

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อคัดเลือกแบบจำลองการอบแห้งข้าวเปลือก สำหรับเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

Genetic algorithm for the selection of rough rice drying model for the free-fall paddy dryer

โคธรา แฉงการ¹, สุกษมา ยมมสุขเจ้าสำราญ¹ และ ทวษ จิตรสมบูรณ¹

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: E-Mail: tabon@sut.ac.th, โทรศัพท์: 044 22 4410, โทรสาร: 044 22 4613

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการค้นหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งที่เหมาะสมกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ โดยทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100, 130 และ 150°C ใช้ความเร็วของอากาศอบแห้ง 2 m/s และระยะเวลาพักข้าวเปลือก 1 นาทีต่อรอบการอบแห้ง จากนั้นใช้รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อค้นหาค่าปัจจัยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางในรูปแบบต่างๆ 9 รูปแบบ ที่สอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งมากที่สุด ทั้งนี้โดยใช้ GA Toolbox ของโปรแกรม MATLAB จากการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Midilli เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าสูง และแบบจำลองอบแห้งชั้นบางแบบ Two-term exponential เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าต่ำ

คำหลัก: รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม, แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง, เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

Abstract

The purpose of this study was to seek the proper thin-layer rough rice model for the free-fall dryer. Experimental data for drying temperatures 100, 130 and 150°C, drying velocity 2 m/s and rest period between drying round of 1 minute were fitted to the 9 theoretical models by a genetic algorithm (GA). The GA Toolbox in MATLAB was used to generate the correlation coefficients of the models. The best fitting of the experimental data by these models was specified by comparing the correlation coefficients, standard errors and mean square deviations. The Midilli model was found to be the most suitable model for drying condition at high relative humidity of ambient air while the Two-term exponential model was most appropriate for ambient air of low relative humidity.

Keywords: Genetic Algorithm, thin-layer model, free-fall paddy dryer

1. บทนำ

ข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นในเมล็ดสูง ซึ่งส่งผลต่ออายุการเก็บรักษา อัตราการเสื่อมคุณภาพ การเข้าทำลายของแมลง และเชื้อรา ดังนั้นจึงต้องลดความชื้นเมล็ดให้เร็วที่สุด การลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับสภาพในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ในปริมาณที่มาก และในระยะเวลาที่กำหนดได้แน่นอน โดยไม่ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ แต่เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง และความร้อนที่ใช้อย่างมีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือก จึงเกิดงานวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อลดการใช้พลังงานและคงรักษาคุณภาพข้าวเปลือกที่ดี ผลของงานวิจัยก่อให้เกิดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคต่าง ๆ อย่างหลากหลาย เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, แบบสเปาเด็ดเบด, แบบไหลคลุกเคล้า (LSU), แบบการไหลขวาง และแบบข้าวหล่นอิสระเป็นต้น

การจำลองกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้ง โดยสมการทำนายความชื้นภายในวัสดุเป็นหัวใจสำคัญของระบบสมการอบแห้ง และเนื่องจากข้าวเปลือกเป็นวัสดุทางชีวภาพที่มีความซับซ้อนในกระบวนการแพร่และการระเหยน้ำภายในเมล็ด เช่น มีทั้งการแพร่ของน้ำในสภาพของเหลวและไอ การดูดซึมด้วยระบบคาปิลารี และการไหลแบบโมเลกุลอิสระ (Knudsen flow) ดังนั้นการสร้างสมการทำนายความชื้นภายในข้าวเปลือก จึงมักใช้ผลการทดลองอบแห้งเป็นข้อมูลในการสร้างสมการ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งเข้ากับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง (Thin Layer Drying Model) ซึ่งมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 1.

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ก็คือการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ซึ่งทำให้แบบจำลองสามารถทำนายลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่ากระบวนการดังกล่าว คือปัญหา

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Problem) นั้นเอง ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคการหาคำตอบด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) กำลังได้รับการประยุกต์ใช้อย่างมากมายในหลากหลายงาน เนื่องจากเป็นที่ยอมรับว่าสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และสามารถหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global optimum) ได้

เพื่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระในขั้นสูงต่อไป งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระซึ่งเป็นการอบแห้งแบบมีการพักในระหว่างกระบวนการ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง โดยประยุกต์ใช้รหัสวิธีพันธุกรรมในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละแบบจำลองแล้วใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อเลือกแบบจำลองอบแห้งชั้นผิวบางที่เหมาะสม ซึ่งแบบจำลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองแบบมีการพักได้ดี แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองในการทำนายผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

2. หลักการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนี้ ได้ถูกคิดค้นขึ้นโดยคาดหวังว่าจะสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และไม่เกิดผลเสียต่อเมล็ดข้าว ซึ่งจะทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ด (ข้าวตัน) เป็นปริมาณสูง อีกทั้งได้คุณภาพดีทั้งในด้านของกลิ่นและสีของข้าวสาร ซึ่งเครื่องอบนี้ได้รับการจดสิทธิบัตรแล้ว [3]

