

แบบจำลองการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดโดยใช้ ระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ Modeling Pepper Drying by Jet Spouted Bed Technique Using ANFIS System

กิตติ สถาพรประสารณ์¹โพธิ์ทอง ปราณิตพลกรัง^{2*}

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม(ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Kitti Sathapornprasath¹ Pothong Praneetpolkrang^{2*}

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Srinakharinwirot University

²Instructor, Department of Industrial Technology (Continuous), Faculty of Industrial Technology

Rambhai BarniRajabhat University

*Corresponding author: Email:pttmbj@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดทำการทดสอบ โดยหาแบบจำลองที่เหมาะสมระหว่างแบบจำลองเอมพิริคัลกับแบบจำลอง ANFIS ทดลองอบแห้งพริกไทย ภายใต้อุณหภูมิอบแห้งคือ 70, 80 และ 90°C ความเร็วลมร้อน คือ 20 m/sec และความสูงของชั้นพริกไทย 250 mm โครงสร้าง ANFIS ประกอบด้วยตัวแปรอินพุต คือ อุณหภูมิลมร้อน และเวลาในการอบแห้ง ตัวแปรเอาต์พุต คือ อัตราส่วนความชื้นผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลอง ANFIS มีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองเอมพิริคัลโดย แบบจำลอง ANFIS แบบที่ 8 มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9991 และ RMSE เท่ากับ 0.0032 ตามลำดับ ในส่วนของแบบจำลองเอมพิริคัล แบบจำลองของ Page (Page model) มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการอบแห้งพริกไทย โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9983 และ RMSE เท่ากับ 0.0067 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เจ็ตสเปาต์เต็ดเบด แบบจำลองคณิตศาสตร์ ระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ พริกไทย

ABSTRACT

This research aimed to determine the drying model of pepper undergoing a jet spouted bed drying process. A comparative study was executed among experimental results and empirical models and adaptive- network- based fuzzy inference system (ANFIS) . Pepper was dried under drying temperatures of 70, 80 and 90 °C, hot air velocity 20 m/s, bed height 250 mm. ANFIS input were air drying temperature and drying time and output was moisture ratio. The results showed that, the

ANFIS had better capability than the empirical models. The best ANFIS model was model no.8 with the coefficient of determination (R^2) and root-mean-square error (RMSE) are 0.9991 and 0.0032 respectively. Among empirical drying models considered, the page model, was found to best describe the drying behavior of pepper, the coefficient of determination (R^2) and root-mean-square error (RMSE) are 0.9983 and 0.0067 respectively.

Keyword: Jet spouted bed, mathematical model, adaptive neuro-fuzzy inference systems, pepper.

1. บทนำ

พริกไทย (*Piper nigrum* L.) พริกไทยเป็นเครื่องเทศที่ใช้กันแพร่หลายมาเป็นเวลานาน เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของไทย มีปลูกมากในจังหวัดจันทบุรี มีพื้นที่ปลูกคิดเป็นร้อยละ 95 ของประเทศ ปริมาณส่งออก 3,180 ตัน ในปี 2553 คิดเป็นมูลค่า 124 ล้านบาท [1], [2] พริกไทยหลังเก็บเกี่ยวนั้นมีความจำเป็นต้องทำการลดความชื้นเพื่อป้องกันการเน่าเสีย โดยทั่วไปเกษตรกรจะทำการตากแห้งใช้เวลาประมาณ 4-5 วัน [1] ในการใช้แสงแดดสำหรับการตากแห้งเป็นวิธีการที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อย แต่ปัญหาสำหรับวิธีการตากแห้งก็คือไม่สามารถที่จะควบคุมการผลิตและคุณภาพได้ [1] ดังนั้นเทคโนโลยีการอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลผลิตจึงได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย วัตถุประสงค์ของการอบแห้งนั้นคือ ลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลผลิตนั้นเพื่อยืดอายุในการเก็บรักษา ลดน้ำหนักและสะดวกในการขนส่ง [3]-[4] ซึ่งกระบวนการอบแห้งจะมีการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารที่จะเกิดขึ้นพร้อมกัน กระบวนการที่ซับซ้อนกันนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิและความเร็วลมร้อน อัตราการไหลของอากาศ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ พื้นที่และความดัน [3], [5], [23]

การอบแห้งเมล็ดพืชด้วยเทคนิคสเปาต์เต็ดเบดเป็นการอบแห้งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แต่เครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบดแบบดั้งเดิมนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่หลาย

