

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในส่วนของบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ความเร็วของตัวกลาง 1 m/s แล้วทำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนต่ออัตราส่วนความชื้น วิเคราะห์ผลของตัวกลางการถ่ายเทความร้อนต่ออัตราส่วนความชื้น วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิของการอบแห้งที่มีผลต่อการอบแห้งพริกไทยโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ได้ดังต่อไปนี้

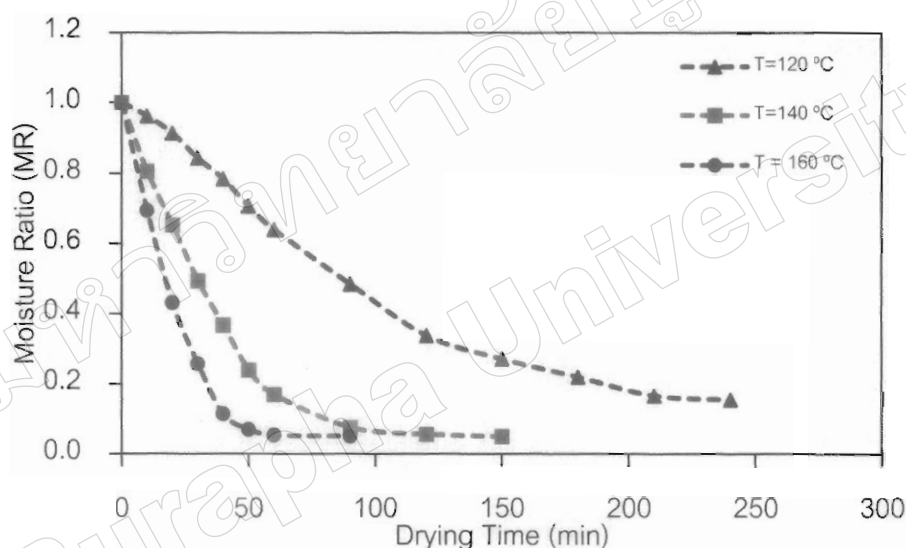
อิทธิพลของอุณหภูมิตัวกลางที่มีผลต่อการอบแห้ง

ในการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ได้แก่ พริกไทย แบ่งได้เป็นสองกรณีดังนี้ คือ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C โดยน้ำหนักของพริกไทยที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 71.00 g จากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 410 % (d.b.) จนกระทั่งพริกไทยมีค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 3 % (d.b.) การทดลองจะครอบคลุมถึงผลของอุณหภูมิและตัวกลาง (ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน) ต่ออัตราส่วนความชื้น

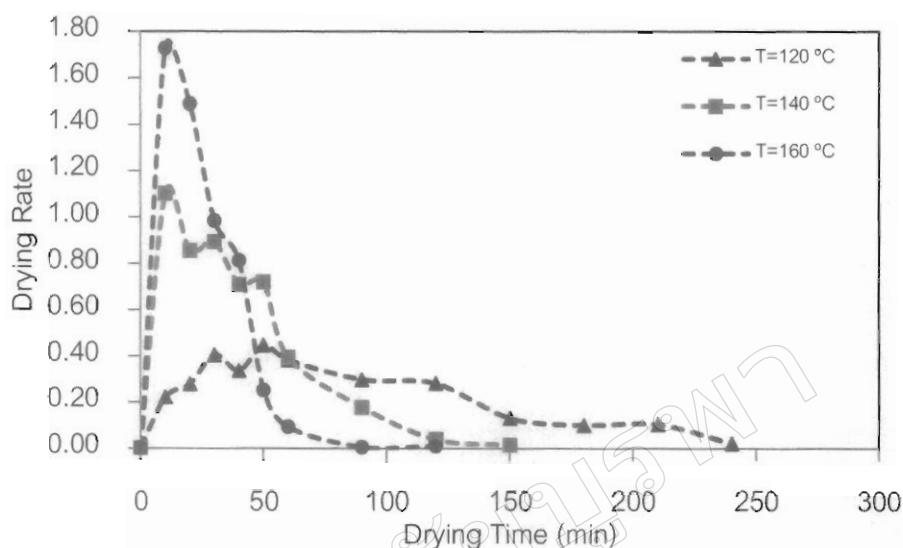
การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

จากผลการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ดังแสดงภาพที่ 4-1 และ 4-2 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของพริกไทยได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับพริกไทยมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่ามากกว่า ทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปยังพริกไทย เพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่า จึงทำให้การระเหยของน้ำในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140 และ 160°C เนื่องจากอุณหภูมิ 120°C มีค่าใกล้เคียงกับจุดเดือดของน้ำที่อุณหภูมิ 100°C ซึ่งจะทำให้เกิด

การควบคุมของไอน้ำที่บริเวณผิวของพริกไทยในช่วงแรกของการอบแห้งได้ง่ายกว่าและมากกว่า ทำให้การระเหยน้ำที่บริเวณผิวของพริกไทยเป็นไปได้ช้ากว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140 และ 160°C ซึ่งการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C จะใช้เวลาในการอบแห้งจนกระทั่งพริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 63 % (d.b.) เป็นเวลาประมาณ 240 นาที ส่วนที่อุณหภูมิ 140°C จะใช้เวลาในการอบแห้งจนกระทั่งพริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 18 % (d.b.) เป็นเวลาประมาณ 150 นาที และที่อุณหภูมิ 160°C จะใช้เวลาในการอบแห้งจนกระทั่งพริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 17 % (d.b.) เป็นเวลาประมาณ 120 นาที ตามลำดับ



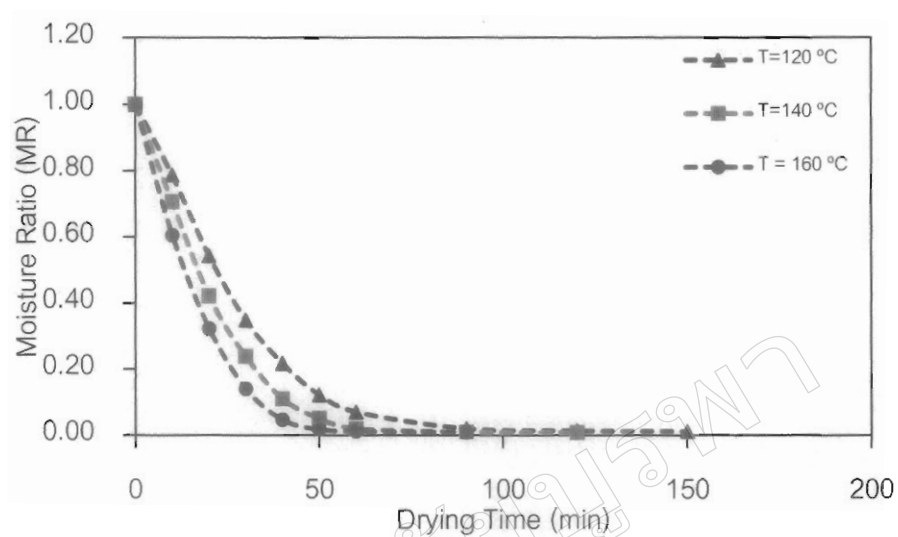
ภาพที่ 4 - 1 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ



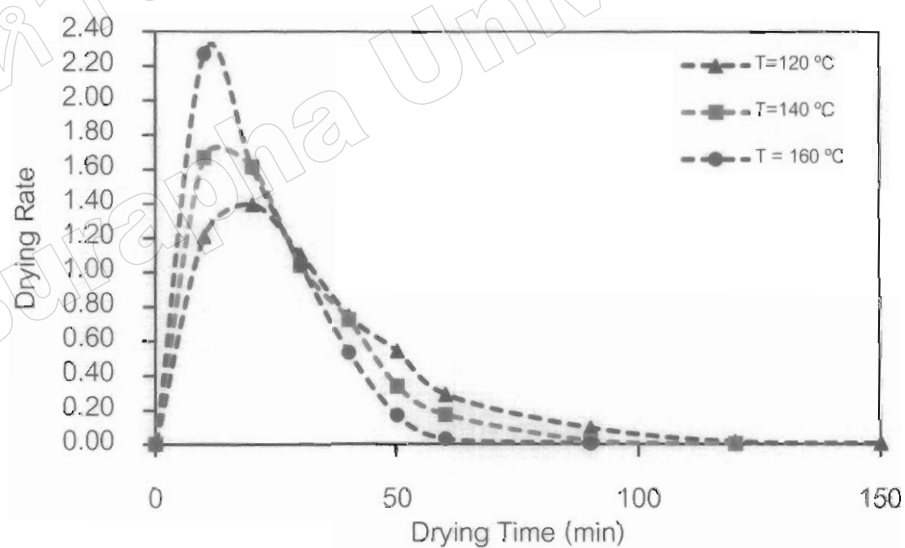
ภาพที่ 4-2 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การอบแห้งด้วยอากาศร้อน

จากผลการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีสามารถลดความชื้นของพริกไทยได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกันกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ดังแสดงภาพที่ 4-3 และ 4-4 เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนกับพริกไทยมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความร้อนถ่ายเทจากอากาศไปยังพริกไทยเพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่า ดังนั้น การระเหยน้ำในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำ แต่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะไม่เกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวของพริกไทย ในช่วงแรกของการอบแห้ง ดังเช่นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งการอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C จะใช้เวลาในการอบแห้งจนกระทั่งพริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 4 %(d.b.) เป็นเวลาประมาณ 150 นาที ส่วนที่อุณหภูมิ 140°C จะใช้เวลาในการอบแห้งจนกระทั่งพริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 3 %(d.b.) เป็นเวลาประมาณ 120 นาที และที่อุณหภูมิ 160°C จะใช้เวลาในการอบแห้งจนกระทั่งพริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 3 %(d.b.) เป็นเวลาประมาณ 90 นาที ตามลำดับ



ภาพที่ 4-3 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ



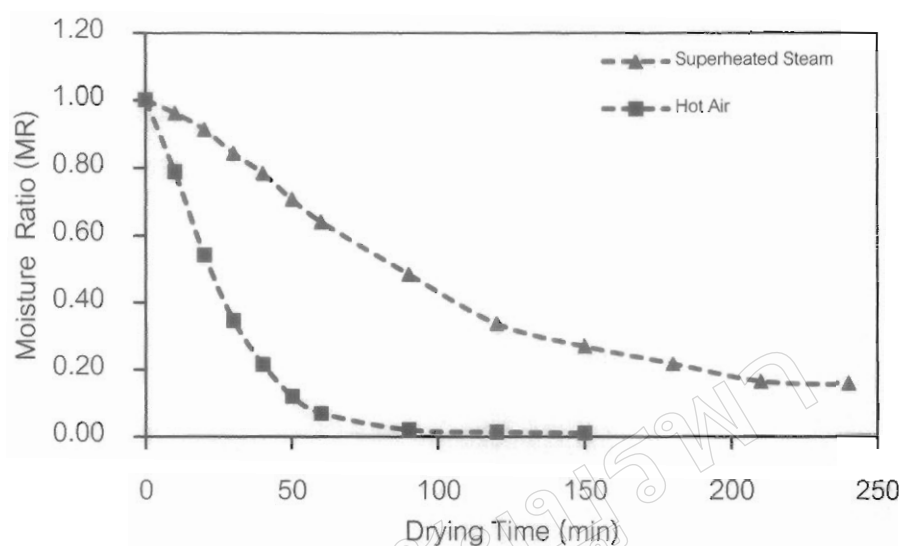
ภาพที่ 4-4 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ผลการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน

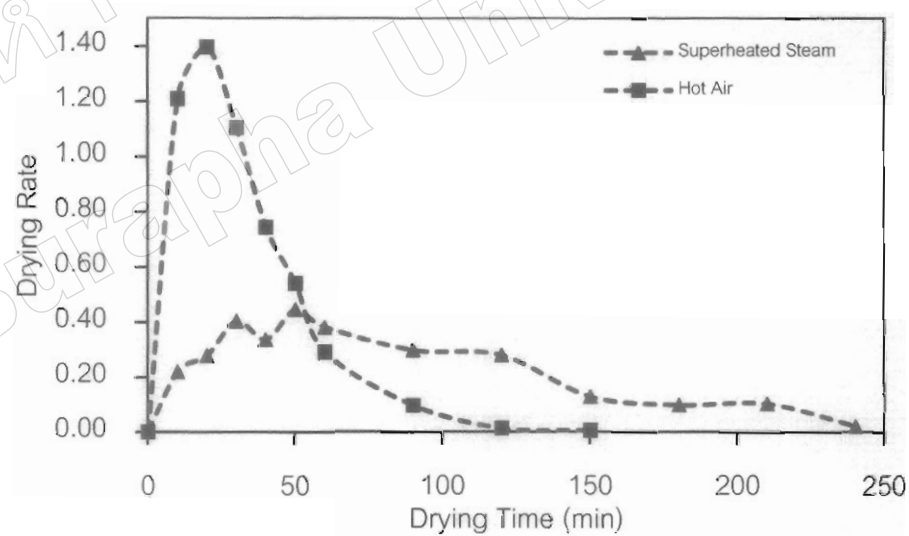
ผลของตัวกลางการถ่ายเทความร้อนต่ออัตราการอบแห้ง

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ดังแสดงในภาพที่ 4-5 ถึง 4-10 ตามลำดับ พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณผิวของพริกไทยในช่วงแรกของการอบแห้ง และในช่วงที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำนี้เอง ไอน้ำจะคายความร้อนให้กับพริกไทย ทำให้อุณหภูมิของพริกไทยสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่จุดเดือดของน้ำอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างช้า ๆ หลังจากนั้นอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าเดิมอย่างเห็นได้ชัด จนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นคงที่ ซึ่งจะต่างกับการอบแห้งอากาศร้อนที่อัตราส่วนความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง ทำให้ในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางไปยังพริกไทย เพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งจนกระทั่งพริกไทยมีความชื้นประมาณ 3 % (d.b.) ได้รวดเร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

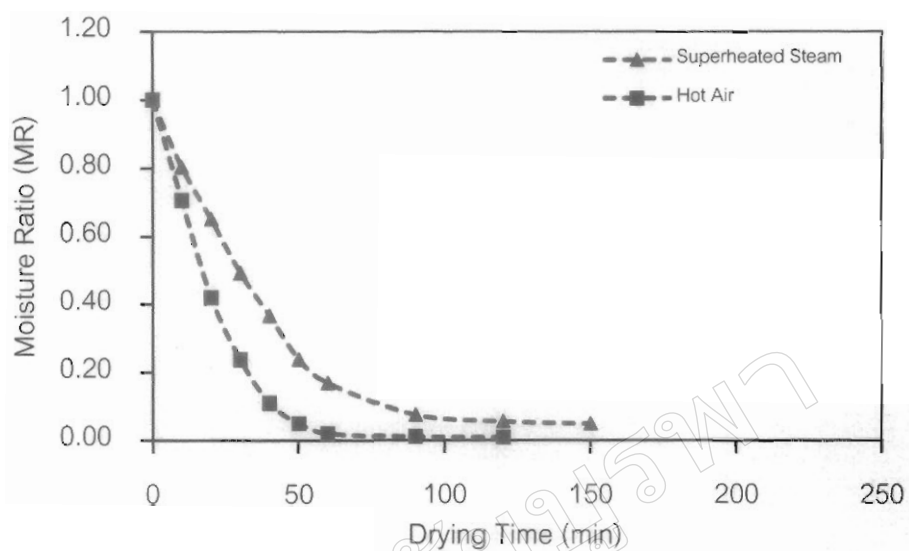
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง พบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณผิวของพริกไทยซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีการอบแห้งด้วยอากาศร้อน พบว่าไม่เกิดการควบแน่นที่ผิวของพริกไทย จึงทำให้ในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง นอกจากนี้การควบแน่นที่เกิดขึ้นในกรณีที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้น ยังทำให้ความชื้นและอุณหภูมิของพริกไทยสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยพบว่าความแตกต่างของอัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ทดลองยังไม่สูงพอที่จะทำให้อัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากันได้



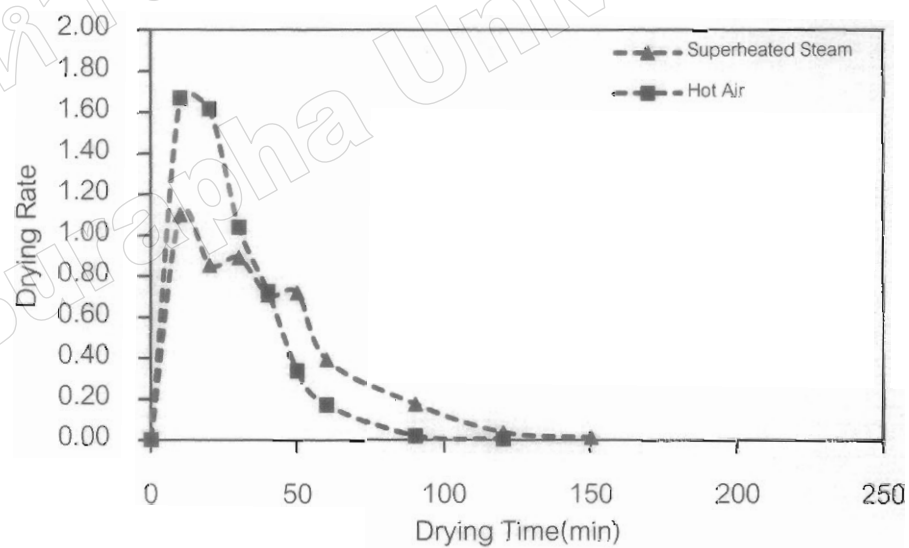
ภาพที่ 4-5 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C



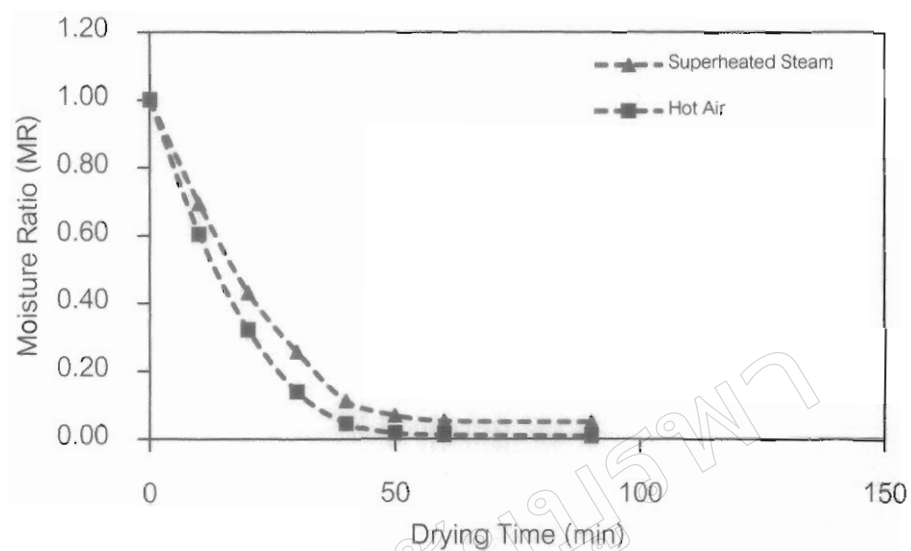
ภาพที่ 4-6 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C



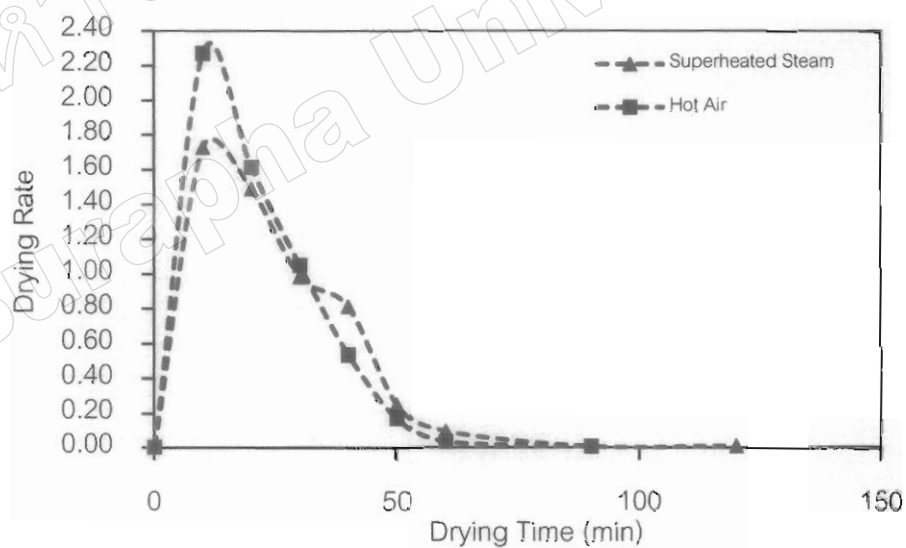
ภาพที่ 4-7 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C



ภาพที่ 4-8 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C



ภาพที่ 4-9 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C



ภาพที่ 4-10 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชิ้นบางพริกไทย

จากข้อมูลผลการทดลองการอบแห้งของพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามตารางที่ 3 – 1 โดยนำอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองการอบแห้งได้ โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) ของอัตราส่วนความชื้น (MR) ต่อเวลา (t) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งชิ้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนอุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะต้องพิจารณาจากค่า R^2 มาก แต่ให้ค่า %P RMSE และ χ^2 ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ค่าทางสถิติของแบบจำลองแสดงดังในตารางที่ 4 – 1 ถึง 4 – 7 โดยจากตารางจะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยพบว่าแบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C โดยให้ค่า R^2 มาก ในขณะที่ %P RMSE และ χ^2 น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ โดยมีค่า R^2 %P RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999420 1.755724 0.007363 และ 0.000078 ตามลำดับ ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้สามารถเปรียบเทียบผลการทำนายและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140°C แบบจำลอง Midilli et al. โดยมีค่า R^2 %P RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.998441 3.834235 0.012619 และ 0.000265 ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 160°C แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยมีค่า R^2 %P RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.998880 6.543980 0.010981 และ 0.000241 ตามลำดับ

ส่วนแบบจำลองการอบแห้งแบบอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยพบว่าแบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C โดยให้ค่า R^2 มาก ในขณะที่ %P RMSE และ χ^2 น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ โดยมีค่า R^2 %P RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999900 7.851460 0.003460 และ 0.000020 ตามลำดับ ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้สามารถเปรียบเทียบผลการทำนายและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140°C แบบจำลอง Midilli et al. โดยมีค่า R^2 %P RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999780 13.282331 0.005070 และ 0.000046 ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 160°C แบบจำลอง Page

จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยมีค่า R^2 %P RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999380 24.082112 0.000096 และ 0.000096 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

ตารางที่ 4-1 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งซึ่งบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนโดยตรงที่อุณหภูมิ 120°C

แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง	R ²	P (%)	RMSE	χ^2
Newton	$k=0.007905$	0.985910	6.791338	0.036206	0.001420
Page	$k=0.003483, n=1.176526$	0.995306	5.408938	0.020882	0.000515
Henderson and Pabis	$k=0.008546, a=1.054168$	0.992913	24.370351	0.025682	0.000779
Logarithmic	$k=0.007907, a=1.087377, c=-0.039981$	0.993291	4.818236	0.024992	0.000812
Modified Page	$k=0.088910, n=0.088910$	0.985910	6.791813	0.036206	0.001549
Two Term	$k_0=0.008546, k_1=0.008546, a=0.527090, b=0.527090$	0.993291	4.818236	0.024992	0.000812
Two Term Exponential	$k=1.590808, a=0.004911$	0.984560	7.122595	0.037888	0.001697
Wang and Singh	$a=-0.006799, b=0.000013$	0.993929	3.683676	0.023750	0.000667
Approximation of diffusion	$k=0.083235, a=-0.123581, b=0.111567$	0.997881	3.515893	0.014032	0.000256
Midilli et al.	$k=0.002143, n=1.323677, a=1.004734, b=0.000448$	0.999420	1.755724	0.007363	0.000078
Verma et al.	$k=0.009478, n=1.281682, a=0.990072, b=0.000310$	0.998441	3.834235	0.012619	0.000265
Modified Henderson and Pabis	$k=0.008545, a=0.339063, b=0.351253, c=0.363843, g=0.008545, h=0.008546$	0.992913	4.851531	0.025682	0.001225

ตารางที่ 4 – 2 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งซึ่งแบ่งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนจนถึงที่อุณหภูมิ 140°C

แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง	R ²	P (%)	RMSE	χ ²
Newton	k 0.025465	0.990542	16.936842	0.031097	0.001074
Page	k -0.013307, n -1.178173	0.995585	18.173595	0.021268	0.000565
Henderson and Pabis	k=0.026330, a=1.029873	0.991817	16.890191	0.028906	0.001044
Logarithmic	k 0.026279, a=-1.030518, c=-0.000838	0.991837	17.067128	0.028904	0.001194
Modified Page	k=0.159577, n=0.159577	0.990542	16.936842	0.031097	0.001209
Two Term	k ₁ -0.026330 k ₂ =0.026330 a=0.514936 b=0.514936	0.991817	16.890190	0.028906	0.001393
Two Term Exponential	k=2.589104, a=-0.009641	0.989607	17.015482	0.032598	0.001328
Wang and Singh	a -0.018525, b=0.000084	0.983548	37.955096	0.041007	0.002102
Approximation of diffusion	k-0.080113, a=-0.362614, b=0.405648	0.996064	16.389992	0.020054	0.000575
Midilli et al.	k= 0.009478, n=-1.281682, a-0.990072, b-0.000310	0.998441	3.834235	0.012619	0.000265
Verma et al.	k=0.025464, a-0.033639, g-0.025465	0.990542	16.936847	0.031097	0.001381
Modified Henderson and Pabis	k-0.026330, a=0.343291, b=0.343291, c=0.343290, g-0.026330, h=0.026330	0.991817	16.890190	0.028906	0.002089

ตารางที่ 4-3 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนจนถึงที่อุณหภูมิ 160°C

แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง	R ²	P (%)	RMSE	χ^2
Newton	k 0.044916	0.989508	25.550181	0.033704	0.001298
Page	k=0.021660, n=1.224332	0.996543	18.745741	0.019377	0.000501
Henderson and Pabis	k=0.046038, a=1.027035	0.990523	24.370351	0.032032	0.001026
Logarithmic	k=0.044564, a=1.0378217, c=-0.013255	0.990781	24.437362	0.031582	0.001596
Modified Page	k=0.211934, n=0.211934	0.989508	25.550214	0.033704	0.001515
Two Term	k ₀ =0.046038 k ₁ =0.046038 a=0.513517 b=0.513517	0.990523	24.370390	0.032032	0.002052
Two Term Exponential	k=8.416675, a=0.005297	0.989110	26.098568	0.034355	0.001574
Wang and Singh	a=-0.030517, b=0.000226	0.986704	36.189228	0.037960	0.001921
Approximation of diffusion	k=0.124583, a=-0.576602, b=0.482544	0.996723	18.084217	0.018850	0.000569
Midilli et al.	k=0.017270 n=1.310067 a=0.996813 b=0.000469	0.998880	6.543980	0.010981	0.000241
Verma et al.	k=0.044915, a=0.063543, g=0.044916	0.989508	25.550147	0.033704	0.001818
Modified Henderson and Pabis	k=0.046059, a=0.342319, b=0.342319, c=0.342319, g=0.046020, h=0.046020	0.990523	24.377939	0.032032	0.004104

ตารางที่ 4 – 4 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C

แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง	R ²	P (%)	RMSE	χ^2
Newton	k=0.035478	0.985870	32.431223	0.039865	0.001766
Page	k=0.011134, n=1.337779	0.999680	24.193563	0.005927	0.000044
Henderson and Pabis	k=0.037125, a=1.048169	0.988573	29.258024	0.035839	0.001606
Logarithmic	k=0.035199, a=1.067034, c=-0.023336	0.989766	56.072804	0.033901	0.001642
Modified Page	k=0.188356, n=0.188356	0.985870	32.431359	0.039865	0.001987
Two Term	k ₀ =0.037126, k ₁ =0.037093, a=0.524054, b=0.524054	0.988573	29.281662	0.035839	0.002141
Two Term Exponential	k=4.606416, a=0.007614	0.984977	33.820730	0.041098	0.002111
Wang and Singh	a=-0.021927, b=0.000107	0.947352	259.879766	0.076925	0.007397
Approximation of diffusion	k=0.080089, a=-2.0311786, b=0.743688	0.999720	21.827440	0.005569	0.000044
Midilli et al.	k=0.010260, n=1.361285, a=0.999297, b=-0.000061	0.999900	7.851460	0.003460	0.000020
Verma et al.	k=0.077824, a=-2.889304, g=0.060920	0.999720	21.991449	0.005553	0.000044
Modified Henderson and Pabis	k=0.037126, a=0.34388, b=0.349388, c=0.349388, g=0.037125, h=0.037124	0.988573	29.258383	0.035839	0.003211

ตารางที่ 4 – 5 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งซึ่งแบ่งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C

แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง	R ²	P (%)	RMSE	χ ²
Newton	k=0.046803	0.987181	53.589908	0.038101	0.001633
Page	k=0.016204, n=1.327687	0.999720	24.971802	0.005612	0.000040
Henderson and Pabis	k=0.048319, a=1.037045	0.988792	49.597260	0.001631	0.001631
Logarithmic	k=0.044874, a=1.062577, c=-0.030860	0.990961	100.942639	0.031982	0.001534
Modified Page	k=0.216341, n=0.216341	0.987181	53.589964	0.001866	0.001866
Two Term	k ₁ =-0.048319, k ₂ =0.04839, a=0.518522, b=0.518522	0.988792	49.597245	0.002283	0.002283
Two Term Exponential	k=4.550342, a=0.010080	0.986208	57.390231	0.039524	0.002008
Wang and Singh	a=-0.027452, b=0.000166	0.948014	343.713135	0.076705	0.007565
Approximation of diffusion	k=-0.097563, a=-3.340442, b=0.810507	0.999580	26.571904	0.006895	0.000071
Midilli et al.	k=0.015764, n=1.337359, a=0.998585, b=0.000046	0.999780	13.282331	0.005070	0.000046
Verma et al.	k=0.046803, a=0.093043, g=0.046803	0.987181	53.589952	0.038101	0.002177
Modified Henderson and Pabis	k=0.048319, a=0.345682, b=0.345682, c=0.345682, g=0.048319, h=0.048319	0.988792	49.597284	0.035612	0.003805

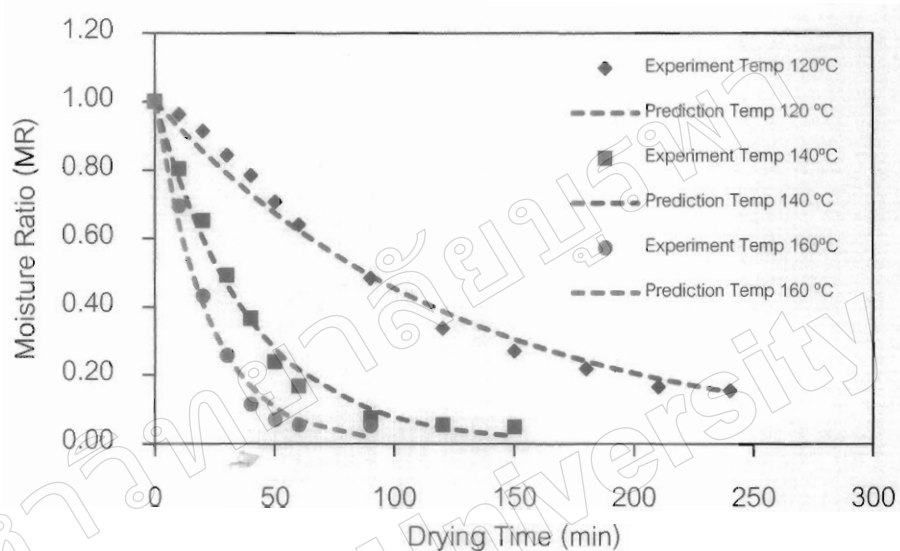
ตารางที่ 4 – 6 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งซึ่งแบ่งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C

แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง	R ²	P (%)	RMSE	χ^2
Newton	$k=0.059772$	0.991777	67.052558	0.030641	0.001073
Page	$k=0.026525, n=1.266551$	0.999380	24.082112	0.000096	0.000096
Henderson and Pabis	$k=0.060849, a=1.021860$	0.992375	64.473973	0.001162	0.001162
Logarithmic	$k=0.056018, a=1.048455, c=-0.031965$	0.994647	81.592563	0.000979	0.000979
Modified Page	$k=0.244483, n=0.244483$	0.991777	67.052592	0.001252	0.001252
Two Term	$k_0=0.060849, k_1=0.060849, a=0.510930, b=0.510930$	0.992375	64.474017	0.001744	0.001744
Two Term Exponential	$k=5.653096, a=0.010417$	0.991180	70.043957	0.001342	0.001342
Wang and Singh	$a=0.034329, b=0.000266$	0.954646	275.841776	0.071985	0.006909
Approximation of diffusion	$k=0.113799, a=-3.742107, b=0.846417$	0.999260	24.233533	0.000136	0.000136
Midilli et al.	$k=0.026068, n=1.272299, a=0.998021, b=0.000019$	0.999380	20.957308	0.000142	0.000142
Verma et al.	$k=0.059772, a=0.104035, g=0.059772$	0.991777	67.052495	0.030641	0.001502
Modified Henderson and Pabis	$k=0.060849, a=0.340620, b=0.340620, c=0.340620, g=0.060849, h=0.060849$	0.992375	64.474043	0.029526	0.003487

