

## บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

### 4.1 สมการ quadratic

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองจาก 15 การทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจากการวิเคราะห์พื้นที่ตอบสนอง พบว่าสมการ quadratic ที่ใช้ทำนายขนาดเกล็ดนูล ขนาดอนุภาคแป้ง และร้อยละการเกาะตัวกันของแป้ง ได้ตั้งสมการที่ (4.1) (4.2) และ (4.3) โดยสมการที่ได้ตั้งกล่าวนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้ทำนายขนาดเกล็ดนูล ขนาดอนุภาคแป้ง และร้อยละการเกาะตัวกันของแป้งที่ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.965 0.941 และ 0.938 ตามลำดับ

สำหรับขนาดเกล็ดนูลแป้ง:

$$Y_1 = 7.19 - 0.07X_1 - 0.11X_2 - 0.02X_3 - 0.01X_1^2 + 0.01X_2^2 + 0.01X_3^2 - 0.02X_1X_2 + 0.02X_1X_3 - 0.04X_2X_3 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.965$$

สำหรับขนาดอนุภาคแป้ง:

$$Y_2 = 16.59 + 2.22X_1 - 2.80X_2 + 3.62X_3 + 2.91X_1^2 - 0.21X_2^2 + 3.60X_3^2 - 1.76X_1X_2 + 1.94X_1X_3 - 0.25X_2X_3 \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0.941$$

สำหรับร้อยละการเกาะตัวของแป้ง:

$$Y_3 = 9.16 + 1.59X_1 - 1.37X_2 + 0.84X_3 + 0.47X_1^2 - 0.07X_2^2 - 1.14X_3^2 + 0.25X_1X_2 - 0.64X_1X_3 - 0.78X_2X_3 \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0.938$$

ตารางที่ 4.1 ขนาดเกล็ดน้ำตาล ขนาดอนุภาคแป้ง และร้อยละการเกาะตัวกันของแป้ง

Factors			Average	Average	Degree of
Temperature	Velocity	Moisture	granule size	particle size	agglomeration
(°C)	(m/s)	% (d.b.)	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	(%)
$X_1$	$X_2$	$X_3$			
Cassava starch before drying			7.37 ± 0.03	21.47 ± 0.08	9.18 ± 0.03
120	20	50	7.35 ± 0.01	20.38 ± 0.35	9.17 ± 0.03
200	20	50	7.27 ± 0.01	27.55 ± 0.47	13.08 ± 0.04
120	40	50	7.15 ± 0.01	15.40 ± 0.01	5.54 ± 0.02
200	40	50	7.00 ± 0.03	15.51 ± 0.01	10.44 ± 0.05
120	30	40	7.30 ± 0.01	18.42 ± 0.01	6.11 ± 0.06
200	30	40	7.08 ± 0.02	19.80 ± 0.62	9.33 ± 0.02
120	30	60	7.25 ± 0.01	22.54 ± 1.43	8.92 ± 0.01
200	30	60	7.13 ± 0.01	31.67 ± 0.29	9.58 ± 0.03
160	20	40	7.30 ± 0.01	18.27 ± 0.08	7.42 ± 0.08
160	40	40	7.18 ± 0.01	16.06 ± 0.01	6.63 ± 0.02
160	20	60	7.30 ± 0.01	25.25 ± 0.37	10.81 ± 0.04
160	40	60	7.02 ± 0.02	22.04 ± 0.13	6.89 ± 0.03
160	30	50	7.19 ± 0.01	16.60 ± 0.03	9.16 ± 0.03
160	30	50	7.19 ± 0.01	16.59 ± 0.01	9.16 ± 0.02
160	30	50	7.18 ± 0.01	16.59 ± 0.02	9.15 ± 0.02

#### 4.2 นัยสำคัญของสภาวะในการอบแห้งที่มีต่อขนาดเกล็ดน้ำตาล ขนาดอนุภาคแป้ง และร้อยละการเกาะตัวกันของแป้ง

ค่า  $P$  ของขนาดเกล็ดน้ำตาล ขนาดอนุภาคแป้ง และร้อยละการเกาะตัวกันของแป้งแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งค่า  $P$  จะใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดนัยสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา รวมทั้งปัจจัยร่วมที่มีต่อขนาดเกล็ดน้ำตาล ขนาดอนุภาคแป้ง และร้อยละการเกาะตัวกันของแป้ง โดยถ้าค่า  $P$  น้อยกว่า

0.05 จะชี้ให้เห็นว่าแต่ละปัจจัยและปัจจัยร่วมนั้น ๆ มีผลต่อขนาดเกล็ดขนาดอนุภาคแป้ง และ ร้อยละการเกาะตัวกันของแป้งอย่างมีนัยสำคัญ