ประการ เช่น ความหนาแน่นของเบดสูงทำให้การกระจายตัวและการสัมผัสของอนุภาคกับอากาศร้อนไม่ดีเท่าที่ควร สัดส่วนช่องว่างระหว่างบริเวณวงแหวนและบริเวณสเปาต์แตกต่างกันมาก มีอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคต่ำ [6]-[9] เครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด (Jet spouted bed) เป็นเครื่องอบแห้งชนิดหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบดแบบดั้งเดิม [6]-[12] และได้นำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลายชนิด ซึ่งผลการอบแห้งที่ได้ก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาในแง่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ [8], [12]

การทราบพฤติกรรมในการอบแห้งดังเช่น อัตราส่วนความชื้นเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบจำลองกระบวนการอบแห้งให้มีความเหมาะสม [13] ในปัจจุบันนั้นได้มีการนำเทคนิคต่าง ๆ มาใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์ เช่น การทำนายโดยใช้วิธีการทางสถิติ การสร้างแบบจำลองโดยใช้นิวโรฟัซซี และการใช้โครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น [14] ซึ่งแบบจำลองนิวโรฟัซซียังเป็นแบบจำลองหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันในหลาย ๆ ด้าน [14]-[21], [23], [29]-[30] และได้นำมาใช้ทำนายพฤติกรรมในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร [18] ดังนั้นบทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลและ ANFIS ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด และเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการอบแห้งเทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดต่อไป

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์

2.1 แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (Empirical equation)

แบบจำลองการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยในการออกแบบระบบการอบแห้งต่างๆ [3]-[5], [13], [21], [23] แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล เป็นแบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ [21] สมการเอมพิริคัลคือสมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุที่ใช้อบแห้งในช่วงอุณหภูมิ ความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งหนึ่งๆ [5]

2.2 ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive neural fuzzy inference systems, ANFIS)

ANFIS เป็นการประยุกต์ผสมผสาน (Hybrid algorithm) วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมและโมเดลฟัซซีเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถนำข้อดีของแต่ละวิธีการมาสนับสนุนกันและช่วยลดข้อจำกัดของแต่ละวิธีการ [14]-[20], [29], [30] การปรับตัวเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลเป็นข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียม แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการอธิบายการปรับเรียนรู้ภายในที่ยากต่อการสื่อเพื่อทำความเข้าใจเมื่อเทียบกับในมุมมองของมนุษย์ทั่วไปหรือในภาษาสื่อทั่วไป [30] ในขณะที่ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy logic) มีจุดเด่นตรงที่มีการใช้เหตุผลในเชิงตรรกะเหมือนความคิดของมนุษย์ สามารถอธิบายการตัดสินใจได้จากกฎฟัซซี

และสามารถใช้กับข้อมูลที่คลุมเครือได้ซึ่งมีการพัฒนาจากการตัดสินใจแบบตรรกะเชิงทวินัย (Crisp logic) ด้วยการเปรียบเทียบกฎแบบแบบถ้า-แล้ว (If-then) แต่ข้อเสียของฟัซซีลอจิกคือไม่สามารถเรียนรู้และปรับแต่งกฎต่าง ๆ ด้วยตัวเอง [30] โมเดลฟัซซีพื้นฐานที่ได้รับการอ้างอิงและเป็นที่ยอมรับคือ โมเดลฟัซซีแมนดานิ (Mandani fuzzy) และโมเดลฟัซซีซูเกโน (Sugeno fuzzy) ทั้งสองวิธีการมีข้อแตกต่างหลักที่ผลค่าเอาต์พุตฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Output membership function) ซึ่งวิธีหลังสามารถเลือกได้ทั้งฟังก์ชันเชิงเส้นหรือเลือกเป็นค่าคงที่ได้ [30]

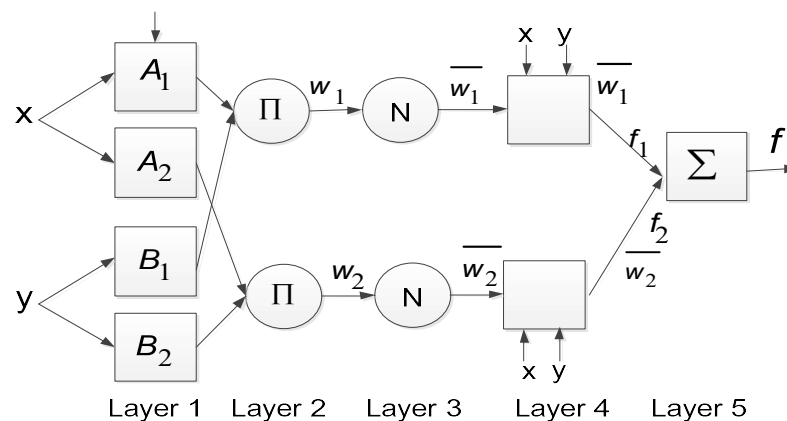
2.3 ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive neural fuzzy inference systems, ANFIS)

