

<http://journal.rmutp.ac.th/>

สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน¹ กระวี ตรีอำรรค^{1*} เทวรัตน์ ตรีอำรรค² และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ 17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

รับบทความ 26 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 22 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 29 พฤศจิกายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาค่าสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นต่างกัน ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบถูกเตรียมให้มีค่าความชื้นแตกต่างกันในช่วง 10 – 26 %WB (ฐานเปียก) และแปรค่าอุณหภูมิของอากาศในช่วง 50 ถึง 100 องศาเซลเซียส สำหรับการทดสอบหาค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ วิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าความชื้นข้าวเปลือกมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือกมีความแตกต่างกัน และเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมมีความแตกต่าง การเพิ่มขึ้นของระดับความชื้นข้าวเปลือกส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงกลุ่มและเชิงเมล็ดเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความพรุนลดลง ระดับความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วสุดท้าย ระดับความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

คำสำคัญ : ความชื้น; สมบัติอากาศพลศาสตร์; สมบัติกายภาพ; ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Physical and Aerodynamics Properties of Khao Dawk Mali 105 Paddy Rice

Thamarat Yabsungnoen¹ Krawee Treeamnu^{1*} Tawarat Treeamnu²
and Nuttapong Ruttanadech³

¹ School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology

² School of Agricultural engineering, Suranaree University of Technology

³ Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

^{1,2} 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ 17/1 Moo 6 Chumko Pathio Chumphon, 86160, Thailand

Received 26 July 2021; Revised 22 September 2021; Accepted 29 November 2021

Abstract

This research objective was to determine physical and aerodynamics properties of Khao Dawk Mali 105 paddy (Thai Jasmine paddy rice). The paddy sample in this test was prepared with different moisture contents in the range of 10-26% WB and air temperature in aerodynamics properties test was varied in the range of 50–100 °C. Test results were analyzed to determine the statistical mean difference by DMRT method (at $P < 0.05$). It found that moisture content in paddy affects the difference of average length, width, and thickness of grain and results the difference of geometric mean diameter and degree of sphericity of paddy. An increase in paddy moisture results the increase of average bulk density and kernel density but it reduces the porosity of paddy. Moisture content in paddy affects the difference of terminal velocity. Moisture content in paddy and air temperature influenced the difference of average drag coefficient of paddy.

Keywords : Moisture Content; Aerodynamics Properties; Physical Properties; Khao Dawk Mali 105 Paddy Rice

** Corresponding Author. Tel.: +664 4224 766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th*

1. บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa*) เป็นพืชอาหารที่นิยมปลูกมากในทวีปเอเชียและอาจมีการเพาะปลูกบางส่วนในทวีปอื่น ข้าวถือเป็นอาหารหลักของคนเอเชียในหลายประเทศ สำหรับประเทศไทยข้าวเป็นอาหารหลักที่มีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด ในปี 2563 ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวเป็นอันดับที่ 1 ในภูมิภาคอาเซียนปริมาณ 7.5 ล้านตัน [1] ดังนั้นแล้วข้าวจึงถือเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยโดยเฉพาะข้าวหอมมะลิถือเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคต่างชาติภายหลังการเก็บเกี่ยว ผลผลิตเกษตรกรจำเป็นต้องผ่านกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว (Post-Harvest Processing) กระบวนการนี้ประกอบไปด้วยวิธีการและเครื่องจักรกลเกษตรโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งการออกแบบเครื่องจักรกลเหล่านี้จำเป็นต้องทราบข้อมูลสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของผลผลิตเกษตร สมบัติดังกล่าวนี้สำหรับข้าวเปลือกประกอบไปด้วย รูปร่าง ขนาด มวล ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (Bulk Density) ความหนาแน่นเชิงเมล็ด (Kernel Density) ความพรุน (Porosity) ค่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล (Drag Coefficient) ค่าเหล่านี้ล้วนเป็นข้อมูลที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก เช่น รูปร่างและขนาดของเมล็ดถูกใช้ในการออกแบบเครื่องคัดแยกสิ่งเจือปน ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดและค่าความพรุนของเมล็ดเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบเติมและระบายอากาศ (Aeration System) ในขณะเก็บรักษา [7], [13] ค่าความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลถูกใช้ในการออกแบบระบบการไหลของอากาศและระบบคัดแยกซึ่งรวมถึงการเลือกขนาดเครื่องเป่าลม [4] ซึ่งค่าทั้งหมดดังกล่าวนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ

อุตสาหกรรมการผลิตข้าว ปัจจัยประการสำคัญที่ส่งผลต่อค่าสมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์คือความชื้นในผลผลิต [9] สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นผลผลิตข้าวที่สำคัญของไทย การศึกษาสมบัติกายภาพดังกล่าวนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

จากความสำคัญดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นแตกต่างกัน โดยทำการทดสอบหาสมบัติกายภาพได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ค่าความกลม ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ด ความพรุนของเมล็ด และทดสอบหาสมบัติอากาศพลศาสตร์ได้แก่ ค่าความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของข้าวเปลือกในอากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