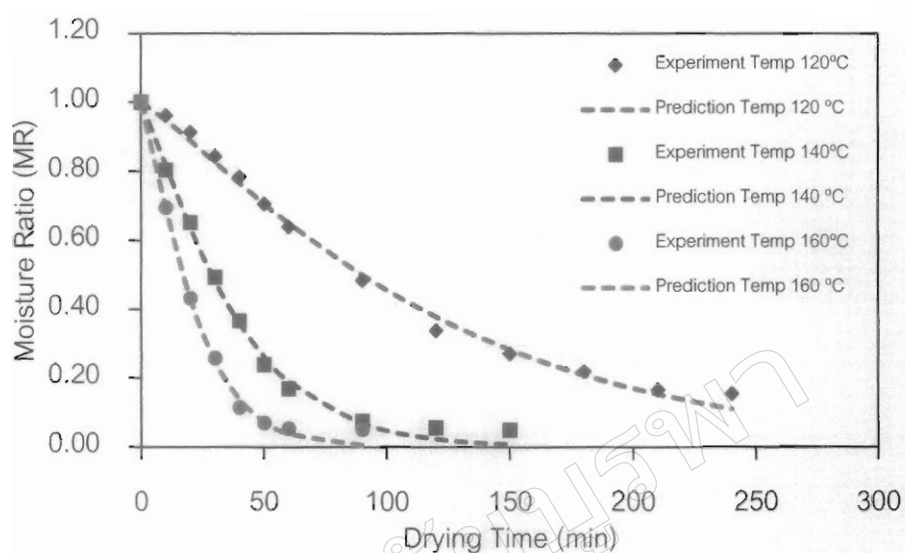
ตารางที่ 4 – 7 ค่าทางสถิติของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Drying Medium	อุณหภูมิ (°C)	แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด	R ²	%P	RMSE	χ^2
Superheated Steam	120	Midilli et al.	0.999420	1 / 55724	0.007363	0.000078
	140	Midilli et al.	0.998441	3.834235	0.012619	0.000265
	160	Midilli et al.	0.998880	6.543980	0.010981	0.000241
Hot Air	120	Midilli et al.	0.999900	7.851460	0.003460	0.000020
	140	Midilli et al.	0.999780	13.282331	0.005070	0.000046
	160	Page	0.999380	24.082112	0.000096	0.000096

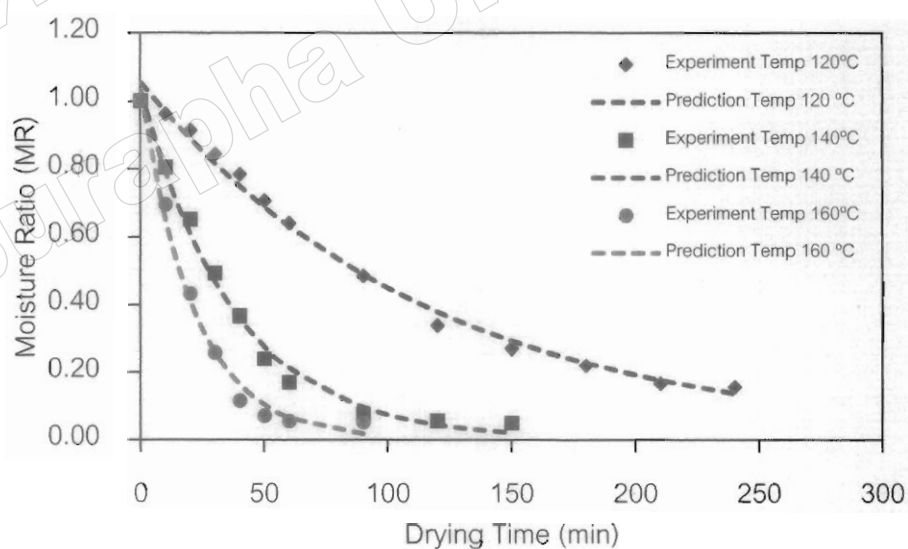
จากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดง ภาพที่ 4 – 11 ถึง 4 – 34 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด โดยค่าอัตราส่วน ความชื้นที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขการอบแห้ง



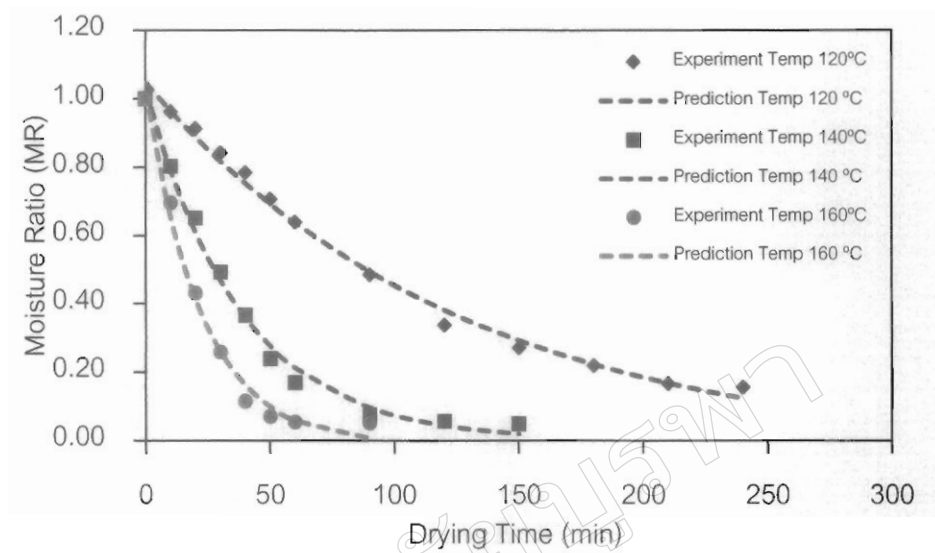
ภาพที่ 4 – 11 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Newton สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



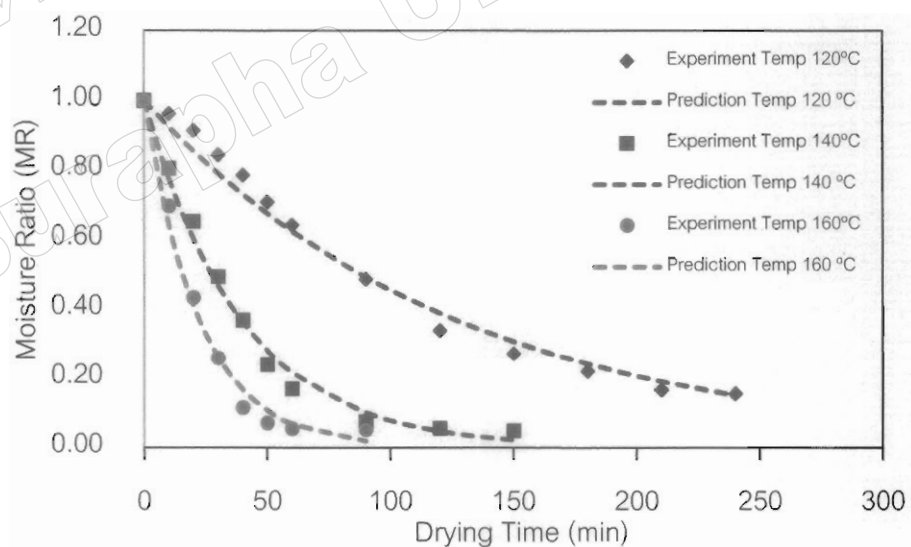
ภาพที่ 4 – 12 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Page สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



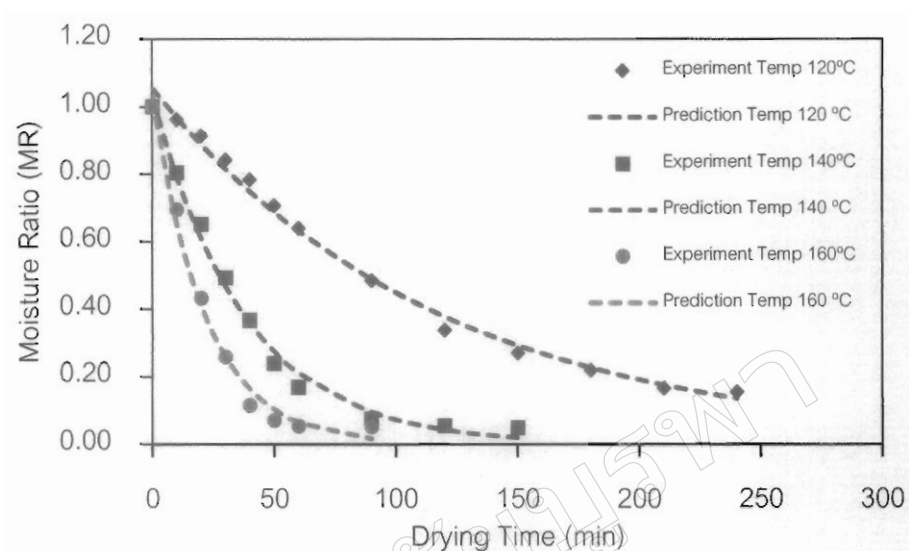
ภาพที่ 4 – 13 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



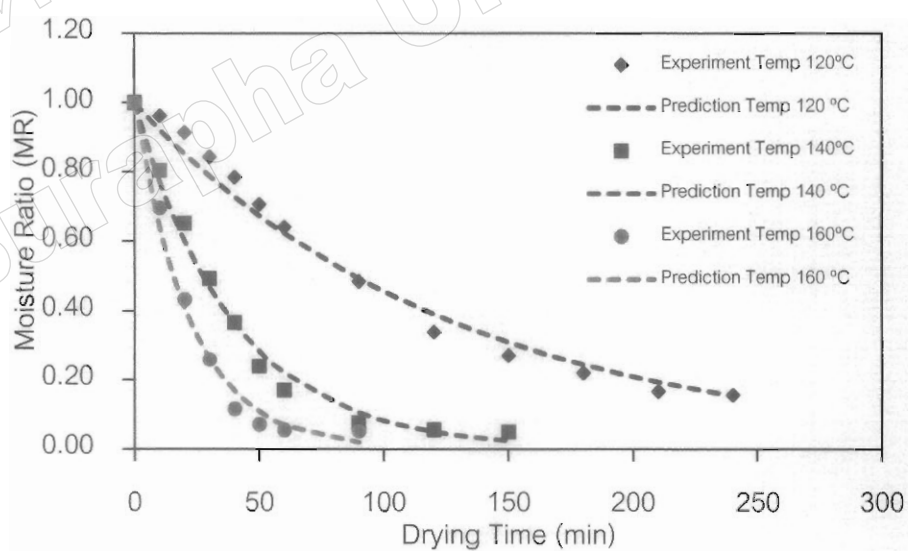
ภาพที่ 4 – 14 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



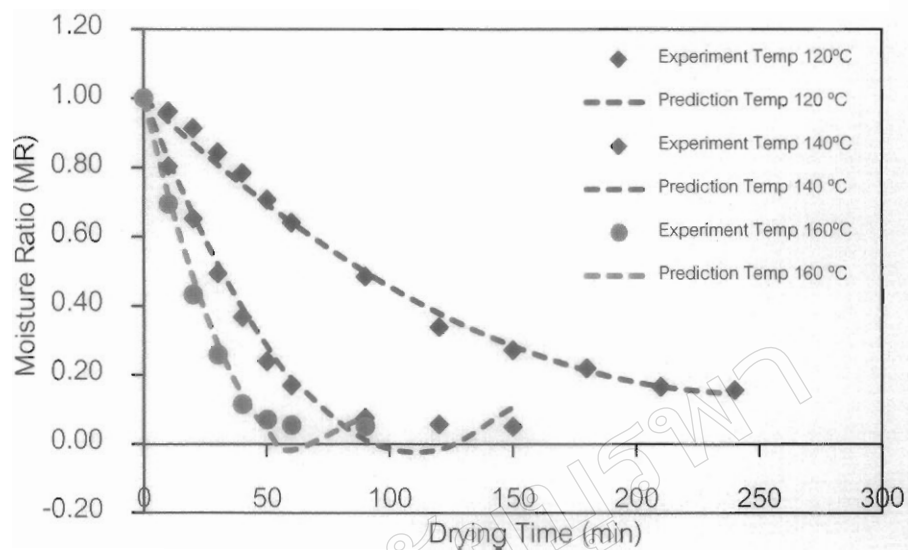
ภาพที่ 4 – 15 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Page สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