โมเดล ANFIS ที่ได้รับการพัฒนามาจากโมเดลฟัซซีซูเกโน ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการฝึกเรียนรู้ก่อนใช้งาน สามารถแสดงรูปแบบของโครงสร้างออกเป็น 5 ชั้น [20], [30] แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยตัวแปร 2 อินพุต x และ y และตัวแปร 1 เอาต์พุต f โดยทั่วไปหลักปฏิบัติเซตของ 2 ฟัซซี คือหลัก if-then สามารถแสดงเป็น [15]-[20], [29]-[30]

Rule 1: If x is A_1 and y is B_1
then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Rule 2: If x is A_2 and y is B_2
then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

เมื่อ p_1, q_1, r_1, p_2, q_2 และ r_2 เป็นพารามิเตอร์ผลลัพธ์



รูปที่ 1 โครงสร้างของ ANFIS [15]

โครงสร้างของ ANFIS ดังรูปที่ 1 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [15]-[20], [29]

ขั้นที่ 1 ผลลัพธ์ของขั้นที่ 1 นี้เป็นค่าความเป็นสมาชิกและตัวแปรภาษา ทุกหน่วยย่อย ในขั้นนี้คือการปรับหน่วยย่อยเอาท์พุตกำหนดโดย

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), i=1,2 \quad (1)$$

หรือ

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), j=3,4 \quad (2)$$

เมื่อ x หรือ y คือ อินพุตของหน่วยย่อย และ A_i หรือ B_{i-2} แทนค่าตัวแปรภาษา (Linguistic variable) เอาท์พุตของขั้นนี้คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) งานวิจัยนี้เลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ Gaussian membership function สามารถแสดงในสมการ

$$\mu_{A_i}(x) = \exp\left(\frac{-(x - c_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (3)$$

โดยที่ σ_i และ c_i คือ เซตพารามิเตอร์ (Premise parameters)

ขั้นที่ 2 ในขั้นที่ 2 นี้จะเป็นการหาค่าฟิซซี (Firing strength) จากข้อตั้งของกฎแต่ละข้อทุกหน่วยย่อยในขั้นที่ถูกกำหนดด้วย Π ซึ่งคือการคูณกันของสัญญาณที่เข้ามาและเป็นเอาท์พุตตัวอย่างเช่น

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y), i=1,2 \quad (4)$$

ขั้นที่ 3 ทุกๆหน่วยย่อยในขั้นที่ 3 จะเป็นการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างค่าฟิซซีจากข้อตั้งของกฎแต่ละข้อกับผลรวมของค่าฟิซซีจากข้อตั้งของทุกกฎเรียกผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นนี้ว่า Normalized firing strength

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2 \quad (5)$$

ขั้นที่ 4 ทุกหน่วยย่อยในขั้นนี้ คือหน่วยย่อยปรับตัวได้กับฟังก์ชันหน่วยย่อย

$$O_{4,i} = \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2 \quad (6)$$

เมื่อ w_i คือ เอาท์พุตของขั้นที่ 3 และ $\{p_i, q_i, r_i\}$ เป็นเซตพารามิเตอร์ พารามิเตอร์ในขั้นนี้เรียกว่าพารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์ (Consequent parameters)

ขั้นที่ 5 ขั้นนี้จะมียู่อหน่วยย่อยเดียว กำหนดโดย S ซึ่งเอาท์พุตที่ได้คือการรวมกันของสัญญาณเข้ามาทั้งหมด

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i} \quad (7)$$

จากโครงสร้างของ ANFIS เมื่อค่าพารามิเตอร์หลักฐานถูกกำหนดไม่ให้เกิดเปลี่ยนแปลง เอาท์พุตทั้งหมดสามารถแสดงในรูปของผลรวมเชิงเส้นของพารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์ ในสัญลักษณ์เอาท์พุต f

$$f = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 \quad (8)$$

ซึ่งคือความเป็นเชิงเส้นในพารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์ p_1, q_1, r_1, p_2, q_2 และ r_2 เป็นเซตของ Consequent parameters

