

กระดาษอินดิเคเตอร์จากซีโอไลต์โซเดียม-โมลิบเดตสำหรับตรวจวัดความสุกของทุเรียน  
Sodium zeolite-Molybdate Based Indicator Paper for Ripeness Detection of Durian  
(Durio zibethinus)

พิรวัส แซ่ نیم\*, กฤติพงศ์ เตียวไรสง

วัชรารักษ์ แสนหา

โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาราชวิทยาลัยบุรีรัมย์ 299 หมู่ 2 ตำบลสตึก อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์ 31150

อีเมลล์: phirawatseanim@gmail.com\*

### บทคัดย่อ

ทุเรียนเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีมูลค่าการส่งออกสูงของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม การเก็บเกี่ยวผลผลิตก่อนระยะสุกแก่ที่เหมาะสมส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิต ความเชื่อมั่นของผู้บริโภค และมูลค่าทางเศรษฐกิจ การประเมินความสุกของทุเรียนในปัจจุบันยังอาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานหรือเครื่องมือที่มีต้นทุนสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระดาษอินดิเคเตอร์ชนิดนาโนซีโอไลต์-เพอร์ออกโซโมลิบเดต (Na-zeolite-Peroxomolybdate indicator paper) สำหรับตรวจวัดความสุกของทุเรียนแบบไม่ทำลาย โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อสัมผัสก๊าซเอทิลีนและสารระเหยที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสุก

Na-zeolite ถูกเตรียมด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน จากนั้นเคลือบด้วยสารประกอบเพอร์ออกโซโมลิบเดตด้วยวิธีการอิมเพรเกชัน (Impregnation) โดยศึกษาอัตราส่วนของ Na-zeolite ต่อสารละลายเพอร์ออกโซโมลิบเดตจำนวน 3 ระดับ ก่อนนำมาผลิตเป็นกระดาษอินดิเคเตอร์บนกระดาษโครมาโทกราฟี และทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดความสุกของทุเรียนภายใต้สภาวะปิด

ผลการศึกษาพบว่า สูตรที่เตรียมจาก Na-zeolite 3 กรัม ต่อสารละลายเพอร์ออกโซโมลิบเดต 60 มิลลิลิตร ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยสารเคลือบมีความสม่ำเสมอ ยึดเกาะกับพื้นผิวกระดาษได้ดี และสามารถตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนที่ปลดปล่อยจากทุเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระดาษอินดิเคเตอร์เกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงินภายใน 187 นาที ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะออกซิเดชันของโมลิบดีนัมจาก Mo(VI) เป็น Mo(V) ภายหลังการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์กับสารรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสุก นอกจากนี้ การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีในระบบ CIELAB แสดงให้เห็นแนวโน้มของค่า  $\Delta E$  และ  $\Delta b^*$  ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ากระดาษอินดิเคเตอร์นาโนซีโอไลต์-เพอร์ออกโซโมลิบเดตมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับตรวจวัดความสุกของทุเรียนแบบไม่ทำลาย และสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะสำหรับการควบคุมคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรในอนาคต

คำสำคัญ: กระดาษอินดิเคเตอร์, ซีโอไลต์, เพอร์ออกโซโมลิบเดต, เอทิลีน, ความสุกของทุเรียน

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและผู้ส่งออกทุเรียนรายสำคัญของโลก โดยมีมูลค่าการส่งออกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ทุเรียนจึงนับเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีบทบาทสำคัญต่อรายได้ของภาคการเกษตรและการค้าระหว่างประเทศ อย่างไรก็ตาม การเก็บเกี่ยวผลผลิตก่อนระยะสุกแก่ที่เหมาะสมยังคงเป็นปัญหาสำคัญของอุตสาหกรรมทุเรียน เนื่องจากทุเรียนที่เก็บเกี่ยวเร็วเกินไปไม่สามารถพัฒนาคุณภาพด้านรสชาติ กลิ่น และเนื้อสัมผัสได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการร้องเรียนจากผู้บริโภค การถูกปฏิเสธสินค้าในตลาดส่งออก และก่อให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างมาก