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งนี้คือ พัดลมเป่าอากาศผ่านอุปกรณ์สร้างความร้อน เพื่อสร้างลมร้อนเข้าสู่ด้านล่างของท่ออบแห้งที่ตั้งอยู่ในแนวตั้ง ส่วนข้าวเปลือกชั้นตกลงมาโดยอิสระจากด้านบนของท่ออบแห้งสวนทางกับการไหลขึ้นของลมร้อน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นกับอากาศร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้อาหารข้าวเปลือกแห้งลงอย่างรวดเร็ว แต่ข้าวเปลือกจะอยู่ในท่ออบแห้งเป็นระยะเวลาสั้นๆ เพียงประมาณ 1 วินาที

ในแต่ละรอบ (กรณีเครื่องอบแห้งขนาดห้องทดลอง ที่ท่ออบแห้งยาวประมาณ 2 เมตร แต่ถ้าท่ออบแห้งยาวกว่านี้ก็จะใช้เวลามากกว่านี้) จากนั้นข้าวเปลือกจะออกจากท่ออบแห้งเข้าสู่ถังพักทางด้านล่าง

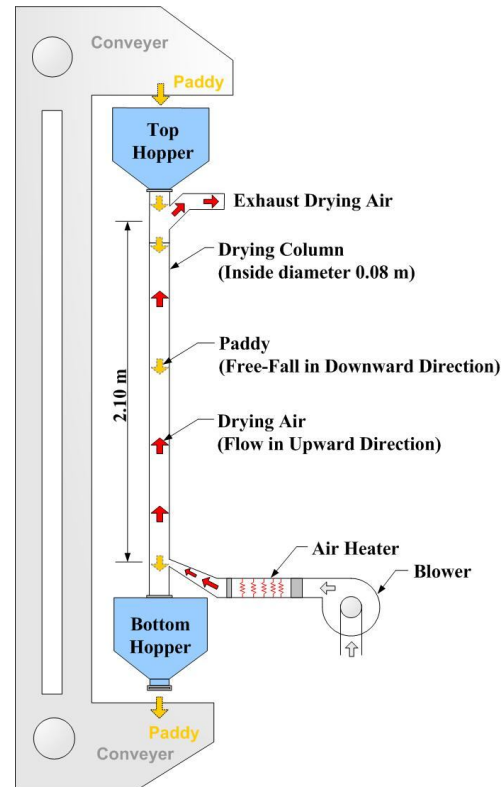
เครื่องอบแห้งนี้แตกต่างจากเครื่องอบแห้ง แบบ LSU ที่ถึงแม้จะมีการไหลของเมล็ดพืชในแนวดิ่งสวนทางกับอากาศแต่จะมีตัวควบคุมการไหลให้เมล็ดพืชตกลงด้านล่างอย่างช้าๆ โดยอากาศจะค่อยๆ ซึมผ่านขึ้นไปด้านบน แต่เครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้เมล็ดพืชตกลงสวนทางกับอากาศในแนวดิ่งด้วยความเร็วสูงและมีความพรุนเมล็ดข้าวสูง ทำให้พื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเพิ่มมากขึ้น ที่สำคัญคือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งนี้มีค่าสูง โดยความเร็วของอากาศไม่จำเป็นต้องมีค่าสูงมากนัก (ต่ำกว่าความเร็วลอยตัว) ซึ่งทำให้มีอัตราการถ่ายเทมวลความชื้นที่สูงเป็นสัดส่วนกัน

เพื่อให้ได้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บจึงต้องลำเลียงข้าวเปลือกเข้าสู่ท่ออบแห้งหลายรอบ ดังนั้นจึงเกิดช่วงเวลาที่ข้าวเปลือกรอที่จะเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง เรียกช่วงเวลานี้ว่า ‘การพัก’ (resting period) นั่นคือระยะเวลาตั้งแต่ข้าวเปลือกออกจากท่ออบแห้ง เข้าสู่ถังพักด้านล่าง และถูกลำเลียงขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง ช่วงระยะเวลาดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณข้าวเปลือกในถังพักด้านล่าง

ผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระมีอัตราการอบแห้งที่ค่อนข้างสูง อยู่ในช่วง 0.0514-0.0971 (%w.b./sec.) [5] และใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะที่ต่ำ อยู่ในช่วง 3.00-3.55 MJ/kg water evap. [6] โดยสามารถคงรักษาปริมาณข้าวต้นได้สูงถึงประมาณ 55% [7]

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเครื่องระดับห้องทดลองขนาดเล็ก โดยมีท่ออบแห้งขนาดวงใน 8 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 210 เซนติเมตร ขดลดความร้อนขนาด 6 กิโลวัตต์ มอเตอร์พัดลมขนาด

1.75 กิโลวัตต์ ซึ่งสามารถปรับแต่งความร้อนและจำนวนรอบพัดลมได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1 โครงร่างเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

3.แบบจำลองอบแห้งชั้นผิวบาง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนมากที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งชั้นบาง แสดงในตารางที่ 1 โดยแต่ละสมการถูกสร้างขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการอบแห้งที่เปลี่ยนไปทั้งด้านเทคนิคอบแห้งเงื่อนไขการอบแห้ง และสภาวะแวดล้อมเป็นต้น

ตารางที่ 1 แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง [2]