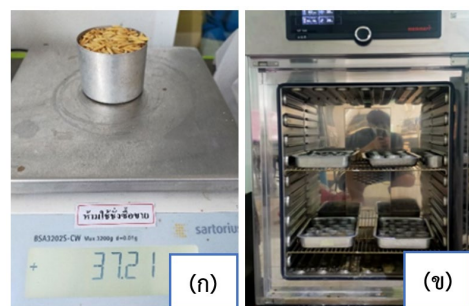
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าว

ในการทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดนครราชสีมา ฤดูกาลเพาะปลูก 2562 โดยทำการแยกวัสดุเจือปนรวมถึงเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ด้วยเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ ยี่ห้อ LA-LS รุ่น SEEDB-RO

2.1.1 การหาความชื้นเริ่มต้นในข้าว

หาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกด้วยวิธี Oven Drying Method [2]



รูปที่ 1 ก) การชั่งน้ำหนักเพื่อหามวลเริ่มต้น ข) การอบตัวอย่างด้วยเครื่องอบแห้งมาตรฐาน

โดยชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกด้วยตาชั่ง (ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น ME204 ความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม รูปที่ 1ก) ก่อนและหลังทำการอบแห้ง ด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยตู้อบลมร้อน (รูปที่ 1ข ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UF160 ความจุ 160 ลิตร) คำนวณค่าความชื้นฐานเปียก (Wet Basis, %WB) จากสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

M_w = เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก

w = มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (กรัม)

d = มวลแห้งเมล็ดข้าวเปลือกหลังอบ (กรัม)

2.1.2 การกำหนดความชื้นในข้าวเปลือก

แปรค่าความชื้นของข้าวเปลือกออกเป็น 5 ระดับ คือ 10 14 18 22 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ด้วยการเติมน้ำกลับสู่ข้าวเปลือก (Rewet) โดยปริมาณน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [2] ด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำที่คำนวณได้ลงบนกองข้าวเปลือก จากนั้นคลุกเคล้าข้าวเปลือกให้ทั่วกัน บรรจุในภาชนะที่บดแสงแล้วเก็บรักษาในห้องเย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [15] เป็นอย่างน้อยก่อนทำการทดสอบ

$$W_2 = W_1 \times \frac{[M_1 - M_2]}{[100 - M_1]} \quad (2)$$

โดยที่

W_2 = ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไป (กรัม)

W_1 = มวลของข้าวเปลือกที่ต้องการกำหนดความชื้นใหม่ (กรัม)

M_1 = เปอร์เซ็นต์ความชื้นสุดท้ายฐานเปียกที่ต้องการ

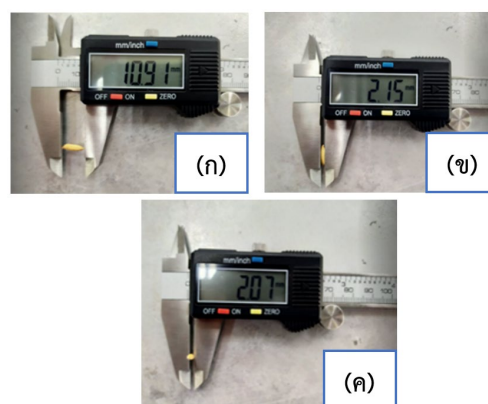
M_2 = เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้นฐานเปียก

ก่อนทำการทดสอบจะต้องนำข้าวเปลือกมาทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนโดยยังไม่เปิดฉีกถุง [8] แล้วจึงทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของข้าวเปลือกที่แต่ละความชื้นดังนี้

2.2 การทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติกายภาพของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

2.2.1 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต และระดับความกลม (Geometric Mean Diameter, Degree of Sphericity)

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (D) และค่าระดับความกลม (ϕ) คำนวณด้วยสมการที่ (3) และ 4 ตามลำดับ [9] โดยทำการสุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกจำนวน 50 เมล็ด จากข้าวเปลือกแต่ละระดับความชื้นทั้ง 5 ระดับความชื้นที่เตรียมไว้ นำมาวัดความกว้าง ความยาว และความหนาของเมล็ดด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (Digital Caliper Vernier Gauge 0-150 มิลลิเมตร) ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การวัดขนาด ก) ความยาว ข) ความกว้าง และ ค) ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก

$$D = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{(LWT)^{\frac{1}{3}}}{L} \times 100\% \quad (4)$$

โดยที่

L = ความยาวของเมล็ด (มิลลิเมตร)

W = ความกว้างของเมล็ด (มิลลิเมตร)

T = ความหนาเมล็ด (มิลลิเมตร)

ϕ = ระดับความกลม (ร้อยละ)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (มิลลิเมตร)

2.2.2 ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิงเมล็ด (Bulk Density, Porosity and Kernel Density)

ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม หาได้จากการชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวเปลือกที่บรรจุในภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอน (รูปที่ 3) คำนวณค่าตามสมการที่ (5) ทำการทดสอบซ้ำ 5 ซ้ำ ทุกระดับความชื้นจนครบทั้ง 5 ระดับ



รูปที่ 3 การหาความหนาแน่นเชิงกลุ่ม

$$\rho_b = \frac{M_p}{V} \quad (5)$$

โดยที่

ρ_b = ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

M_p = มวลของข้าวเปลือก (กิโลกรัม)

V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุ (ลูกบาศก์เมตร)

ค่าความพรุน หาค่าได้จากการแทนที่อากาศด้วยอุปกรณ์ดังรูปที่ 4 โดยบรรจุเมล็ดข้าวเปลือกลงในโหลแก้วจนเต็ม จากนั้นนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์โดยขวดที่ 1 เป็นขวดเปล่า เริ่มการทดสอบโดยเปิดปั๊มสูบน้ำอากาศ

ในระบบออกจนขวดที่ 1 และ 2 มีความดันเป็นสุญญากาศ จากนั้นปิดวาล์ว 1 และวาล์ว 2 แล้วจึงเปิดวาล์ว 3 เพื่อให้อากาศภายนอกไหลเข้าสู่ขวดที่ 1 ทำการปิดวาล์ว 3 อ่านค่าความดัน P_1 แล้วจึงเปิดวาล์ว 2 เพื่ออ่านค่าความดัน P_2 ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งในแต่ละความชื้นแล้วคำนวณค่าความพรุนด้วยสมการที่ (6) [6]



รูปที่ 4 การทดสอบค่าความพรุน

$$\varepsilon = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \times 100\% \quad (6)$$

โดยที่

P_1 = ความดันของอากาศก่อนการถ่ายเทไปยังขวดบรรจุเมล็ด (ปาสคาล)

P_2 = ความดันของอากาศหลังการถ่ายเทไปยังขวดบรรจุเมล็ด (ปาสคาล)

ความหนาแน่นเชิงเมล็ด คำนวณได้จากสมการที่ (7) [9]

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_k} \right) \times 100\% \quad (7)$$

โดยที่

ε = เปอร์เซนต์ความพรุนของเมล็ด

ρ_b = ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_k = ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

2.2.3 การทดสอบหาค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ของ ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ค่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) คือค่าความเร็วลมในท่อที่สามารถทำให้วัตถุเกิดการลอยตัวแบบ Suspension ได้ หาได้จากการทดสอบการลอยตัวของเมล็ด [9], [16] ดังรูปที่ 5 ใช้ตัวอย่างข้าวเปลือกจำนวน 10 เมล็ด [17] ในการทดสอบ เนื่องจากท่อชุดทดสอบที่ใช้มีขนาดเล็กและหากใช้ข้าวปริมาณมากเมล็ดข้าวจะเคลื่อนไปชิดผนังท่อและไม่สามารถลอยตัวขึ้นได้ ทำให้สังเกตการทดสอบได้ยาก นำเมล็ดข้าวตัวอย่างมาบรรจุไว้ในท่ออะคริลิก จากนั้นป้อนอากาศร้อนจากฮีตเตอร์ด้วยพัดลมเข้าสู่ท่อแนวตั้งจากด้านล่าง โดยควบคุมอุณหภูมิอากาศด้วย PID Electronic Temperature Controller (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.073 เมตร ความยาว 0.410 เมตร) ปรับเพิ่มความเร็วลมจนสังเกตเห็นเมล็ดข้าวเปลือกเริ่มลอยตัวขึ้น วัดความเร็วลมขณะนั้นด้วย Anemometer ความละเอียด 0.1 เมตรต่อวินาที ทำการทดสอบกับข้าวทั้ง 5 ระดับความชื้น (10 14 18 22 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก) และที่แต่ละความชื้นทำการแปรค่าอุณหภูมิอากาศออกเป็น 4 ระดับ คือ 70 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำต่อ 1 สภาวะการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล (Drag Coefficient) หาได้จากค่าความเร็วลมสุดท้าย โดยการคำนวณจากสมการที่ (8) [9], [11]

$$C_d = \frac{2Mg}{\rho_A A_f V_t^2} \quad (8)$$

โดยที่

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล

M = มวลของเมล็ดข้าวเปลือก (กิโลกรัม)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ 9.81 (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

V_t = ค่าความเร็วสุดท้าย (เมตรต่อวินาที)

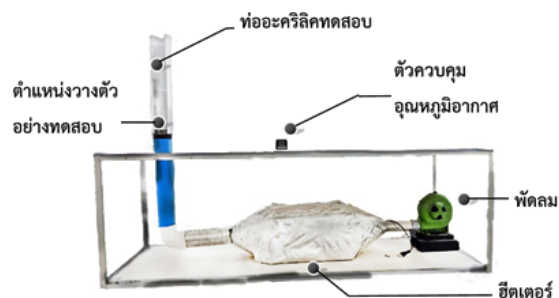
ρ_A = ความหนาแน่นอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A_f = พื้นที่หน้าตัดของเมล็ด (Frontal Area) (ตารางเมตร) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$A_f = \frac{\pi}{4} L_1 L_2 \quad (9)$$