ทุเรียนเป็นผลไม้ประเภท climacteric ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจและการผลิตก๊าซเอทิลีนอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการสุก เอทิลีนทำหน้าที่เป็นฮอร์โมนพืชที่ควบคุมการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุก การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของผนังเซลล์ การเปลี่ยนแปลงสี และการสร้างสารประกอบให้กลิ่นหอม ดังนั้น ปริมาณเอทิลีนที่ปลดปล่อยออกมาจึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ระดับความสุกของผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัจจุบัน การประเมินความสุกของทุเรียนส่วนใหญ่ยังอาศัยประสบการณ์ของเกษตรกรและผู้ค้า เช่น การเคาะผล การสังเกตสีหนาม หรือการตัดผลเพื่อตรวจสอบลักษณะเนื้อ ซึ่งเป็นวิธีที่ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ประเมินและอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิต ขณะที่เทคนิคการตรวจวัดเอทิลีนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ เช่น Gas Chromatography หรือเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ มีความแม่นยำสูงแต่มีต้นทุนสูงและไม่เหมาะสำหรับการใช้งานภาคสนามหรือในระดับเกษตรกรรายย่อย

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการพัฒนาวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Intelligent Packaging) และเซนเซอร์เชิงสี (Colorimetric Sensor) เพื่อใช้ตรวจติดตามคุณภาพอาหารและผลผลิตทางการเกษตรอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะวัสดุฐานกระดาษซึ่งมีข้อดีด้านต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และ

สามารถสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ ซีโอไลต์ยังเป็นวัสดุพรุนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง สามารถดูดซับก๊าซและสารระเหยได้ดี ขณะที่สารประกอบเพอร์ออกโซโมลิบเดตสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์กับสารรีดิวซ์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน จึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับตรวจวัดความสุกของผลไม้

โครงการนี้จึงมุ่งพัฒนากระดาษอินดิเคเตอร์ชนิดนาโนซีโอไลต์-เพอร์ออกโซโมลิบเดตสำหรับตรวจวัดความสุกของทุเรียนแบบไม่ทำลาย โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุและประเมินประสิทธิภาพการตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนที่ปลดปล่อยจากทุเรียนระหว่างการสุก เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเซนเซอร์ต้นทุนต่ำที่สามารถประยุกต์ใช้ในระบบบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะและการควบคุมคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรในอนาคต

## วิธีการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 การเตรียมโซเดียมซีโอไลต์ (Preparation of Na-zeolite)

โซเดียมซีโอไลต์เตรียมด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange method) โดยชั่งผงซีโอไลต์จำนวน 3.0 กรัม เติมน้ำละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วกวนสารเป็นเวลา 12 นาที เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนและปรับสภาพพื้นผิวของซีโอไลต์ จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและกรองจนกระทั่งสารละลายมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6–7

นำซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วเติมน้ำละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และกวนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6–7 อีกครั้ง ก่อนนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเก็บรักษาในถุงซิปล็อกพร้อมซิลิกาเจลเพื่อป้องกันการดูดความชื้น

ตอนที่ 2 การเตรียมสารประกอบเพอร์ออกโซโมลิบเดต (Preparation of Peroxomolybdate)

ซังแอมโมเนียมโมลิบเดตจำนวน 1.0 กรัม และแอมโมเนียมซัลเฟตจำนวน 0.2 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (18%) ปริมาตร 4 มิลลิลิตรที่ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตร 4 มิลลิลิตรที่ละลายในน้ำกลั่น พร้อมกวนอย่างต่อเนื่องจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารประกอบเปอร์ออกไซด์โมลิบเดตที่พร้อมนำไปใช้เคลือบบนวัสดุรองรับ