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

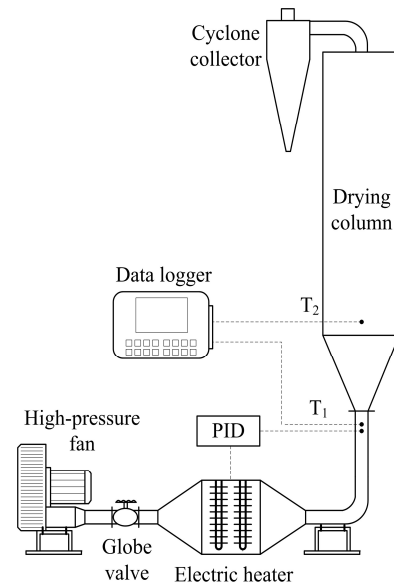
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เมล็ดของพริกไทยสดซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 2.56 ± 0.23 kg/kg (d.b.) [22] เป็นวัสดุตัวอย่างในการทดลองอบแห้ง และจะถูกเก็บที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนการทดลองอบแห้งแต่ละครั้ง พริกไทยสดจะถูกนำมาผึ่งลมทิ้งไว้จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการควบแน่นของไอน้ำในช่วงแรกของการอบแห้ง

3.2 อุปกรณ์สำหรับทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เตดเบตที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 1) พัดลมแรงดันสูง (High-pressure fan) (CRELEC, HB-329, Taiwan) ขนาด 2.2 kW ซึ่งทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ 2) โกลบวาล์ว (Globe valve) ซึ่งทำหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศที่เข้าสู่ระบบให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยความเร็วของอากาศจะถูกวัดด้วยท่อปีโดท์ (Pitot tube) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์สำหรับประมวลผล (TESTO, 435-4, Germany) 3) ชุดกำเนิดความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 15 kW ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง 4) หอบแห้ง (Drying column) ทำจากเหล็กสแตนเลส (Stainless steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 mm และสูง 800 mm อากาศร้อนที่ผ่านชุดทำความร้อนจะไหลเข้าหอบแห้งที่ด้านล่างผ่านช่องทางเข้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 63 mm ซึ่งเชื่อมต่อกับหอบแห้งด้วยกรวยสแตนเลสที่มีมุมเอียง 20 องศา 5) ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone collector) ซึ่งทำหน้าที่แยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศร้อน 6) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) แบบ PID (SHINKO, JCS-33A, Japan) ซึ่งมีความแม่นยำในการควบคุม $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ชุดควบคุมนี้จะทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่เข้าหอบแห้ง (T_1) เป็นตัวควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน 7) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) (HIOKI, 8421-52, Japan) 8) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K Thermocouples) ซึ่งทำหน้าที่ส่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปเก็บไว้ที่เครื่องบันทึกอุณหภูมิ หุ้มนวนความร้อนให้กับอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เตดเบตไว้ทั้งหมด เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อม



รูปที่ 2 แสดงเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เตดเบต

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองอบแห้งจะกระทำที่อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอบแห้ง 3 ระดับกล่าวคือ 70, 80 และ 90°C โดยใช้ความสูงเบตของเมล็ดพริกไทย 250 mm ซึ่งที่ระดับความสูงเบตดังกล่าวจะต้องใช้ความเร็วต่ำสุดของอากาศในท่อทางเข้าหอบแห้งประมาณ 20 m/s เพื่อที่จะทำให้เบตเกิดการสเปาต์อย่างสม่ำเสมอ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง น้ำหนักของพริกไทยจะถูกวัดอย่างต่อเนื่อง (ทุก ๆ 10 นาที) สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยนั้น การอบแห้งจะดำเนินไปจนกระทั่งความชื้นของพริกไทยไม่เปลี่ยนแปลง (สังเกตได้จากมวลมีค่าคงที่) โดยความชื้นในสภาวะดังกล่าวถือเป็นความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ของพริกไทยที่เงื่อนไขการทดลองนั้นๆ โดยแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งจะทำการทดลอง 3 ครั้ง

3.4 แบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1

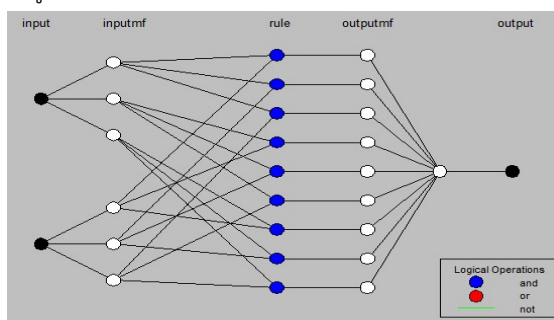
ตารางที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล [4], [13], [18], [21], [24]-[28]