**ตารางที่ 4.2** ค่า *P* ของขนาดเกล็ดขนาดอนุภาคแป้ง และร้อยละการเกาะตัวกันของแป้ง

Factors	<i>P</i> -value of average granule size	<i>P</i> -value of average particle size	<i>P</i> -value of degree of agglomeration
$X_1$	0.002 <sup>a</sup>	0.024 <sup>a</sup>	0.003 <sup>a</sup>
$X_2$	<0.001 <sup>a</sup>	0.010 <sup>a</sup>	0.005 <sup>a</sup>
$X_3$	0.146	0.003 <sup>a</sup>	0.034 <sup>a</sup>
$X_1^2$	0.908	0.036 <sup>a</sup>	0.319
$X_2^2$	0.663	0.847	0.871
$X_3^2$	0.764	0.017 <sup>a</sup>	0.044 <sup>a</sup>
$X_1X_2$	0.335	0.132	0.574
$X_1X_3$	0.188	0.105	0.181
$X_2X_3$	0.059	0.809	0.116

<sup>a</sup> Significant

#### 4.2.1 ขนาดเกล็ด

ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งทั้งก่อนและหลังอบแห้งแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยพบว่าขนาดเกล็ดเฉลี่ยของแป้งก่อนอบแห้งลดลงจาก  $7.37 \pm 0.03$  ไมครอน เป็น  $7.00 \pm 0.03$  ถึง  $7.35 \pm 0.01$  ไมครอน เมื่อทำการอบแห้งแป้งแล้ว โดยจากการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 4.2 ผลแสดงให้เห็นว่าความเร็วลมร้อนมีผลกับขนาดเกล็ดแป้งเฉลี่ยมากกว่าอุณหภูมิร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง โดยที่ขนาดเกล็ดเฉลี่ยจะลดลงเมื่อความเร็วลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากความเร็วลมร้อนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้เกล็ดแป้งไหลมากระแทกกันด้วยแรงที่มากขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิความร้อน และความชื้นของแป้งเริ่มต้นที่มีต่อขนาดเกล็ดน้ำตาลเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังอบแห้ง

Temperature (°C)	Average granular size (µm)	Velocity (m/s)	Average granular size (µm)
120	7.26 ± 0.08	20	7.30 ± 0.03
160	7.19 ± 0.09	30	7.19 ± 0.07
200	7.12 ± 0.11	40	7.08 ± 0.09

#### 4.2.2 ขนาดอนุภาคแป้ง

อนุภาคแป้งคือเกล็ดน้ำตาลหลาย ๆ เกล็ดมารวมตัวกัน (Jones, 1940) ซึ่งจากตารางที่ 4.1 พบว่าขนาดอนุภาคแป้งเฉลี่ยก่อนอบแห้งคือ  $21.47 \pm 0.08$  ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเกล็ดน้ำตาลเฉลี่ยก่อนอบแห้งแป้ง ซึ่งเท่ากับ  $7.37 \pm 0.03$  ไมครอน แล้ว ผลชี้ให้เห็นว่าขนาดอนุภาคใหญ่กว่าขนาดเกล็ดน้ำตาลประมาณ 3 เท่า แต่ทว่าหลังจากอบแห้งแล้วกลับพบว่าแป้งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง

ค่า  $P$  ของขนาดอนุภาคในตารางที่ 4.2 ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิความร้อน ความเร็วลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของแป้งมีผลต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้ง โดยที่ความชื้นเริ่มต้นของแป้งจะมีอิทธิพลต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ความเร็วลมร้อน และอุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ตามลำดับ ส่วนปัจจัยร่วมของสภาวะการอบแห้งที่ทำการศึกษามีผลอย่างไรเลยต่อขนาดอนุภาค

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิความร้อน ความเร็วลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของแป้งที่มีต่อขนาดอนุภาคแป้งเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งหลังการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่อแป้งถูกอบแห้งด้วยอุณหภูมิความร้อนและความชื้นแป้งเริ่มต้นสูง รวมทั้งใช้ความเร็วลมร้อนในการอบแห้งที่ต่ำ ซึ่งในปัจจุบันนี้ยังไม่มีการศึกษาถึงกลไกการเกาะตัวของเกล็ดน้ำตาลเป็นอนุภาคแป้งขนาดใหญ่ แต่ทว่ามีการวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษากลไกการเกาะตัวในระหว่างการอบแห้งแบบต่าง ๆ ของอาหารผงชนิดอื่น ๆ ซึ่งงานวิจัยเหล่านั้นอธิบายว่ากลไกการเกาะตัวของอาหารผงมักเกิดจากการเกิดสะพานของเหลว (liquid bridge) ระหว่างอนุภาคอาหารผงการอบแห้ง ซึ่งการเกิดสะพานของเหลวนี้นี้มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง (glass transition) เมื่ออุณหภูมิของอาหารผงสูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้าย

แก้วเป็นสถานะคล้ายยาง อาหารผงนั้นจะเปลี่ยนจากลักษณะคล้ายแก้วหรือคล้ายของแข็งเป็นสถานะคล้ายยางหรือคล้ายของเหลวหนืด ดังนั้นอนุภาคอาหารผงจะมีความเหนียว และเมื่ออาหารผงเคลื่อนที่มาชนกันระหว่างการอบแห้ง อาหารผงจึงสามารถเกาะตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้

อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางของแป้งมันสำปะหลังที่มีความชื้นร้อยละ 27.30 (ฐานแห้ง) อยู่ที่ประมาณ 20 องศาเซลเซียส และค่าอุณหภูมินี้จะลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น (Perdomo และคณะ, 2009) ซึ่งในการทดลองนี้พบว่าร้อยละความชื้นต่ำสุดของแป้งเท่ากับร้อยละ 40 (ฐานแห้ง) ดังนั้นอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางของแป้งจึงควรต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแป้งในการทดลองนี้เปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางเรียบร้อยแล้วที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นทั้งก่อนและหลังการอบแห้งแบบพาหะลม แป้งจึงน่าจะเกาะตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ได้ด้วยการเกิดสะพานของเหลวระหว่างเกล็ดแป้ง

อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางของแป้งจะมีความเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ (Levine และ Slade, 1998) ซึ่ง Perdomo และคณะ (2009) รายงานว่าค่าอุณหภูมินี้จะลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น และแป้งที่มีความชื้นสูงจะมีลักษณะคล้ายยางมากกว่าแป้งที่มีความชื้นต่ำ เมื่อแป้งทั้งสองตัวอย่างนี้มีอุณหภูมิเท่ากัน ดังนั้นแป้งที่มีความชื้นสูงจึงมีแนวโน้มที่จะเกาะตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าแป้งที่มีความชื้นต่ำกว่า

**ตารางที่ 4.4** ผลของอุณหภูมิมร้อน ความเร็วลมร้อน และความชื้นของแป้งเริ่มต้นที่มีต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังอบแห้ง

Temperature (°C)	Average particle size (µm)	Velocity (m/s)	Average particle size (µm)	Moisture % (d.b.)	Average particle size (µm)
120	19.18±3.03	20	22.86±4.28	40	18.13±1.54
160	18.77±3.35	30	20.31±5.46	50	18.37±4.37
200	23.63±7.31	40	17.25±3.20	60	25.37±4.43

นอกจากนี้ จากข้อมูลในตารางที่ 4 ยังพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งจะลดลงเมื่อแป้งถูกอบแห้งที่ความเร็วลมร้อนสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเป็นสาเหตุให้อนุภาคแป้งแตก

ออกจากกัน ซึ่งถ้าอนุภาคแป้งได้รับแรงที่มากกว่าแรงจากสะพานของเหลวที่ใช้ยึดเกาะกัน อนุภาคแป้งจึงสามารถแตกตัวออกจากกันได้ (Verdurmen และคณะ, 2006)

#### 4.2.3 ร้อยละการเกาะตัวกัน

ร้อยละการเกาะตัวกันของแป้งจะแสดงถึงจำนวนของแป้งที่มีขนาดใหญ่กว่า 150 ไมครอน หรือแป้งหยาบนั้นเอง ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 พบว่า ร้อยละการเกาะตัวกันของแป้งที่ผ่านการอบแห้งจะอยู่ในช่วงร้อยละ 5.54 ถึง 13.08 แต่ทว่าก่อนการอบแห้ง แป้งจะมีร้อยละการเกาะตัวเท่ากับร้อยละ 9.18 ซึ่งผลนี้ชี้ให้เห็นว่ามีแป้งบางส่วนเกาะกันเป็นแป้งหยาบตั้งแต่อ่อนอบแห้งแล้ว

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 ค่า  $P$  ของร้อยละการเกาะตัวชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบแห้ง ความเร็วลมร้อนในการอบแห้ง และความชื้นของแป้งเริ่มต้นมีผลต่อร้อยละการเกาะตัวกันของแป้ง ซึ่งอุณหภูมิลมร้อนจะมีอิทธิพลสูงสุดต่อร้อยละการเกาะตัวกันของแป้ง รองลงมาได้แก่ความเร็วลมร้อนและความชื้นของแป้งเริ่มต้น ตามลำดับ

ข้อมูลในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการเกาะตัวกันของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลมร้อนและความชื้นของแป้งเริ่มต้นสูงขึ้น และความเร็วลมร้อนต่ำลง ซึ่งผลนี้สอดคล้องกับผลของอนุภาคเฉลี่ยของแป้ง

ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลมร้อน และความชื้นของแป้งเริ่มต้นที่มีต่อร้อยละการเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังอบแห้ง

Temperature (°C)	degree of agglomeration (%)	Velocity (m/s)	degree of agglomerati on (%)	Moisture % (d.b.)	degree of agglomeration (%)
120	7.43±1.88	20	10.12±2.41	40	7.37±1.41
160	8.45±1.52	30	8.77 ±1.19	50	9.05±2.23
200	10.61±1.71	40	7.37±2.12	60	9.38±1.64