ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์กับปริมาณความชื้นเมล็ดข้าวเปลือก
Relationship between Color Values of Paper Coated with Cobalt Chloride and Paddy Moisture Content

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์[1]
Assistant Professor Dr. Siwalak Pathaveerat[1]
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรือางาม[2*]
Assistant Professor Dr. Pimpan Pruengam[2*]

[1,2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140*
[1,2]Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering, Kasetsart University -Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140*
**Corresponding Author: fengpppn@ku.ac.th*
(Received: April 25, 2019, Revised: June 6, 2019, Accepted: June 12, 2019)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ และศึกษาถึงระยะเวลาการวัด (During Time) ที่เหมาะสม โดยนำกระดาษ 100 ปอนด์ แช่ในสารละลายสารโคบอลต์ (II) คลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) และ เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) อัตราส่วน 1 : 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำข้าวเปลือกและกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์บรรจุในโหลแก้ว โดยให้มีช่องว่างอากาศ (Head Space) ในขวด 50% ปิดฝาเป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที ผลการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ ในข้าวเปลือกที่มีความชื้น 10-24%w.b. พบว่า กระดาษจะค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากฟ้าเป็นชมพูเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และเมื่อประเมินในระบบ CIE พบว่า เมื่อความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ค่า L* มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่า a* และค่า b* มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน การหาค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจากการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของช่องว่างอากาศในโหลแก้วนั้น ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศมีเปลี่ยนแปลง จากการทดลองพบว่า ควรเก็บข้าวเปลือกในโหลแก้วนานอย่างน้อย 45 นาที จึงจะเพียงพอให้ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกกระจายตัวจนกระทั่งความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศต่าง ๆ เกิดสมดุล

คำสำคัญ : การหาความชื้น โคบอลต์คลอไรด์ กระดาษ ค่าสี ความชื้นสัมพัทธ์

Abstract : This research is a study of the relationship between moisture content of paddy and the color changing of the cobalt chloride coated paper. The optimum during time was determined by soaking 100 pounds of paper in a solution of cobalt (II) chloride ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) and methyl alcohol in ratio of 1: 4 ratio at 60 °C for 3 and 4 hours, respectively. The paddy and paper coated with cobalt chloride were carried out in glass jar with head space 50% and closed the lid for a period of either 30 45 and 60 min. The results of the experiment to measure the color changing of cobalt chloride coated paper in paddy with moisture content was 10-24%w.b. showed that the paper color was slowly changed from blue to pink with an increase in the moisture content. The evaluation using the CIE color system found that the value of L * was slightly changed with an increase in the paddy moisture content, while the value of a * and b * values were changed clearly. Determination of paddy moisture content by measuring the relative humidity of the head space in the glass jar associated with the paddy moisture content was caused the relative humidity in the head space to change. From the experiment found that should keep paddy in a glass jar for at least 45 min, so it would be sufficient to allow the paddy moisture content to spread until the relative humidity in the head space was balanced.

Keywords : Moisture Determination, Cobalt Chloride, Paper, Color Value, Relative Humidity

1. บทนำ

ข้าวเป็นอาหารหลักที่บริโภคภายในประเทศและเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของไทย โดยปี พ.ศ. 2559 ไทยมีปริมาณส่งออก 9.88 ล้านตันข้าวสาร คิดเป็นส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 29.97 ของการส่งออกข้าวโลก [1] ข้าวที่ไทยส่งออกส่วนใหญ่เป็น ข้าวเจ้าขาว ข้าวนึ่ง และข้าวหอมมะลิ ทำรายได้เข้าประเทศหลายแสนล้านบาท ในสภาวะที่การค้าข้าวในตลาดโลกมีการแข่งขันสูง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวโดยยืดอายุการเก็บรักษาด้วยการลดความชื้นจากกระบวนการทางความร้อน เช่น การอบแห้ง เป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ข้าวได้

ปัจจุบันการปลูกข้าวในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) ข้าวนาปี จะเริ่มปลูกตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมและเก็บเกี่ยวสิ้นสุดไม่เกินเดือนกุมภาพันธ์ (2) ข้าวนาปรัง เริ่มปลูกตั้งแต่เดือนมกราคม นิยมปลูกในท้องที่ที่มีการชลประทานดี เช่น ในภาคกลาง [2] และเก็บเกี่ยวในช่วงฤดูฝน ทำให้ข้าวที่เก็บเกี่ยวยิ่งมีความชื้นสูง

หลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกจะมีความชื้นสูงประมาณ 24-30% w.b. อาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของข้าวขึ้น เช่น ข้าวสารเกิดสีเหลืองเนื่องจากความร้อน ซึ่งมาจากการหายใจของข้าวเปลือก และเกิดข้าวเน่าข้าวบูด ซึ่งมาจากเชื้อราที่เจริญเติบโตได้ดี ข้าวมีคุณภาพการสีต่ำ เมล็ดพันธุ์เสื่อมความงอกเร็ว [3] ดังนั้นต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ประมาณ 12-14% w.b. จึงจะปลอดภัยต่อการเก็บรักษาโดยปราศจากการทำลายของแมลงและการเจริญเติบโตของเชื้อรา นอกจากนี้กระบวนการลดความชื้นที่เหมาะสมยังส่งผลต่อคุณภาพข้าวหลังการสีซึ่งเป็นเกณฑ์คุณภาพข้าวที่สำคัญ

การลดความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เครื่องอบ ได้แก่ เทคนิคสเปาเต็ดเบด (Spouted Bed) และเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized Bed) ซึ่ง

เป็นการอบแห้งในระดับโรงสี และวิธีทางธรรมชาติ คือ การตากข้าวเปลือกบนลานโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นวิธีที่นิยมกันโดยแพร่หลาย ในส่วนของเกษตรกรจะใช้ผ้าพลาสติกหรือถุงปุ๋ยวางรองบนลานดิน และต้องคอยกลับข้าวเปลือกบ่อยๆ เพื่อให้ข้าวเปลือกแห้งทั่วถึงและเร็วขึ้น การลดความชื้นทำให้เกษตรกรจำหน่ายข้าวได้ราคาดีขึ้น สำหรับเกษตรกรที่ต้องการเก็บข้าวไว้นาน 2-3 เดือน ต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้เหลือประมาณ 14%w.b. และหากลดความชื้นของเมล็ดข้าวได้ต่ำกว่า 12%w.b. จะสามารถเก็บข้าวได้มากกว่า 3 เดือน [4] ระหว่างการเก็บรักษาในยุ้งฉางการประเมินค่าความชื้นของกองข้าวเปลือกจึงเป็นสิ่งสำคัญ

การหาความชื้นในเมล็ดพืชสามารถทำได้หลากหลายวิธี [5, 6] ทั้งการวัดแบบทางตรง ซึ่งให้ความแม่นยำสูงแต่ต้องเสียเวลาในการปฏิบัตินานมีขั้นตอนมาก และการวัดแบบทางอ้อมสามารถตรวจวัดค่าความชื้นในเมล็ดพืชได้รวดเร็วกว่า

1. การวัดความชื้นโดยตรง (Direct Method) คือ การหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ด โดยอาศัยหลักการอบเมล็ดด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อไล่น้ำที่มีอยู่ในเมล็ดให้ออกไป ปริมาณน้ำถูกไล่ออกจากเมล็ดคือ ความชื้นของเมล็ดนั่นเอง วิธีการวัดโดยตรงเป็นการวัดที่ทำลายตัวอย่าง แต่ละวิธีจะมีความถูกต้องแตกต่างกัน วิธีที่มีการยอมรับกันทั่วไปว่ามีความถูกต้องแม่นยำสูง จะนิยมใช้เป็นค่าความชื้นมาตรฐานเพื่อใช้ปรับเทียบค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการอื่นๆ ก่อนนำค่าที่ได้ไปใช้ประโยชน์ การวัดทางตรงสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1.1 การใช้ตู้อบไฟฟ้า (Hot Air Oven) เป็นการไล่ความชื้นหรือน้ำออกจากเมล็ดพืชตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยการนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบ แล้วจึงชั่งน้ำหนักเมล็ดพืชแห้งหลังจากที่ไล่ความชื้นออกไปจนหมด แล้วเอาไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดพืช สำหรับอุณหภูมิที่ใช้อบมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ดพืชและมาตรฐานที่ใช้วัด

1.2 การกลั่น (Distillation) ใส่เมล็ดพืชลงในน้ำมัน หรือใส่เมล็ดพืชที่บดเป็นแป้งลงในตัวทำละลายโทลูอีน (Toluene) และทำให้ร้อน น้ำมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมันจะระเหยออกมาก่อน โดยผ่านไอน้ำเข้าเครื่องควบแน่นได้หยดน้ำ ซึ่งก็คือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช

1.3 การใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ (Infrared and Microwave Radiation) เป็นการใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ เพื่อระเหยน้ำในแป้งที่ได้จากการบดตัวอย่างเมล็ดพืช

2. วิธีโดยอ้อม (Indirect Method) จะเป็นการใช้คุณสมบัติอื่นของวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้าหรือคุณสมบัติทางไดอิเลคตริก (Dielectric) วิธีการนี้จะใช้เครื่องมือในการวัดโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมล็ดพืช เป็นวิธีที่รวดเร็วแต่ค่าที่ได้มีความถูกต้องต่ำเนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความชื้นจะต้องมีการตรวจสอบกับค่าวิธีพื้นฐานมี 2 วิธี

2.1 การใช้ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Electrical Resistance Method) เนื่องจากความต้านทานหรือการนำไฟฟ้าของวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นภายใน ดังนั้นเมื่อทราบความต้านทานไฟฟ้าของเมล็ดพืชก็สามารถเปรียบเทียบเป็นค่าความชื้นได้ การวัดโดยวิธีนี้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ อุณหภูมิเมล็ดพืช ความชื้น และความหนาแน่น (การอัดตัวของเมล็ด) ในการวัดค่าความต้านทานนั้น เมล็ดพืชจะถูกบดอัดอยู่ระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่น ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ค่าความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องวัด คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างเมล็ดพืช ข้อดีคือเป็นการวัดที่ง่ายและรวดเร็ว เครื่องมีขนาดกะทัดรัดพกพาง่าย ข้อเสียคือ ความผิดพลาดจากการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ดไม่สม่ำเสมอ เช่น เมล็ดพืชที่เพิ่งผ่านการลดความชื้นค่าที่วัดได้จะต่ำ เพราะที่ผิวของเมล็ดจะแห้งกว่าภายในเมล็ด และเมล็ดพืชที่เปียกจากฝนหรือแช่น้ำ ค่าที่วัดได้จะสูงเพราะที่ผิวของเมล็ดจะชื้นกว่าภายในเมล็ด

