

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

จากผลการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งผลการวิจัยเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. จลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยลมร้อน
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางพริกไทย
3. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทย

#### 1. จลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยด้วยลมร้อน

1.1 ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อการลดลงของความชื้นพริกไทย ที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าที่ระดับความเร็วลมเดียวกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้น โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่างกัน พบว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นและน้ำในพริกไทยเกิดการระเหยได้ดีขึ้น จากการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งมีผลทำให้อัตราการอบแห้งพริกไทยมีค่าเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4-1 ถึงภาพที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าเมื่ออบแห้งพริกไทยด้วยลมร้อน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที และใช้อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 189.00 83.07 และ 21.00 มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ โดยคิดเป็นอัตราส่วนความชื้น 0.565 0.267 และ 0.065 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-1 และพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งเป็น 60 และ 70 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการอบแห้งพริกไทยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส เพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 52.74 และ 88.50 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 172.91 73.00 และ 13.70 มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ โดยคิดเป็นอัตราส่วนความชื้น 0.569 0.231 และ 0.041 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-2 และพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งเป็น 60 และ 70 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการอบแห้งพริกไทยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส เพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 59.40 และ 92.79 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วลม

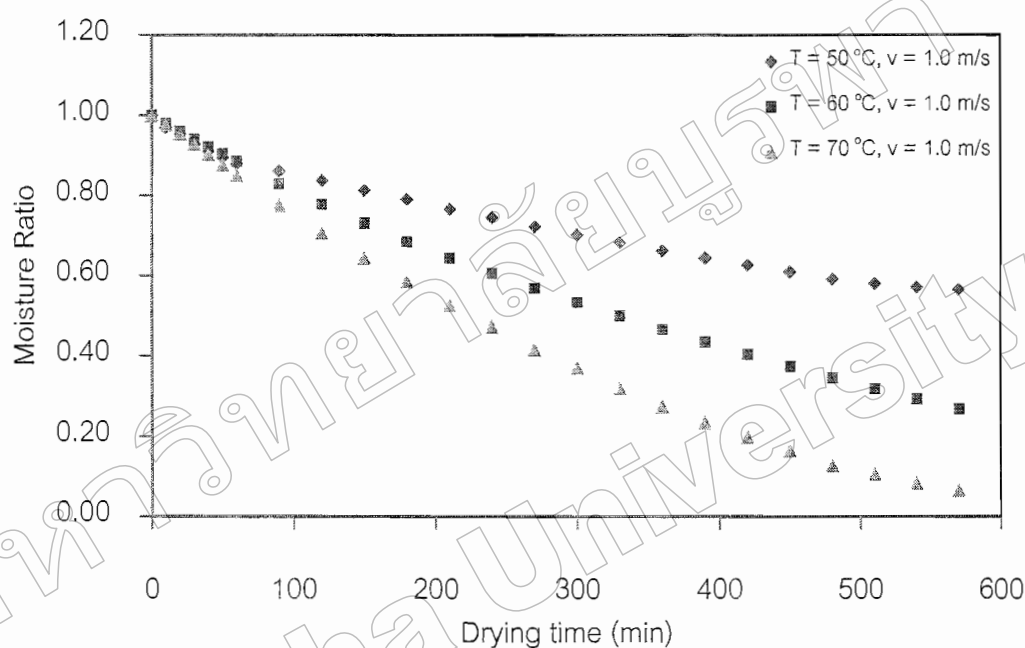
2.0 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 158.76 70.00 และ 10.00 มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ ตามลำดับ โดยคิดเป็นอัตราส่วนความชื้น 0.516 0.226 และ 0.028 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-3 และพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งเป็น 60 และ 70 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการอบแห้งพริกไทยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 56.20 และ 94.57 ตามลำดับ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการลดลงของความชื้นของพริกไทยอย่างเห็นได้ชัด

#### 1.2 ผลของความเร็วมวลที่มีต่อการลดลงของความชื้นพริกไทย ที่เงื่อนไขระดับ

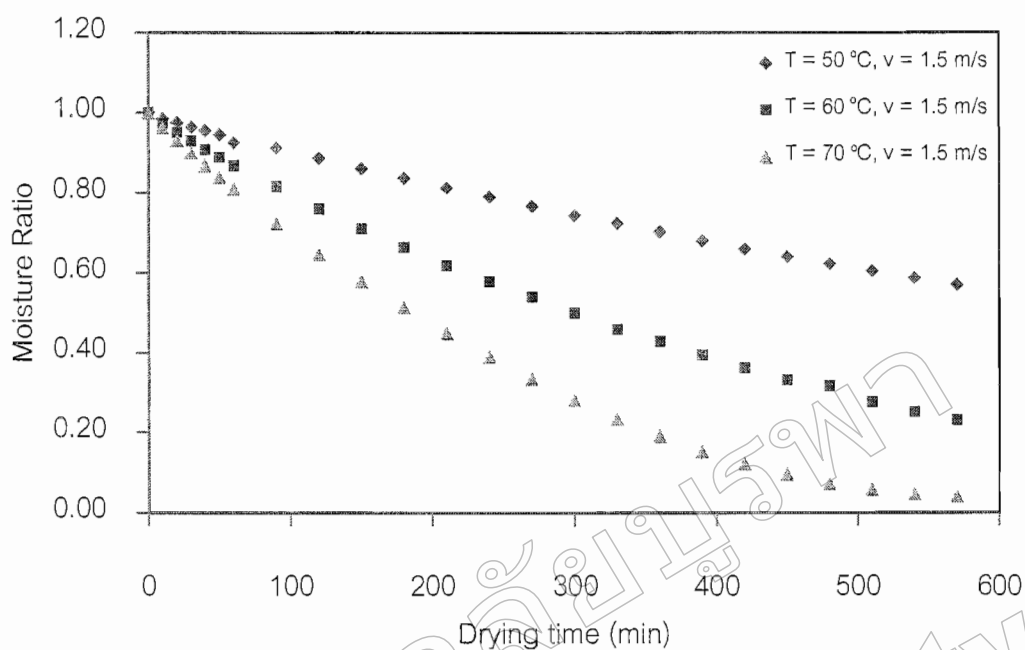
ความเร็วมวลต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ความเร็วมวลที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อการลดลงของความชื้นพริกไทย โดยการอบแห้งด้วยความเร็วมวลสูงมีผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยความเร็วมวลต่ำ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของลมร้อนมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวลเพิ่มขึ้น กล่าวคือทำให้เกิดการพาความร้อนจากกระแสอากาศถ่ายเทเข้าสู่พริกไทยเพิ่มขึ้นรวมถึงการถ่ายเทมวลจากพริกไทยสู่อากาศมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4-4 ถึงภาพที่ 4-6 จะเห็นได้ว่าการอบแห้งพริกไทยด้วยลมร้อน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

ด้วยอุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส และความเร็วมวล 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ทำให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 189.00 172.91 และ 158.76 มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ โดยคิดเป็นอัตราส่วนความชื้น 0.565 0.569 และ 0.516 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-4 และพบว่า การเพิ่มความเร็วมวลเป็น 2.0 เมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการอบแห้งพริกไทยเมื่อเทียบกับความเร็วมวล 1.0 เมตรต่อวินาที เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 8.67 และพบว่า การเพิ่มความเร็วมวลเป็น 1.5 เมตรต่อวินาที เมื่อเทียบกับความเร็วมวล 1.0 เมตรต่อวินาที ไม่มีผลต่อการลดลงของความชื้น และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส และความเร็วมวล 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ทำให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 83.07 73.00 และ 70.00 มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ โดยคิดเป็นอัตราส่วนความชื้น 0.267 0.231 และ 0.226 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-5 และพบว่า การเพิ่มความเร็วมวลเป็น 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการอบแห้งพริกไทยเมื่อเทียบกับความเร็วมวล 1.0 เมตรต่อวินาที เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 13.48 และ 15.36 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส และความเร็วมวล 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ทำให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 21.00 13.70 และ 10.00 มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ โดยคิดเป็นอัตราส่วนความชื้น 0.065 0.041 และ 0.028 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-6 และพบว่า การเพิ่มความเร็วมวล

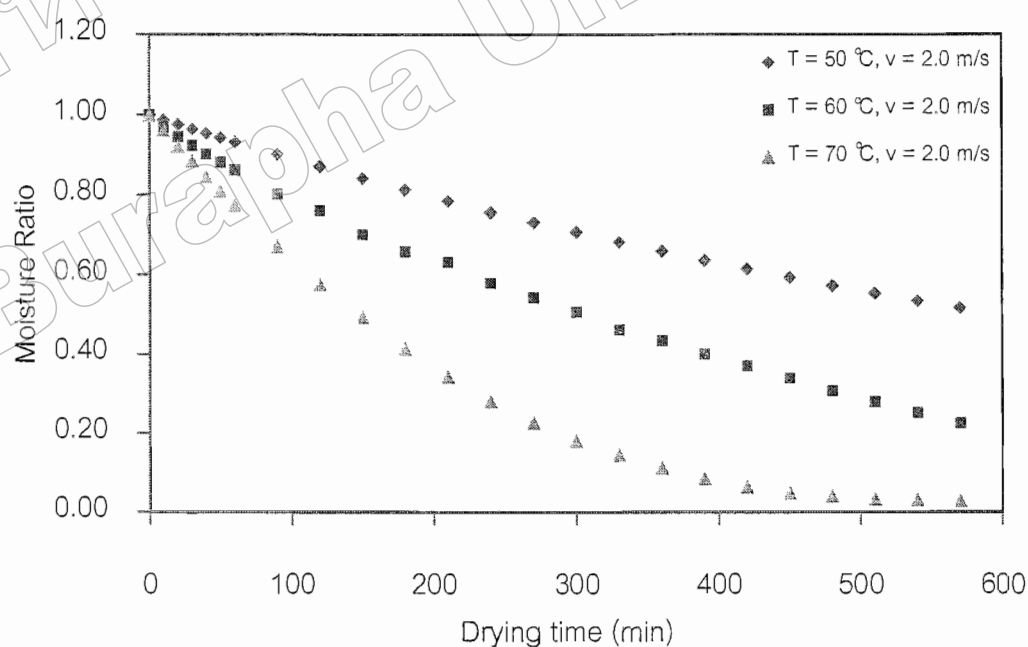
เป็น 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการอบแห้งพริกไทยเมื่อเทียบกับความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 36.92 และ 56.92 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อการลดลงของความชื้นของพริกไทยน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง



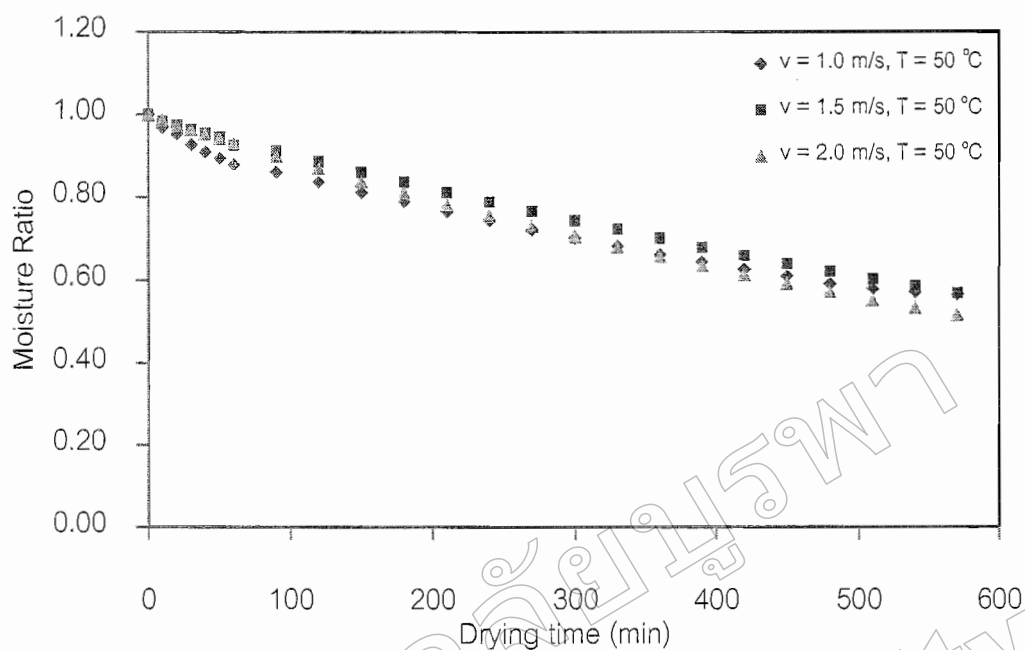
ภาพที่ 4-1 ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อความชื้นพริกไทย ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