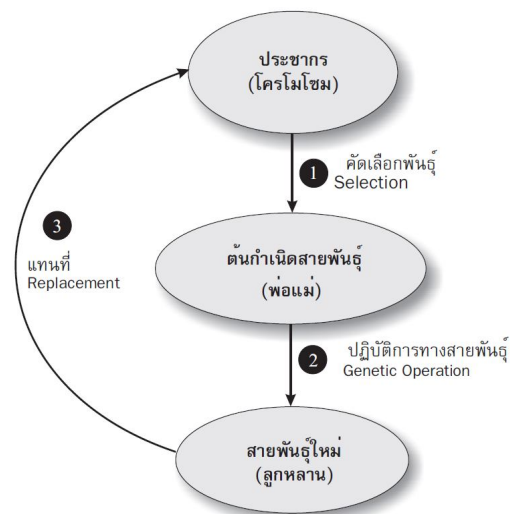
Name	Model equation
Newton	$MR = e^{-kt}$
Page	$MR = e^{-kt^n}$
Henderson and Pabis	$MR = ae^{-kt}$
Logarithmic	$MR = a_0 + ae^{-kt}$
Two-term exponential	$MR = a_1e^{-k_1t} + a_2e^{-k_2t}$
Geometric	$MR = at^{-n}$
Wang and Singh	$MR = 1 + a_1t + a_2t^2$
Midilli	$MR = ae^{-kt^n} + bt$
Diffusion approach	$MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kbt}$

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองในตารางที่ 1 เพื่อทดสอบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดกับเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

4. การค้นหาคำตอบด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ใช้การเลียนแบบการคัดเลือกโดยธรรมชาติและปฏิบัติการทางสายพันธุ์กับการค้นหาคำตอบให้โจทย์ปัญหา โดยพิจารณารูปแบบของปัญหาเลียนแบบประชากรในสังคม ซึ่งโดยปกติประชากรในสังคมจะถูกคัดเลือกและปรับเปลี่ยนพันธุกรรม เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีลักษณะเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่บีบบังคับ ดังนั้น โจทย์ปัญหาจะเปรียบได้กับแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง ผลการทดลองอบแห้งและฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปรียบได้กับสิ่งแวดล้อมที่บีบบังคับ สำหรับประชากรเปรียบได้กับชุดค่าคงที่ของแบบจำลองนั้นๆ ซึ่งจะถูกคัดเลือกและปรับเปลี่ยนพันธุกรรมจนได้คำตอบของปัญหาที่ดีขึ้นเรื่อยๆ จากรุ่นหนึ่งไปสู่รุ่นหนึ่ง ทำให้แบบจำลองและผลการทดลองซ้อนทับกันมากขึ้นเรื่อยๆ

วัฏจักรของ GA ประกอบด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ คือการคัดเลือกสายพันธุ์, ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ และการแทนที่ ดังรูปที่ 2

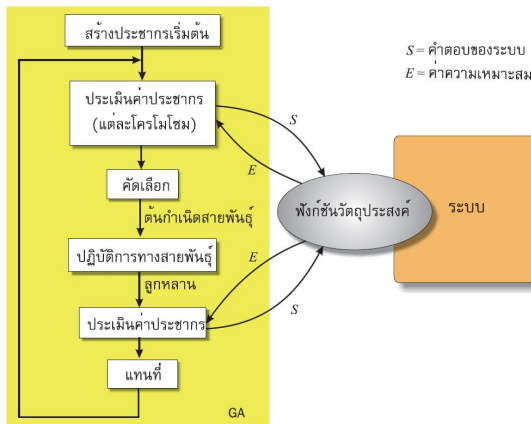


รูปที่ 2 วัฏจักรของรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม [8]

ขั้นตอนการทำงานของ GA

1. สร้างประชากรโดยการสุ่ม (Random) ตามจำนวนที่ต้องการ
2. ประเมินค่าประชากร (ประชากร 1 คน ประกอบด้วย 1 โครโมโซมซึ่งแต่ละโครโมโซมแทนชุดค่าคงที่ของแบบจำลองและยีนแต่ละตัวใน 1 โครโมโซม เป็นตัวแทนของค่าคงที่แต่ละพจน์ของแบบจำลอง) ของกลุ่มประชากรทั้งหมดที่สุ่มได้ จากข้อ 1. ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในที่นี้ คือ ค่าน้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ระหว่างแบบจำลองและผลการทดลอง
3. คำนวณค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยัง GA
4. ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่ม เพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไป
5. นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลาน ด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือโครโมโซมลูกหลาน
6. คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับข้อ 3
7. โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยลูกหลานที่ได้จากข้อ 5 ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ
8. เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนในข้อ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ คำตอบที่ต้องการ คำตอบที่ได้จะมาจากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชากรนั่นเอง โดยที่สามารถใช้ค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการประเมินว่าคำตอบที่ได้เป็นที่ต้องการ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 3

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะดำเนินการไปเรื่อย ทำให้พบคำตอบที่ดีขึ้น จากคำตอบวงแคบ เฉพาะถิ่น (Local solution) ไปยังคำตอบวงกว้าง (Global solution) รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะยุติเมื่อ เงื่อนไขการค้นหาลอดคล้องกับฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยทั่วไปจะอาศัยเงื่อนไข เกี่ยวกับจำนวนรุ่นที่ต้องการ หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ คำตอบที่ดีที่สุดที่พบคือ โครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มของประชากร



รูปที่ 3 ขั้นตอนของรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม [8]

5. สมการการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

5.1 การหาอัตราส่วนความชื้น

อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) นิยาม โดย

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

โดยที่ M คือ ความชื้นข้าวเปลือกที่เวลาใด

M_0 คือ ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น

M_e คือ ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก

ความชื้นสมดุลหาได้จากสมการกึ่งทฤษฎี พัฒนา โดย Henderson (1952)

$$M_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - RH)}{(C_1 T_{abs})} \right]^{1/c_2} \quad (2)$$

โดยที่ RH คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้ง (ทศนิยม)

T_{abs} คือ ค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งสัมบูรณ์

C_1, C_2 คือ ค่าคงที่การคายความชื้น สำหรับ

ข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ -3.146×10^{-6} และ 2.464 ตามลำดับ [4]

5.2 การคำนวณระยะเวลาในท่ออบแห้ง

เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ มีลักษณะการ สัมผัสกันระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งแบบไม่ ต่อเนื่อง ดังนั้นการพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการ อบแห้งจะพิจารณาจากระยะเวลาที่เมล็ดข้าว 1 เมล็ด สัมผัสอากาศร้อนจริง, $t_{resident}$ ตามสมการที่ (3)

$$t_{resident} = (N_{drying_pass} \times t_{resident_1pass}) \quad (3)$$

โดยที่ N_{drying_pass} คือจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่าน เข้าสู่ท่ออบแห้ง (รอบ) และ $t_{resident_1pass}$ คือเวลาที่ เมล็ดข้าว 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้ง ใน 1 รอบการ อบแห้ง (วินาที)

5.3 เงื่อนไขที่ใช้ประเมินความเหมาะสม ของ

แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

ประกอบด้วย 3 เงื่อนไข คือค่าความคลาดเคลื่อน มาตรฐาน (e_s), ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และ ค่าความแปรปรวน (χ^2) แต่ละเงื่อนไขมีนิยาม ดังต่อไปนี้ [1]

$$e_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - N_c}} \quad (4)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} MR_{exp,i} - \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \right)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i} \right)^2}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - N_c} \quad (6)$$

โดยที่ $MR_{pre,i}$ คือ ค่าสัดส่วนความชื้นที่คำนวณได้ จากสมการอบแห้งชั้นบาง, $MR_{exp,i}$ คือ ค่าสัดส่วน ความชื้นที่ได้จากผลการทดลอง, N คือ จำนวนจุด ข้อมูลการทดลอง และ N_c คือ จำนวนค่าคงที่ใน แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

6. วิธีการดำเนินงานวิจัย

6.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ ชัยนาท 1 ที่ได้จากการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวหวด ในเดือน พฤษภาคม 2551 บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท ถุงละ 60 กิโลกรัม และจัดเก็บในห้องแช่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 5°C ก่อนการทดลองนำข้าวเปลือกออกจากห้องแช่เย็น และพักในสภาพอากาศแวดล้อมประมาณ 12 ชั่วโมง จากนั้นนำข้าวเปลือกไปคัดแยกเมล็ดเต็มออกจากเศษฟางและเมล็ดลีบด้วยเครื่องคัดแยก บรรจุข้าวเปลือกเมล็ดเต็มที่ได้ในถุงพลาสติกปิดสนิทตั้งไว้ในสภาพอากาศแวดล้อมอีกประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ด แล้วจึงเริ่มการทดลอง ข้าวเปลือกที่เตรียมได้มีน้ำหนัก 51.5 กิโลกรัม และมีความชื้นประมาณ 21 (%w.b.) โดยเงื่อนไขการทดลองอบแห้งแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขการทดลองอบแห้ง

- ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s		
- ระยะเวลาพัก 1 นาที ต่อรอบการอบแห้ง		
อุณหภูมิ อากาศอบแห้ง (°C)	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ อากาศแวดล้อม, RH (%)	
	กรณี %RH สูง	กรณี %RH ต่ำ
100	74.82	55.73
130	69.09	53.48
150	61.16	53.47

เริ่มการทดลอง ด้วยการเปิดพัดลม กะพ้อลำเลียง และเครื่องทำความร้อน ตั้งความเร็วและอุณหภูมิอากาศอบแห้งตามเงื่อนไขข้างต้น เก็บตัวอย่างเริ่มต้น 15 กรัม ในถุงพลาสติกปิดสนิท นำข้าวเปลือกที่เตรียมไว้เทใส่ถังพักด้านบน ข้าวเปลือกจะไหลผ่านท่ออบแห้ง เข้าสู่ถังพักด้านล่าง และเข้าสู่กะพ้อลำเลียง เพื่อลำเลียงกลับไปถังพักด้านบน เกิดการอบแห้งซ้ำเป็นวงจรตามวิธีการข้างต้นจนกระทั่งข้าวเปลือกได้ความชื้นประมาณ 13% (w.b.) ในขณะอบแห้งเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกตัวอย่างละ 15 กรัมในถุงพลาสติกปิดสนิท โดยเก็บทุกๆ 5 นาที ในชั่วโมง

แรกและทุกๆ 10 นาทีในชั่วโมงต่อมา เพื่อนำไปหาค่าความชื้น หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งนำตัวอย่างที่เก็บได้พักในอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 6 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง คลายความเครียดที่ผิวและเกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว จากนั้นนำไปหาค่าความชื้นโดยวิธีการอบด้วยตู้อบ (Oven Method) โดยนำข้าวเปลือกตัวอย่างทั้งเมล็ด นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