2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของเมล็ดพืช (Dielectric Methods, Capacitance) ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุขึ้นอยู่กับค่าความชื้นและความสามารถของตัวเก็บประจุ (Condensor) หรือค่าความจุไฟฟ้าเป็นผลมาจากคุณสมบัติไดอิเลคตริคของวัสดุที่ใส่อยู่ระหว่างแผ่นคู่ขนานของตัวเก็บประจุ โดยวัสดุที่มีความชื้นจะมีค่าคงที่ไดอิเลคตริค (Dielectric Constant) สูง วัสดุที่แห้งจะมีค่าน้ำบริสุทธิ์คงที่ที่ไดอิเลคตริคเท่ากับ 80 ที่ 20 องศาเซลเซียส ข้อดีคือมีความผิดพลาดน้อยกว่าเพราะการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ดไม่มีผลต่อการวัดโดยวิธีนี้ ข้อเสียคือการอัดตัวของเมล็ดหรือความหนาแน่นของเมล็ด จะมีผลต่อการวัดค่าความชื้นมากกว่าแบบวัดค่าความต้านทาน

ในปี 2017 Michael Reid and Jim Thompson [7] ได้สร้าง DryCard™ จากกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เป็นเครื่องมือที่ง่ายต่อการใช้งานในการตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ เกษตรกรสามารถใช้ในการตรวจวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ช่วยลดการสูญเสียของอาหาร ป้องกันการเกิดเชื้อราและสารพิษที่เกี่ยวข้อง

การใช้ประโยชน์จากสารโคบอลต์คลอไรด์นั้น มีการประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายด้าน เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพชลประทานการใช้น้ำแก่ต้นกาแฟในประเทศเคนย่า โดยให้น้ำแก่ต้นกาแฟเมื่อจำเป็นเท่านั้น ทำให้เพิ่มผลผลิตพืชต่อน้ำที่ใช้ [8] การใช้โคบอลต์คลอไรด์ต่ำกว่า 5 mM ที่ไม่เป็นพิษทำให้เซลล์ขน (Hair Cell) ของเส้นข้างลำตัวของปลาม้าลายมีความคมชัด [9] การใช้โคบอลต์คลอไรด์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์เยื่อบุฟันในมนุษย์ (hDPC) ให้ผลคล้ายกับการใช้ Hypoxia (การขาดออกซิเจน) ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสเต็มเซลล์ เนื่องจากโคบอลต์คลอไรด์เป็นสารเคมีที่เลียนแบบการขาดออกซิเจน และนอกจากนี้ยังพบว่า การใช้โคบอลต์คลอไรด์จะเพิ่มจำนวนเซลล์ต้นกำเนิด (Stem Cells) [10] ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะส่งออกข้าวเป็นอันดับต้นๆ ของโลก แต่ชาวนาส่วนใหญ่ยังคงยากจน เนื่องจาก (1) ผลผลิตต่อไร่ต่ำ (2) ต้นทุนการผลิตสูง ได้แก่ ค่าเช่านา ค่าจ้างไถ หว่าน ดำ ใส่ปุ๋ย ค่ากำจัดวัชพืชและแมลงศัตรูข้าว ตลอดจนค่าเก็บเกี่ยว และ (3) เกษตรกรขายข้าวได้ต่ำกว่าราคาทุน เนื่องจากการหักกำไรของพ่อค้าคนกลาง [11] สอดคล้องกับแผนพัฒนาการเกษตร ในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560 – 2564) [12] ซึ่งระบุว่า ครัวเรือนเกษตรไทยมีแนวโน้มเป็นหนี้สินเพิ่มขึ้น และส่วนใหญ่เป็นหนี้ที่ใช้เพื่อการลงทุนของทรัพย์สินเกษตร ซื้อปัจจัยการผลิตซึ่งมีราคาสูงขึ้น

เนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเมล็ดข้าว ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของข้าว รวมทั้งใช้เป็นข้อกำหนดในการซื้อขายด้วย ความชื้นที่สูงเกินมาตรฐานจะถูกหักลดน้ำหนักหรือราคาต่อหน่วยลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ และศึกษาถึงระยะเวลาการวัด (During Time) ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มทางเลือกในการประเมินปริมาณความชื้นข้าวเปลือก โดยไม่มีการสูญเสียตัวอย่าง กระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกและยังมีต้นทุนต่ำด้วย จึงน่าจะเหมาะแก่การใช้งานสำหรับเกษตรกรที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกล

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมล็ดพืชมีคุณสมบัติที่เรียกว่า ไฮโกรสโคปิค (Hygroscopic) โดยเมล็ดพืชที่มีความดันไอย่อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของเมล็ดพืช ทำให้เมล็ดสามารถรับ หรือถ่ายเทความชื้นให้กับบรรยากาศรอบๆ เมล็ดได้ การถ่ายเทความชื้นนี้เกิดขึ้นจนกว่าถึง จุดสมดุล ซึ่งเป็นจุดที่เมล็ดมีความชื้นคงที่ [13]

เมื่อปล่อยให้เมล็ดข้าวสัมผัสกับอากาศในภาชนะปิดจนความชื้นของเมล็ดข้าวไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ความชื้นของเมล็ดข้าวนั้นคือ ความชื้นสมดุล ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ วัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) หรือความดัน

ไอของไอน้ำในอากาศที่อิ่มตัว ส่งผลต่อความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ของเมล็ด เช่น ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจาก 60% เป็น 80% ที่อุณหภูมิเดียวกัน 35 องศาเซลเซียส พบว่า ในข้าวเมล็ดยาวมีความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นจาก 12.2% เป็น 15.3% ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความชื้นสมดุลของข้าวเมล็ดยาว [14]