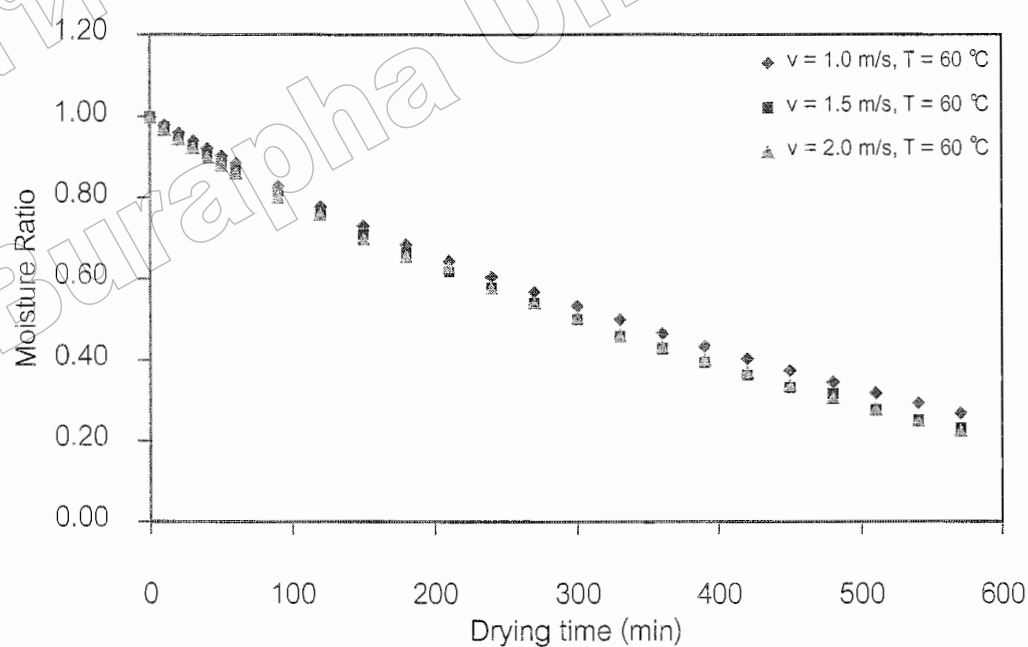
ภาพที่ 4-2 ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อความชื้นพริกไทย ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



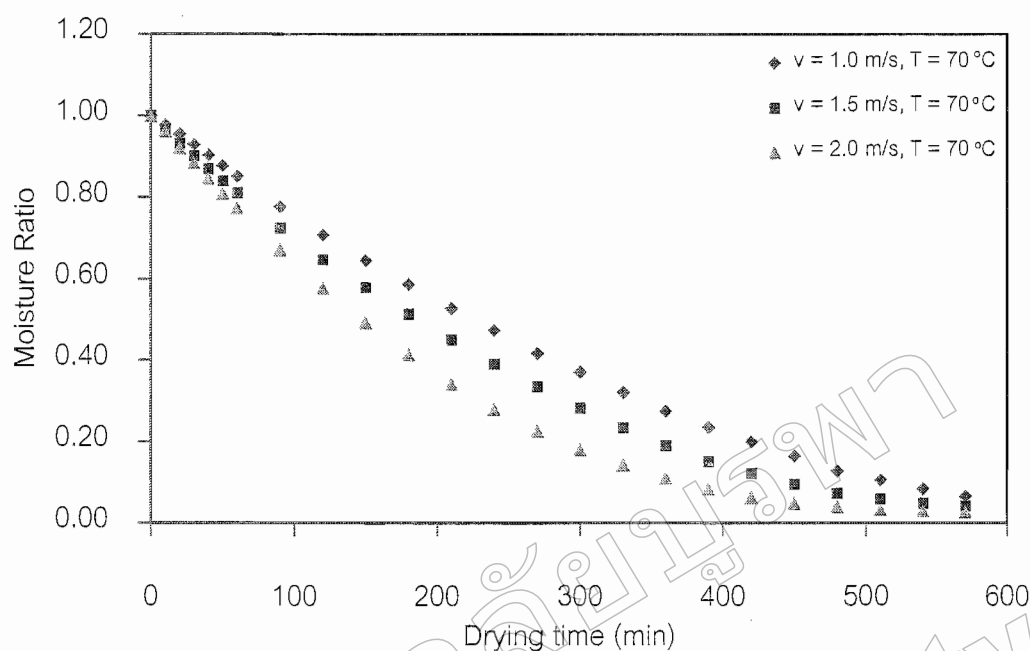
ภาพที่ 4-3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อความชื้นพริกไทย ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-4 ผลของความเร็วมที่มีต่อความชื้นพริกไทย ที่ความเร็วม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-5 ผลผลของความเร็วมที่มีต่อความชื้นพริกไทย ที่ความเร็วม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-6 ผลของความเร็วมวลที่มีต่อความชื้นพริกไทย ที่ความเร็วมวล 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางพริกไทย

จากข้อมูลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทยที่เหมาะสม โดยนำอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยลมร้อนที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วมวล 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะต้องให้ค่า  $R^2$  สูงกว่า และให้ค่า %P, RMSE และ  $\chi^2$  ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ค่าทางสถิติของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4-1 ถึงตารางที่ 4-9 โดยจากตารางจะเห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คือ แบบจำลอง Two term (1974), Midilli et al.(2002) และ Henderson and Pabis (1973) ที่ความเร็วมวล 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แบบจำลอง Midilli et al. (2002) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งชั้นบางพริกไทย ที่ทุกระดับความเร็วมวล และเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วมวล

1.0 เมตรต่อวินาที แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด คือ แบบจำลอง Wang and Singh (1978) และที่ความเร็วลม 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด คือ แบบจำลอง Midilli et al. (2002) โดยค่าทางสถิติของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดแสดงดังตารางที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะให้ค่า  $R^2$  มากกว่า 0.9986 ทุกแบบจำลอง

ตารางที่ 4-1 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                    | $R^2$   | %P     | RMSE     | $\chi^2$  |
|-----------------------------|---------|--------|----------|-----------|
| Newton                      | 0.95660 | 3.0378 | 0.028509 | 0.0008481 |
| Page                        | 0.99718 | 0.7927 | 0.007268 | 0.0000576 |
| Henderson and Pabis         | 0.98869 | 1.3577 | 0.014553 | 0.0002310 |
| Logarithmic                 | 0.99453 | 0.9136 | 0.010121 | 0.0001171 |
| Modified Page               | 0.95660 | 3.0364 | 0.028509 | 0.0008866 |
| Two term                    | 0.99869 | 0.5496 | 0.004947 | 0.0000294 |
| Two term exponential        | 0.99005 | 1.9425 | 0.013653 | 0.0002034 |
| Wang and Singh              | 0.97997 | 1.9044 | 0.019370 | 0.0004093 |
| Approximation and diffusion | 0.99869 | 0.5553 | 0.004948 | 0.0000280 |
| Midilli et al.              | 0.99826 | 0.6511 | 0.005712 | 0.0000392 |

ตารางที่ 4-2 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย  
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                    | $R^2$   | %P     | RMSE     | $\chi^2$  |
|-----------------------------|---------|--------|----------|-----------|
| Newton                      | 0.99887 | 0.3082 | 0.004690 | 0.0000230 |
| Page                        | 0.99910 | 0.4114 | 0.004171 | 0.0000190 |
| Henderson and Pabis         | 0.99944 | 0.2817 | 0.003296 | 0.0000118 |
| Logarithmic                 | 0.99942 | 0.3064 | 0.003359 | 0.0000129 |
| Modified Page               | 0.99887 | 0.3099 | 0.004690 | 0.0000240 |
| Two term                    | 0.99950 | 0.2094 | 0.003127 | 0.0000117 |
| Two term exponential        | 0.99887 | 0.0004 | 0.004690 | 0.0000240 |
| Wang and Singh              | 0.99874 | 0.3884 | 0.004943 | 0.0000267 |
| Approximation and diffusion | 0.99952 | 0.2854 | 0.003056 | 0.0000107 |
| Midilli et al.              | 0.99956 | 0.2909 | 0.002930 | 0.0000103 |

ตารางที่ 4-3 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย  
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                    | $R^2$   | %P     | RMSE     | $\chi^2$  |
|-----------------------------|---------|--------|----------|-----------|
| Newton                      | 0.99998 | 0.0675 | 0.000763 | 0.0000006 |
| Page                        | 0.99998 | 0.0843 | 0.000775 | 0.0000007 |
| Henderson and Pabis         | 0.99998 | 0.0680 | 0.000631 | 0.0000004 |
| Logarithmic                 | 0.99991 | 0.1783 | 0.001478 | 0.0000025 |
| Modified Page               | 0.99998 | 0.0676 | 0.000763 | 0.0000006 |
| Two term                    | 0.99997 | 0.0960 | 0.000858 | 0.0000009 |
| Two term exponential        | 0.99998 | 0.0001 | 0.000763 | 0.0000006 |
| Wang and Singh              | 0.99993 | 0.1554 | 0.001341 | 0.0000020 |
| Approximation and diffusion | 0.99998 | 0.0712 | 0.000672 | 0.0000005 |
| Midilli et al.              | 0.99987 | 0.1856 | 0.001833 | 0.0000040 |

ตารางที่ 4-4 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย  
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                   | $R^2$   | %P     | RMSE     | $\chi^2$  |
|----------------------------|---------|--------|----------|-----------|
| Newton                     | 0.99850 | 1.7186 | 0.009351 | 0.0000912 |
| Page                       | 0.99940 | 1.0806 | 0.005935 | 0.0000384 |
| Henderson and Pabis        | 0.99875 | 1.5489 | 0.008519 | 0.0000792 |
| Logarithm                  | 0.99987 | 0.4709 | 0.002769 | 0.0000088 |
| Modified Page              | 0.99850 | 1.7188 | 0.009351 | 0.0000954 |
| Two term                   | 0.99933 | 1.1277 | 0.006260 | 0.0000470 |
| Two term exponential       | 0.99850 | 0.0104 | 0.009351 | 0.0000954 |
| Wang and Singh             | 0.99944 | 0.9539 | 0.005736 | 0.0000359 |
| Appoximation and diffusion | 0.99960 | 0.8696 | 0.004816 | 0.0000265 |
| Midilli et al.             | 0.99992 | 0.2321 | 0.002100 | 0.0000053 |

ตารางที่ 4-5 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย  
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                   | $R^2$   | %P     | RMSE     | $\chi^2$  |
|----------------------------|---------|--------|----------|-----------|
| Newton                     | 0.99802 | 2.1454 | 0.011269 | 0.0001325 |
| Page                       | 0.99901 | 1.5264 | 0.007988 | 0.0000696 |
| Henderson and Pabis        | 0.99817 | 2.1013 | 0.010854 | 0.0001285 |
| Logarithm                  | 0.99983 | 0.5642 | 0.003295 | 0.0000124 |
| Modified Page              | 0.99802 | 2.1465 | 0.011269 | 0.0001385 |
| Two term                   | 0.99816 | 2.1061 | 0.010862 | 0.0001416 |
| Two term exponential       | 0.99802 | 0.0037 | 0.011269 | 0.0001385 |
| Wang and Singh             | 0.99919 | 1.2806 | 0.007200 | 0.0000566 |
| Appoximation and diffusion | 0.99938 | 1.2057 | 0.006318 | 0.0000456 |
| Midilli et al.             | 0.99987 | 0.5245 | 0.002930 | 0.0000103 |

ตารางที่ 4-6 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย  
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                    | $R^2$   | %P     | RMSE     | $\chi^2$  |
|-----------------------------|---------|--------|----------|-----------|
| Newton                      | 0.99727 | 2.5451 | 0.013094 | 0.0001789 |
| Page                        | 0.99765 | 2.2548 | 0.012139 | 0.0001607 |
| Henderson and Pabis         | 0.99727 | 2.5443 | 0.013083 | 0.0001867 |
| Logarithmic                 | 0.99938 | 0.9427 | 0.006263 | 0.0000448 |
| Modified Page               | 0.99727 | 2.5452 | 0.013094 | 0.0001870 |
| Two term                    | 0.99727 | 2.5456 | 0.013087 | 0.0002055 |
| Two term exponential        | 0.99727 | 0.0048 | 0.013094 | 0.0001870 |
| Wang and Singh              | 0.99763 | 1.9640 | 0.012205 | 0.0001625 |
| Approximation and diffusion | 0.99727 | 2.5452 | 0.013094 | 0.0001960 |
| Midilli et al.              | 0.99978 | 0.4188 | 0.003709 | 0.0000165 |