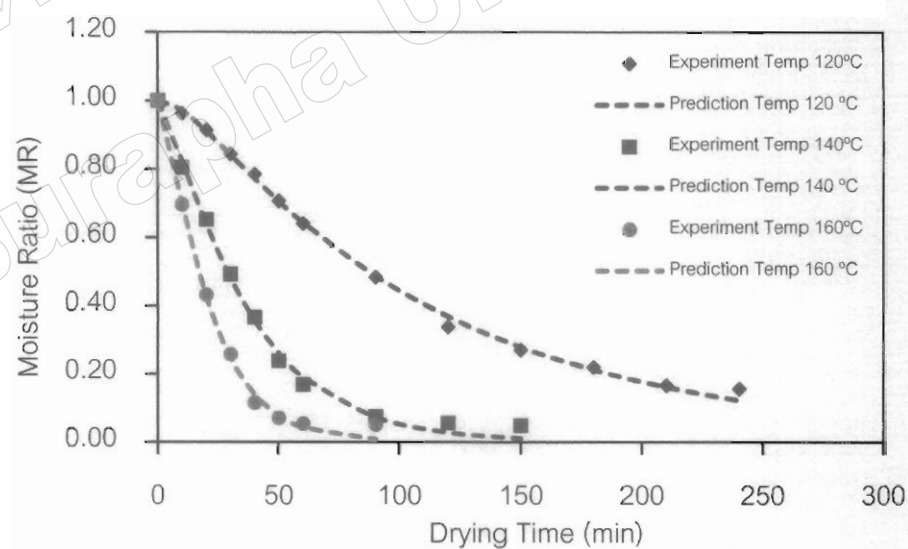
ภาพที่ 4 – 16 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two Term สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



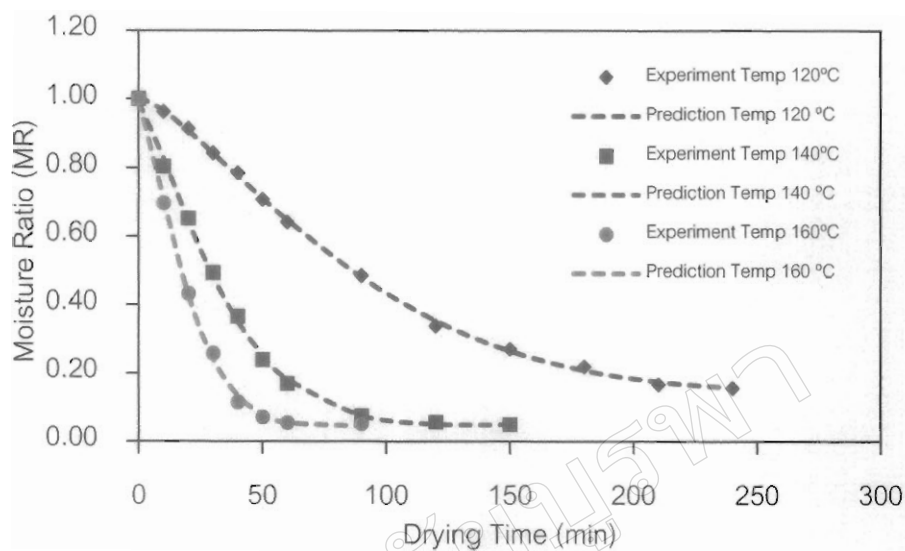
ภาพที่ 4 – 17 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two Term Exponential สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



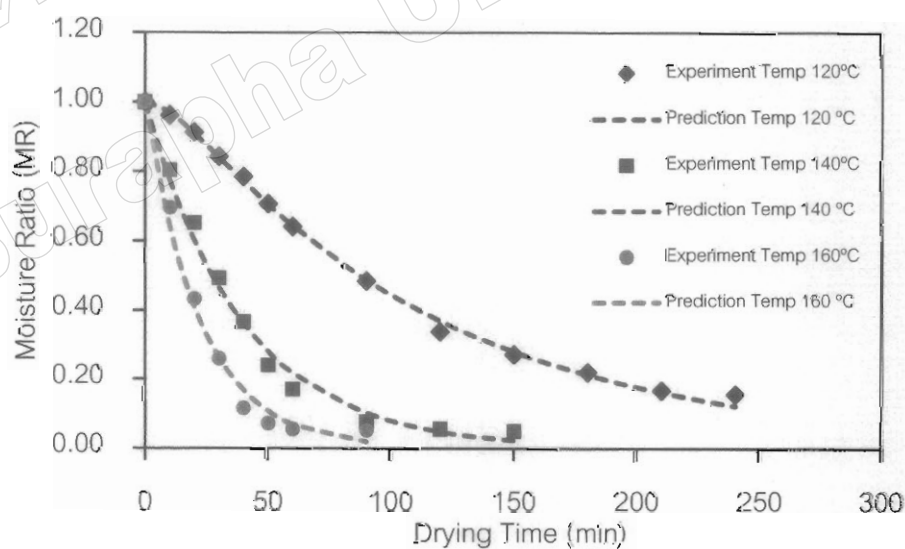
ภาพที่ 4 - 18 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Wang and Singh สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



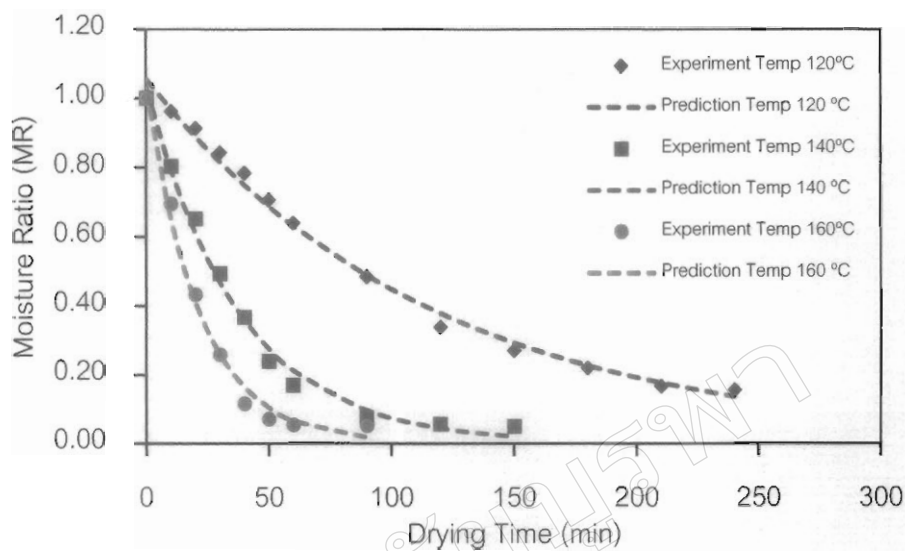
ภาพที่ 4 - 19 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Approximation of diffusion สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



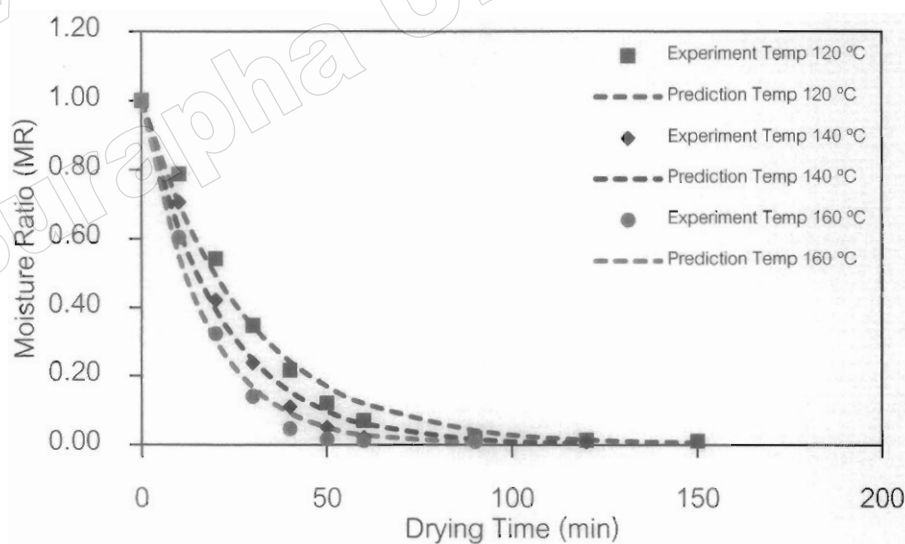
ภาพที่ 4 – 20 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



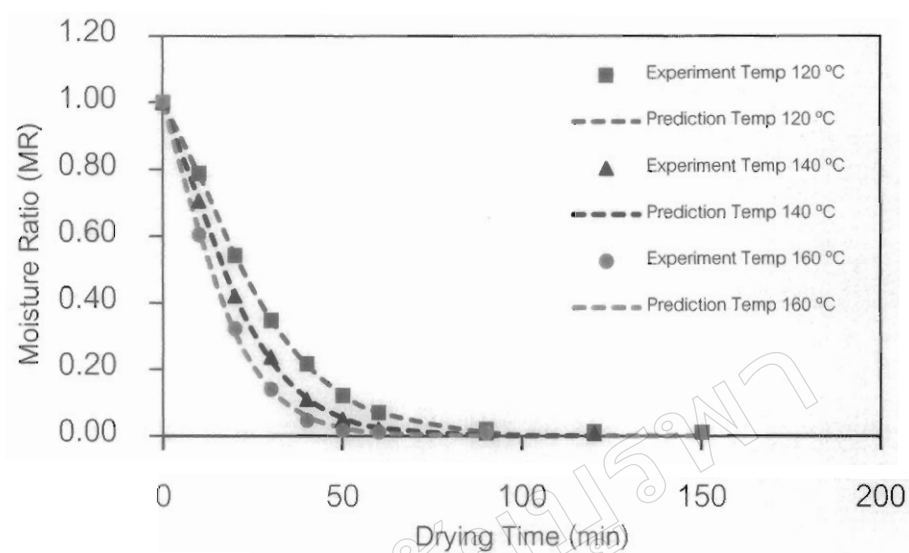
ภาพที่ 4 – 21 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Verma et al. สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



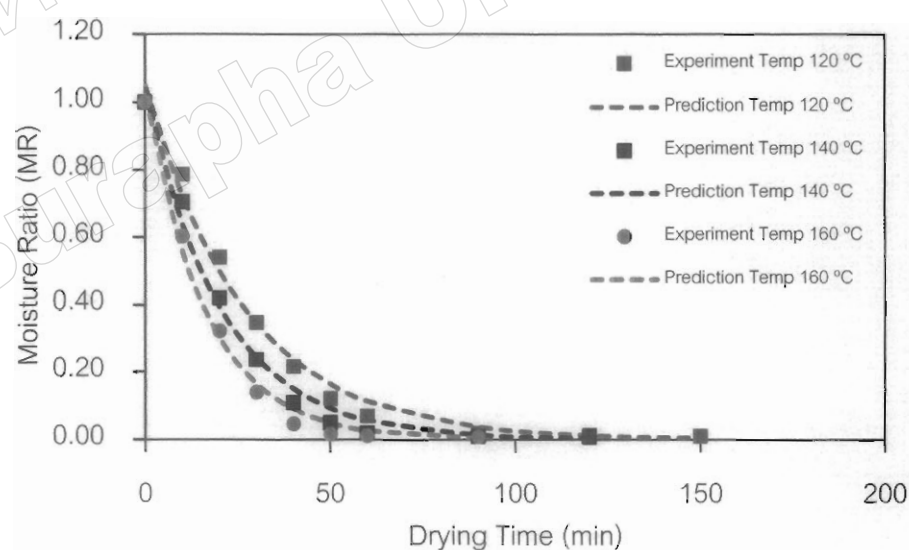
ภาพที่ 4 – 22 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