6.2 ฟังก์ชันค่าความเหมาะสมและเงื่อนไขรหัสวิพันธุกรรม

ผู้วิจัยเลือกใช้ Genetic Algorithm Tool ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งอยู่ในรูปแบบ Graphic User Interface, GUI การใช้งานเริ่มต้นจากการสร้างฟังก์ชันค่าความเหมาะสม (ฟังก์ชันวัตถุประสงค์) ในรูปของ m-file โดยงานวิจัยนี้ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (e_s) เป็นค่าความเหมาะสมที่ต้องการให้มีความน้อยที่สุด ซึ่ง e_s ได้จากความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ตามสมการที่ 4

อันดับต่อมาทำการกำหนดกลยุทธ์วิวัฒนาการ (Evolution Strategies) ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้ตามที่แสดงในตารางที่ 3 จากนั้นทำการ run โปรแกรมผ่าน Genetic Algorithm Tool หายที่สุดได้คำตอบเป็นค่าของตัวแปรในแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่พิจารณาซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำที่สุด

ตารางที่ 3 แสดงกลยุทธ์วิวัฒนาการที่เลือกใช้

Population size	- 3000
Fitness scaling	- Rank
Selection	- Stochastic uniform
Reproduction	- Elite count: 2 - Crossover fraction: 0.8
Mutation	- Gaussian function
Crossover	- Heuristic
Migration	- Forward
Hybrid function	- fminsearch
Stopping criteria	- 300,000 Generation

7. ผลการคำนวณและการวิจารณ์ผล

ค่าตัวแปรของแบบจำลองออบแห้งชั้นบางทั้ง 9 สมการ ที่ค้นหาด้วย GA และผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ ในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงแสดงใน ตารางที่ 4-7 และในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศ แวดล้อมต่ำแสดงในตารางที่ 8-10

แบบจำลองออบแห้งที่ดีจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เข้าใกล้ 1 และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (e_s) และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (χ^2) ที่ต่ำ

จากตารางที่ 4-6 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงคือ แบบจำลองของ Midilli โดยในการทดลองทั้ง 3 กรณี มีค่า r ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.999480 และมีค่า e_s สูงสุดเท่ากับ 0.005975 และค่า χ^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.000004 ถึงแม้ว่าในกรณีที่ 150°C ค่า e_s ที่ได้จากแบบจำลองของ Midilli จะมีค่า 0.005975 ซึ่งมากกว่าแบบจำลองแบบ Two-term exponential ($e_s = 0.005842$) และเส้นกราฟของแบบจำลองทั้งสองเกาะกับผลการทดลองได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นจึงถือว่าที่อุณหภูมิ 150°C สามารถใช้แบบจำลองทั้งสองได้ และเลือกใช้แบบจำลองของ Midilli เพื่อให้เป็นแนวทางเดียวกันกับการอบแห้งที่ อุณหภูมิอบแห้ง 100°C และ 130°C และสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของสมการกับอุณหภูมิอบแห้ง สำหรับกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม สูงได้

จากตารางที่ 7-9 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำคือ แบบจำลองแบบ Two-term exponential ซึ่งมีค่า r ต่ำสุดเท่ากับ 0.999417 และมีค่า e_s สูงสุดเท่ากับ 0.006614 และค่า χ^2 สูงสุด เท่ากับ 0.000049

เหตุผลทางกายภาพที่แบบจำลองของ Midilli มีความเหมาะสมกับการอบแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์

อากาศแวดล้อมสูง อาจเนื่องมาจากค่าความดันไอของอากาศที่ปกคลุมกองข้าวเปลือกในช่วงระยะพักมีค่าสูง ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอกายในกับภายนอกต่ำกว่ากรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ จึงทำให้การกระจายความชื้นภายในเมล็ดและการระเหยสู่บรรยากาศเป็นไปได้ช้ากว่า ลักษณะการลดลงของความชื้นจึงค่อนข้างราบเรียบ สอดคล้องกับรูปแบบของแบบจำลองของ Midilli ที่มีพจน์การลดลงแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4 ในทางกลับกันกรณีการอบแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ การลดลงของความชื้นจึงรวดเร็วและมีลักษณะโค้งงอมากกว่า ดังนั้นแบบจำลองแบบ Two-term exponential จึงให้ความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ ดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 5

ดังนั้น กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง เลือกแบบจำลองของ Midilli

$$MR = ae^{-kt^n} + bt \quad (7)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ a , k , n และ b เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (T) ดังนี้

$$a = -0.000011337T^2 + 0.00292897T + 0.80653797 \quad (8)$$

$$k = 0.000000397T^2 - 0.00007671T + 0.00463167 \quad (9)$$

$$n = -0.00007536T^2 + 0.01611246T + 0.36044789 \quad (10)$$

$$b = -0.000000367T^2 + 0.00008397T - 0.00436890 \quad (11)$$

กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ เลือกแบบจำลองแบบ Two-term exponential

$$MR = a_1e^{-k_1t} + a_2e^{-k_2t} \quad (12)$$

โดยที่ สัมประสิทธิ์ a_1 , k_1 , a_2 และ k_2 เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (T) ดังนี้

$$a_1 = 0.00018725T^2 - 0.03041804T + 2.26215079 \quad (13)$$

$$k_1 = -0.00000332T^2 + 0.00080216T - 0.04427326 \quad (14)$$

$$a_2 = -0.00017492T^2 + 0.02724108T - 1.07857873 \quad (15)$$

$$k_2 = -0.00000737T^2 + 0.00166233T - 0.08351565 \quad (16)$$

ความถูกต้องของแบบจำลองอบแห้งและสมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น ด้วยการเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนความชื้นที่ทำนายได้กับผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 6 และ 7 จากรูปพบว่าค่าที่ทำนายค่อนข้างซ้อนทับกับเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองอบแห้งทั้งสอง ในการทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกเมื่อใช้เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