โดยที่ L_1 และ L_2 คือ ความยาวที่มากที่สุดสองอันดับแรกของเมล็ดข้าวเปลือก (เมตร)

วิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



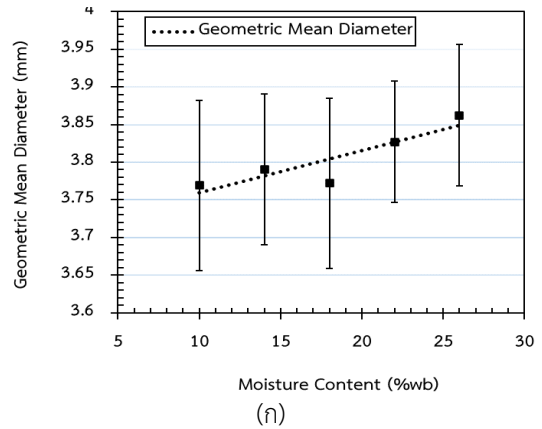
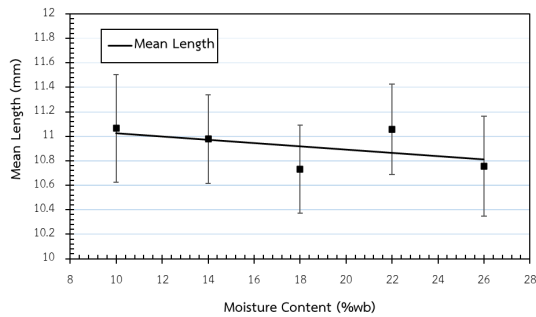
รูปที่ 5 การทดสอบหาค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

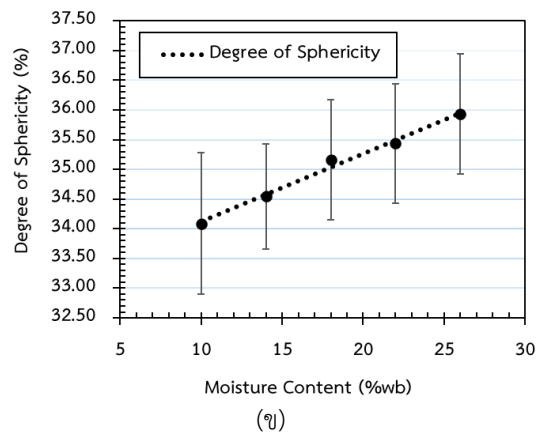
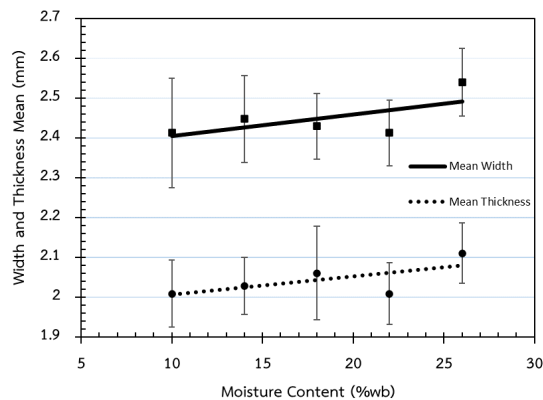
3.1 สมบัติกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

3.1.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อมิติของเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ในช่วง 10 - 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก กับค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก แสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความยาวของข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 6 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 7 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก

รูปที่ 8 (ก) อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและ (ข) ค่าระดับความกลม

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม

Moisture Content %WB	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Geometric Mean Diameter (mm)	Degree of Sphericity (%)
10	11.07 ± 0.44 ^b	2.41 ± 0.14 ^a	2.00 ± 0.08 ^a	3.77 ± 0.11 ^a	34.09 ± 1.189 ^a
14	10.98 ± 0.36 ^b	2.44 ± 0.11 ^{ab}	2.02 ± 0.07 ^{ab}	3.79 ± 0.10 ^{ab}	34.55 ± 0.88 ^b
18	10.73 ± 0.36 ^a	2.42 ± 0.08 ^a	2.06 ± 0.12 ^{bc}	3.77 ± 0.11 ^a	35.16 ± 1.01 ^c
22	10.8 ± 0.37 ^a	2.48 ± 0.08 ^b	2.09 ± 0.08 ^{cd}	3.82 ± 0.08 ^{bc}	35.44 ± 1.00 ^c
26	10.75 ± 0.41 ^a	2.54 ± 0.08 ^c	2.11 ± 0.08 ^d	3.86 ± 0.09 ^c	35.93 ± 1.01 ^d
Average	10.86 ± 0.41	2.46 ± 0.11	2.06 ± 0.09	3.80 ± 0.03	35.03 ± 0.72