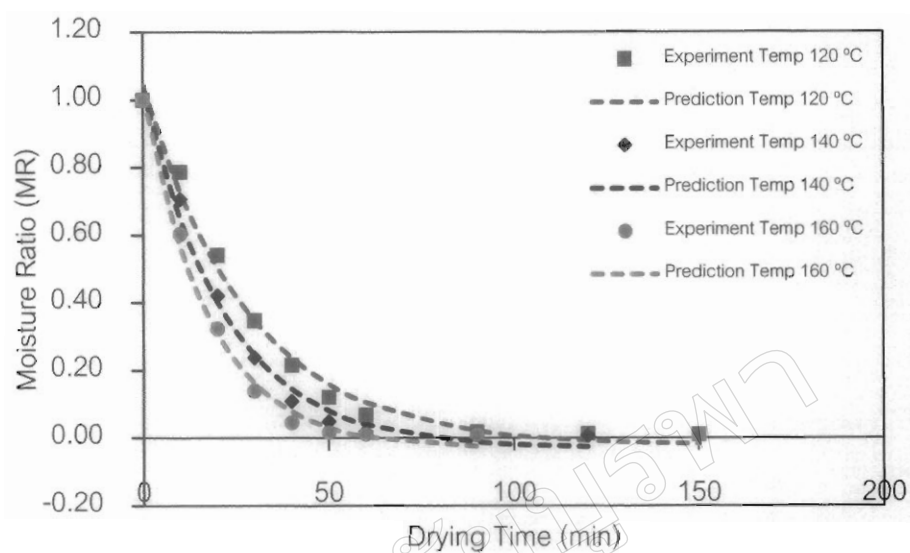
ภาพที่ 4 – 23 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Newton สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



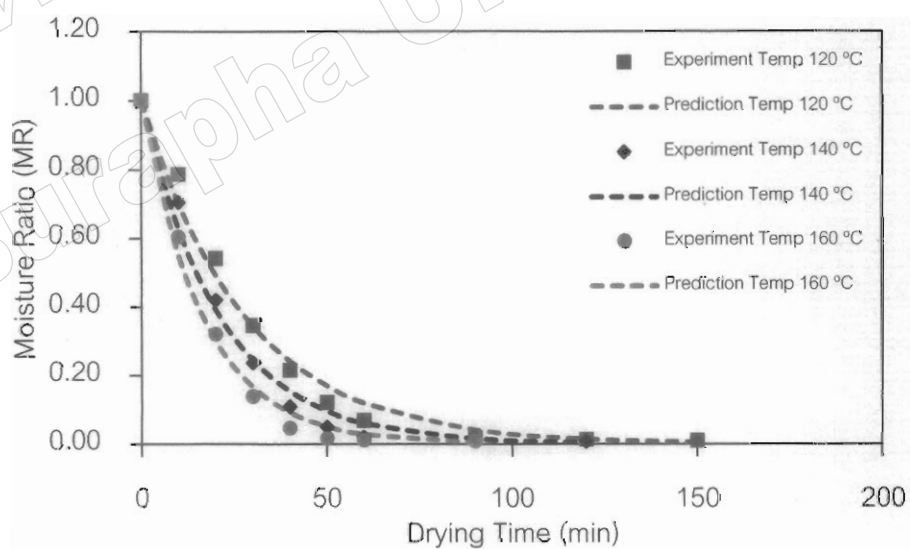
ภาพที่ 4 - 24 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Page สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



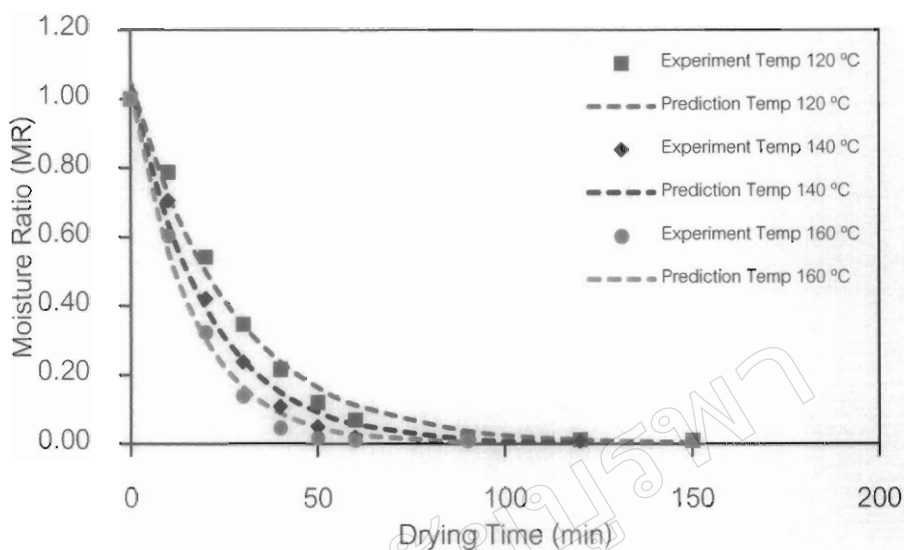
ภาพที่ 4 - 25 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



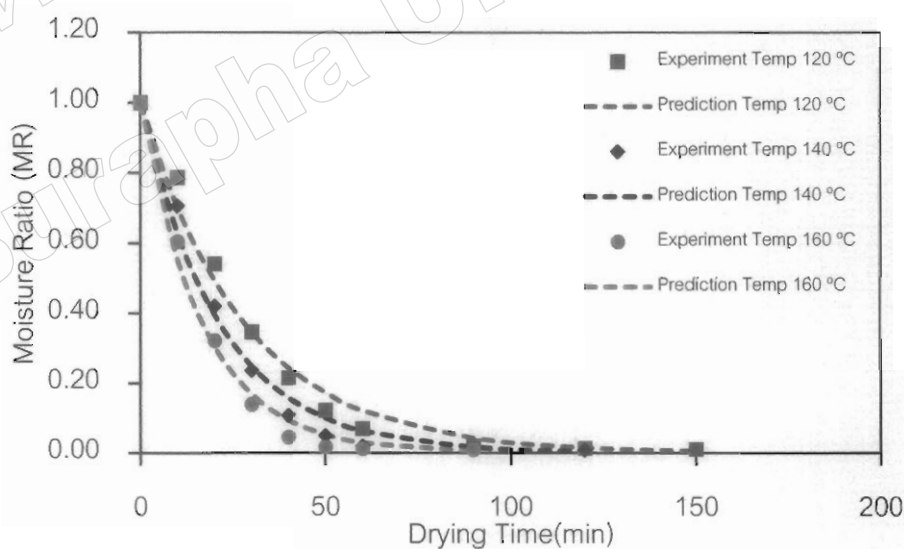
ภาพที่ 4 – 26 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



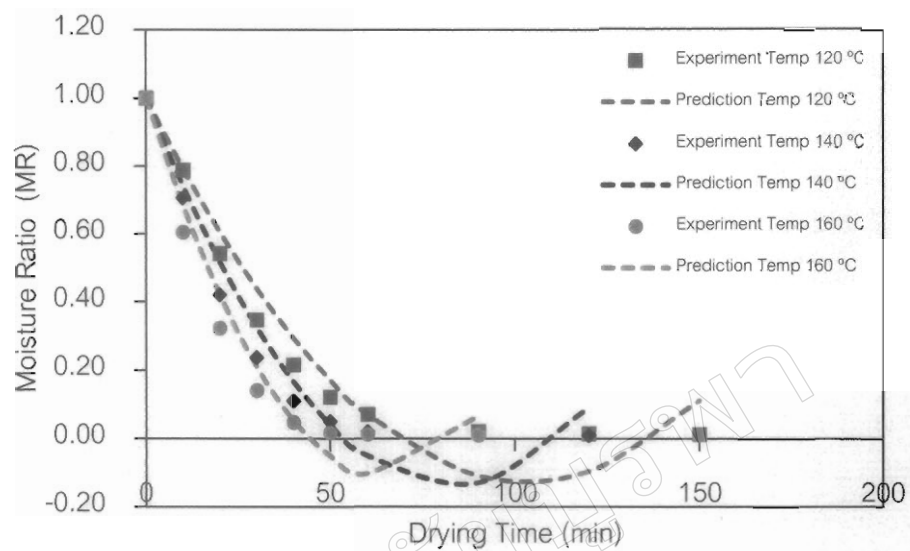
ภาพที่ 4 – 27 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Page สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



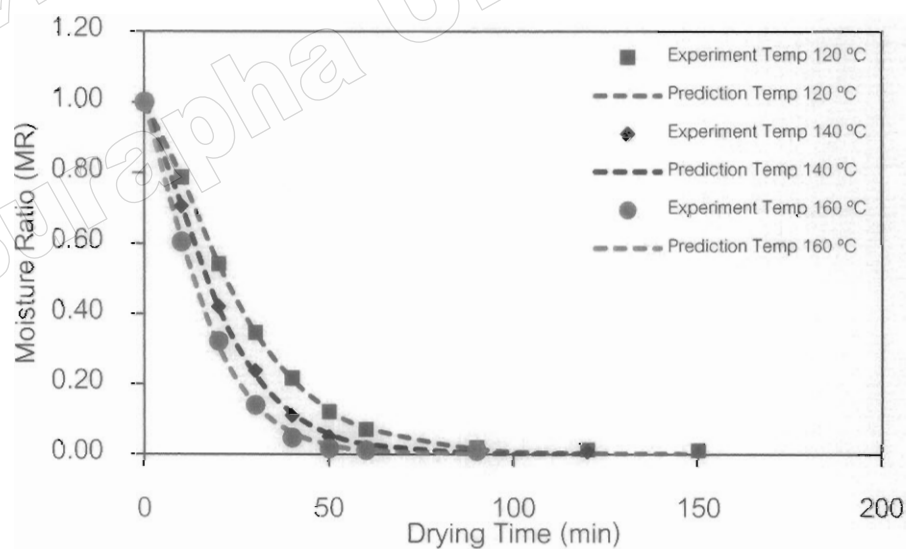
ภาพที่ 4 – 28 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Three Term สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



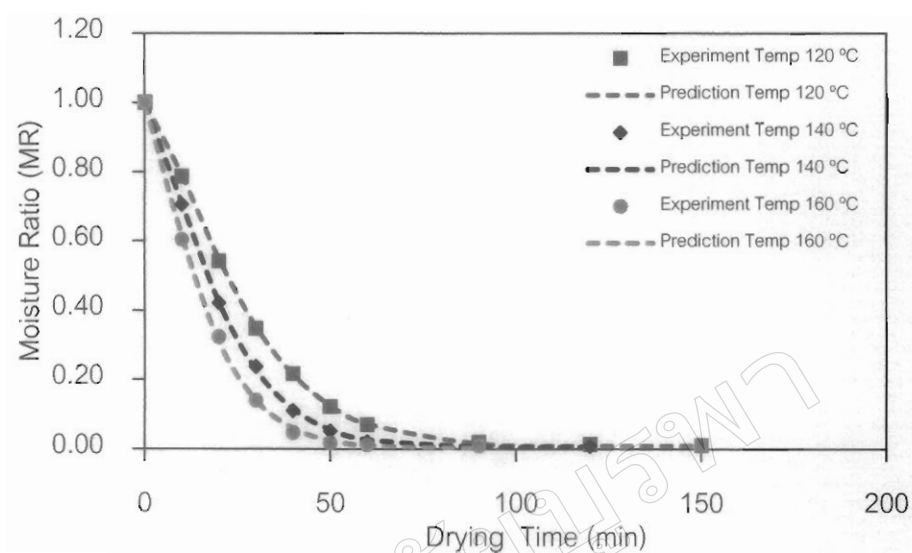
ภาพที่ 4 – 29 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two Term Exponential สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