No	Model name	Model
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB [21]

3.5 โครงสร้างของ ANFIS

สำหรับโครงสร้างของ ANFIS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของ ANFIS

ตารางที่ 2 แสดงจำนวน Membership Function ตัวแปรอินพุต

ลำดับ	อุณหภูมิ (°C) Range[70 90]	เวลา (min) Range[0 270]
1	3	3
2	3	4
3	3	5
4	4	3
5	4	4
6	4	5
7	5	3
8	5	4
9	5	5

โครงสร้างของ ANFIS ที่ใช้ในงานวิจัยเลือกใช้โมเดลฟัซซี่ Sugeno อันดับหนึ่ง ตัวแปรอินพุตที่ใช้มี 2 ค่า คือ อุณหภูมิ และเวลา และเอาต์พุต 1 ค่า คือ อัตราส่วนความชื้น ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นแบบ Gaussian membership function ฟังก์ชันเอาต์พุตเป็นแบบ Linear และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid algorithm) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองจำนวน Membership function ตัวแปรอินพุตที่ใช้เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 2 ในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดนั้น จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determine, R^2) ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าที่สุด หรือเข้าใกล้ 1 มากที่สุด และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ซึ่งจะต้องมีค่าต่ำที่สุด [4], [13], [21], [24] แสดงดังสมการที่ (9)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{n}} \quad (9)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

$MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง

n คือ จำนวนข้อมูล

4. ผลการทดลอง

4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ดสเปาต์เตี๊ยะเบด

จากผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่ได้นำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายค่าความชื้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และ RMSE เป็นค่าทางสถิติที่ใช้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสม [12], [20] ดังตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบจำลองเอมพิริคัลกับผลการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 70-90°C

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพีริคัล

No	Model name	R ²	RMSE
1	Newton	0.9821	0.0371
2	Page	0.9983	0.0067
3	Henderson and Pabis	0.9882	0.0304
4	Modified Page	0.9824	0.0375

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองต่างๆ

Temp. (°C)	Model constants	R ²	RMSE
Newtonmodel			
70 °C	k=0.01186	0.9847	0.0381
80 °C	k = 0.01704	0.9811	0.0414
90 °C	k = 0.02462	0.9840	0.0350
Page model			
70 °C	k=0.003677, n = 1.254	0.9986	0.0118
80 °C	k = 0.003758, n = 1.354	0.9965	0.0067
90 °C	k = 0.003983, n = 1.363	0.9987	0.0049
Henderson and Pabis model			
70 °C	a = 1.08, k =0.01275	0.9909	0.0298
80 °C	a = 1.091, k =0.01842	0.9877	0.0340
90 °C	a = 1.082, k = 0.02637	0.9889	0.0296
Modified Page model			
70 °C	k = 0.6806, n = 0.01742	0.9847	0.0387
80 °C	k = 0.03867, n = 0.4408	0.9811	0.0422
90 °C	k = 0.3499, n = 0.07037	0.9840	0.0356

ในตารางที่ 3 จะพบว่าแบบจำลองของ Page (Page model) มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 70-90 °C เนื่องจากมีค่า R² สูงที่สุด คือ 0.9983 และค่า RMSE ต่ำสุด คือ 0.0067 และค่าความสัมพันธ์ของแบบจำลองกับผลการทดลองทั้ง 4 แบบ มีค่า R² อยู่ในช่วง 0.9821-0.9983 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0067-0.0375 ตารางที่ 4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่อุณหภูมิ 70-90 °C

จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 จะพบว่าผลการคำนวณโดยใช้สมการอบแห้งตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงได้นำค่าคงที่ k และ n มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอุณหภูมิ จะได้แบบจำลองสำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยในทุกอุณหภูมิอบแห้ง ดังสมการที่ (10)

$$\text{Page model ; } MR = \exp(-kt^n) \quad (10)$$

เมื่อค่า k และ n เขียนความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ (T) ในรูปแบบสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$k = 0.003 + 1.53 \times 10^{-5} T \quad ; R^2 = 0.931$$

$$n = 0.888 + 0.005 T \quad ; R^2 = 0.811$$

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ ANFIS ตาม Membership function ตัวแปรอินพุต

ลำดับ	อุณหภูมิ	เวลา	R ²	RMSE
1	3	3	0.9865	0.0356
2	3	4	0.9874	0.0315
3	3	5	0.9907	0.0089
4	4	3	0.9913	0.0092
5	4	4	0.9962	0.0080
6	4	5	0.9955	0.0083
7	5	3	0.9982	0.0070
8	5	4	0.9991	0.0032
9	5	5	0.9989	0.0056