ตารางที่ 4-7 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย  
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                    | $R^2$   | %P      | RMSE     | $\chi^2$  |
|-----------------------------|---------|---------|----------|-----------|
| Newton                      | 0.98345 | 18.3677 | 0.041251 | 0.0017756 |
| Page                        | 0.99740 | 6.9453  | 0.016344 | 0.0002914 |
| Henderson and Pabis         | 0.98840 | 15.5990 | 0.035065 | 0.0013413 |
| Logarithmic                 | 0.99966 | 2.4558  | 0.005913 | 0.0000400 |
| Modified Page               | 0.98345 | 18.3637 | 0.041251 | 0.0018563 |
| Two term                    | 0.98804 | 15.5906 | 0.035065 | 0.0014755 |
| Two term exponential        | 0.98345 | 0.0016  | 0.041251 | 0.0018563 |
| Wang and Singh              | 0.99989 | 1.0800  | 0.003352 | 0.0000123 |
| Approximation and diffusion | 0.99308 | 12.0942 | 0.026670 | 0.0008129 |
| Midilli et al.              | 0.98840 | 13.4085 | 0.034524 | 0.0014303 |

ตารางที่ 4-8 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย  
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                    | $R^2$   | %P      | RMSE     | $\chi^2$  |
|-----------------------------|---------|---------|----------|-----------|
| Newton                      | 0.98751 | 25.4026 | 0.037426 | 0.0014616 |
| Page                        | 0.99717 | 10.7063 | 0.017807 | 0.0003459 |
| Henderson and Pabis         | 0.99016 | 22.2084 | 0.033215 | 0.0012035 |
| Logarithmic                 | 0.99895 | 7.4033  | 0.010838 | 0.0001342 |
| Modified Page               | 0.99751 | 25.4072 | 0.037426 | 0.0015281 |
| Two term                    | 0.99016 | 22.2125 | 0.033215 | 0.0013239 |
| Two term exponential        | 0.98751 | 0.0033  | 0.037426 | 0.0015281 |
| Wang and Singh              | 0.99850 | 10.6035 | 0.012952 | 0.0001830 |
| Approximation and diffusion | 0.99774 | 9.9405  | 0.015907 | 0.0002892 |
| Midilli et al.              | 0.99925 | 5.9872  | 0.009166 | 0.0001008 |

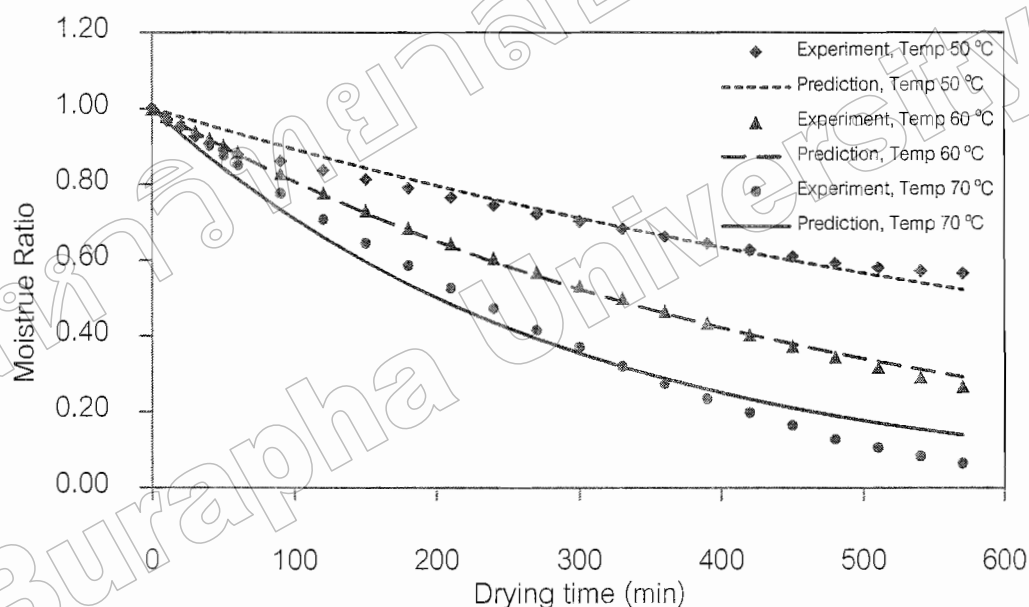
ตารางที่ 4-9 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย  
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

| แบบจำลอง                    | $R^2$   | %P      | RMSE     | $\chi^2$  |
|-----------------------------|---------|---------|----------|-----------|
| Newton                      | 0.99082 | 29.9596 | 0.033398 | 0.0011639 |
| Page                        | 0.99915 | 7.0482  | 0.010176 | 0.0001130 |
| Henderson and Pabis         | 0.99384 | 24.1346 | 0.027360 | 0.0008166 |
| Logarithmic                 | 0.99808 | 14.5370 | 0.015285 | 0.0002670 |
| Modified Page               | 0.99082 | 29.9832 | 0.033398 | 0.0012168 |
| Two term                    | 0.99384 | 24.1341 | 0.027360 | 0.0008983 |
| Two term exponential        | 0.99082 | 0.0278  | 0.033398 | 0.0012168 |
| Wang and Singh              | 0.99940 | 9.3556  | 0.008556 | 0.0000799 |
| Approximation and diffusion | 0.99943 | 6.3903  | 0.008339 | 0.0000795 |
| Midilli et al.              | 0.99954 | 6.9055  | 0.007484 | 0.0000672 |

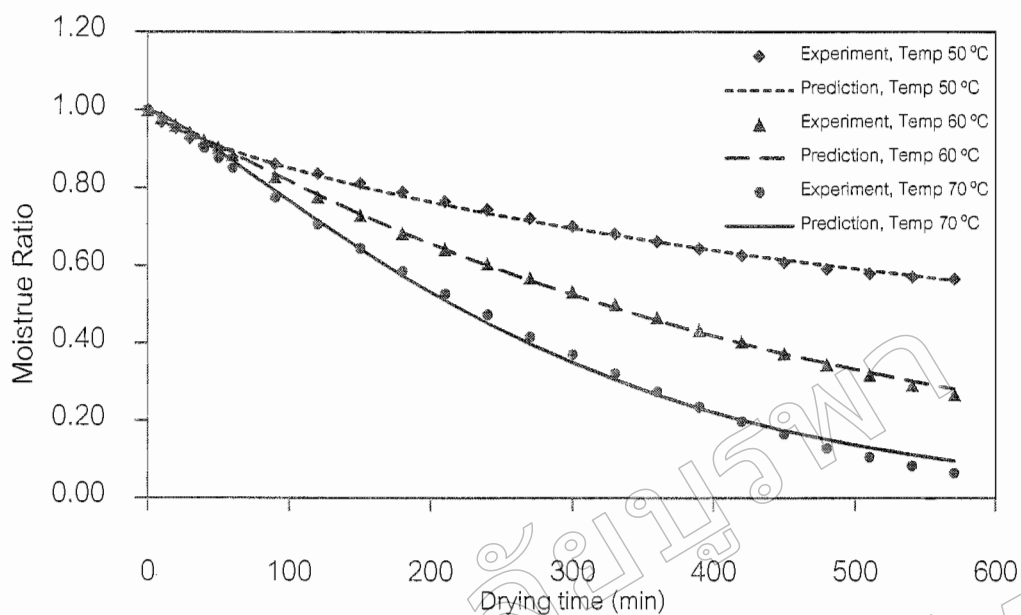
ตารางที่ 4-10 แสดงค่าทางสถิติของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นพริกไทยบ่มแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที

| เงื่อนไขการอบแห้ง |                  | แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด |        |          |           |
|-------------------|------------------|--------------------------|--------|----------|-----------|
| อุณหภูมิ (°C)     | ความเร็วลม (m/s) | $R^2$                    | %P     | RMSE     | $\chi^2$  |
| 50                | 1.0              | 0.99869                  | 0.5496 | 0.004947 | 0.0000294 |
|                   | 1.5              | 0.99956                  | 0.2909 | 0.002930 | 0.0000103 |
|                   | 2.0              | 0.99998                  | 0.0680 | 0.000631 | 0.0000004 |
| 60                | 1.0              | 0.99992                  | 0.2321 | 0.002100 | 0.0000053 |
|                   | 1.5              | 0.99987                  | 0.5245 | 0.002930 | 0.0000103 |
|                   | 2.0              | 0.99978                  | 0.4188 | 0.003709 | 0.0000165 |
| 70                | 1.0              | 0.99989                  | 1.0800 | 0.003352 | 0.0000123 |
|                   | 1.5              | 0.99925                  | 5.9872 | 0.009166 | 0.0001008 |
|                   | 2.0              | 0.99954                  | 6.9055 | 0.007484 | 0.0000672 |

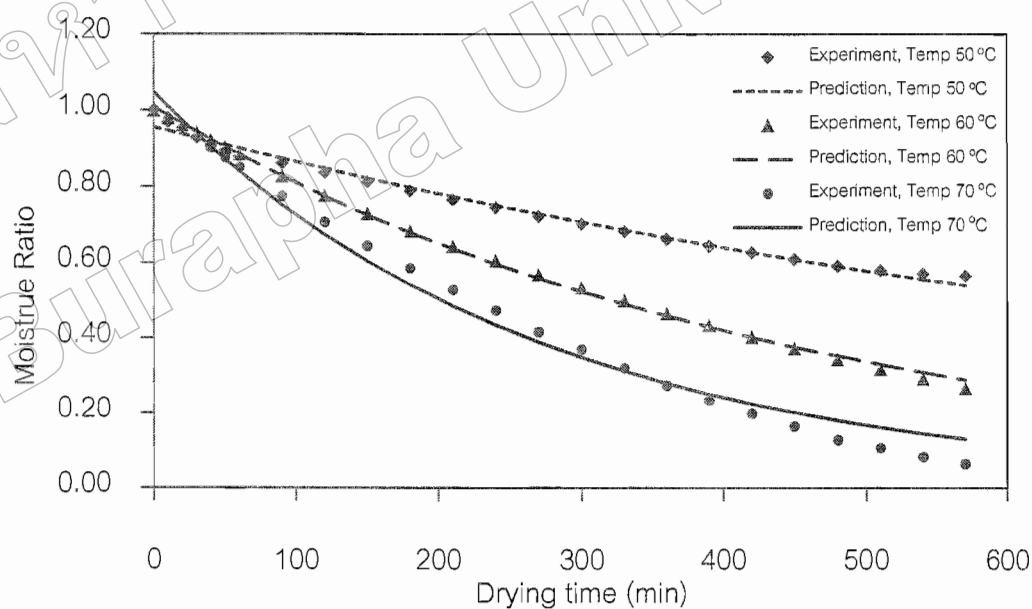
จากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยดังภาพที่ 4-7 ถึงภาพที่ 4-36 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองให้ผลการทำนายดี โดยค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขการอบแห้ง โดยแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.99869 0.99956 และ 0.99998 ที่ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ เมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.99992 0.99987 และ 0.99978 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.99989 0.99925 และ 0.99954 ตามลำดับ



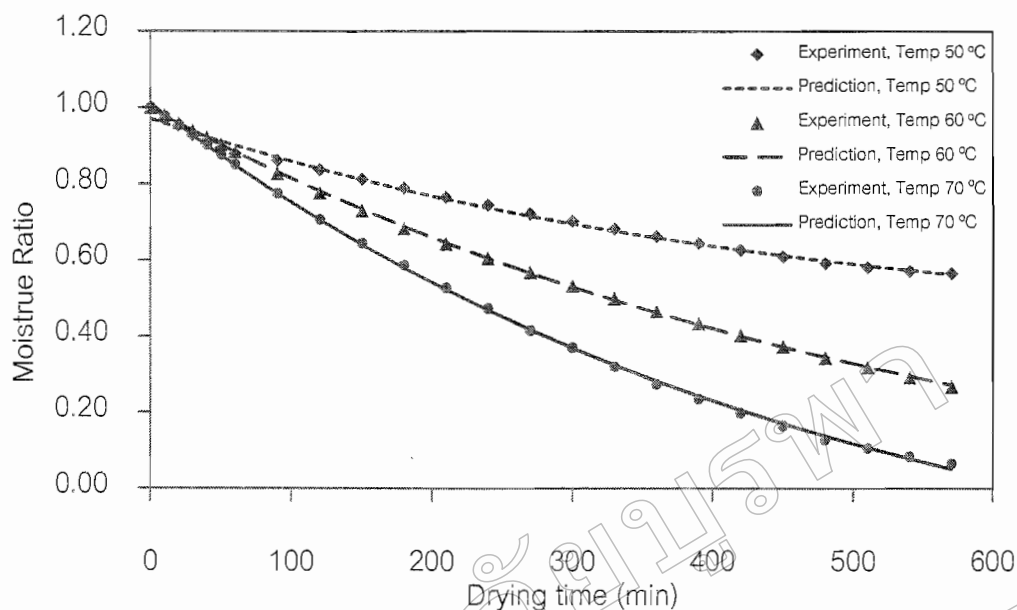
ภาพที่ 4-7 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Newton สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