**ตอนที่ 3** การเตรียม Na-zeolite–Peroxomolybdate method) โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่าง Na-zeolite และสารละลายเปอร์ออกไซด์โมลิบเดตจำนวน 3 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 : Na-zeolite 3g : Peroxomolybdate 30 mL สูตรที่ 2 : Na-zeolite 3g : Peroxomolybdate 45 mL สูตรที่ 3 : Na-zeolite 3g : Peroxomolybdate 60 mL เติมสารละลายเปอร์ออกไซด์โมลิบเดตลงใน Na-zeolite แล้วกวนเป็นเวลา 20 นาที โดยควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วง 1.5–2.0 ตลอดกระบวนการ จากนั้นกรองและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนเก็บรักษาในถุงซิปล็อกพร้อมซิลิกาเจลเพื่อป้องกันความชื้น

#### **ตอนที่ 4** การผลิตกระดาษอินดิเคเตอร์

ซัง Na-zeolite–Peroxomolybdate จำนวน 1 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 12 มิลลิลิตร และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) จำนวน 0.1 กรัม เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร แล้วกวนจนเกิดสารแขวนลอยที่เป็นเนื้อเดียวกัน นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้เคลือบลงบนกระดาษโครมาโทกราฟีโดยใช้วิธีการเกลี่ยให้มีความสม่ำเสมอบนพื้นผิว จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 40 นาที จนแห้งสนิท แล้วเก็บรักษาในถุงซิปล็อกที่มีซิลิกาเจลเพื่อป้องกันการดูดซับความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

**ตอนที่ 5** การทดสอบประสิทธิภาพของกระดาษอินดิเคเตอร์ ประเมินประสิทธิภาพของกระดาษอินดิเคเตอร์ โดยเปรียบเทียบสูตรที่เตรียมได้ทั้ง 3 สูตร ภายใต้ระบบภาชนะปิด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่

ชุดควบคุม (Control) วางกระดาษอินดิเคเตอร์ไว้ในภาชนะปิดโดยไม่สัมผัสกับทุเรียน เพื่อประเมินความคงตัวของกระดาษอินดิเคเตอร์และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีที่อาจเกิดจากปัจจัยภายนอกชุดทดลอง (Treatment) วางกระดาษอินดิเคเตอร์ร่วมกับผลทุเรียนในภาชนะปิด เพื่อให้กระดาษสัมผัสกับก๊าซเอทิลีนและสารระเหยที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสุกของผลทุเรียน บันทึกระยะเวลาที่กระดาษอินดิเคเตอร์เริ่มเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน และเปรียบเทียบระยะเวลาการตอบสนองของแต่ละสูตร เพื่อคัดเลือกสูตรที่มีความไวต่อการตรวจวัดก๊าซเอทิลีนสูงที่สุด

#### **ตอนที่ 6** การประเมินการเปลี่ยนแปลงของสี

การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษอินดิเคเตอร์ประเมินจากการเปรียบเทียบสีของกระดาษก่อนและหลังการสัมผัสกับก๊าซจากทุเรียน โดยรายงานค่าพิกัดสีในระบบ CIE Lab\* ประกอบด้วย ค่า L\* (ความสว่าง) ค่า a\* (แกนสีเขียว-แดง) และค่า b\* (แกนสีน้ำเงิน-เหลือง) รวมทั้งคำนวณค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E$ ) และการเปลี่ยนแปลงของค่า b\* ( $\Delta b^*$ ) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณของการตอบสนองของกระดาษอินดิเคเตอร์ต่อกระบวนการสุกของทุเรียน

#### **ตอนที่ 7** การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาเปรียบเทียบระยะเวลาการเปลี่ยนสีของกระดาษอินดิเคเตอร์แต่ละสูตรกับการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดสีในระบบ CIELAB เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระดาษอินดิเคเตอร์ในการตรวจวัดความสุกของทุเรียน และคัดเลือกสูตรที่มีสมรรถนะเหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