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตรงข้ามกับความหนาและความกว้างเฉลี่ยของข้าวเปลือกที่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในถั่วพีชตาซีโอด [8] ถั่วเหลือง [7] เมล็ดข้าวบาร์เลย์ [10] เมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อิทธิพลของความชื้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว ความกว้างและความหนา (ตารางที่ 1) โดยค่าเฉลี่ยความยาวของเมล็ดกลุ่มระดับความชื้น 10-14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก และกลุ่มระดับความชื้น 18-26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ค่าเฉลี่ยความยาวของทั้งสองกลุ่มนี้แตกต่างกัน ($p < 0.05$) ซึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้นตั้งแต่ 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ขึ้นไปมีค่าเฉลี่ยความยาวของเมล็ดข้าวเปลือกลดลง

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าความกว้างเฉลี่ยของเมล็ดที่ระดับความชื้น 10-22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่แตกต่างกับค่าความกว้างเฉลี่ยของเมล็ดที่ระดับความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ($p < 0.05$) และสังเกตเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นได้จากรูปที่ 7 ส่วนความหนาเฉลี่ยของข้าวเปลือกพบว่าที่ระดับความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีความแตกต่างกับที่ระดับความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แนวโน้มการเพิ่มเป็นไปดังรูปที่ 7 และมีค่าเฉลี่ยจากทุกความชื้นเท่ากับ 2.06 ± 0.09 มิลลิเมตร

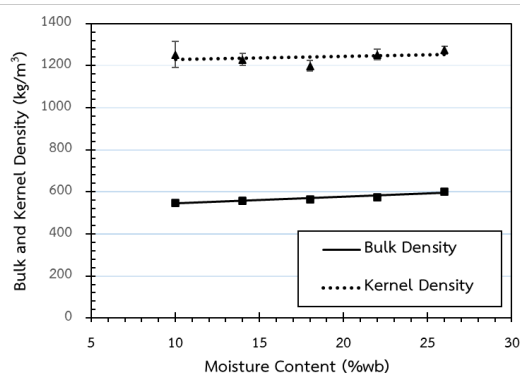
การเพิ่มระดับความชื้นข้าวเปลือกทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) และ (ข) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างและความหนา ประกอบกับความยาวที่ลดลงเนื่องจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเข้าใกล้ทรงกลมมากขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3 และ 4 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดสอบในถั่วเหลือง (ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 6.7 ถึง 7.1 มิลลิเมตร) [7] เมล็ดข้าวเปลือก Tarom (ระดับค่าความกลมเพิ่มขึ้น 40 ถึง 42 เปอร์เซ็นต์) [5] การ

วิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีความแตกต่างกับที่ระดับความชื้น 10 14 และ 18 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ($p < 0.05$) และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.80 ± 0.03 มิลลิเมตร

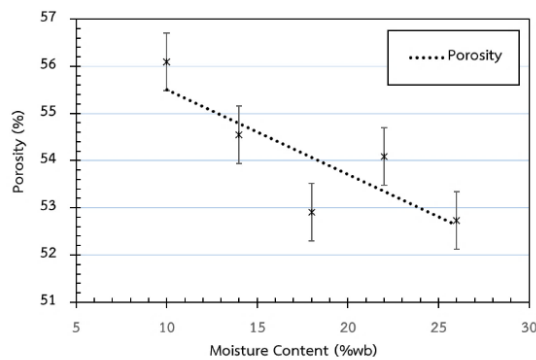
ระดับความชื้นข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าระดับความกลมเฉลี่ยมีความแตกต่างกันออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่ม 10 กลุ่ม 14 กลุ่ม 16 กับ 18 และ กลุ่ม 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ($p < 0.05$) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความชื้นนี้มีอิทธิพลต่อการเพิ่มค่าระดับความกลมเฉลี่ยอย่างค่อนข้างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 8

3.1.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิงเมล็ด

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อระดับความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้แม้ว่าปริมาณของข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างและความหนาของเมล็ดเนื่องจากความชื้น แต่การเพิ่มขึ้นของมวลข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีอิทธิพลสูงกว่า จึงทำให้ความหนาแน่นเชิงกลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (5)



รูปที่ 9 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่มและความหนาแน่นเชิงเมล็ด



รูปที่ 10 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความพรุนของเมล็ด

สำหรับค่าความพรุนพบว่ามีความหนาแน่นลดลง (รูปที่ 10) เมื่อความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาและความกว้างร่วมกับการลดลงของความยาวเมล็ดทำให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงกลมมากขึ้นและส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเมล็ดมีค่าลดลง เมื่อนำค่าความพรุนและค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มไปคำนวณตามสมการที่ (7) จะ