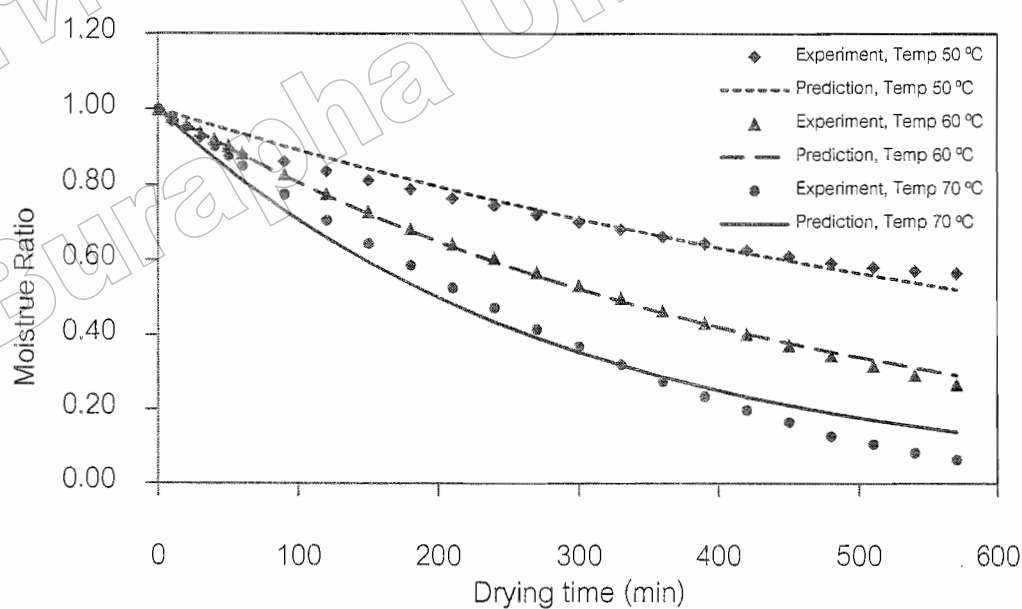
ภาพที่ 4-8 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Page สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



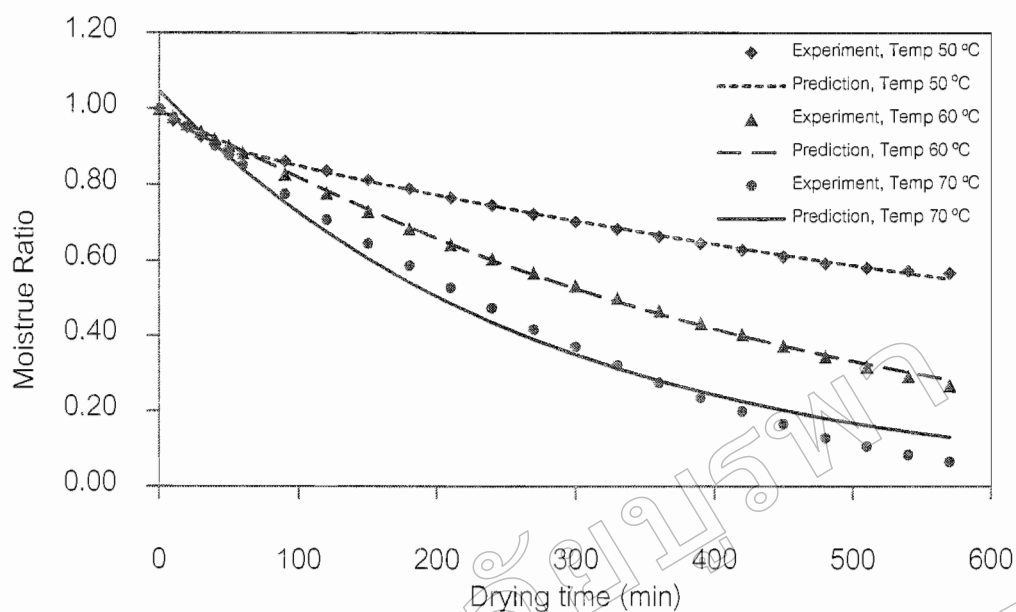
ภาพที่ 4-9 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



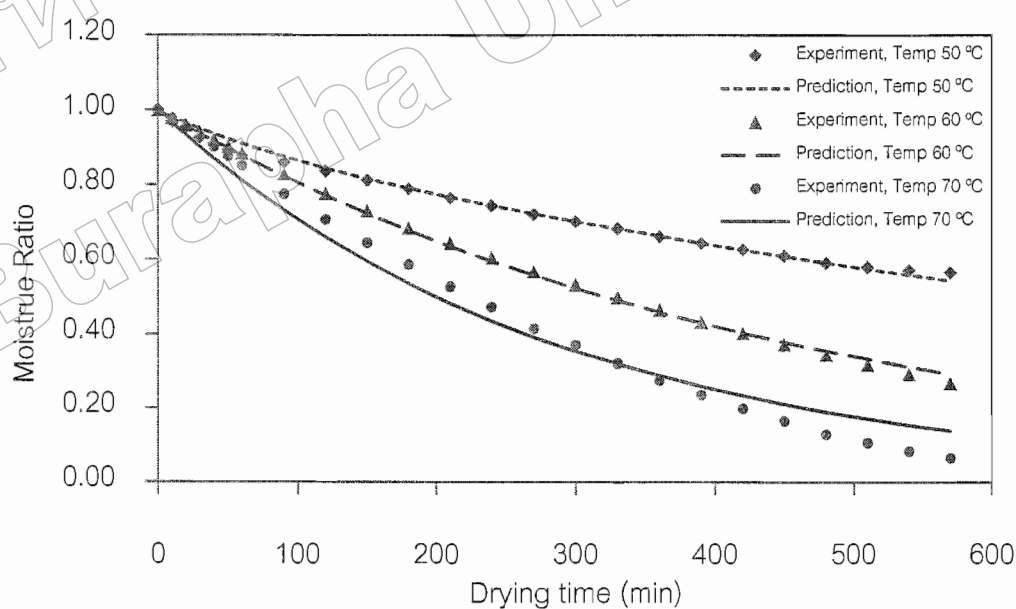
ภาพที่ 4-10 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



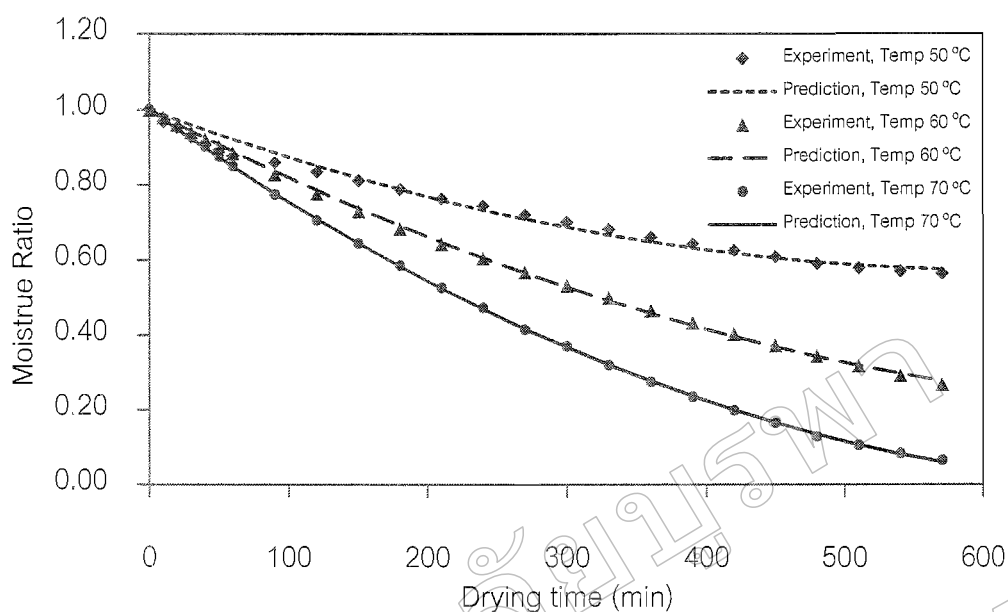
ภาพที่ 4-11 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Page สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



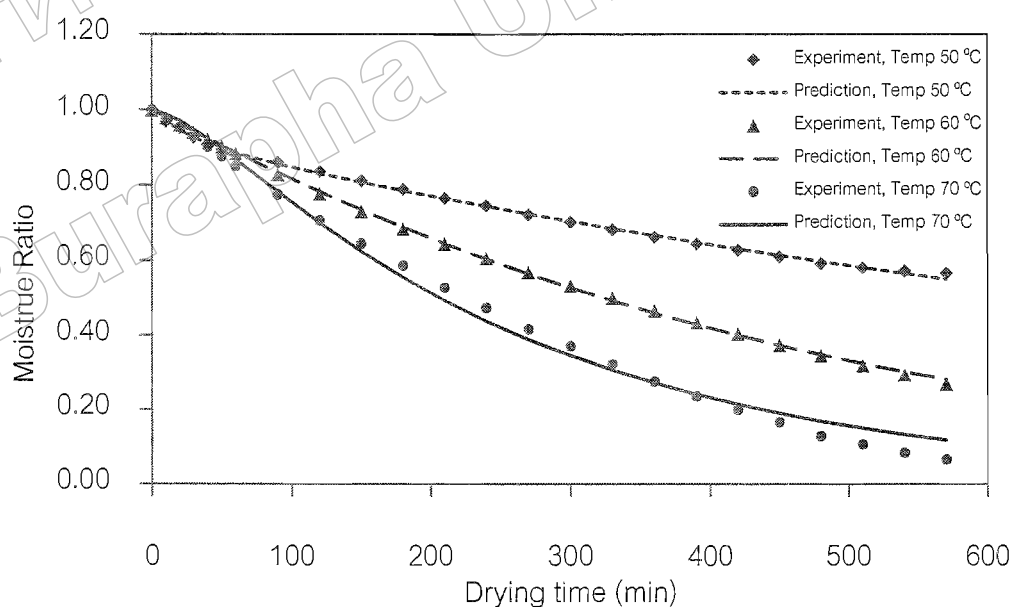
ภาพที่ 4-12 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two term สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



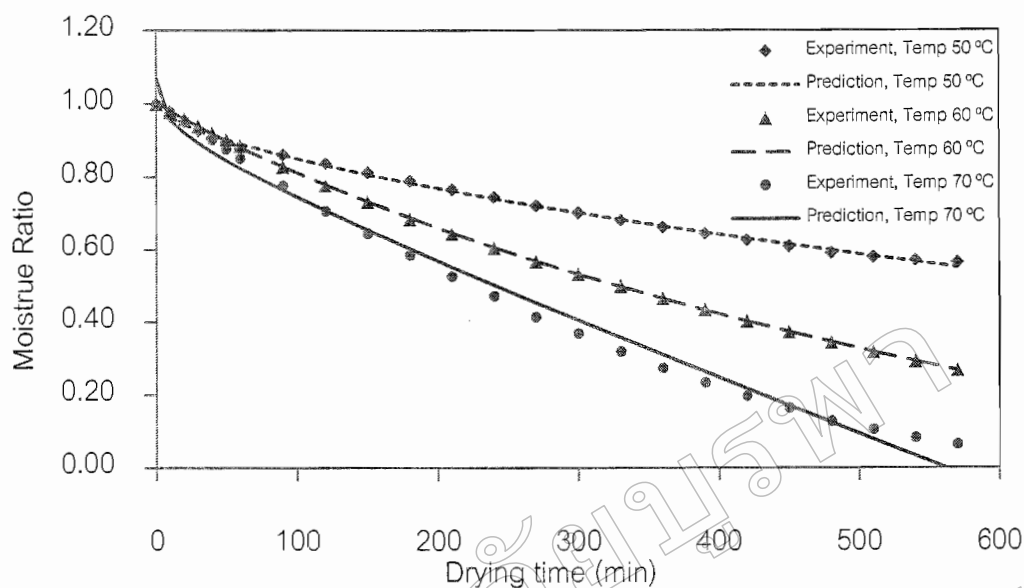
ภาพที่ 4-13 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two term exponential สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