#### **การวิเคราะห์ ANOVA**

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่า ค่า L\*, a\* และ b\* ของตัวอย่างทั้งสองกลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่า L\* มีค่า  $F(1,4) = 274.57$ ,  $p < 0.001$  ค่า a\* มีค่า  $F(1,4) = 37.50$ ,  $p = 0.004$  และค่า b\* มีค่า  $F(1,4) = 600.00$ ,  $p < 0.001$

## ผลและอภิปรายผล

**ตอนที่ 1** การคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของ Na-zeolite–Peroxomolybdate

ตารางที่ 1 การศึกษาอัตราส่วนของ Na-zeolite ต่อสารละลาย Peroxomolybdate

| สูตร     | Na-zeolite (g) | Peroxomolybdate (mL) | เวลาการเปลี่ยนสี (min) | การเปลี่ยนสี     |
|----------|----------------|----------------------|------------------------|------------------|
| สูตรที่1 | 3.00           | 30                   | 335                    | เหลือง → น้ำเงิน |
| สูตรที่2 | 3.00           | 45                   | 242                    | เหลือง → น้ำเงิน |
| สูตรที่3 | 3.00           | 60                   | 187                    | เหลือง → น้ำเงิน |

จากตารางที่ 1 พบว่า อัตราส่วน Na-zeolite 3 กรัม ต่อสารละลาย Peroxomolybdate 60 มิลลิลิตร ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น โดยสารเคลือบสามารถกระจายตัวบนพื้นผิวกระดาษได้อย่างสม่ำเสมอ มีการยึดเกาะที่ดี และไม่หลุดลอกระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยังตอบสนองต่อก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสุกของทุเรียนได้รวดเร็วที่สุด จึงเลือกสูตรดังกล่าวสำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษอินดิเคเตอร์ในขั้นตอนต่อไป

**ตอนที่ 2** ประสิทธิภาพของกระดาษอินดิเคเตอร์ในการตรวจวัดความสุกของทุเรียน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกระดาษอินดิเคเตอร์กับทุเรียน

| ชุดการทดลอง | การเปลี่ยนสี     | เวลาที่ใช้(min) |
|-------------|------------------|-----------------|
| ชุดควบคุม   | ไม่เปลี่ยนสี     | -               |
| ชุดทดลอง    | เหลือง → น้ำเงิน | 187± 4          |

จากตารางที่ 2 พบว่ากระดาษอินดิเคเตอร์สามารถตอบสนองต่อก๊าซและสารระเหยที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสุกของทุเรียนได้อย่างชัดเจน โดยสีของกระดาษเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงินภายใน 187 นาที ในขณะที่ชุดควบคุมซึ่งไม่สัมผัสกับทุเรียนไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสีตลอดระยะเวลาการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีของกระดาษอินดิเคเตอร์เกิดจากการตอบสนองต่อสารระเหยที่ปลดปล่อยจากทุเรียน ไม่ใช่เกิดจากปัจจัยแวดล้อมอื่น

**ตอนที่ 3** การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสี

ผลการวิเคราะห์สีของกระดาษอินดิเคเตอร์ในระบบ CIE Lab\* แสดงให้เห็นว่า หลังสัมผัสกับก๊าซจากทุเรียน ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลงเล็กน้อยจาก 95 เป็น 93 ขณะที่ค่า  $a^*$  เปลี่ยนจาก -2 เป็น -1.5 และค่า  $b^*$  ลดลงจาก 8 เป็น 6 ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของโทนสีจากสีเหลืองไปทางสีน้ำเงิน นอกจากนี้ ค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E$ ) มีค่าเท่ากับประมาณ 2.6 และค่า  $\Delta b^*$  เท่ากับ -2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของสีสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าและสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้เชิงปริมาณของระดับความสุกของทุเรียนได้

การเปลี่ยนแปลงของค่า  $b^*$  เป็นตัวแปรที่สะท้อนการตอบสนองของกระดาษอินดิเคเตอร์ได้ชัดเจนที่สุด เนื่องจากค่า  $b^*$  แสดงการเปลี่ยนแปลงบนแกนสีเหลือง-น้ำเงิน ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนสีที่สังเกตได้ระหว่างการทดลอง ดังนั้น ค่า  $\Delta b^*$  จึงอาจใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณสำหรับการติดตามความสุกของผลไม้ในระบบตรวจวัดแบบไม่ทำลาย