Temp.	Relative humidity (%)													
(°C)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
1.7	9.2	10.1	10.9	11.7	12.5	13.3	14.1	14.9	15.7	16.6	17.6	18.6	19.8	21.3
4.4	9.0	9.9	10.7	11.5	12.3	13.0	13.8	14.6	15.4	16.3	17.2	18.2	19.4	20.9
7.2	8.8	9.7	10.5	11.2	12.0	12.8	13.5	14.3	15.1	15.9	16.9	17.9	19.0	20.5
10.0	8.6	9.5	10.3	11.0	11.8	12.5	13.3	14.0	14.8	15.7	16.5	17.5	18.7	20.1
12.8	8.5	9.3	10.1	10.8	11.5	12.3	13.0	13.8	14.5	15.4	16.3	17.2	18.4	19.8
15.6	8.3	9.1	9.9	10.6	11.3	12.1	12.8	13.5	14.3	15.1	16.0	16.9	18.1	19.5
18.3	8.2	8.9	9.7	10.4	11.1	11.9	12.6	13.3	14.1	14.9	15.7	16.7	17.8	19.2
21.1	8.0	8.8	9.5	10.3	11.0	11.7	12.4	13.1	13.8	14.6	15.5	16.4	17.5	18.9
23.9	7.9	8.7	9.4	10.1	10.8	11.5	12.2	12.9	13.6	14.4	15.2	16.2	17.2	18.6
26.7	7.8	8.5	9.2	9.9	10.6	11.3	12.0	12.7	13.4	14.2	15.0	15.9	17.0	18.3
29.4	7.6	8.4	9.1	9.8	10.5	11.1	11.8	12.5	13.2	14.0	14.8	15.7	16.8	18.1
32.2	7.5	8.3	9.0	9.6	10.3	11.0	11.6	12.3	13	13.8	14.6	15.5	16.5	17.8
35.0	7.4	8.1	8.8	9.5	10.2	10.8	11.5	12.2	12.9	13.6	14.4	15.3	16.3	17.6
37.8	7.3	8.0	8.7	9.4	10.0	10.7	11.3	12.0	12.7	13.4	14.2	15.1	16.1	17.4

เมล็ดพืชที่ถูกเก็บรักษาไว้ในสภาพแวดล้อมแบบปิด เช่น การบรรจุใส่ถุง หรือไซโล จะทำให้อากาศรอบเมล็ดพืชถูกจำกัด ไม่มีการแลกเปลี่ยนหมุนเวียนกับอากาศภายนอก ดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในที่ปิดนั้นจะเข้าสู่สภาวะสมดุลกับความชื้นในเมล็ดพืช จนกระทั่งเป็นความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium Relative Humidity) และหากเมล็ดที่อยู่ในไซโลความชื้นสูงจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงตามด้วย ส่งผลให้โอกาสเกิดเชื้อราและการสูญเสียการงอกสูงขึ้น เช่น ในไซโลที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ข้าวเปลือกจะมีความชื้นประมาณ 12.8% ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นเป็น 81% จะส่งผลให้ความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นเป็น 14.6% ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่ข้าวเปลือกมีแนวโน้มจะเสื่อมคุณภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยทั่วไปแล้วความชื้นสัมพัทธ์ในไซโลหรือที่เก็บรักษาควรมีค่าไม่เกิน 65% จึงจะปลอดภัย

ตารางที่ 2 ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกในสภาวะต่างๆ [15]

Range	RH (%)	Temperature (°C)						
		22	24	28	32	36	40	44
Safe-1	50	11.2	10.9	10.7	10.5	10.2	10	9.9
	55	11.7	11.5	11.2	11	10.8	10.6	10.4
Safe-2	60	12.3	12	11.8	11.6	11.4	11.2	11
	65	12.7	12.6	12.4	12.2	12	11.8	11.6
	70	13.5	13.3	13.1	12.8	12.6	12.5	12.3
Unsafe	75	14.3	14	13.8	13.6	13.4	13.2	13
	77	14.6	14.3	14.1	13.9	13.7	13.5	13.4
	79	14.9	14.7	14.5	14.3	14.1	13.9	13.7
	81	15.3	15.1	14.9	14.6	14.5	14.3	14.1
	83	15.7	15.7	15.3	15.1	14.9	14.7	14.5
	85	16.1	15.9	15.7	15.5	15.3	15.1	15
	87	16.6	16.4	16.2	16	15.8	15.6	15.5
	89	17.2	17	16.8	16.6	16.4	16.2	16.1
	91	17.9	17.7	17.5	17.3	17.1	16.9	16.7

หมายเหตุ

Safe-1 : ปลอดภัยสำหรับเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์

Safe-2 : ปลอดภัยสำหรับขัดสีและจำหน่าย

Unsafe : เมล็ดมีความชื้นสูงและจำเป็นต้องลดความชื้น

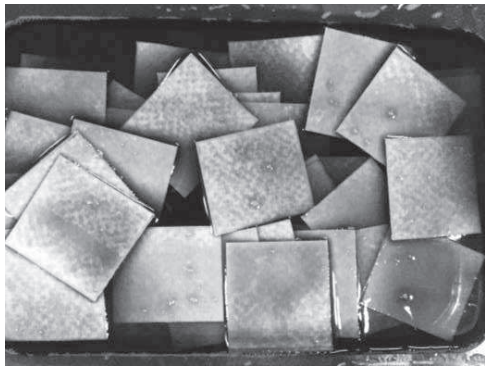
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