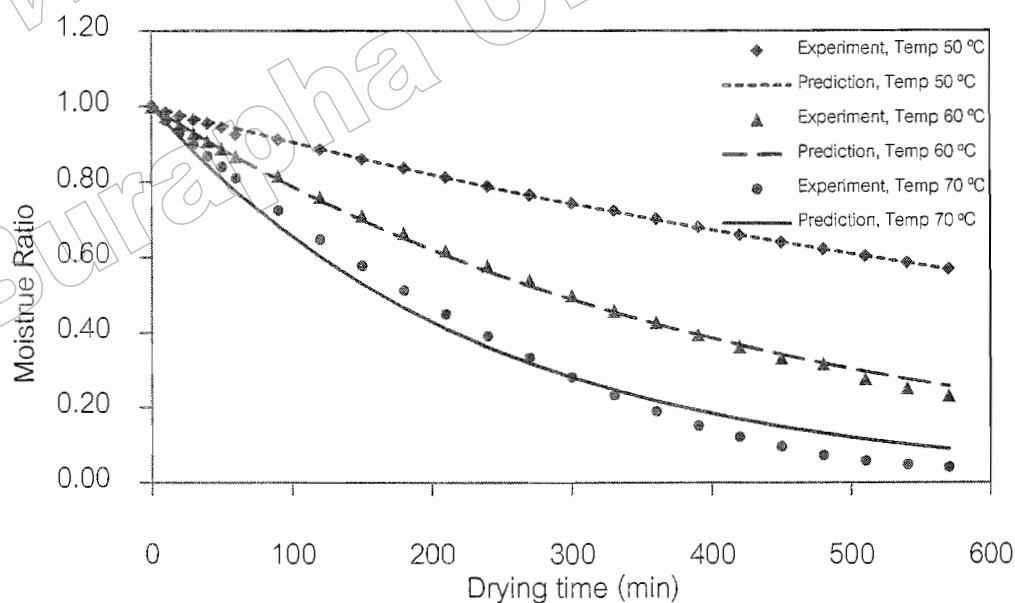
ภาพที่ 4-14 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Wang and Singh สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



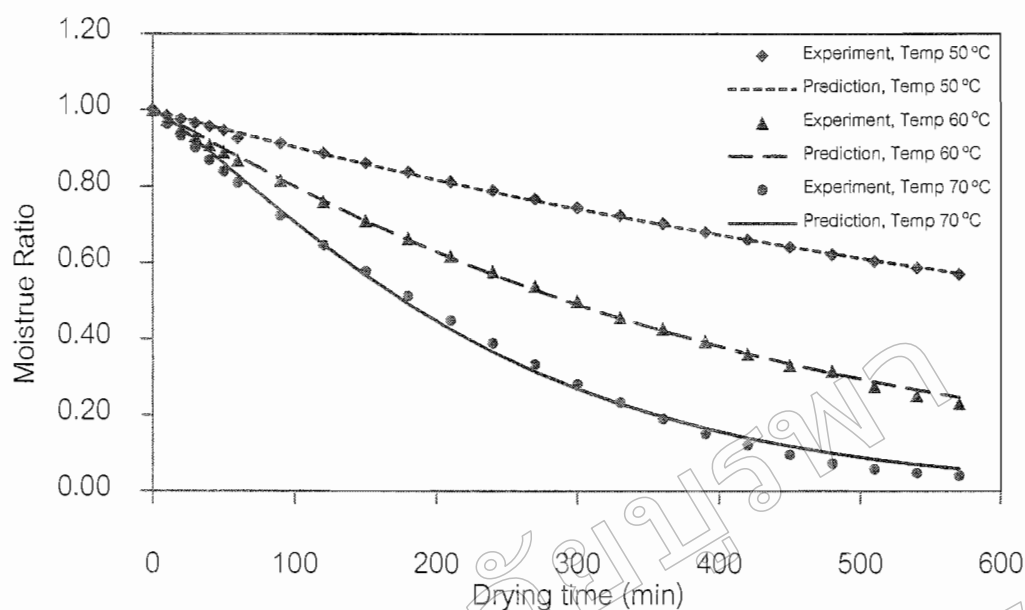
ภาพที่ 4-15 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Approximation and diffusion สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



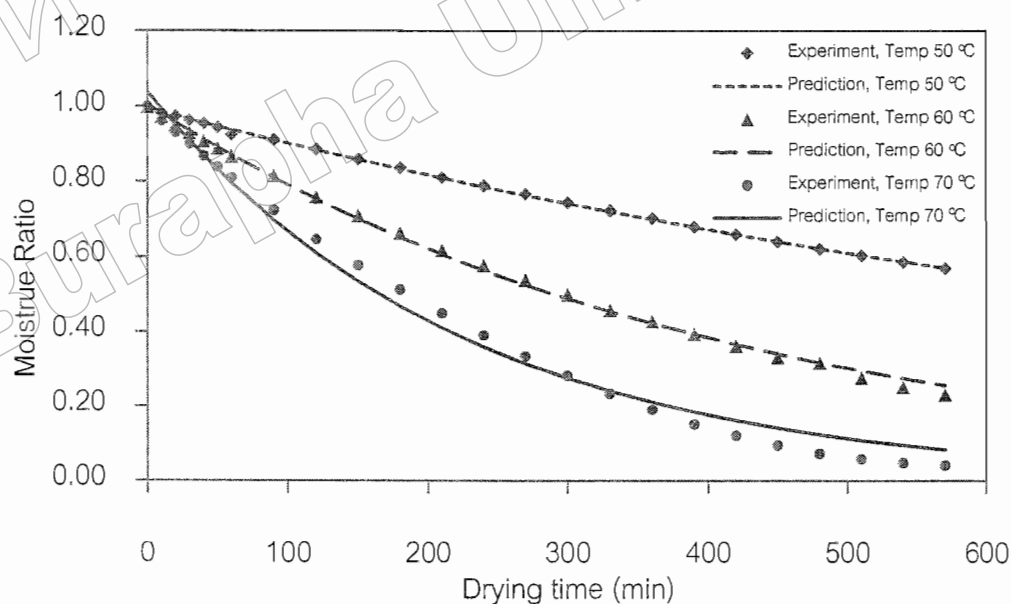
ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



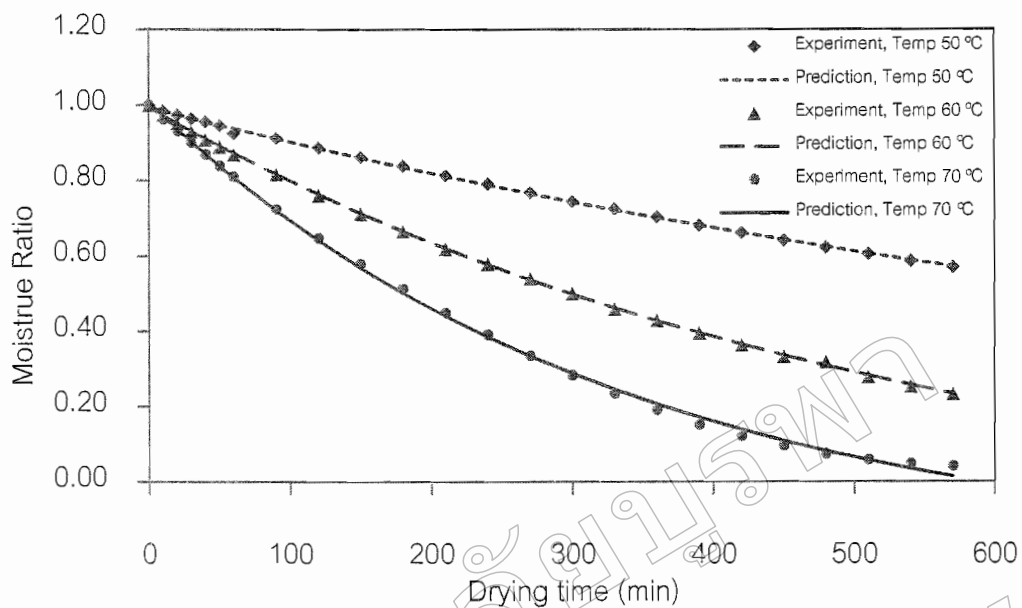
ภาพที่ 4-17 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Newton สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



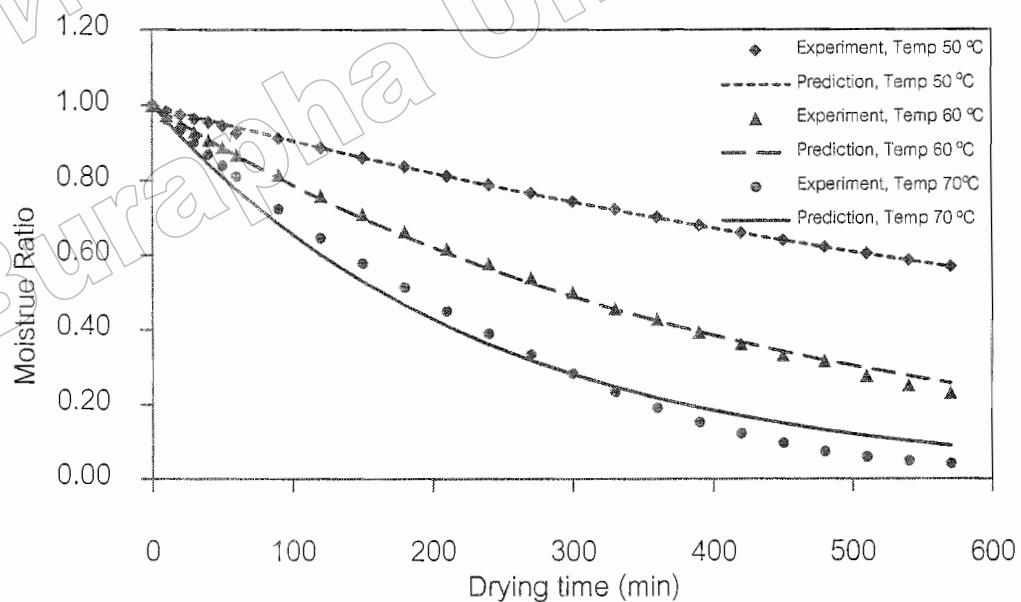
ภาพที่ 4-18 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ  
 Page สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส  
 ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



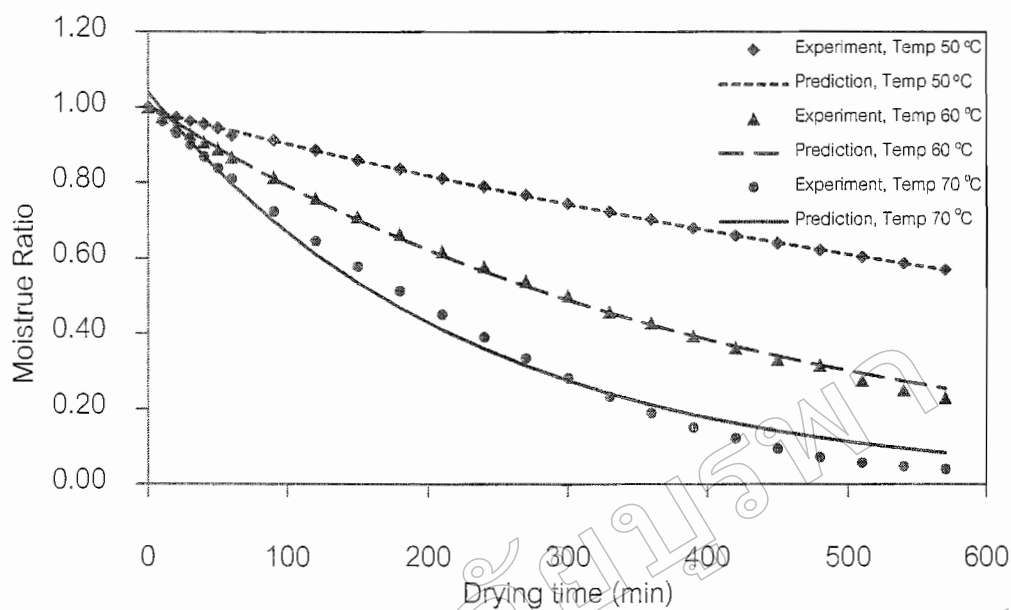
ภาพที่ 4-19 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้ง  
 ของ Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60  
 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



