในบรรจุภัณฑ์ โดยแถบชี้วัดคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้ระบบของเอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสร่วมกับเอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส พร้อมทั้งใช้สีย้อม 2, 6– ไดคลอโรอินโดฟีนอล เป็นสารที่ทำให้แถบชี้วัดเกิดการเปลี่ยนสี โดยได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างเอ็นไซม์และเอทานอล ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลและกิจกรรมของเอ็นไซม์ ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแถบชี้วัดที่ผลิตจากฟิล์มเมทิลเซลลูโลสและแผ่นดูดซับ และศึกษาประสิทธิภาพของแถบชี้วัดที่เหมาะสม ในการตรวจติดตามคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาพบว่าสูตรที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาระหว่างเอ็นไซม์ และเอทานอลที่ความเข้มข้น 100-1000 ppm ที่ทำให้สีของสารละลายเอ็นไซม์เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อนที่คงตัว และสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า ได้แก่ การใช้เอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดส 9.0 µg เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส 20 µg และสีย้อม 2, 6– ไดคลอโรอินโดฟีนอล (DCIP) 0.1 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M. ที่พีเอช 7.5 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร

แถบชี้วัดเอทานอลที่เหมาะสมสำหรับใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ คือแถบชี้วัดที่ผลิตจากแผ่นดูดซับ ซึ่งใช้สารละลายเอ็นไซม์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นจากสูตรที่ใช้ในสภาวะสารละลาย โดยใช้เอ็นไซม์แอลกอฮอล์ออกซิเดสร้อยละ 0.15 เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดสร้อยละ 0.02 และใช้ DCIP 2 M ซึ่งจะได้แถบชี้วัดที่มีสีน้ำเงิน ที่มีค่าความสว่าง (L) 48.45 ค่าสีเขียว–แดง (a) -2.30 และค่าสีน้ำเงิน–เหลือง (b) -9.68 มีความหนา 180.14 µm มีปริมาณความชื้นร้อยละ 35.18 และมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง 39.10 MPa ส่วนแถบชี้วัดที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ฟิล์มเมทิลเซลลูโลส ไม่เหมาะสมสำหรับการติดตามการเสื่อมเสียของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ เนื่องจากแถบชี้วัดชนิดนี้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ เมื่อมะม่วงน้ำดอกไม้มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ จากผลดิบไปจนกระทั่งมะม่วงเกิดการเน่าเสีย

เมื่อนำแถบชี้วัดที่ผลิตจากแผ่นดูดซับ ไปใช้ตรวจติดตามคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าแถบชี้วัดจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อนเมื่อมะม่วงเริ่มสุก และจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อมะม่วงเริ่มเสีย แถบชี้วัดที่พัฒนาขึ้นนี้ มีการเตรียมที่ไม่ยุ่งยาก ใช้งานได้ง่าย และมีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเชิงอุตสาหกรรมได้ต่อไป อย่างไรก็ตาม สภาวะในการเก็บรักษาแถบชี้วัด เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง พบว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแถบชี้วัด โดยการเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูง จะมีผลทำให้แถบชี้วัดเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอ่อน และความเป็นกรด จะทำให้แถบชี้วัดเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีส้มอ่อน ดังนั้น การเก็บรักษาแถบชี้วัด ควรเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่น ในตู้เย็น และควรเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อป้องกันสภาวะภายนอกที่ไม่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษานี้ พบว่าแถบชี้วัดที่ผลิตขึ้นสามารถใช้ตรวจติดตามคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศได้ แต่สาเหตุการเปลี่ยนสีของแถบชี้วัดยังขึ้นอยู่กับทั้งสารระเหย และเอทานอล ที่มะม่วงผลิตออกมาเมื่อเข้าสู่กระบวนการสุก และเมื่อมีกระบวนการหมักเกิดขึ้น ตามลำดับ ดังนั้น เพื่อให้ได้แถบชี้วัดที่สามารถใช้ตรวจติดตามการสุก หรือการหมัก อย่างใดอย่างหนึ่ง ควรมีการศึกษาเชิงลึกต่อไป เพื่อให้ได้ข้อมูลมาใช้ในการปรับกิจกรรมของเอ็นไซม์ต่อสารต่างๆ ให้เหมาะสม นอกจากนี้ ควรมีการศึกษารูปแบบ ตลอดจนสารในการทำแถบชี้วัดชนิดอื่นๆ เพื่อให้ได้แถบชี้วัดที่มีสีเข้มขึ้น มีความคงตัวในสภาวะกรด ตลอดจนสามารถมองเห็นความแตกต่างของสีที่เปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งการวิจัยและพัฒนาเชิงลึก จะช่วยเอื้อต่อการนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ในลำดับต่อไป