3.1 การเตรียมกระดาษเคลือบสารโคบอลต์ (II) คลอ-ไรด์ ($CoCl_2.6H_2O$)

ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลของน้ำ (Hexahy-Drate) เมื่อปราศจากความชื้น สาร $CoCl_2$ จะเป็นผงสีฟ้า แต่เมื่อสารได้รับความชื้นจะกลายเป็นผลึกสีชมพู คุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาความชื้นหรือการคายน้ำ และการเปลี่ยนสีของโคบอลต์คลอไรด์จากสีน้ำเงินจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพู [16]

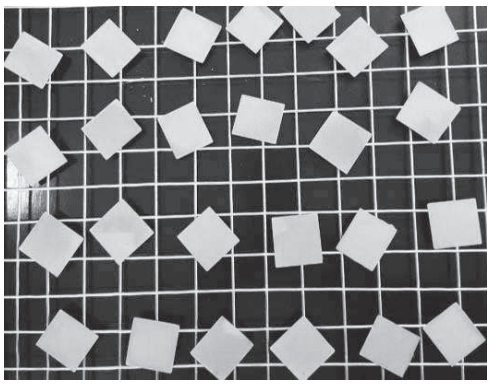
1. ผสมสารโคบอลต์ (II) คลอไรด์ และเมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) ในอัตราส่วน 1 : 4 โดยน้ำหนัก สารละลายในสถานะของเหลว ณ อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส

2. นำกระดาษ 100 ปอนด์ มาแช่ไว้ในสารละลายโคบอลต์ (II) คลอไรด์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กระดาษจะเป็นสีน้ำเงินเข้ม ดังภาพที่ 1 จากนั้นนำกระดาษมาผึ่งให้แห้งหมาด



ภาพที่ 1 กระดาษที่แช่ในสารละลาย

3. อบกระดาษด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กระดาษเคลือบสารโคบอลต์ (II) คลอไรด์ที่อบจนแห้ง

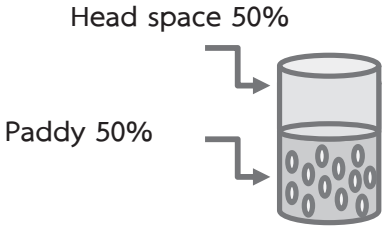
4. นำกระดาษที่ได้มาตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3×3 cm^2 (มีต้นทุนประมาณ 1.5 บาท/แผ่น) เพื่อเตรียมทดสอบความชื้นในขวดแก้ว

3.2 การเตรียมข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองคือข้าวเปลือกพันธุ์ กข 29 หรือ ชัยนาท 80 และมีความชื้นเริ่มต้นที่ประมาณ 28-30% w.b. จากนั้นแบ่งข้าวเปลือกเข้าตู้อบ 60 องศาเซลเซียส เพื่อลดความชื้นให้อยู่ในช่วง 10-24%w.b. เก็บข้าวแต่ละความชื้นแยกบรรจุถุงไว้ ก่อนทำการทดลองนำข้าวเปลือกมาตรวจวัดความชื้นซ้ำอีกครั้ง

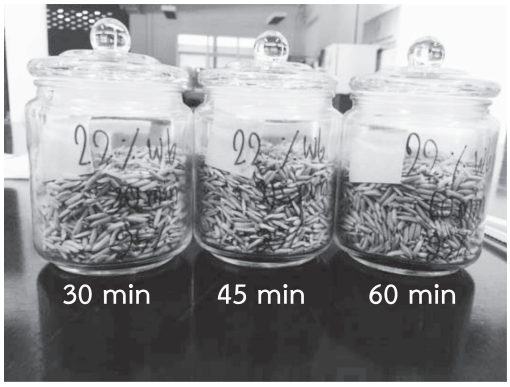
3.3 การทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ในแต่ละระดับความชื้นของข้าวเปลือก

1. นำข้าวเปลือกที่ระดับความชื้น 10%w.b. และกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ บรรจุในโหลแก้วขนาด 450 มล. โดยให้มีช่องว่างอากาศ (Head Space) ในขวด 50% ดังแสดงในภาพที่ 3 ปิดฝาเป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที



ภาพที่ 3 ช่องว่างอากาศในขวดแก้วที่บรรจุข้าวเปลือก

2. เมื่อครบระยะเวลา (During Time) 30, 45 และ 60 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4 เก็บกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ออกจากขวดแก้ว เก็บใส่ถุงซิปแล้วปิดทันที



ภาพที่ 4 สีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ที่บรรจุในโหลแก้วกับข้าวเปลือกความชื้น 22 %w.b. เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที

3. นำข้าวเปลือกทุกระดับความชื้นมาทดลองและทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.4 การวัดค่าสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอ-ไรด์

ค่าที่ได้จากเครื่องวัดสี คือ L*, a* , b* การใช้เครื่องวัดสีควรสอบเทียบด้วยผ่านสีขาวมาตรฐาน ซึ่งมีค่า L* เท่ากับ 96.16, a* เท่ากับ -1.07 และ b* เท่ากับ -0.4 วิธีการวัดค่าสี โดยรายละเอียดดังนี้