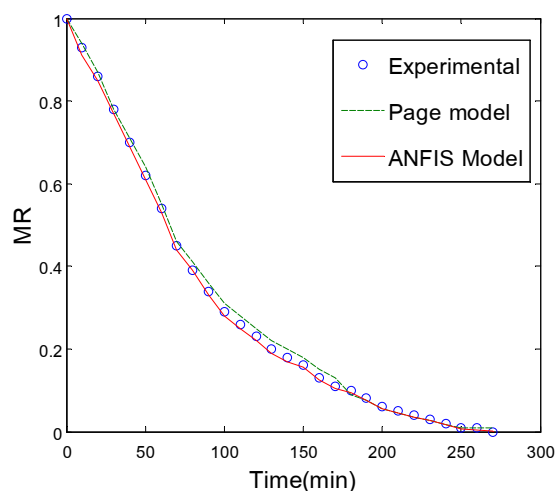
ในตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ ANFIS ตาม Membership function ตัวแปรอินพุตแบบจำลอง ANFIS แบบที่ 8 ที่มีจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตัวแปรอินพุต อุณหภูมิเท่ากับ 5 และ ตัวแปรอินพุต เวลา เท่ากับ 4 มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 70-90 °C เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด คือ 0.9991 และค่า RMSE ต่ำสุด คือ 0.0032 และผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ ANFIS ทั้ง 8 แบบ พบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9865-0.9991 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0032-0.0356 ตารางที่ 6 แสดงเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองเอมพีรีคัลกับ ANFIS ซึ่งจะพบว่า แบบจำลอง ANFIS ให้ผลวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากกว่าแบบจำลองของ Page เนื่องจากมีค่า R^2 สูงมากกว่า และค่า RMSE ต่ำ

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองเอมพีรีคัลกับ ANFIS

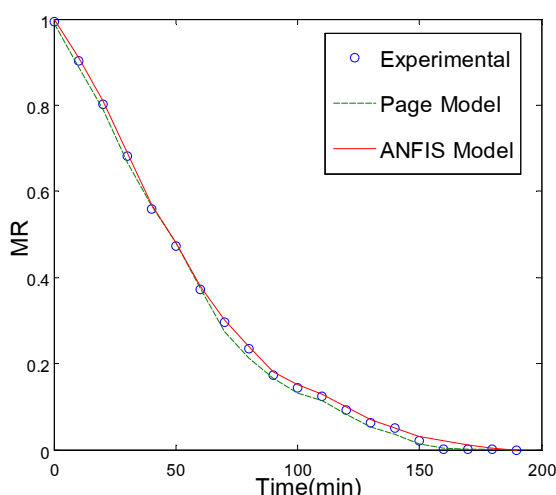
No	Model Name	R^2	RMSE
1	Page model	0.9983	0.0067
2	ANFIS model	0.9991	0.0032

4.2 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองอบแห้งเมล็ดพริกไทย

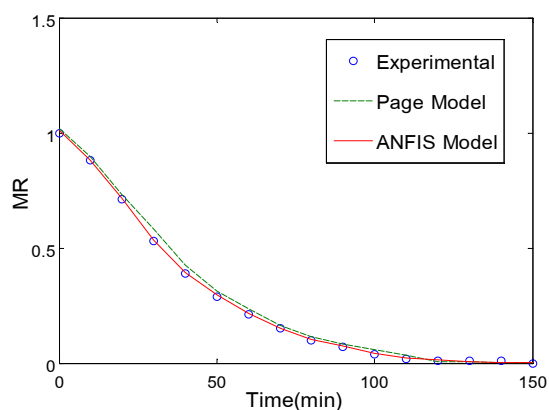
จากผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ดสเปาต์เต็ดเบดที่อุณหภูมิ 70-90 °C แสดงดังรูปที่ 4-6 พบว่าในช่วงแรกอัตราส่วนการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทยลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากภายในเมล็ดมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำมายังผิวนอกเป็นไปอย่างรวดเร็ว [11], [21] เมื่อพิจารณาอิทธิพลอุณหภูมิมีผลต่ออัตราส่วนการลดความชื้นจากรูปที่ 4-6 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการลดความชื้นที่สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งยังส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลง สอดคล้องกับผลการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรอื่นๆ [13]-[21], [24]-[26] จากผลการทดลองจะพบว่าอุณหภูมิอบแห้งมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทย



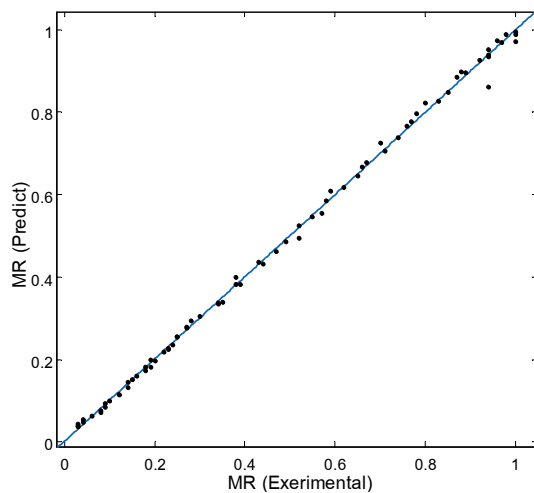
รูปที่ 4 แสดงผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 70 °C



รูปที่ 5 แสดงผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 6 แสดงผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 90 °C



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลอง ANFIS

และจากรูปที่ 4-6 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณทั้งจากแบบจำลองเอมพิริคัลและของ ANFIS สำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้นจะพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ในรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลอง ANFIS สำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เด็ตเบด ซึ่งสามารถให้ผลการทำนายความชื้นได้ดี

5. สรุปผลการทดลอง

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลและ ANFIS ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคเจ็ตสเปาต์เด็ตเบด ทดลองอบแห้งอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอบแห้งที่ 70, 80 และ 90 °C โดยใช้ความสูงเบดของเมล็ดพริกไทย 250 mm ความเร็วของอากาศประมาณ 20 m/s จากผลการทดลองพบว่า ค่ารวมทั้งจากแบบจำลองเอมพิริคัลและ ANFIS สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดี มีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบจำลองเอมพิริคัลทั้ง 4 แบบกับผลการทดลอง พบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9821-0.9983 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0067-0.0375 โดยแบบจำลองของ Page (Page

model) มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยได้ดีที่สุด ที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 70-90 °C เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด คือ 0.9983 และค่า RMSE ต่ำสุด คือ 0.0067 ในส่วนของแบบจำลอง ANFIS ทั้ง 8 แบบ พบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9865-0.9991 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0032-0.0356 โดยแบบจำลอง ANFIS แบบที่ 8 ที่มีจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตัวแปรอินพุต อุณหภูมิเท่ากับ 5 และ ตัวแปรอินพุตเวลา เท่ากับ 4 มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 70-90°C เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด คือ 0.9991 และค่า RMSE ต่ำสุด คือ 0.0032 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลกับแบบจำลอง ANFIS พบว่า แบบจำลองมีค่า R^2 สูงกว่าและค่า RMSE มีค่าต่ำกว่าแบบจำลองเอมพิริคัล

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรที่ช่วยเก็บข้อมูลผลการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Torpol, "A study on thin layer drying of pepper using hot air dryer," M.S. thesis, Dept. Phys., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2013.
- [2] Ministry of Agriculture and Cooperatives. (10 October 2010). Thailand's agricultural trade statistics for 2010 [Online]. Available: <http://www.oae.go.th>
- [3] P. Praneetpolkrang and K. Sathapornprasath, "Application of a combined jet spouted bed and ultrasound waves for drying of agricultural products," Srinakharinwirot Univ. Eng. J., vol.12, no.1, pp.163-175, Jan. 2017.
- [4] C. Ertekin and O. Yaldiz, "Drying of eggplant and selection of suitable thin layer drying