ได้ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดดังรูปที่ 9 ซึ่งค่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องความชื้นจะถูกกักเก็บไว้ในรูขนาดเล็กในเมล็ดและทำให้มวลของเมล็ดเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงมวลและการลดลงของค่าความพรุนของเมล็ดข้าวเปลือก และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดของข้าวเปลือกนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในเมล็ดยี่ห่วย (Cumin Seeds) [12] (ความหนาแน่นเชิงกลุ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 410 ถึง 502 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นเชิงเมล็ดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1,047 ถึง 1,134 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และการลดลงของค่าความพรุนคล้ายกับการลดลงของค่าความพรุนในข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] (ข้าวเปลือก Fajr มีค่าลดลงตั้งแต่ 76.33 ถึง 67.56 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับพันธุ์ข้าวเปลือก Tarom มีค่าลดลง 80.22 ถึง 67.55 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม เชิงเมล็ด และค่าความพรุน

Moisture Content %WB	Bulk Density (kg/m ³)	Kernel Density (kg/m ³)	Porosity (%)
10	548.97 ± 9.41 ^a	1,252.44 ± 62.87 ^{bc}	56.09 ± 1.77 ^c
14	558.91 ± 14.14 ^{ab}	1,229.65 ± 29.55 ^{ab}	54.54 ± 0.61 ^b
18	564.46 ± 11.97 ^b	1,198.66 ± 24.53 ^a	52.90 ± 0.38 ^a
22	574.87 ± 11.30 ^c	1,252.31 ± 25.61 ^{bc}	54.09 ± 0.64 ^b
26	602.40 ± 8.58 ^d	1,274.3 ± 18.16 ^c	52.72 ± 0.00 ^a
Average	569.92 ± 20.43	1,241.47 ± 28.67	54.07 ± 1.36

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าระดับความชื้นตั้งแต่ 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกขึ้นไปส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ

ความหนาแน่นเชิงกลุ่มและความหนาแน่นเชิงเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้น

มีผลให้มวลของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ความชื้นนี้ยังส่งผลต่อการลดลงของค่าความพรุน ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการเมื่อเมล็ดมีความชื้นสูงขึ้นย่อมทำให้ปริมาตรของเมล็ดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม ในหัวข้อ 3.1 ที่ผ่านมา ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเท่ากับ $1,241.47 \pm 28.67$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

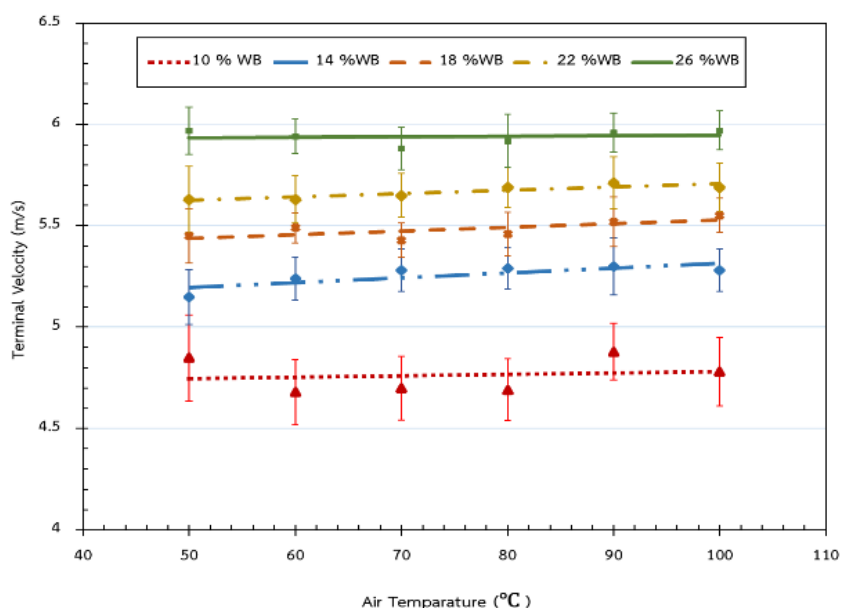
3.2 สมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก

ข้าวดอกมะลิ 105

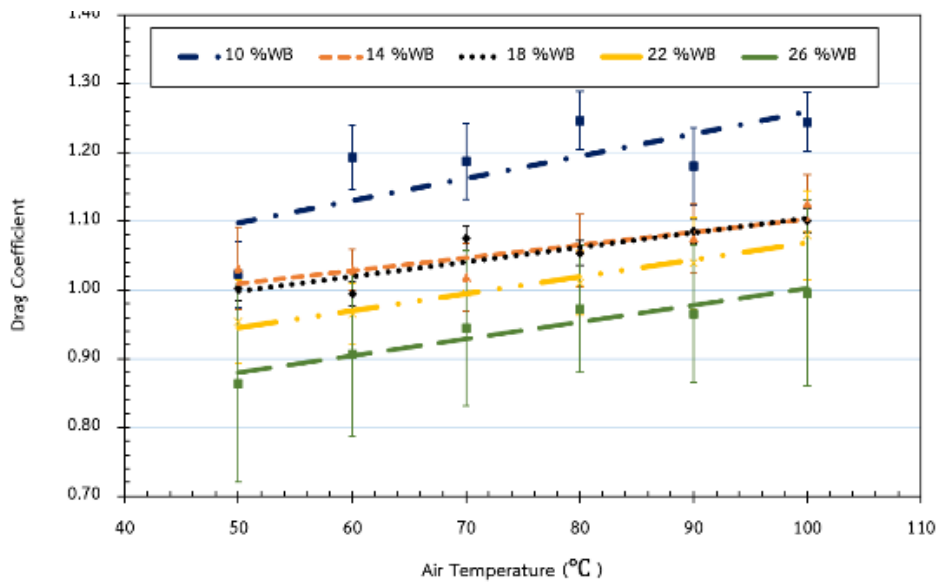
3.2.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าความเร็วสุดท้าย