1. วัดค่าสีของกระดาษที่ผ่านการใช้ในแต่ละการทดลอง โดยใช้เครื่องมือวัดสี ยี่ห้อ Spectro-Guide (Sphere Gloss, รุ่น BYK-Gardner, USA) ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมผู้สังเกต คือ 10°

2. ก่อนการวัดทุกครั้งจะต้องสอบเทียบอุปกรณ์กับแผ่นสีดำและแผ่นสีขาวมาตรฐาน (X=85.14, Y=90.40, Z=97.61)

3. นำกระดาษแต่ละชุดมาหาค่าสี วัดสีออกมาเป็น ค่า L*, a* และ b* เมื่อ

L* คือ ค่าที่แสดงถึงความสว่าง (Lightness) ของวัตถุ ถ้าค่า L* เข้าใกล้ 100 แสดงว่าวัตถุมีความสว่าง ถ้าค่า L* เข้าใกล้ 0 แสดงว่าวัตถุมีความทึบแสง โดยค่า L* เท่ากับ 100 แสดงว่าวัตถุมีสีขาว ค่า L* เท่ากับ 0 แสดงว่าวัตถุมีสีดำ

a* คือ ค่าที่แสดงถึงความเป็นสีแดง (Redness) และสีเขียวของวัตถุ ถ้าค่า a* เป็นบวก (+) แสดงว่าวัตถุเป็นสีแดงและถ้าค่า a* เป็นลบ (-) แสดงว่าวัตถุเป็นสีเขียว มีค่าในช่วง -60 ถึง +60

b* คือ ค่าที่แสดงถึงความเป็นสีเหลือง (Yellowness) และสีน้ำเงินของวัตถุ ถ้าค่า b* เป็นบวก (+) แสดงว่าวัตถุเป็นสีเหลือง ถ้าค่า b* เป็นลบ (-) แสดงว่าวัตถุเป็นสีน้ำเงิน มีค่าในช่วง -60 ถึง +60

4. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ย

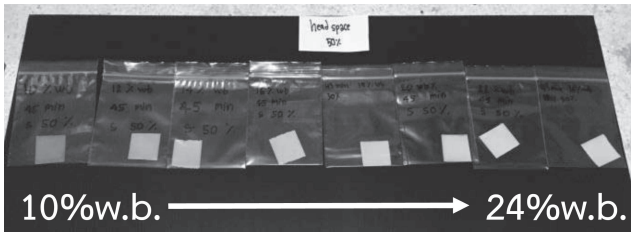
5. วัดค่าสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอ-ไรด์ที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบกับสีของกระดาษที่ใช้งานแล้ว

3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนผลของระยะเวลาที่ทดลองเก็บในขวดแก้วต่อการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบโคบอลคลอไรด์ในแต่ละระดับความชื้นของข้าวเปลือก แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละวิธีโดยใช้การทดสอบแบบดันแคน (Ducan Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)

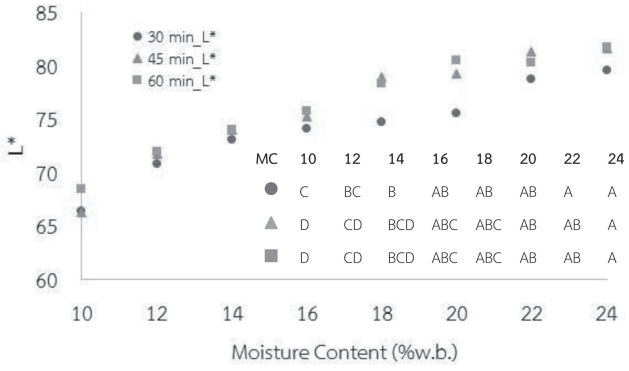
4. ผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอ-ไรด์ที่ได้รับผลจากอิทธิพลของระดับความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกและระยะเวลาการเก็บในโหลแก้ว กระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ก่อนใช้ทดลองจะมีสีฟ้าเข้ม ค่าสี L*, a* และ b* คือ 63.2±1.1, -4.8±1.2 และ -19.4±1.2 ตามลำดับ หลังการทดลองเป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที กระดาษจะมีการเปลี่ยนแปลงสีไปจากค่าเริ่มต้น ในข้าวเปลือกที่แห้งความชื้นต่ำประมาณ 10-12%w.b. สังเกตด้วยตาเปล่า พบว่า กระดาษยังคงเป็นสีฟ้า และจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพูตามระดับความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ [17, 18] สีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์จะมีการเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ที่บรรจุในโหลแก้วกับข้าวเปลือกเป็นเวลา 45 นาที

ในส่วนของค่าสี L*, a* และ b* ที่เป็นค่าที่นิยม ในการประเมินลักษณะปรากฏของตัวอย่างที่ทำการศึกษา พบว่า ค่า L* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก โดยเฉพาะข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงในช่วง 16-24%w.b. ส่งผลต่อค่า L* เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่า L* ของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นข้าวเปลือก

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

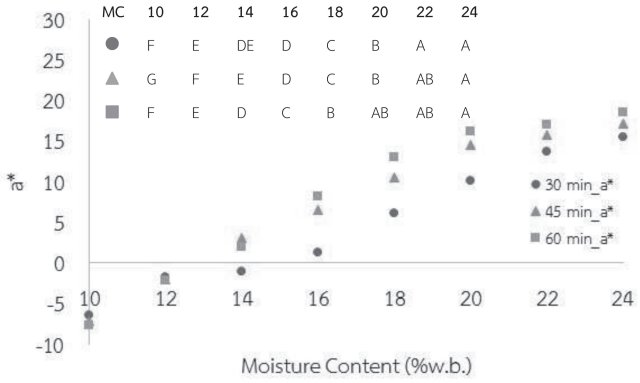
ในแต่ละระดับความชื้นของข้าวเปลือก พบว่า ระยะเวลาการวัด 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที ส่งผลต่อค่าสี L* ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่า L* ของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของระยะเวลาทดลอง

Moisture content (%w.b.)	During time		
	30 min	45 min	60 min
10	66.4±2.0 ^{A}	66.2±0.4 ^{A}	70.5±1.6 ^{A}
12	70.8±1.7 ^{A}	71.7±2.4 ^{A}	71.9±4.1 ^{A}
14	73.0±2.2 ^{A}	73.9±1.5 ^{A}	74.0±2.7 ^{A}
16	74.1±5.1 ^{A}	75.2±3.9 ^{A}	75.8±5.4 ^{A}
18	74.7±4.0 ^{A}	78.9±2.8 ^{A}	78.3±4.1 ^{A}
20	75.6±2.2 ^{A}	79.2±3.5 ^{A}	80.5±1.9 ^{A}
22	78.7±3.1 ^{A}	81.3±1.0 ^{A}	80.3±2.7 ^{A}
24	79.5±1.7 ^{A}	81.6±2.4 ^{A}	81.7±3.6 ^{A}

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่า a* ของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ที่ใช้ประเมินความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก พบว่า เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำ a* มีค่าที่เป็นลบ แสดงถึง ความเป็นสีเขียว และเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้น a* มีค่าที่เป็นค่าบวก แสดงถึง ความเป็นสีแดง นั่นคือ ที่ความชื้น 10%w.b. กระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์จะมีสีฟ้าค่อนข้างน้ำเงิน และที่ความชื้น 24%w.b. กระดาษจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในช่วง 10-24%w.b. ส่งผลต่อค่า a* อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่า a* ของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นข้าวเปลือก

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

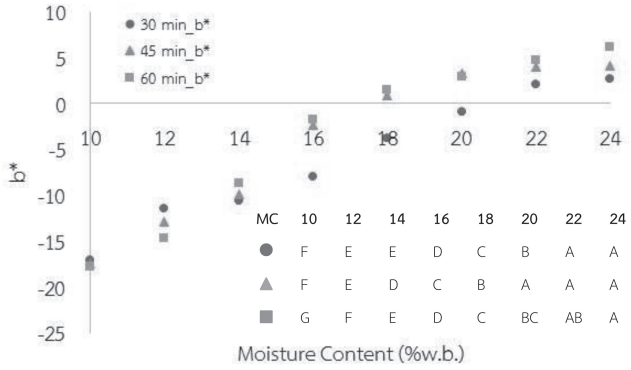
ระยะเวลาการวัด 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที ค่า a* ที่ระดับความชื้น 10-12%w.b. ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะพบว่า มีเพียงระยะเวลาการวัด 45 นาที และ 60 นาที ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4 เป็นเพราะเมื่อความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกสูงขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่องว่างอากาศในขวดเหนือเมล็ดข้าว (Head Space) จะมีมาก ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการถ่ายเทความชื้นสู่กระดาษเพิ่มขึ้น จนถึงจุดสมดุล

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่า a* ของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของระยะเวลาทดลอง

Moisture content (%w.b.)	During time		
	30 min	45 min	60 min
10	-6.5±0.6 ^{A}	-7.2±0.9 ^{A}	-7.7±0.8 ^{A}
12	-1.7±0.7 ^{A}	-2.1±0.6 ^{A}	-2.2±3.4 ^{A}
14	-1.0±0.2 ^{B}	3.0±1.6 ^{A}	1.9±1.6 ^{A}
16	1.3±2.4 ^{B}	6.5±3.1 ^{AB}	8.2±3.4 ^{A}
18	6.1±3.3 ^{B}	10.6±0.6 ^{AB}	13.0±3.4 ^{A}
20	10.1±1.7 ^{B}	14.4±1.1 ^{A}	16.1±0.6 ^{A}
22	13.6±0.8 ^{B}	15.7±0.7 ^{AB}	17.0±1.6 ^{A}
24	15.4±0.3 ^{B}	17.2±1.5 ^{AB}	18.5±1.0 ^{A}

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่า b* ของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ ที่ใช้ประเมินความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก พบว่า เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำ b* มีค่าที่เป็นลบ แสดงถึง ความเป็นสีน้ำเงิน และเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้น b* มีค่าเป็นบวก แสดงถึง ความเป็นสีเหลือง การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในช่วง 10-24%w.b. ส่งผลต่อค่า b* อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับค่า a* ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงค่า a* ของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นข้าวเปลือก

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาการวัด 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความชื้น 10-12%w.b. แต่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะพบว่า มีเพียงระยะเวลาการวัด 45 นาที และ 60 นาที ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับค่า a* ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่า b* ของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของระยะเวลาทดลอง

Moisture content (%w.b.)	During time		
	30 min	45 min	60 min
10	-17.1±0.6 ^{A}	-17.4±0.5 ^{A}	-17.8±0.3 ^{A}
12	-11.4±0.6 ^{A}	-12.8±0.2 ^{A}	-14.7±2.6 ^{A}
14	-10.6±0.5 ^{B}	-9.9±0.2 ^{AB}	-8.6±1.1 ^{A}
16	-8.0±0.5 ^{B}	-2.4±0.8 ^{A}	-1.7±1.3 ^{A}
18	-3.8±0.5 ^{B}	0.9±1.3 ^{A}	1.5±2.1 ^{A}
20	-0.9±2.1 ^{B}	3.3±0.4 ^{A}	3.0±0.8 ^{A}
22	2.1±1.3 ^{B}	4.0±0.9 ^{AB}	4.7±0.9 ^{A}
24	2.7±0.5 ^{B}	4.1±1.0 ^{B}	6.2±0.8 ^{A}

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

การหาค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจากการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของช่องว่างอากาศในโหลแก้วนั้น ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศมีเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ควรเก็บข้าวเปลือกในโหลแก้วนานอย่างน้อย 45 นาที จึงจะเพียงพอให้ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกกระจายตัวจนกระทั่งความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศต่างๆ เกิดสมดุล สอดคล้องกับการวิจัย Davis, U. C. (2017) รายงานว่า โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงสีจะสังเกตได้ภายใน 20–30 นาที และสีจะไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านไป 2 ชั่วโมง

5. สรุปและอภิปรายผล

ผลการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสีของกระดาษเคลือบสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ในข้าวเปลือกที่มีความชื้น 10-24%w.b. เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที พบว่า กระดาษจะค่อยๆ เปลี่ยนสีจากฟ้าเป็นชมพูเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และเมื่อประเมินในระบบ CIE พบว่า เมื่อความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ค่า L* มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่า a* และค่า b* มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน

จากการทดลอง กระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ ในขวดเก็บข้าวเปลือกที่มีช่องว่างอากาศ (Head space) 50% และปิดฝาเป็นเวลา 45 นาที มีการเปลี่ยนแปลงสีแต่ละระดับความชื้นชัดเจน ดังนั้น จึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาทำบัตรตรวจความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกที่มีต้นทุนต่ำให้แก่เกษตรกร

ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกกับการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ มีความสัมพันธ์กับระดับความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก ซึ่งสามารถใช้ทำนายหรือบอกปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่นำมาใช้ในการวัดได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

7. เอกสารอ้างอิง

(1) สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2559. (Online) www.thairiceexporters.or.th.

(2) มูลนิธิชัยพัฒนา, ม.ป.ป., ข้าว (Online) http://www.chaipat.or.th/publication/publish-document/tips/40-3.html.

(3) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2555. นโยบายส่งเสริมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวข้าว : เพิ่มราคาเพิ่มคุณภาพข้าว, (Online) http://prp.trf.or.th/trf-policy-brief/นโยบายส่งเสริมเทคโนโลยี

(4) จุฑามาส จงศิริ, 2556. การเก็บเกี่ยวและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวข้าว, สำนักงานวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, (Online) http://actech.agritech.doae.go.th/techno/other/Harvest.

(5) สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540, การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, พิมพ์ครั้งที่ 7, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 338 หน้า.

(6) วิบูลย์ เทเพนทร์, การวัดความชื้นเมล็ดพืช วิศวกรรมการเกษตร 8 วช. หัวหน้ากลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร, (Online) http://www.doa.go.th/aerix/files/research/vb_moisture_measure.pdf.

(7) M. Reid, and J. Thompson, 2017, Inventing a Low-Cost Solution to Reduce Moldy Foods: 'DryCard' Takes the Guesswork Out of Drying, (Online) https://news.plantsciences.ucdavis.edu/2017/04/03/inventing-a-low-cost-solution-to-reduce-moldy-foods-drycard-takes-the-guesswork-out-of-drying.

(8) E. M. W. Akunda, and Kumar D., 1981, A Simple Technique for Timing Irrigation in Coffee Using Cobalt Chloride Paper Disks, Irrigation Science, Vol 3(1), p. 57–62.

(9) W. J. Stewart, J. L. Johansen and J. C. Liao, 2017, A Non-toxic Dose of Cobalt Chloride Blocks Hair Cells of The Zebrafish Lateral Line, Hearing Research, Vol 350, p. 17-21.

(10) K. Laksana, S. Sooampon, P. Pavasant and W. Sriarj, 2017, Cobalt Chloride Enhances the Stemness of Human Dental Pulp Cells, Journal of Endodontics, Vol 43(5), p. 760-765.

(11) สมบัติ ธำรงธัญวงศ์, 2558. ทำไมชาวนายากจน? (Online) https://www.posttoday.com/social /think/407222

(12) สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559. แผนพัฒนาการเกษตร ในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560 – 2564), กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

(13) จวงจันทร์ ดวงพัตรา, 2529, การตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพเมล็ดพันธุ์, ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 194 หน้า.

(14) S. Sadaka, and R. Bautista, Grain Drying Tools: Equilibrium Moisture Content Tables and Psychrometric Charts. University of Arkansas, Little Rock, Arkansas, USA., FSA1074.

(15) Rice knowledge bank, (Online) http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/drying/drying-basics/how-to-determine-the-emc.

(16) G. Korotcenkov, 2018, "Moisture Indicators", In Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement. ; CRC Press: Boca Raton, p. 203-206.

(17) U. C. Davis, 2017, Feed the future innovation lab for horticulture, (Online) https://horticulture.ucdavis. edu/drycard.

(18) M.V. Zambrano, B. Dutta, D.G. Mercer, H.L. MacLean and M.F. Touchie, 2019, Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review, Trends in Food Science & Technology, Vol 88, p. 484–496.