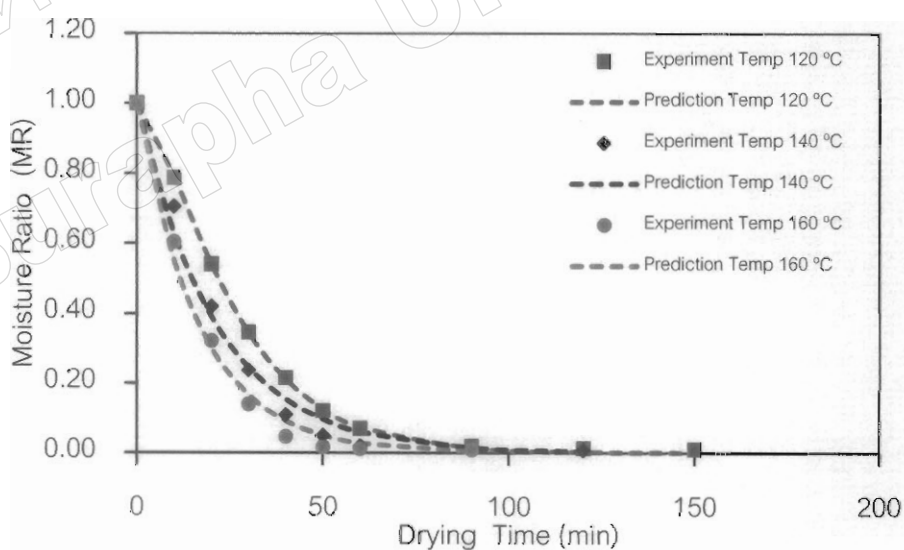
ภาพที่ 4 – 30 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Wang and Singh สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



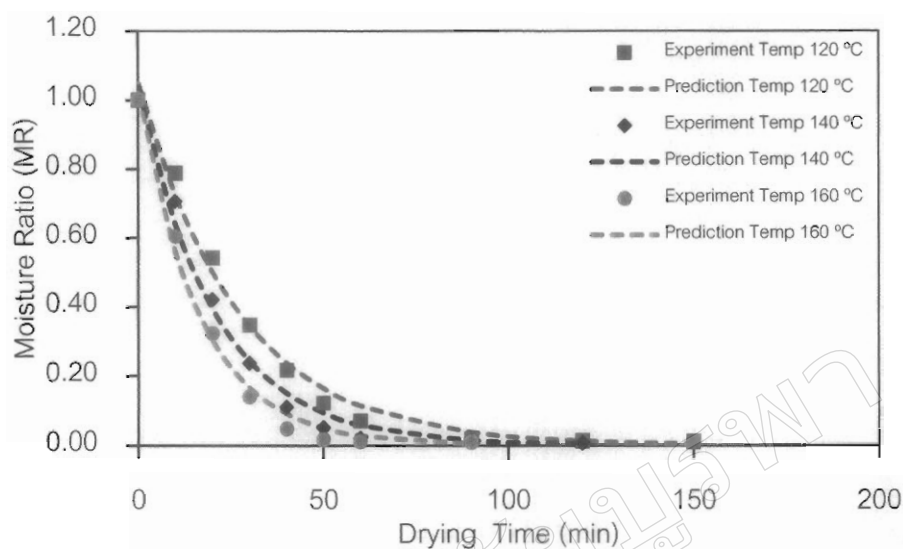
ภาพที่ 4 – 31 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Approximation of diffusion สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



ภาพที่ 4 - 32 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



ภาพที่ 4 - 33 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Verma et al. สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C



ภาพที่ 4 – 34 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160 °C

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

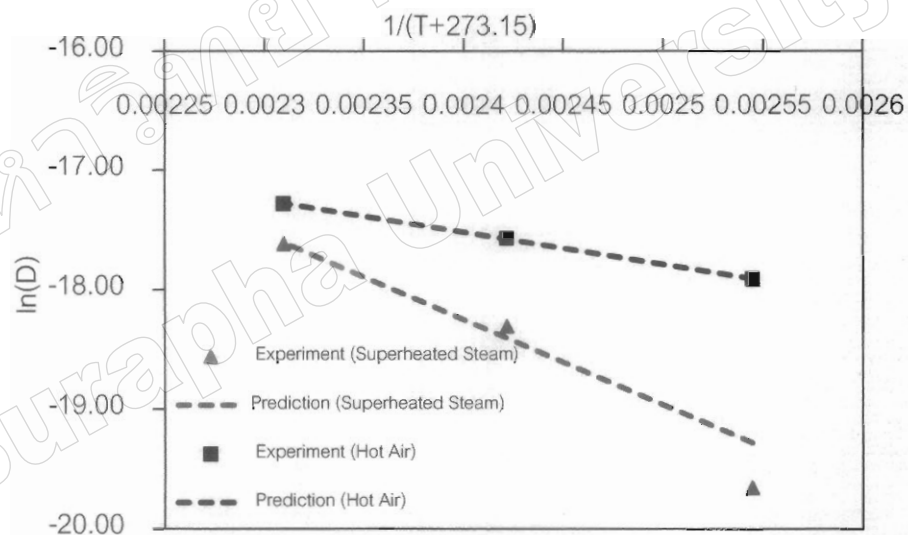
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160 °C ดังแสดงในภาพที่ 4-1 ถึง 4-4 ตามลำดับ สามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-8 โดยพิจารณาจากสมการกรณีการแพร่ความชื้นในวัสดุแบบทรงกลม (Sphere) ดังสมการที่ 2-6 และจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล สำหรับที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิโดยใช้รูปแบบของ Arrhenius ดังสมการที่ 2-7 จะได้ค่า D_0 และ E_a ดังแสดงในตารางที่ 4-9

ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนจากตารางที่ 4-8 เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น

ความชื้นสามารถแพร่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่ามากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเล็กน้อย สำหรับทุกอุณหภูมิการอบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อัตราส่วนความชื้นในช่วงแรกของการอบแห้งจะลดลงเร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แต่เมื่อเวลาผ่านไปการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนจะมีอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกัน จึงเป็นเหตุให้การอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 4 – 35

นอกจากนี้จากภาพที่ 4 – 35 พบว่า สมการของ Arrhenius สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี ทั้งกรณีที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน



ภาพที่ 4 – 35 ผลการเปรียบเทียบค่า $\ln(D)$ กับ $1/(T+273.15)$ ของการอบแห้งพริกไทย

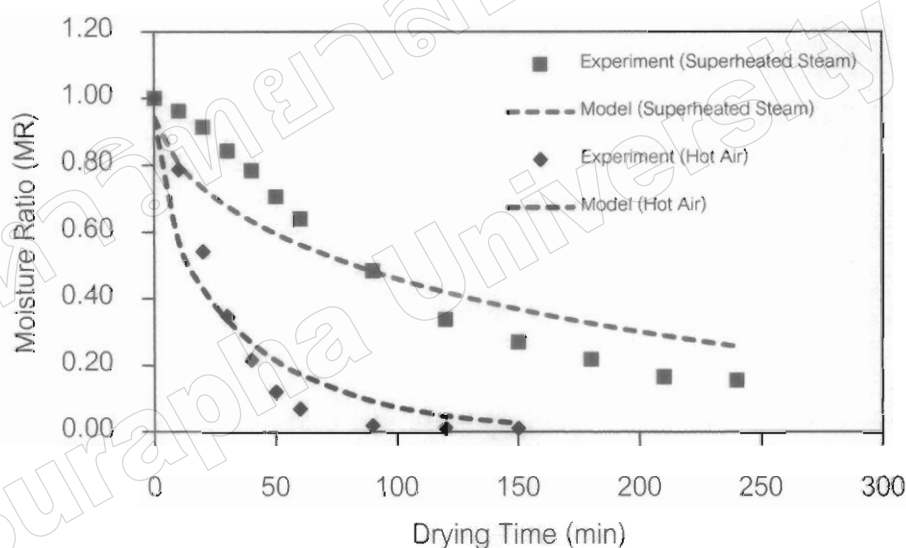
ตารางที่ 4 – 8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนที่ประสิทธิภาพของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวกลางอบแห้ง	อุณหภูมิ (°C)	D_{eff} (m ² /min)	R^2	P (%)	RMSE	χ^2
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	120	2.897500×10^{-9}	0.848130	27.636475	0.118852	0.015303
	140	1.120800×10^{-8}	0.920045	42.567287	0.090438	0.009088
	160	2.228960×10^{-8}	0.933156	44.464635	0.085105	0.008278
อากาศร้อน	120	1.664960×10^{-8}	0.917783	111.836814	0.096126	0.010267
	140	2.337952×10^{-8}	0.929797	138.015874	0.089137	0.008939
	160	3.127300×10^{-8}	0.949455	147.835819	0.075986	0.006599

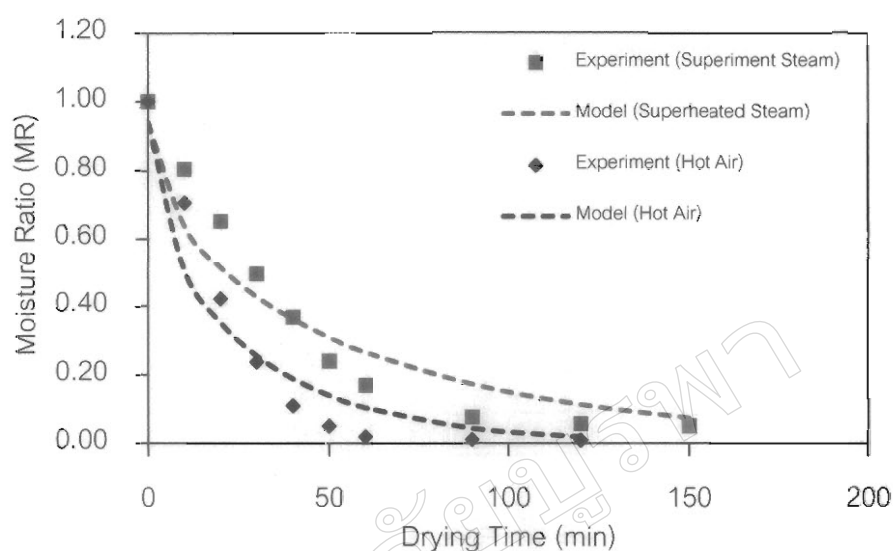
ตารางที่ 4 – 9 ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนที่ประสิทธิภาพของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวกลางอบแห้ง	D_{eff} (m ² /min)	E_a (kJ/kg)	R^2
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	0.312948	59209.87	0.985255
อากาศร้อน	1.552023×10^{-5}	22334.33	0.999700