จากรูปที่ 10 เมื่อระดับความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเร็วสุดท้ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากข้าวเปลือกมีมวลเพิ่มขึ้นจากความชื้น ทำให้ต้องใช้ความเร็วลมมากขึ้นในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเริ่มลอยตัว ผลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อค่าความเร็วลม

สุดท้ายพบว่ามีเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศมีผลทำให้ความหนาแน่นอากาศลดลงเพียงเล็กน้อย ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลสอดคล้องกับผลการทดลองในเมล็ดข้าวเทพี [14] (ความชื้น 6.5 ถึง 30.1 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าความเร็วสุดท้ายเพิ่มขึ้นจาก 3.32 ถึง 5.4 เมตรต่อวินาที) และเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] (ความชื้น 5 ถึง 37 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าความเร็วสุดท้ายของ Fajr และ Tarom เพิ่มขึ้นจาก 6.15 ถึง 6.65 และ 6.35 ถึง 6.77 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ) การวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 3) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ชี้ให้เห็นว่าความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อค่าความเร็วสุดท้าย โดยที่ระดับความชื้นข้าวเปลือก 24 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าเฉลี่ยความเร็วสุดท้ายแตกต่างจากระดับความชื้นอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศจาก 50 – 100 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเร็วลอยตัวที่แต่ละระดับความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 10 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือก



รูปที่ 11 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล

ตารางที่ 3 ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการ

Air Temperature (°C)	Moisture Content (%WB)	Terminal Velocity (m/s)	Drag Coefficient
50	10	4.85±0.21 ^b	1.02±0.143 ^{cdef}
	14	4.68±0.16 ^c	1.18±0.119 ^{cdef}
	18	4.70±0.16 ^e	1.19±0.114 ^{efg}
	22	4.69±0.15 ^{fgh}	1.25±0.091 ^{bc}
	26	4.88±0.14 ⁱ	1.18±0.099 ^a
60	10	4.78±0.17 ^a	1.24±0.136 ^{hi}
	14	5.15±0.14 ^{cd}	1.03±0.061 ^{cdef}
	18	5.24±0.11 ^e	1.03±0.044 ^{bcde}
	22	5.28±0.10 ^{fgh}	1.02±0.051 ^{bcd}
	26	5.29±0.10 ⁱ	1.06±0.047 ^{ab}
70	10	5.30±0.14 ^a	1.08±0.066 ^{hi}
	14	5.28±0.10 ^d	1.13±0.066 ^{cdef}
	18	5.45±0.14 ^e	1.09±0.307 ^{efg}
	22	5.49±0.07 ^{fgh}	0.99±0.030 ^{bcde}
	26	5.43±0.08 ⁱ	1.08±0.049 ^{abc}
80	10	5.46±0.11 ^a	1.05±0.052 ⁱ
	14	5.52±0.12 ^d	1.09±0.049 ^{defg}
	18	5.55±0.08 ^e	1.10±0.043 ^{defg}
	22	5.63±0.16 ^h	0.95±0.054 ^{cdf}
	26	5.63±0.12 ⁱ	0.97±0.067 ^{bcd}

Air Temperature (°C)	Moisture Content (%WB)	Terminal Velocity (m/s)	Drag Coefficient
90	10	5.65±0.11 ^b	1.00±0.036 ^{hi}
	14	5.69±0.10 ^d	1.01±0.052 ^{efg}
	18	5.71±0.13 ^{ef}	1.04±0.056 ^{efg}
	22	5.69±0.12 ^h	1.08±0.077 ^{cdefg}
	26	5.97±0.12 ⁱ	0.86±0.050 ^{bcd}
100	10	5.94±0.08 ^{ab}	0.91±0.048 ⁱ
	14	5.88±0.10 ^d	0.95±0.055 ^{gh}
	18	5.92±0.13 ^{ef}	0.97±0.043 ^{fgh}
	22	5.96±0.10 ^h	0.96±0.057 ^{efg}
	26	5.97±0.09 ⁱ	1.00±0.043 ^{bcde}

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย $\pm$ คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.2.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์