**ตอนที่ 4** กลไกการเปลี่ยนสีของกระดาษอินดิเคเตอร์

การเปลี่ยนสีของกระดาษอินดิเคเตอร์เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารประกอบ Peroxomolybdate เมื่อสัมผัสกับก๊าซเอทิลีนและสารรีดิวซ์ที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการสุกของทุเรียน ส่งผลให้โมลิบดีนัมเกิดการเปลี่ยนสถานะออกซิเดชันจาก Mo(VI) ไปเป็น Mo(V) ซึ่งทำให้สีของสารประกอบเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน

Na-zeolite ทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ช่วยดูดซับและสะสมก๊าซบริเวณพื้นผิวของอินดิเคเตอร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยเพิ่มความไวของการตรวจวัด นอกจากนี้ การยึดเกาะของสารเคลือบบนพื้นผิวกระดาษยังช่วยให้การเปลี่ยนสีเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความสุกของผลไม้แบบไม่ทำลายในภาคการเกษตร

## สรุปผล

จากการศึกษาอัตราส่วนของ Na-zeolite ต่อสารละลาย Peroxomolybdate จำนวน 3 สูตร พบว่าสูตรที่ใช้ Na-zeolite 3 กรัม ต่อสารละลาย Peroxomolybdate 60 มิลลิลิตร ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด เนื่องจากสารเคลือบกระจายตัวสม่ำเสมอบนพื้นผิวกระดาษ มีการยึดเกาะที่ดี และสามารถตอบสนองต่อก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการสุกของทุเรียนได้รวดเร็วกว่าสูตรอื่น จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นกระดาษอินดิเคเตอร์ตรวจวัดความสุกของผลไม้ เมื่อทดสอบกระดาษอินดิเคเตอร์กับทุเรียนภายใต้ระบบภาชนะปิด พบว่ากระดาษอินดิเคเตอร์สามารถเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงินภายใน 187 นาที ขณะที่ชุดควบคุมไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสี แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีเกิดจากการตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนและสารระเหยที่ปลดปล่อยจากทุเรียนระหว่างกระบวนการสุกโดยตรง ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสีในระบบ CIELAB พบว่าค่า  $L^*$  ลดลงจาก 95 เป็น 93 ค่า  $a^*$  เปลี่ยนจาก -2 เป็น -1.5 และค่า  $b^*$  ลดลงจาก 8 เป็น 6 ส่งผลให้มีค่า  $\Delta E$  ประมาณ 2.6 และ  $\Delta b^*$  เท่ากับ -2 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีเหลืองไปทางสีน้ำเงิน และสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณของระดับความสุกของทุเรียนได้

การเปลี่ยนสีของกระดาษอินดิเคเตอร์เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารประกอบ Peroxomolybdate เมื่อสัมผัสกับก๊าซเอทิลีนและสารระเหย ซึ่งส่งผลให้สถานะออกซิเดชันของโมลิบดีนัมเปลี่ยนจาก Mo(VI) เป็น Mo(V) ทำให้สีของอินดิเคเตอร์เปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน ขณะที่ Na-zeolite ทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับที่ช่วยดูดซับก๊าซและเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้กระดาษอินดิเคเตอร์มีความไวและความเสถียรในการตรวจวัดมากขึ้น

กระดาษอินดิเคเตอร์ Na-zeolite–Peroxomolybdate ที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือตรวจวัดความสุกของทุเรียนแบบไม่ทำลาย เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลได้ด้วยตาเปล่า มีต้นทุน

ต่ำ และมีแนวโน้มที่จะต่อยอดเป็นเซนเซอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะและการควบคุมคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรในอนาคตได้ อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความไว ความจำเพาะ ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา และการทดสอบกับผลไม้ชนิดอื่น เพื่อยืนยันศักยภาพในการใช้งานจริง และรองรับการพัฒนาเชิงพาณิชย์ต่อไป.