- model,” J. of Food Eng., vol.21, pp.349-359, Aug. 2004.
- [5] S. Suthicharoenpanich, “Paddy drying by two-dimensional spouted bed technique,” M.S. thesis, Dept. Food Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 1998.
- [6] K.B. Mathur and P. Gishler, “ ” AIChE J., vol.1, pp. 157-164, Jun. 1955.
- [7] R.Tapaneyasin, “Study of hydrodynamics and drying characteristics of a jet spouted bed of shrimp,” M.S. thesis, Dept. Food Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2003.
- [8] S. Wachiraphansakul, “Drying of soy residue using sorbent particles in a jet spouted bed,” M.S. thesis, Dept. Food Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand 2005.
- [9] K. Sathapornprasathand C. Nimmol, “Influences of Far-infrared radiation on the energy efficiency of stepwise jet spouted bed drying system,” KKU Res. J., vol.18, pp.325-343, Mar. 2013.
- [10] S. Wachiraphansakul and S. Devahastin, “Drying kinetics and quality of soy residue (okara) dried in a jet spouted bed dryer,”Drying Technol., vol.23, pp.1229-1242, Feb. 2005.
- [11] S. Wachiraphansakul and S. Devahastin, “Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles,”LWT-Food Sci. Technol.,vol. 40, pp.207-219, Mar. 2007.
- [12] K. Sathapornprasath, “Intermittent batch drying for agricultural products in jet spouted bed drying,” Srinakharinwirot Univ. Eng. J., vol.5, no.1, pp.50-64, Jan. 2010.
- [13] P. Waramit, N. Weerayuth, and U. Teeboonma, “ Prediction of hot air drying moisture ratio using an empirical model and artificial neural network model,” Srinakharinwirot Univ. Eng. J.,vol. 6 no.1, pp. 39-47, Jan. 2011.
- [14] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, S. Shamshirband and D. Petkovic, “ Adaptive neuro- fuzzy approach for solar radiation prediction in Nigeria,” Renewable Sustainable Ener. Rev., Vol.51, pp.1784-1791, Nov. 2015.
- [15]M. Hosoz, H.M. Ertuncand H. Bulgurcu, “An adaptive neuro- fuzzy inference system model for predicting the performance of a refrigeration system with a cooling tower,” Expert Syst. Appl., Vol. 38, pp. 14148- 14155, Oct. 2011.
- [16]S. Soyguder and A. Alli, “ Predicting of fan speed for energy saving in HVAC system based on adaptive network based fuzzy inference system,” Expert Syst. Appl., Vol. 36, pp.8631-8638, May 2009.
- [17]A. Hasiloglu, M. Yilmaz, O. Comakli and I. Ekmekci, “Adaptive neuro-fuzzy modeling of transient heat transfer in circular duct air flow,” Int. J. Therm. Sci., Vol.43, pp.1075-1090, Nov. 2004.
- [18] S. Lertworasirikul, “Drying kinetics of semi-finished cassava crackers: A comparative study,” LWT, Vol. 41, pp. 1360- 1371, Nov. 2008.
- [19]Y. Tana, C. Shuaia, L. Jiaoc and L. Shen, “An adaptive neuro- fuzzy inference system (ANFIS) approach for measuring country

- sustainability performance,” *Environ. Impact Assess. Rev.*, Vol.65, pp.29-40, Jul. 2017.
- [20] L. Virgen-Navarroa, E. J. Herrera-Lópezb, R. Corona-González, E. Arriola-Guevarac and G. M. Guatemala- Morales, “ Neuro- fuzzy model based on digital images for the monitoring of coffee bean color during roasting in a spouted bed,” *Expert Syst. Appl.*, Vol.54, pp.162-169, Jul. 2016.
- [21] R. Assawarachan, “Microwave Vacuum Drying Kinetics of Dried *Spirogyra* sp.,” *TSAE J.*, Vol.19(1), pp. 14-24, Jan. 2013.
- [22] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- [23] A. Seangsai and S. Jiriwibhakorn, “ Power system quality evaluation using adaptive neuro- fuzzy inference systems,” *Kasetsart Engi. J.* vol. 92, pp. 9-16, Apr. 2014.
- [24] T. Madhiyanon, A. Phila and S. Soponronnarit, “ Models of fluidized bed drying for thin- layer chopped coconut,” *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 29, pp. 2849- 2854, Oct. 2009.
- [25] I. Doymaz, “ Convective drying kinetics of strawberry,” *Chem. Eng. Process.*, vol. 47, pp.914-919, May 2008.
- [26] K. Sacilik and A.K. Elicin, “ The thin layer drying characteristics of organic apple slices,” *J. Food Eng.*, vol.73, pp.281-289, Apr. 2006.
- [27] C. Srinivasakannan and N. Balasubramaniam, “ An experimental and modeling investigation on drying of ragi (Eleusinecorocana) in fluidized bed,” *Drying Technol.*, vol.24, pp.1683-1689, Apr. 2006.
- [28] E. K. Akpınar and Y. Bicer, “ Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun,” *Energy Convers. Manage.*, vol.49, pp.1367-1375, Jun. 2008.
- [29] S. Pusat, M. T. Akkoyunlu, E. Pekel, M. C. Akkoyunlu, C. Özkan and S. S. Kara, “ Estimation of coal moisture content in convective drying process using ANFIS,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 147, pp. 12- 17, Jun. 2016.
- [30] T. Srikhacha, “Short-term prediction in stock price using hybrid optimized recursive Slope filtering, adaptive moving approach and neuro fuzzy adaptive learning,” Ph.D. thesis, Dept. Information Tech., King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2007.