8. สรุป

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมในการกำหนดค่าปัจจัยของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 9 แบบ เพื่อใช้กับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Midilli เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าสูง และแบบจำลองอบแห้งชั้นบางแบบ Two-term exponential เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าต่ำ ซึ่ง แบบจำลองทั้งสองให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใกล้เคียง 1 มาก อีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานยังต่ำอีกด้วย งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศอบแห้งในรูปของสมการโพลิโนเมียลเพื่อให้ได้ผลการทำนายที่ดีที่สุดอีกด้วย

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

10. เอกสารอ้างอิง

[1] Chapra, S. C. and Canel, R. P. (1989). *Numerical method for engineer*, McGraw-Hill Book Company, New York.

[2] Vivian, N. P. (2007). *Focus on Food Engineering Research and Developments*, Nova Science Publishers, New York.

[3] กรมทรัพย์สินทางปัญญา, ลิขสิทธิ์การประดิษฐ์ ชื่อ “เครื่องอบแห้งแบบการไหลสวนทางในแนวดิ่ง”, เลขที่สิทธิบัตร 22985, ออกเมื่อ ๒๗ ธันวาคม ๒๕๕๐

[4] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[5] สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2552). ผลของระยะพัก ความเร็ว และอุณหภูมิต่ออัตราอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระ, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[6] สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2552). ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

[7] สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2552). เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ : เงื่อนไขการอบแห้งที่ให้คุณภาพข้าวสารที่ดี, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[8] อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). *ปัญหาเชิงคำนวณ*, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100°C

Model	Parameter	Value	Standard Error (e _s)	Correlation coeff. (r)	MSD (χ^2)
Newton	Drying Coefficient, k	0.002025	0.010379	0.998621	0.000110
Page	Drying Coefficient, k	0.001937	0.010336	0.998609	0.000111
	Exponent, n	1.007810			
Henderson and Pabis	Drying Coefficient, k	0.002041	0.010199	0.998639	0.000108
	Coefficient, a	1.004016			
Logarithmic	Drying Coefficient, k	0.002358	0.009514	0.998813	0.000096
	Coefficient, a	0.921174			
	Coefficient, a ₀	0.088505			
Two-term exponent	Coefficient, a ₁	1.008498	0.010027	0.998687	0.000109
	Drying Coefficient, k ₁	0.002057			
	Coefficient, a ₂	-0.012349			
	Drying Coefficient, k ₂	0.042789			
Geometric	Coefficient, a	1.721333	0.089304	0.906856	0.008282
	Exponent, n	0.192390			
Wang and Singh	Coefficient, a ₁	-0.001979	0.008041	0.999221	0.000067
	Coefficient, a ₂	1.491E-06			
Midilli	Coefficient, a	0.986112	0.005809	0.999558	0.000036
	Coefficient, b	0.000386			
	Drying Coefficient, k	0.000823			
	Exponent, n	1.218109			
Diffusion Approach	Coefficient, a	-0.007795	0.010059	0.998683	0.000107
	Coefficient, b	0.053501			
	Drying Coefficient, k	0.038408			

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130°C

Model	Parameter	Value	Standard Error (e_s)	Correlation coeff. (r)	MSD (χ^2)
Newton	Drying Coefficient, k	0.002025	0.010379	0.998621	0.000110
Page	Drying Coefficient, k	0.001852	0.008386	0.999065	0.000074
	Exponent, n	1.047085			
Henderson and Pabis	Drying Coefficient, k	0.002454	0.007948	0.999135	0.000066
	Coefficient, a	1.012401			
Logarithmic	Drying Coefficient, k	0.002574	0.007879	0.999150	0.000067
	Coefficient, a	0.982580			
	Coefficient, a_0	0.031457			
Two-term exponent	Coefficient, a_1	1.019035	0.007246	0.999283	0.000058
	Drying Coefficient, k_1	0.002486			
	Coefficient, a_2	-0.020826			
	Drying Coefficient, k_2	0.062342			
Geometric	Coefficient, a	1.683932	0.086039	0.915322	0.007755
	Exponent, n	0.190412			
Wang and Singh	Coefficient, a_1	-0.002271	0.008351	0.999250	0.000073
	Coefficient, a_2	1.845E-06			
Midilli	Coefficient, a	0.995787	0.005266	0.999620	0.000031
	Coefficient, b	0.000392			
	Drying Coefficient, k	0.001186			
	Exponent, n	1.181532			
Diffusion Approach	Coefficient, a	-0.019029	0.007254	0.999282	0.000056
	Coefficient, b	0.042598			
	Drying Coefficient, k	0.058348			