## ข้อเสนอแนะ

สามารถพัฒนางานวิจัยต่อไปได้โดยปรับปรุงอัตราส่วนของสารตั้งต้นและองค์ประกอบของกระดาษอินดิเคเตอร์ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น รวมถึงควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนอง เช่น ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน อุณหภูมิ เพื่อเพิ่มความไว ความสม่ำเสมอ และความคงทนของอินดิเคเตอร์สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้จริง

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ประกอบไปด้วยการดำเนินงานหลายขั้นตอน ตั้งแต่การศึกษาค้นคว้าข้อมูล การทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง การจัดทำรูปเล่ม จนกระทั่งโครงการสำเร็จลงไปได้ด้วยดี ตลอดระยะเวลาดังกล่าว คณะผู้จัดทำโครงการได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำในด้านต่าง ๆ จากหลายฝ่าย ทำให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างราบรื่น คณะผู้จัดทำจึงตระหนักและซาบซึ้งในความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ นายศักดิ์อนันต์ อนันตสุข ผู้อำนวยการโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย บุรีรัมย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนการดำเนินโครงการในด้านต่าง ๆ ขอกราบขอบพระคุณ นางสาววัชรภรณ์ แสนนา อาจารย์ที่ปรึกษา รวมทั้งคณะครูกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย บุรีรัมย์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และดูแลเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ จนทำให้โครงการฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี หายที่สุดนี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ และคุณแม่ ผู้เป็นกำลังใจสำคัญ ผู้ให้โอกาสในการศึกษา และคอยสนับสนุนทั้งด้านกำลังใจและกำลัง

ทรัพยากรมาโดยตลอด จนทำให้คณะผู้จัดทำสามารถ  
 ดำเนินโครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุก  
 ประการ

#### เอกสารอ้างอิง

วันทนี สว่างอารมณ์ และคณะ. (2563). การประเมิน  
 คุณภาพผลไม้แบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิค  
 การประมวลผลภาพและการจำแนกด้วยฐาน  
 กฎ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,  
 มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา.  
 ไม่ปรากฏเลขหน้า.  
 วีรพล ผลิตวานนท์;พีรพงษ์ สมบุญยอด;  
 วารุณี

Malik, S.; Singh, J.; Saini, K.; Chaudhary, V.;  
 Umar, A.; Ibrahim, A. A.; Baskoutas, S.  
 (2024). Paper-based sensors: affordable,  
 versatile, and emerging analyte detection  
 platforms. *Analytical Methods*, 16, 2777–  
 2809. DOI: 10.1039/D3AY02258G.

Syamsu, K.; Warsiki, E.; Yuliani, S.; Widayanti, S.  
 M. (2019, June). Nano Zeolite  $\text{KMnO}_4$  as

Ethylene Adsorber in Active Packaging of  
 Horticultural Products (*Musa paradisiaca*).  
*International Journal of Postharvest  
 Technology*, 5(2), 113–122.

Warsiki, E., et al. (2019, June). Theoretical  
 Calculation and Experimental Validation  
 of Ammonium Molybdate Concentration  
 for Fruit Ripeness Indicator Label. *IOP  
 Conference Series: Earth and  
 Environmental Science*, 472(1), 012017.  
 Retrieved June 23, 2019, from  
[https://doi.org/10.1088/1755-  
 1315/472/1/012017](https://doi.org/10.1088/1755-1315/472/1/012017) (doi.org in Bing)

Putri, V. J., et al. (2019, November). Application  
 of Nano Zeolite–Molybdate for Avocado  
 Ripeness Indicator. *IOP Conference  
 Series: Earth and Environmental Science*,  
 347(1), 012063. Retrieved November 9,  
 2019, from [https://doi.org/10.1088/1755-  
 1315/347/1/012063](https://doi.org/10.1088/1755-1315/347/1/012063) (doi.org in Bing)