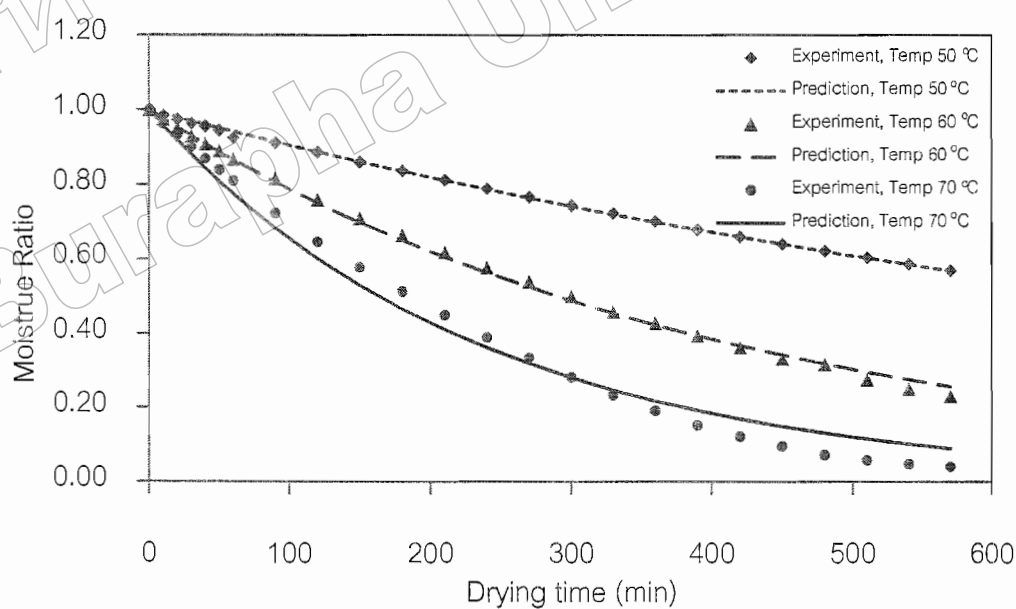
ภาพที่ 4-20 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



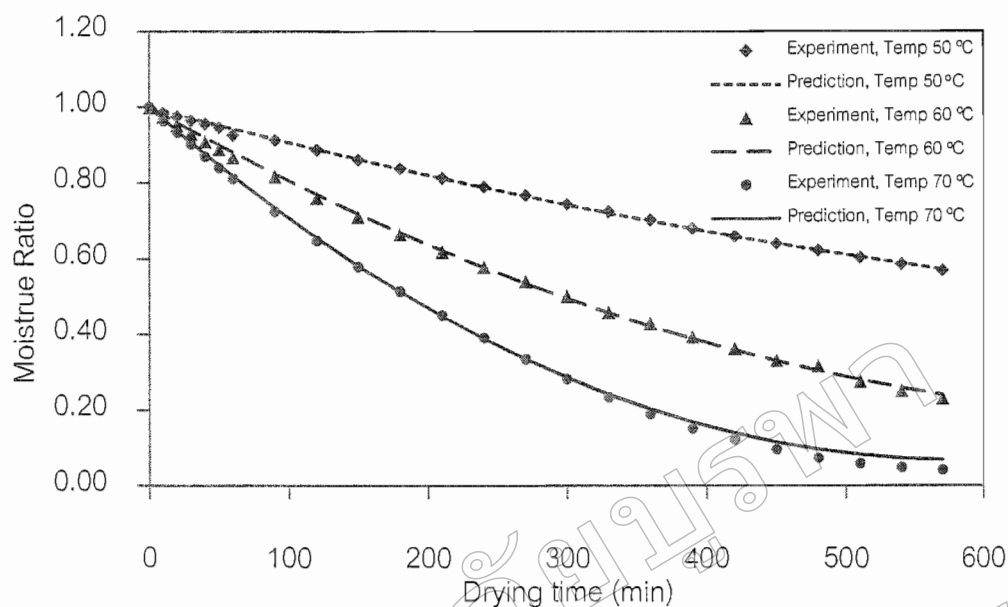
ภาพที่ 4-21 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Page สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



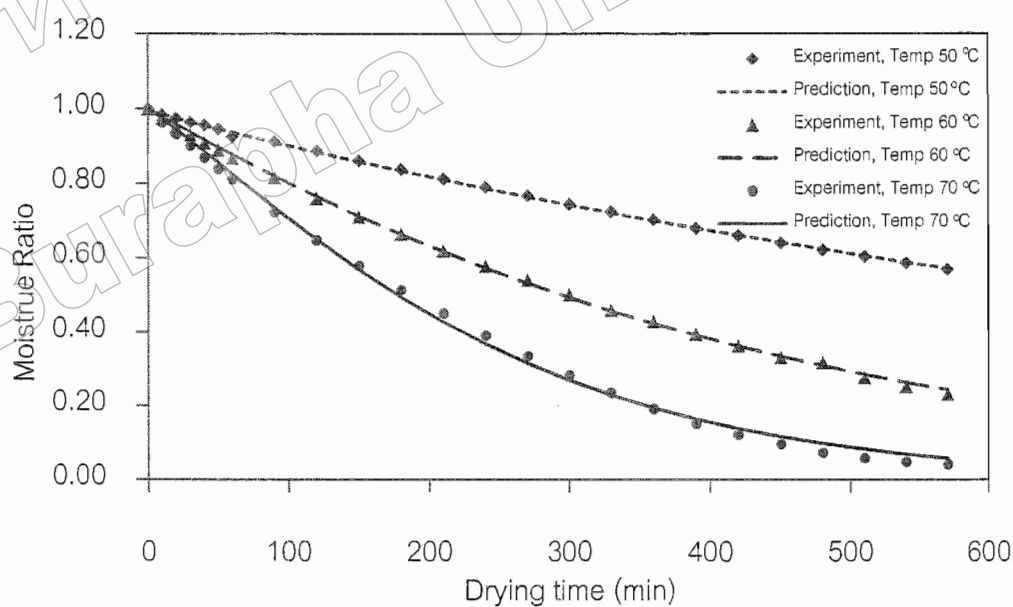
ภาพที่ 4-22 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two term สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



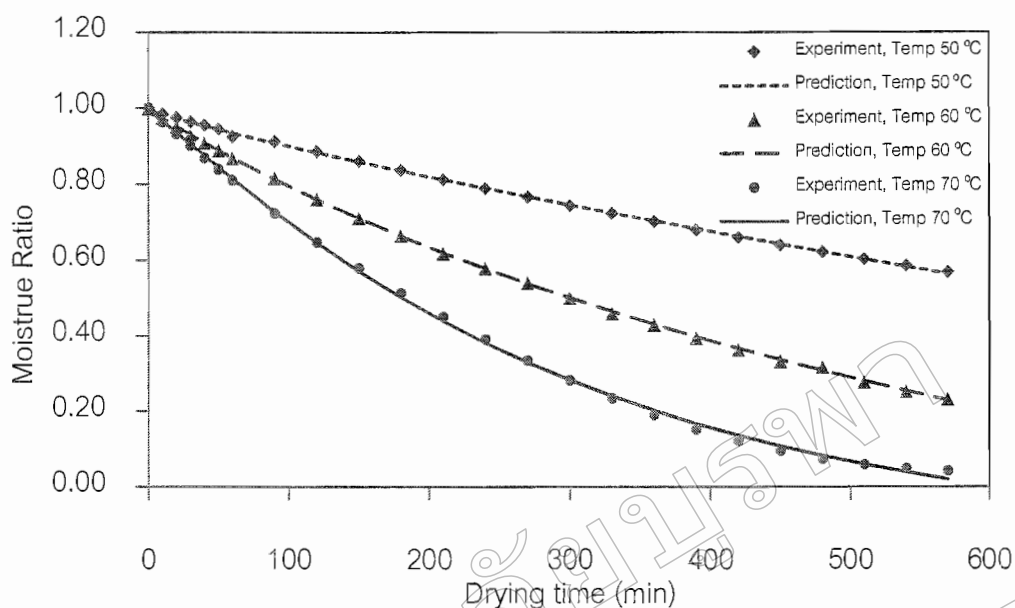
ภาพที่ 4-23 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two term exponential สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



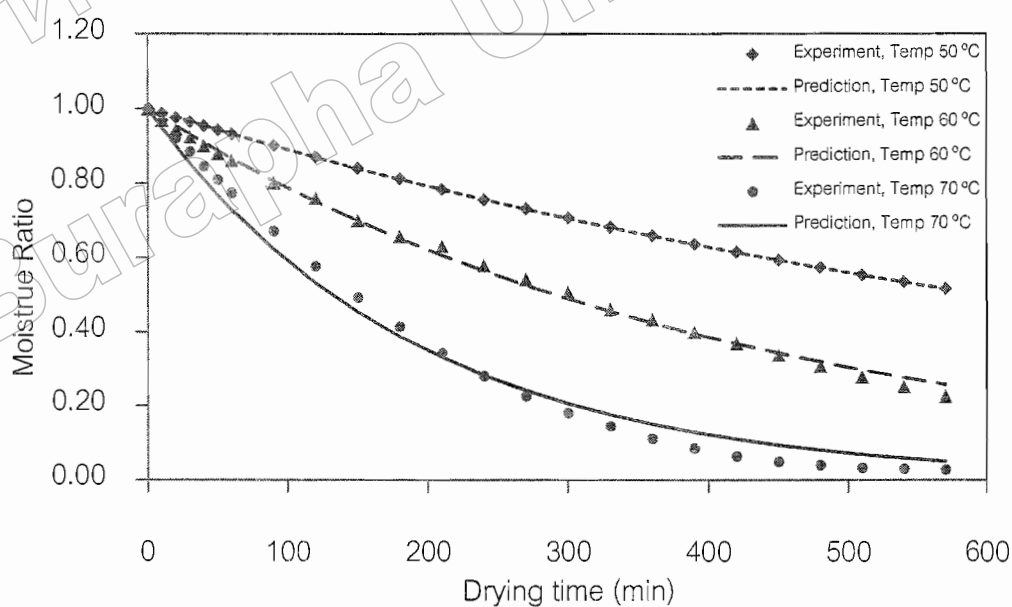
ภาพที่ 4-24 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Wang and Singh สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



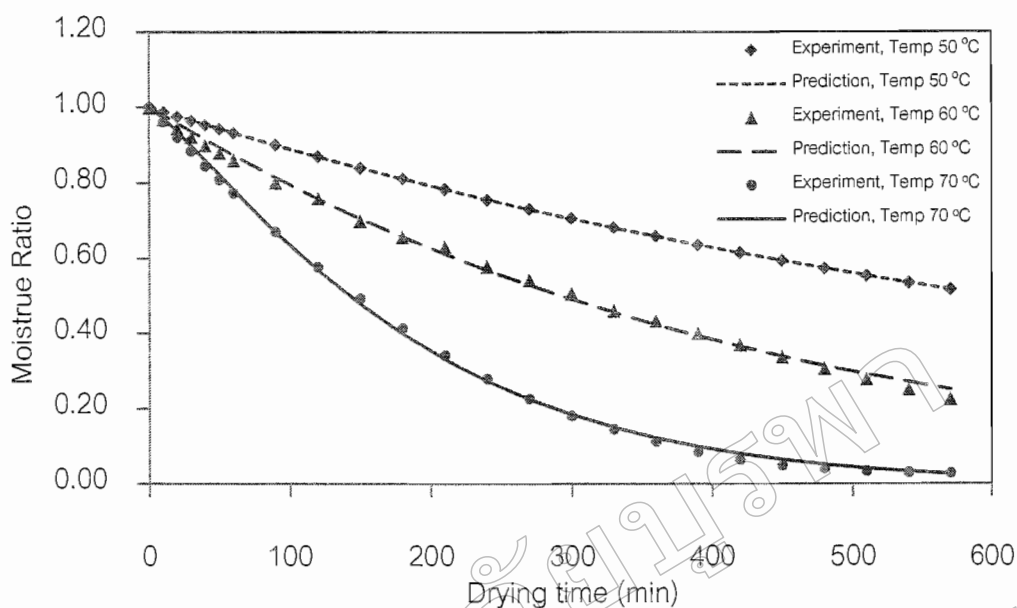
ภาพที่ 4-25 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Approximation and diffusion สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