ด้านทานการไหล

จากรูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลเฉลี่ยมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์นี้อยู่ในช่วง 0.80 – 1.95 การวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าที่ระดับความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลแตกต่างกับระดับความชื้นอื่นๆ ตั้งแต่อุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป และค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลที่ระดับอุณหภูมิอากาศ 50 องศาเซลเซียส แตกต่างกับที่ระดับ 100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นของมวลเมล็ดข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีค่าค่อนข้างสูง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของมิติเมล็ดข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีค่าต่ำมาก (ดังผลจากหัวข้อ 3.1.1) เมื่อคำนวณเป็นพื้นที่หน้าตัดของเมล็ดตามสมการที่ 9 จะได้ค่า A_f ที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก หากพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 8 อากาศที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น (ρ_a) มีค่าลดลง ในขณะที่มวลข้าวเปลือก (M) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็วสุดท้าย (V_t) เพิ่มขึ้นไปด้วย (ดังผลตามหัวข้อ 3.2.1) เป็นผลให้

อัตราส่วนของมัน (คือค่า C_d) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ค่าเฉลี่ยโดยรวมของสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าเท่ากับ 1.05 ± 0.1254

4.สรุป

การทดสอบหาสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับความชื้นข้าวเปลือกมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือกมีความแตกต่างกัน และเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมมีความแตกต่าง การเพิ่มขึ้นของระดับความชื้นข้าวเปลือกส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงกลุ่มและเชิงเมล็ดเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความพรุนลดลง ระดับความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วสุดท้ายและอุณหภูมิอากาศไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวและค่าระดับของความชื้นของข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of International Trade Ministry of Commerce. (2021, May 25). The overall situation of the rice market in ASEAN, September 2019. [Online]. Available: https://www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/564288/564288.pdf&title=564288&cate=455&d=0
- [2] Moisture measurement—unground grain and seeds, ASAE standards, vol. 555, ASABE, 1997.
- [3] C. Aydin and M. Ozcan, “Some physico-mechanic properties of terebinth (*Pistacia terebinthus* L.) fruits,” *Journal of Food Engineering*, vol. 53, pp. 97-101, 2002.
- [4] R. K. Gupta, G. Arora and R. Sharma, “Aerodynamical properties of sunflower seed (*Helianthus annuus* L.),” *Journal of Food Engineering*, vol. 79, pp. 899-904, 2007.
- [5] M. Gharekhani, M. Kashaninejad, A. Daraei Garmkhany and A. Ranjari, “Physical and aerodynamic properties of paddy and white rice as a function of moisture content,” *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, pp. 187-197, 2013.
- [6] Habib Kocabiyik, Tükan Aktaş and Birol Kayışğlu, “Porosity Rate of Some Kernel Crops,” *Journal of Agronomy*, vol. 3, no. 2, pp. 76-80, 2004.
- [7] M. Kashaninejad, M. Ahmadi, A. Daraei and D. Chabra, “Handling and frictional characteristics of oybean as a function of moisture content and variety,” *Powder Technology*, vol. 188, pp. 1-8, 2008.
- [8] M. Kashaninejad, A. Mortazavi, A. Safekordi and L. G. Tabil, “Some physical properties of pistachio (*Pistacia vera* L.) nut and its kernel,” *Journal of Food Engineering*, vol. 72, pp. 30-38, 2006.
- [9] N. N. Mohsenin, Physical properties of plants and animal materials, New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1980.
- [10] J. Sánchez-Mendoza, A. Domínguez-López, S. Navarro-Galindo and J. A. López-Sandoval, “Some physical properties of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seeds as a function of moisture content,” *Journal of Food Engineering*, vol. 87, pp. 391-397, 2008.
- [11] J. E. Shellard and R. H. Macmillan, “Aerodynamic properties of threshed wheat materials,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 23, pp. 273-281. 1978.
- [12] K. K. Singh and T. K. Goswami, “Physical properties of cumin seed,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 64, pp. 93-98, 1996.
- [13] White, N.D.G. and Jayas, D.S., “Physical properties of canola and sunflower meal pellets,” *Canadian Biosystems Engineering*, vol. 43, pp. 49-52, 2001.

- [14] A. D. Zewdu, "Aerodynamic properties of tef grain and straw material," *Biosystem Engineering*, vol. 98, pp. 304-309, 2007.
- [15] N. Saelim, "Continuous flow paddy drying with infrared radial radiation technique," M.S. thesis, Dept. MEP. Eng., Suranaree Univ., Nakhon Ratchasima, Thailand, 2017.
- [16] National aeronautics and space administration. (2021, September 19). Terminal Velocity: gravity and drag. [Online]. Available: https://www.ditp.go.th/ditp_web_61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/564288/564288.pdf&title=564288&cate=455&d=0
- [17] T. Yabsungnoen, K. Treeamnuak and T. Treeamnuak, "Influence of Moisture Content on Physical and Aerodynamic Properties of Paddy," in *Proceeding of the 22nd Thai Society of Agricultural Engineering (TSAE) National Conference*, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 2021, pp. 168-175.