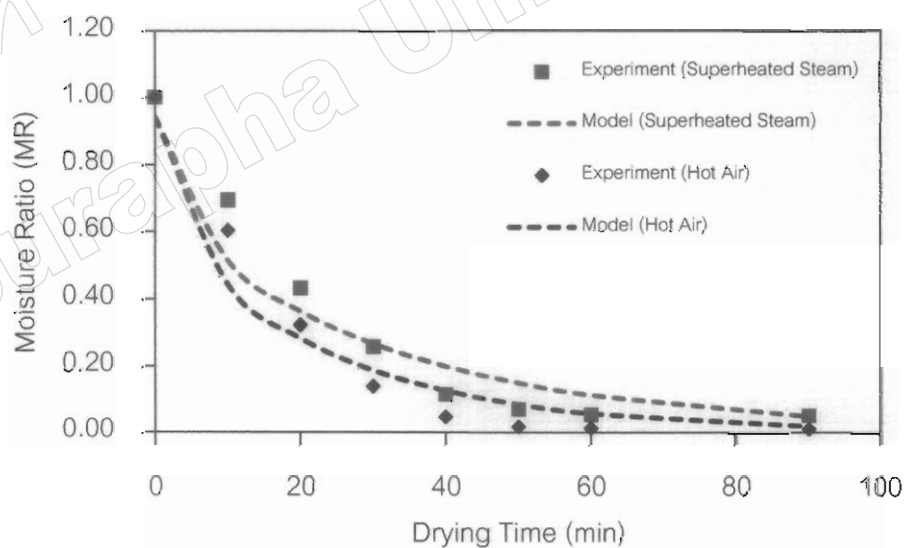
เมื่อนำค่าคงที่ตามตารางที่ 4-9 แทนค่าในสมการที่ 2-7 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทย สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-8 จากนั้นแทนค่าในสมการที่ 2-6 เพื่อหาค่าความชื้นที่เวลาใด ๆ สำหรับการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนอุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4-36 ถึง 4-38 ตามลำดับ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนให้ผลการทำนายถูกต้องมากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลาได้สอดคล้องกับผลการทดลอง



ภาพที่ 4-36 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน 120°C



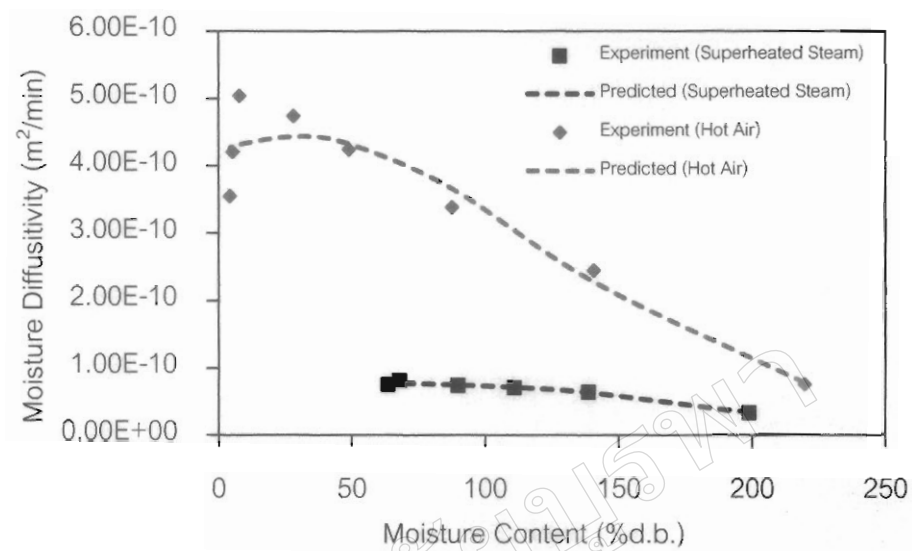
ภาพที่ 4 - 37 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน 140°C



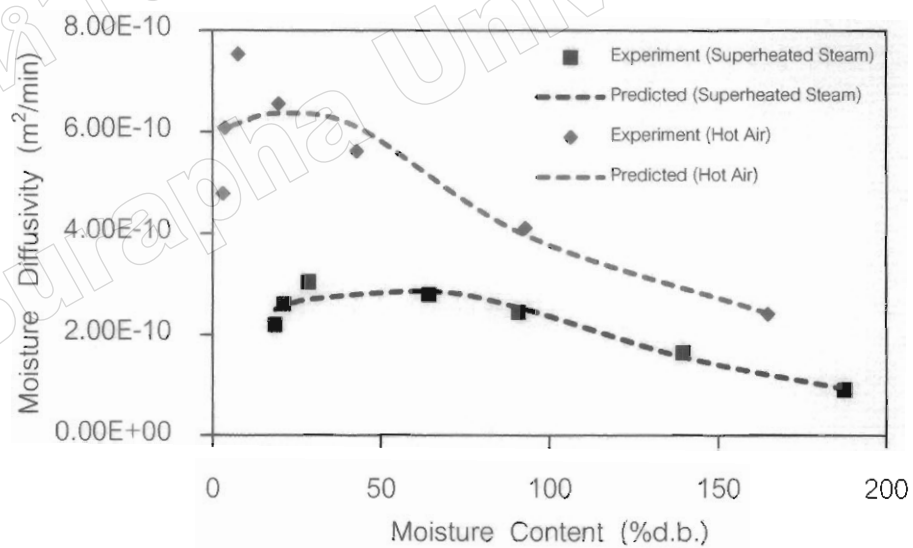
ภาพที่ 4 - 38 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน 160°C

ผลของความชื้นพริกไทยที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

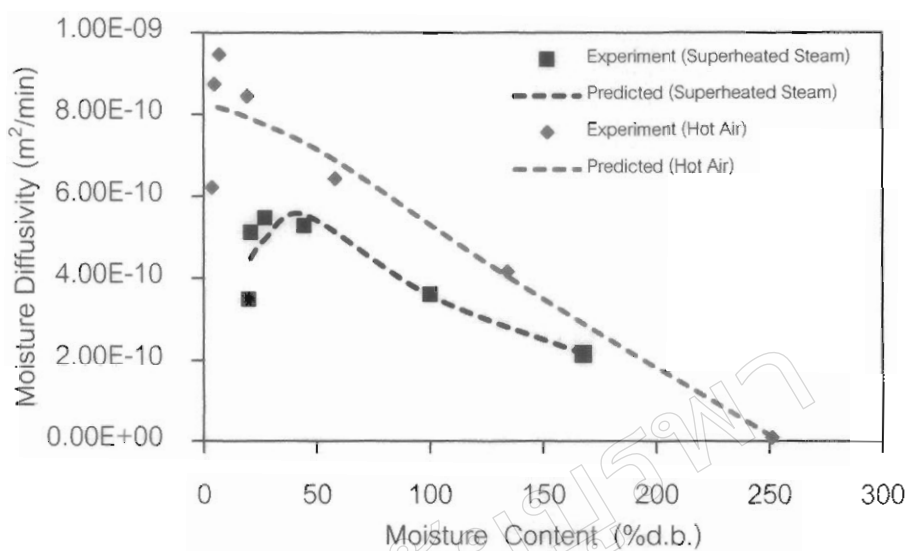
จากการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160 °C สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ความชื้นและเวลาอบแห้งต่าง ๆ จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ขึ้นกับความชื้นของพริกไทยในรูปของสมการกำลังสองได้จากสมการที่ 3 – 16 และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและความชื้นของพริกไทยแสดงภาพที่ 4 – 39 ถึง 4 – 41 จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่ามากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สำหรับทุก ๆ อุณหภูมิในการอบแห้ง การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยสูงขึ้น และเมื่อความชื้นลดลงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้นด้วย ดังตารางภาคผนวก ข – 7 ถึง ข – 9 โดยการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง $3.3016 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{min}$ ถึง $8.1081 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{min}$ และการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง $7.5823 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{min}$ ถึง $50.3521 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{min}$ การอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140 °C ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง $0.9120 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{min}$ ถึง $3.0424 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{min}$ และการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง $2.4107 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{min}$ ถึง $7.5370 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{min}$ และการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160 °C ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง $2.1589 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{min}$ ถึง $5.4706 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{min}$ และการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง $0.0890 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{min}$ ถึง $9.4600 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{min}$ ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 39 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C



ภาพที่ 4 - 40 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C



ภาพที่ 4-41 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C

เมื่อทำการวิเคราะห์การถดถอยของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับความชื้นของพริกไทยตามสมการที่ 3-16 จะได้ค่าคงที่ a, b, c และ d และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และจากภาพที่ 4-39 ถึง 4-41 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่ได้จากสมการมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4 – 10 ค่าคงที่ของสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของพริกไทย

ตัวกลางอบแห้ง	อุณหภูมิ (°C)	a	b	c	d	R ²
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	120	$-5.344753 \times 10^{-18}$	$-2.243489 \times 10^{-16}$	3.071080×10^{-14}	7.784918×10^{-11}	0.983072
	140	1.431185×10^{-16}	$-5.272051 \times 10^{-14}$	4.363851×10^{-12}	1.852888×10^{-10}	0.929605
	160	7.751196×10^{-16}	$-2.297969 \times 10^{-13}$	1.689511×10^{-11}	1.906308×10^{-10}	0.816023
อากาศร้อน	120	8.896796×10^{-17}	$-3.445324 \times 10^{-14}$	1.719220×10^{-12}	4.202481×10^{-10}	0.907733
	140	4.137766×10^{-16}	$-1.069068 \times 10^{-13}$	4.272111×10^{-12}	5.904366×10^{-10}	0.786875
	160	4.782195×10^{-17}	$-1.925866 \times 10^{-14}$	$-1.429193 \times 10^{-12}$	8.262080×10^{-10}	0.898154

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิของการอบแห้งที่มีผลต่อจุลณพลศาสตร์การอบแห้ง แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม และศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทย โดยมีเงื่อนไขการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน 120 140 และ 160°C ความเร็วของตัวกลาง 1 m/s น้ำหนักของพริกไทย 71 g สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากผลการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของพริกไทยได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน พบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และทำให้การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

2 จากผลการทดลองการอบแห้งของพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนอุณหภูมิ 120 140 และ 160°C จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยแบบจำลองที่ทำนายการอบแห้งพริกไทยดีที่สุดจะต้องให้ค่า R' สูงกว่า ซึ่งพบว่าแบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C โดยให้ค่า R^2 มาก ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยพบว่าแบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 และ 140°C โดยให้ค่า R^2 มาก ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 160°C แบบจำลอง Page จะให้ผลการทำนายดีที่สุด

3. จากผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกไทย เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยมีค่ามากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่ามากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเล็กน้อย สำหรับทุกอุณหภูมิการอบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อัตราส่วนความชื้นในช่วงแรกของการอบแห้งจะลดลงเร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แต่เมื่อเวลาผ่านไป การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนจะมีอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกัน จึงเป็นเหตุให้การอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

4. จากการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ความชื้นและเวลาในการอบแห้งต่าง ๆ พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่ามากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สำหรับทุกอุณหภูมิในการอบแห้ง การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยสูงขึ้น และเมื่อความชื้นลดลงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้นด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการปรับปรุงเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องนำผลิตภัณฑ์เข้า – ออกจากห้องอบแห้งบ่อย ๆ เพื่อแก้ปัญหาอากาศเข้าสู่ระบบและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ลดลงทำให้การอบแห้งช้าลง

2. ควรมีการศึกษาคุณภาพสีของพริกไทยที่ได้จากการทดลอง เพื่อทำการเปรียบเทียบพริกไทยที่ได้จากการทดลองและพริกไทยดำในท้องตลาด

3. ควรใช้พริกไทยที่มาจากแหล่งเดียวกัน และควรเลือกพริกไทยที่มีผลแก่จัดสำหรับใช้ในการทดลอง

4. ควรทำการทดลองที่ความเร็วลมที่แตกต่างกัน