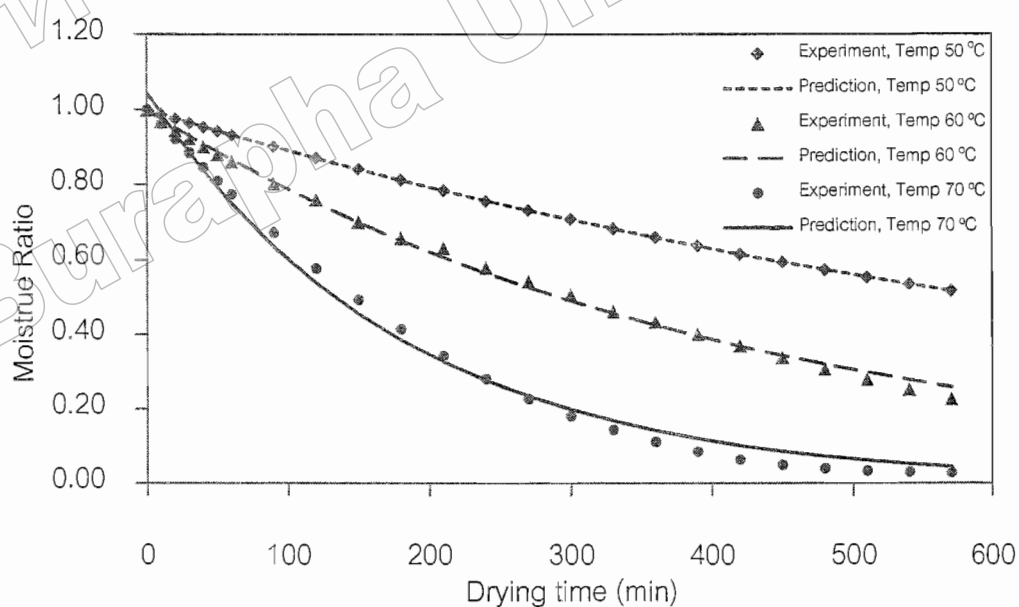
ภาพที่ 4-26 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Midilliret al. สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



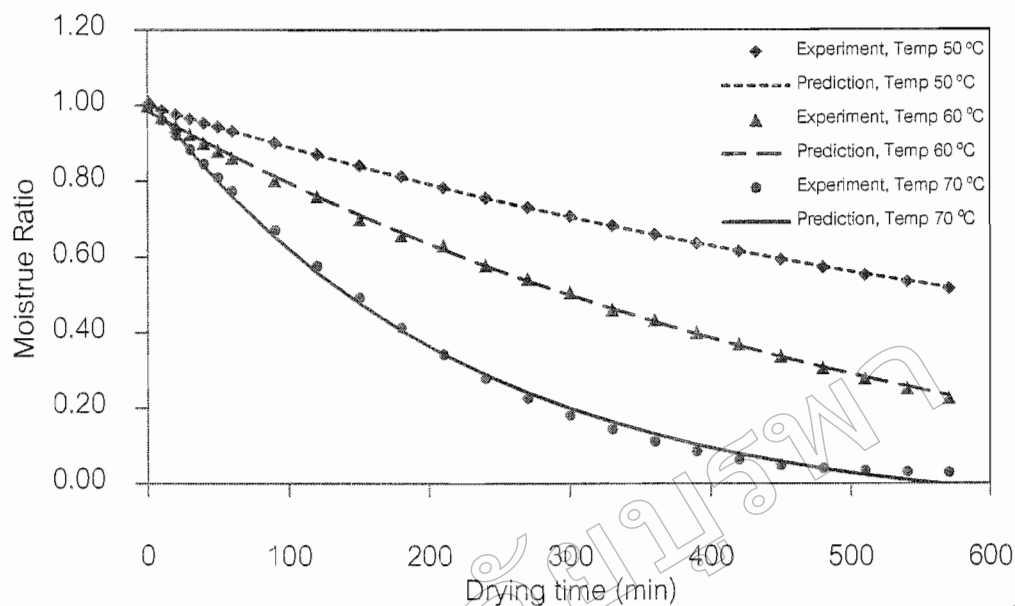
ภาพที่ 4-27 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Newton สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



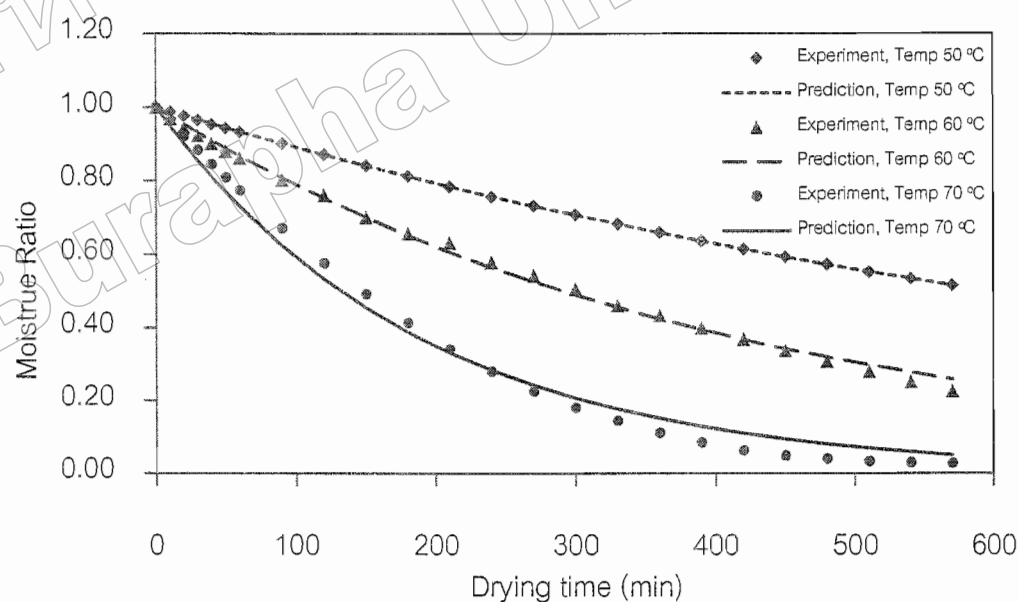
ภาพที่ 4-28 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Page สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



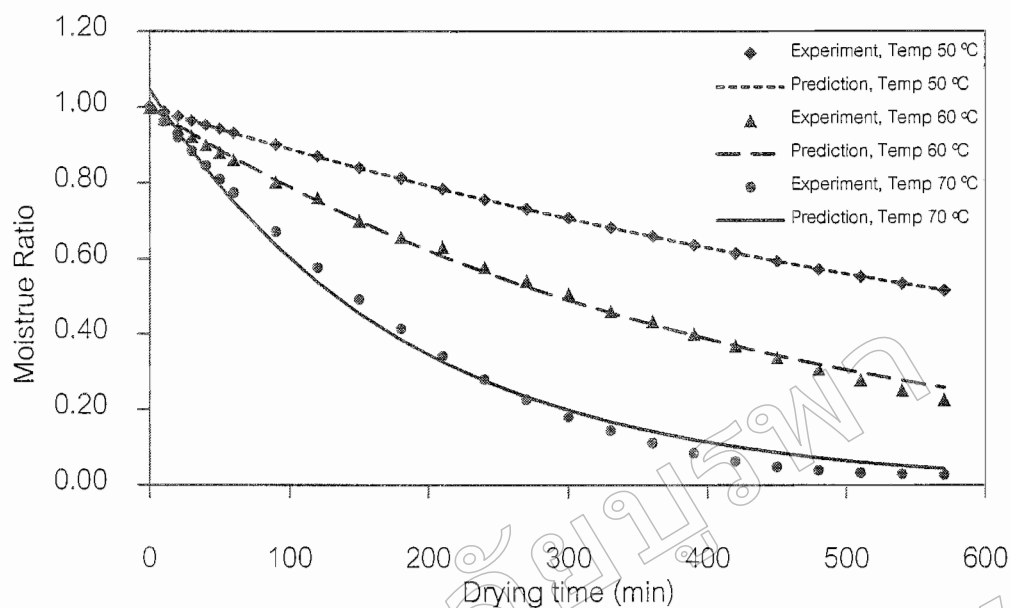
ภาพที่ 4-29 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



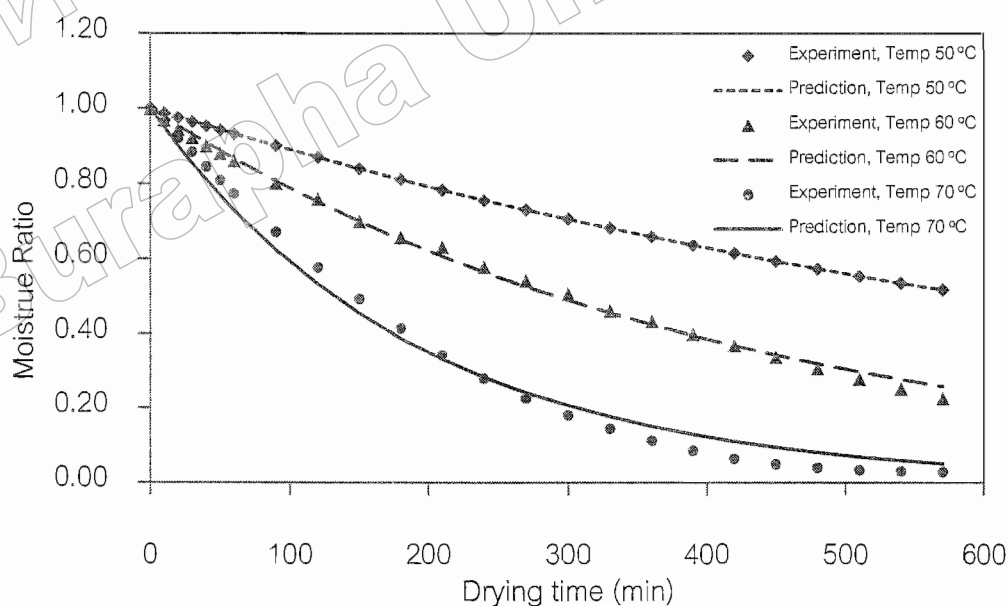
ภาพที่ 4-30 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



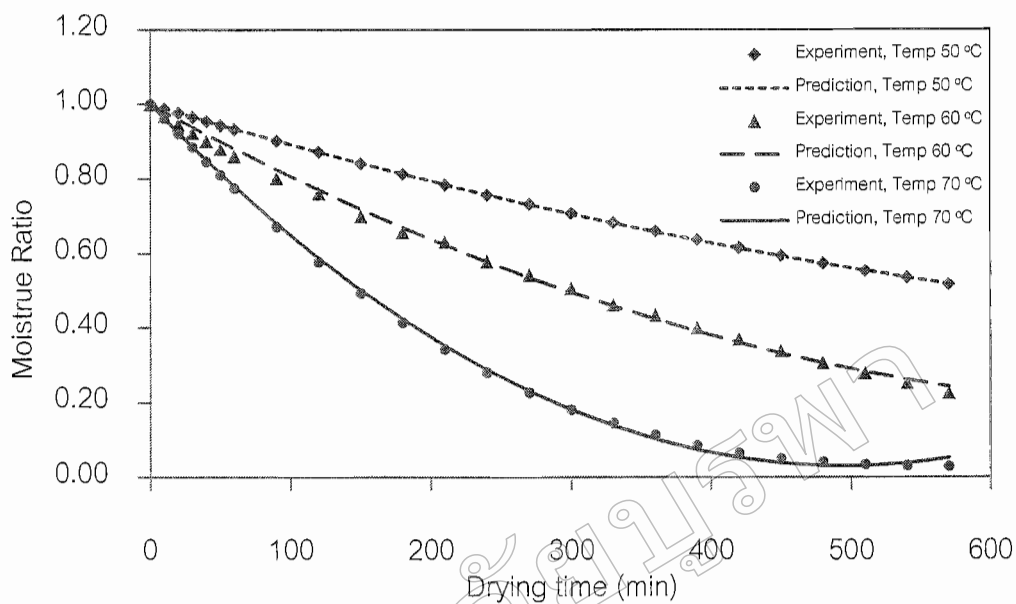
ภาพที่ 4-31 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Page สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