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C

Model	Parameter	Value	Standard Error (e_s)	Correlation coeff. (r)	MSD (χ^2)
Newton	Drying Coefficient, k	0.002788	0.007933	0.999178	0.000065
Page	Drying Coefficient, k	0.002258	0.006497	0.999411	0.000045
	Exponent, n	1.040081			
Henderson and Pabis	Drying Coefficient, k	0.002814	0.007630	0.999155	0.000061
	Coefficient, a	1.004362			
Logarithmic	Drying Coefficient, k	0.002199	0.006259	0.999429	0.000043
	Coefficient, a	1.188866			
	Coefficient, a_0	-0.191337			
Two-term exponent	Coefficient, a_1	1.055264	0.005842	0.999503	0.000038
	Drying Coefficient, k_1	0.003023			
	Coefficient, a_2	-0.062611			
	Drying Coefficient, k_2	0.013871			
Geometric	Coefficient, a	1.628474	0.083954	0.918454	0.007440
	Exponent, n	0.188328			
Wang and Singh	Coefficient, a_1	-0.002591	0.006150	0.999472	0.000040
	Coefficient, a_2	2.263E-06			
Midilli	Coefficient, a	0.990905	0.005975	0.999480	0.000040
	Coefficient, b	0.000032			
	Drying Coefficient, k	0.001815			
	Exponent, n	1.081782			
Diffusion Approach	Coefficient, a	-0.189910	0.006220	0.999457	0.000042
	Coefficient, b	0.490094			
	Drying Coefficient, k	0.006591			

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100°C

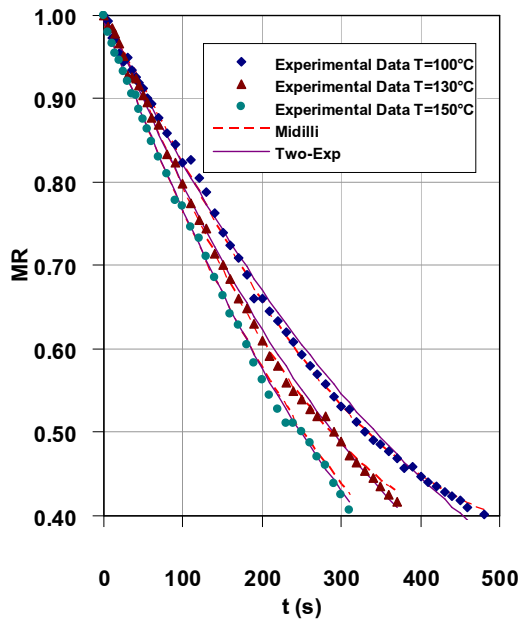
Model	Parameter	Value	Standard Error (e_s)	Correlation coeff. (r)	MSD (χ^2)
Newton	Drying Coefficient, k	0.002499	0.007898	0.999201	0.000064
Page	Drying Coefficient, k	0.002110	0.006984	0.999416	0.000051
	Exponent, n	1.031077			
Henderson and Pabis	Drying Coefficient, k	0.002506	0.007872	0.999193	0.000065
	Coefficient, a	1.001308			
Logarithmic	Drying Coefficient, k	0.001955	0.006032	0.999523	0.000039
	Coefficient, a	1.180027			
	Coefficient, a_0	-0.186477			
Two-term exponent	Coefficient, a_1	1.092848	0.005630	0.999585	0.000035
	Drying Coefficient, k_1	0.002773			
	Coefficient, a_2	-0.103703			
	Drying Coefficient, k_2	0.009044			
Geometric	Coefficient, a	1.684437	0.090860	0.906380	0.008640
	Exponent, n	0.195613			
Wang and Singh	Coefficient, a_1	-0.002319	0.006551	0.999533	0.000045
	Coefficient, a_2	1.818E-06			
Midilli	Coefficient, a	0.987202	0.005790	0.999561	0.000037
	Coefficient, b	-0.000006			
	Drying Coefficient, k	0.001616			
	Exponent, n	1.074260			
Diffusion Approach	Coefficient, a	-6.892263	0.006530	0.999490	0.000046
	Coefficient, b	1.077549			
	Drying Coefficient, k	0.001483			

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130°C

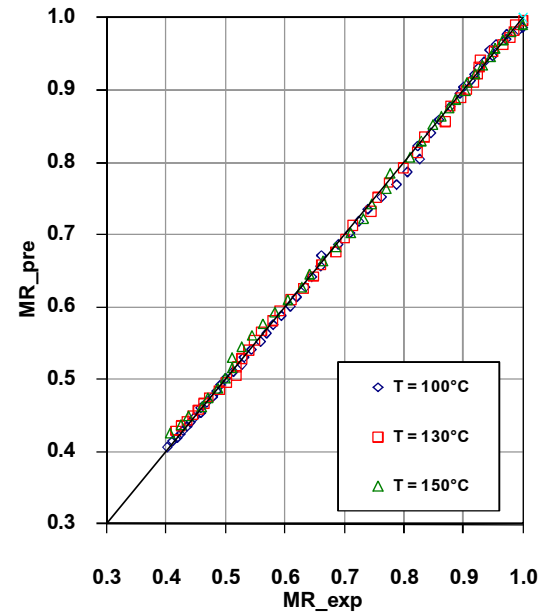
Model	Parameter	Value	Standard Error (e_s)	Correlation coeff. (r)	MSD (χ^2)
Newton	Drying Coefficient, k	0.002839	0.015112	0.997238	0.000234
Page	Drying Coefficient, k	0.001738	0.010929	0.998665	0.000126
	Exponent, n	1.092773			
Henderson and Pabis	Drying Coefficient, k	0.002880	0.014721	0.997138	0.000228
	Coefficient, a	1.006908			
Logarithmic	Drying Coefficient, k	0.001283	0.007934	0.999161	0.000068
	Coefficient, a	1.830550			
	Coefficient, a_0	-0.842124			
Two-term exponent	Coefficient, a_1	1.472332	0.006614	0.999417	0.000049
	Drying Coefficient, k_1	0.003951			
	Coefficient, a_2	-0.493440			
	Drying Coefficient, k_2	0.008079			
Geometric	Coefficient, a	1.645632	0.094285	0.901445	0.009370
	Exponent, n	0.193092			
Wang and Singh	Coefficient, a_1	-0.002488	0.009157	0.999071	0.000088
	Coefficient, a_2	1.700E-06			
Midilli	Coefficient, a	0.976039	0.007116	0.999325	0.000056
	Coefficient, b	-0.000064			
	Drying Coefficient, k	0.001010			
	Exponent, n	1.176772			
Diffusion Approach	Coefficient, a	-16.891285	0.009205	0.999032	0.000092
	Coefficient, b	1.087098			
	Drying Coefficient, k	0.000985			

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C

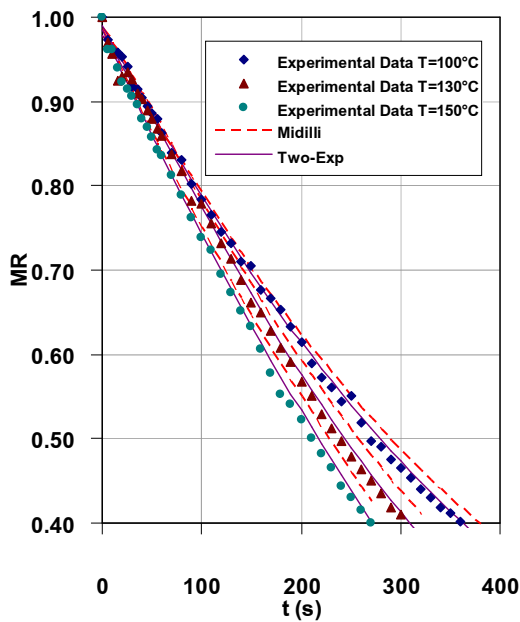
Model	Parameter	Value	Standard Error (e_s)	Correlation coeff. (r)	MSD (χ^2)
Newton	Drying Coefficient, k	0.003224	0.012280	0.997859	0.000155
Page	Drying Coefficient, k	0.002378	0.010304	0.998689	0.000113
	Exponent, n	1.059478			
Henderson and Pabis	Drying Coefficient, k	0.003236	0.012253	0.997837	0.000160
	Coefficient, a	1.001644			
Logarithmic	Drying Coefficient, k	0.001467	0.005410	0.999574	0.000032
	Coefficient, a	1.810819			
	Coefficient, a_0	-0.826184			
Two-term exponent	Coefficient, a_1	1.912572	0.005408	0.999574	0.000033
	Drying Coefficient, k_1	0.001419			
	Coefficient, a_2	-0.928188			
	Drying Coefficient, k_2	0.000068			
Geometric	Coefficient, a	1.601385	0.087277	0.913909	0.008093
	Exponent, n	0.190451			
Wang and Singh	Coefficient, a_1	-0.002883	0.008493	0.999318	0.000077
	Coefficient, a_2	2.439E-06			
Midilli	Coefficient, a	0.984691	0.005452	0.999567	0.000034
	Coefficient, b	-0.000627			
	Drying Coefficient, k	0.002047			
	Exponent, n	1.002924			
Diffusion Approach	Coefficient, a	-0.528344	0.008214	0.999308	0.000074
	Coefficient, b	0.000317			
	Drying Coefficient, k	6.408306			



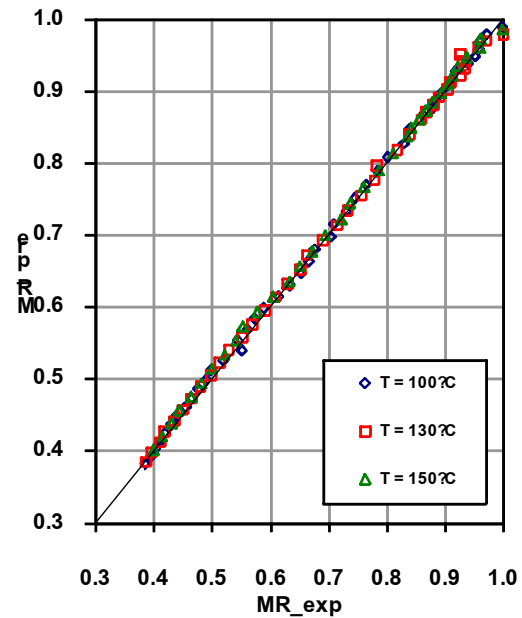
รูปที่ 4 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Midilli และ Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง



รูปที่ 6 ผลการทำนายของแบบจำลอง Midilli กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง



รูปที่ 5 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Midilli และ Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ



รูปที่ 7 ผลการทำนายของแบบจำลอง Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