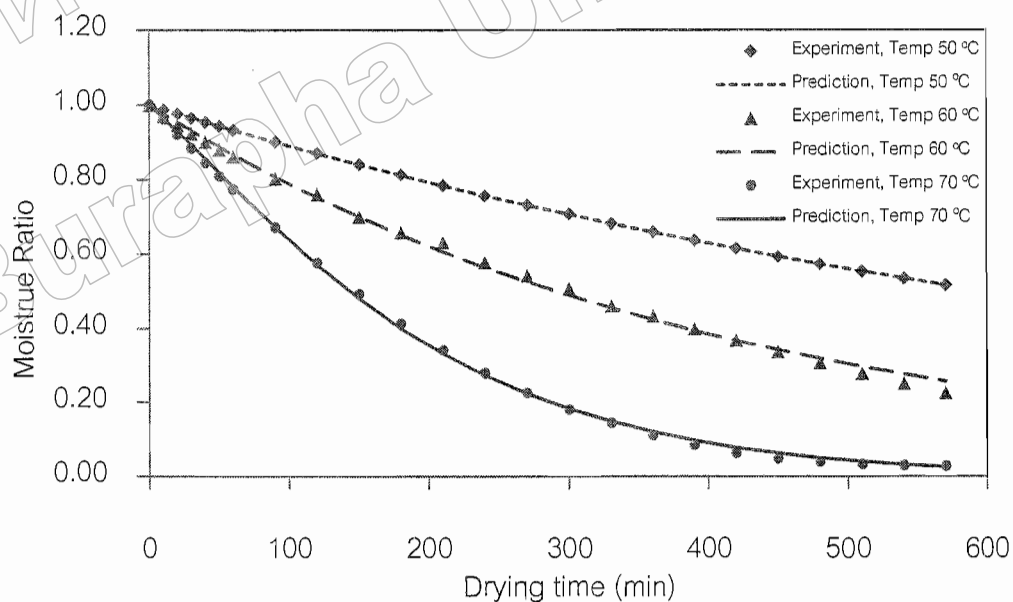
ภาพที่ 4-32 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two term สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



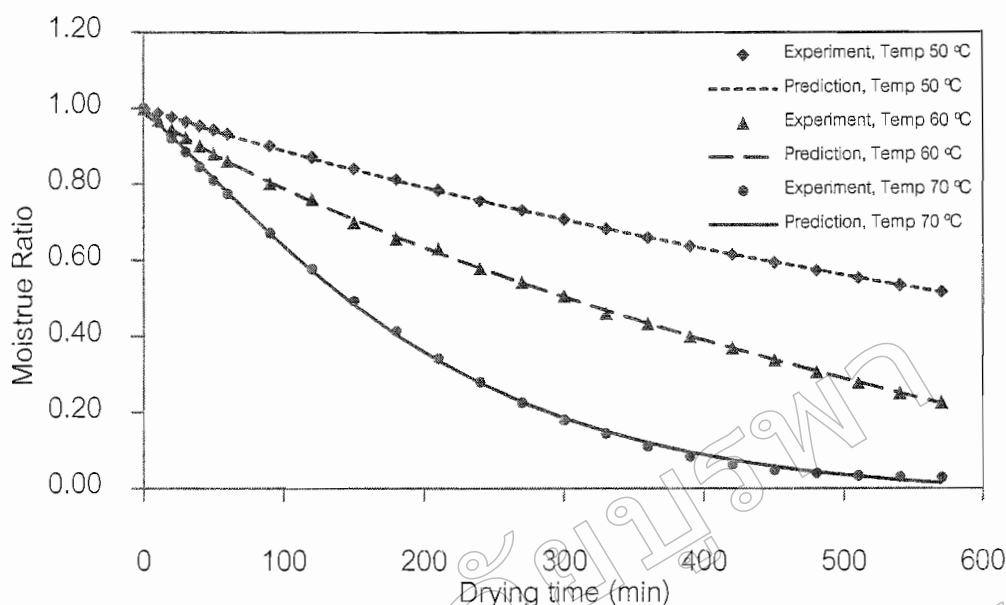
ภาพที่ 4-33 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two term exponential สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-34 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Wang and Singh สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-35 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Approximation and diffusion สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

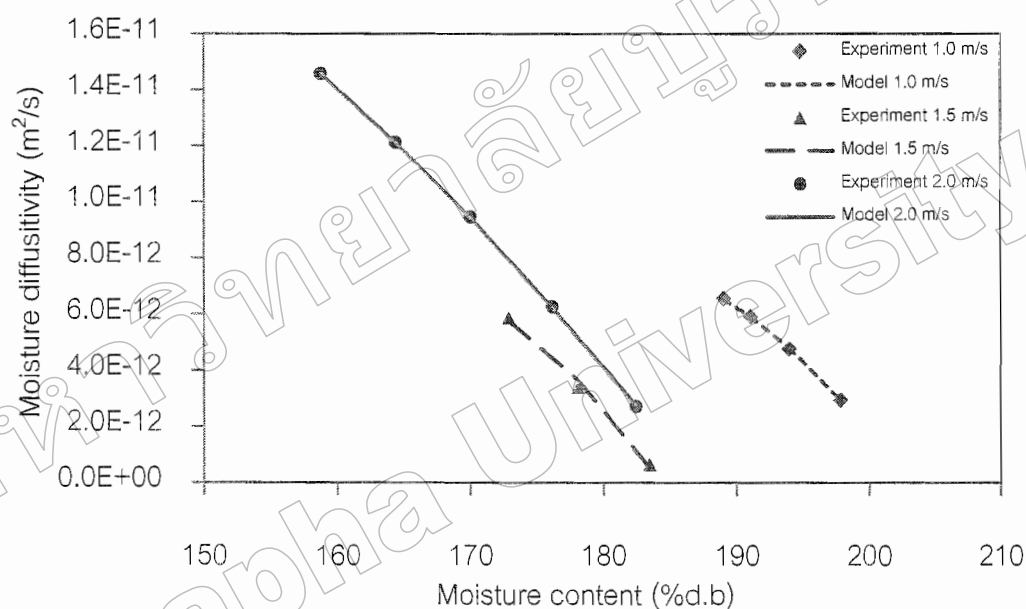


ภาพที่ 4-36 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

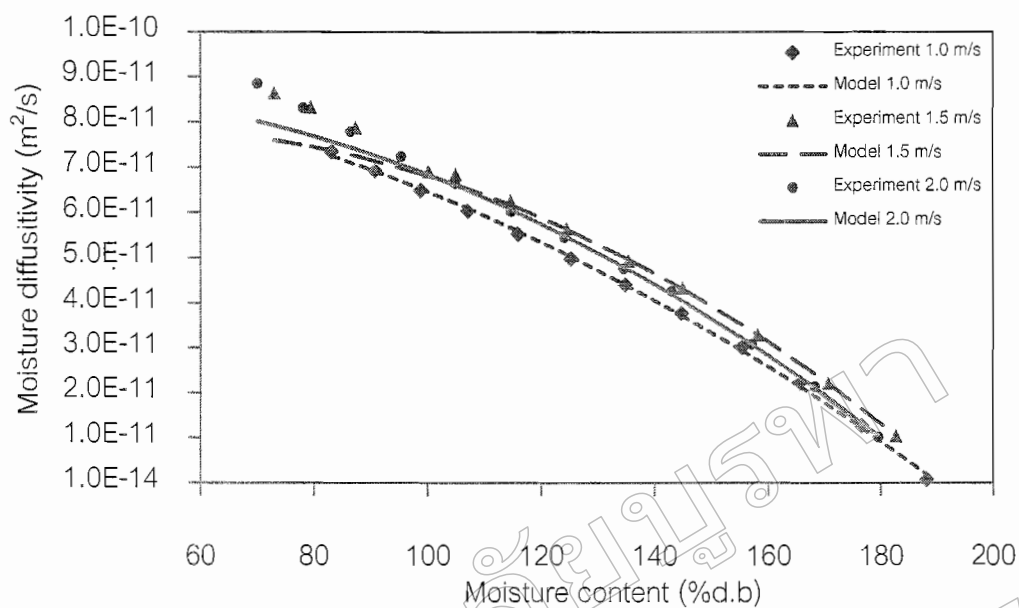
### 3. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทย

จากผลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิและความเร็วลมต่าง ๆ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้จากสมการที่ 3-10 จะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ความชื้นและเวลาอบแห้งต่าง ๆ จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ขึ้นกับความชื้นของพริกไทยในรูปของสมการกำลังสองได้จากสมการที่ 3-11 และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและความชื้นของพริกไทยจะได้ดังภาพที่ 4-37 ถึงภาพที่ 4-39 จะเห็นว่าเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยสูงขึ้น และเมื่อความชื้นของพริกไทยลดลงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง  $2.95 \times 10^{-12}$  ถึง  $6.56 \times 10^{-12}$ ,  $6.49 \times 10^{-13}$  ถึง  $5.88 \times 10^{-12}$  และ  $2.73 \times 10^{-12}$  ถึง  $1.46 \times 10^{-11}$  ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้

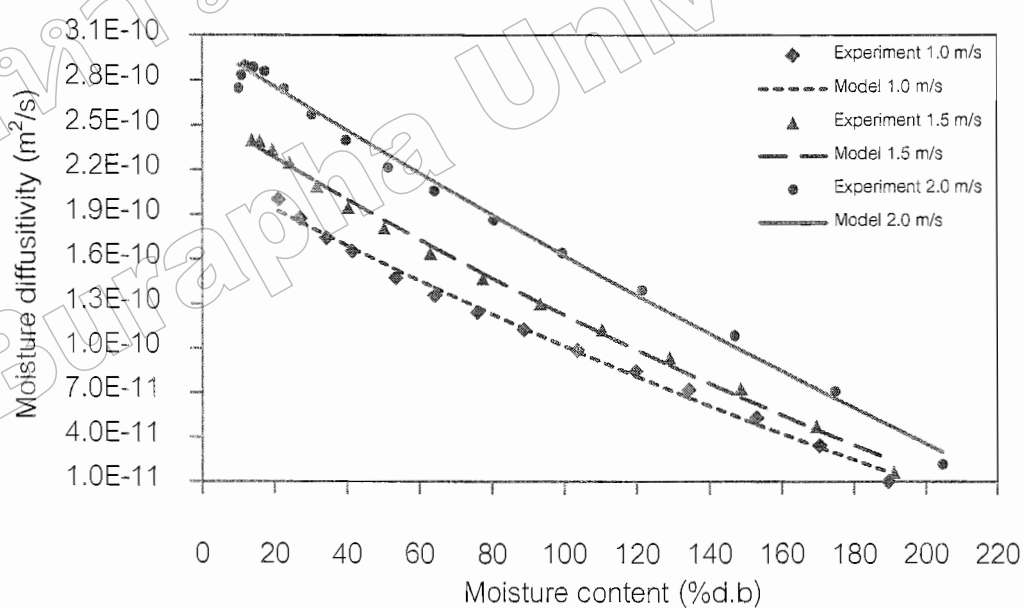
จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง  $7.68 \times 10^{-13}$  ถึง  $7.35 \times 10^{-11}$ ,  $1.05 \times 10^{-11}$  ถึง  $8.65 \times 10^{-11}$  และ  $1.02 \times 10^{-11}$  ถึง  $8.86 \times 10^{-11}$  ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง  $1.01 \times 10^{-11}$  ถึง  $2.00 \times 10^{-10}$ ,  $1.66 \times 10^{-11}$  ถึง  $2.40 \times 10^{-10}$  และ  $2.21 \times 10^{-11}$  ถึง  $2.75 \times 10^{-10}$  ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ



ภาพที่ 4-37 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-38 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยลมร้อน  
ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-39 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยลมร้อน  
ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที

เมื่อทำการวิเคราะห์การถดถอยของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับความชื้นของพริกไทยตามสมการที่ 3-11 จะได้ค่าคงที่ a, b, c และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และจากภาพที่ 4-37 ถึงภาพที่ 4-39 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่ได้จากสมการมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ค่าคงที่ของสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทย

| อุณหภูมิ<br>(°C) | ความเร็วลม<br>(m/s) | a         | b         | c         | $R^2$   |
|------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 50               | 1.0                 | -1.53E-14 | 5.52E-12  | -4.89E-10 | 0.99950 |
|                  | 1.5                 | -1.66E-14 | 5.41E-12  | -4.34E-10 | 0.99389 |
|                  | 2.0                 | -3.37E-15 | 6.49E-13  | -3.66E-12 | 0.99997 |
| 60               | 1.0                 | -2.31E-15 | -4.47E-14 | 9.22E-11  | 0.99913 |
|                  | 1.5                 | -3.73E-15 | 3.57E-13  | 6.98E-11  | 0.99986 |
|                  | 2.0                 | -3.08E-15 | -1.33E-13 | 8.60E-11  | 0.99954 |
| 70               | 1.0                 | 1.20E-15  | -1.30E-12 | 2.19E-10  | 0.99461 |
|                  | 1.5                 | 1.41E-15  | -1.49E-12 | 2.58E-10  | 0.99583 |
|                  | 2.0                 | 8.11E-16  | -1.51E-12 | 3.06E-10  | 0.99557 |