

## บทที่ 4

### ผลและการวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของแป้งถั่วเขียว

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของแป้งถั่วเขียวดิบ

เมล็ดถั่วเขียวแกะเปลือก ตราไรท์พิช บดด้วยเครื่องบดแบบค้อน ผ่านตะแกรงขนาด 0.8 มิลลิเมตร ร่อนด้วยเครื่องคัดแยกขนาดเพื่อให้ได้แป้งถั่วเขียวที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 50 – 100 เมช ได้แป้งถั่วเขียวดิบนำมาวัดความหนาแน่น (bulk density) ตามวิธีของ (Tisdall, 1951) ค่าการดูดซึมน้ำ (WAI) และค่าการละลายน้ำ (WSI) โดยวิธีวัดการดูดซึมน้ำและการละลายน้ำ (Anderson, 1982) วิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) โดยวิธี starch hydrolysis (Goni *et al.*, 1997) วัดปริมาณความชื้น โดยใช้เครื่อง Moisture Analyzer วิเคราะห์หาปริมาณอะไมโลส (amylose content) โดยวิธีทำปฏิกิริยากับไอโอดีน (Pomeranz, 1985) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของแป้งถั่วเขียวดิบ

| คุณสมบัติ                | ผลการทดลอง |
|--------------------------|------------|
| ความหนาแน่นก่อนบด (g/ml) | 0.85±0.01  |
| ปริมาณความชื้น (%)       | 12.49±0.18 |
| การละลายน้ำ (%)          | 33.89±2.73 |
| การดูดซึมน้ำ             | 2.84±0.11  |
| ปริมาณอะไมโลส (%)        | 32.00±0.00 |
| ค่าดัชนีไกลซีมิก         | 66.10±0.59 |

เมล็ดถั่วเขียวแกะเปลือกมีความหนาแน่น 0.85 g/ml เมื่อนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบค้อน ผ่านตะแกรงขนาด 0.8 มิลลิเมตร ร่อนด้วยเครื่องคัดแยกขนาด ได้แป้งถั่วเขียวที่มีขนาดอนุภาค ในช่วง 50 – 100 เมช วัดปริมาณความชื้นได้ 12.49 % ซึ่งปริมาณความชื้นของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity; RH) ของอากาศขณะเก็บผลิตภัณฑ์ ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

แป้งจะมีความชื้นต่ำด้วย ถ้าความชื้นสูงเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำไว้มาก ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ภายใต้สภาวะอากาศปกติแป้งโดยทั่วไปจะมีความชื้น 10-20% (w/w) (สุนีย์ และคณะ, 2543) สามารถละลายน้ำได้ค่อนข้างต่ำ มีค่าการละลายน้ำ 33.89 % และมีค่าการดูดซึมน้ำ 2.84 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณอะไมโลสที่มีอยู่สูง 32.00 % ขีดขวางการละลายน้ำและการดูดซึมน้ำ (สุนีย์ และคณะ, 2543) และมีค่า GI เท่ากับ 66.10 ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chung *et al.*, (2008) ศึกษาถั่วเขียวสามสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทยแคนาดา มีค่า GI อยู่ในช่วง 65.8 - 68.4 จัดอยู่ในกลุ่ม GI ปานกลาง (มีค่า GI ระหว่าง 56- 69)

#### 4.1.2 พฤติกรรมด้านความหนืดของแป้งถั่วเขียวเมื่อเกิดเจลลาตินไนซ์

พฤติกรรมด้านความหนืดของแป้งถั่วเขียวเมื่อเกิดเจลลาตินไนซ์ จากถั่วเขียวเลาะเปลือกที่บดและร่อนมีขนาดอนุภาคในช่วง 50 – 100 ไมครอน โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติที่วัดได้จากเครื่อง RVA

| ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง RVA | ผลการทดลอง   | Thao and Noomhorm (2011) |
|-----------------------------|--------------|--------------------------|
| peak time (min)             | 4.60±0.21    | 4.49±0.08                |
| peak viscosity (RVU)        | 574.33±5.51  | 427.31±0.03              |
| holding strength (RVU)      | 446.00±13.89 | 332.33±0.04              |
| breakdown (RVU)             | 128.33±15.04 | 94.97±0.75               |
| final viscosity (RVU)       | 871.67±28.87 | 599.69±7.90              |
| setback form through (RVU)  | 425.67±24.01 | 267.36±7.57              |
| pasting temperature ( °C)   | 78.10±0.21   | 76.83±0.03               |

จากการทดลองพบว่าเวลาที่เกิดพีคของความหนืดเริ่มที่ 4.60 นาที ซึ่งใช้เวลามากกว่า และมีค่าความหนืดสูงกว่าการทดลองของ Thao and Noomhorm (2011) ซึ่งศึกษาพฤติกรรมทำให้ค่าความหนืดของแป้งถั่วเขียวขณะเกิดเจลลาตินไนซ์ด้วยเครื่อง RVA ก่อนที่จะนำถั่วเขียวผ่าน

กระบวนการ *annaeling* ซึ่งค่าความหนืดที่สูงกว่านี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากวัตุดิบ และการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน

ค่าความหนืดสูงสุด (*peak viscosity*) คือ ค่าที่แสดงความหนืดสูงสุดของแป้งเมื่อเม็ดแป้งส่วนใหญ่ของตัวเต็มที่ ระหว่างการให้ความร้อนซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการจับน้ำของแป้ง (รุ่งนภา, 2541) ความสามารถในการพองตัวและความคงทนต่อการแตกของเม็ดสตาร์ช แป้งถั่วเขียวดิบมีความหนืดสูงสุดเท่ากับ 574.33 RVU มีค่าสูงกว่ารายงานของ Thao and Noomhorm (2011) ที่มีความหนืดสูงสุดเท่ากับ 427.31 RVU

ค่าความหนืดต่ำสุด (*holding strength* หรือ *through*) คือ ค่าความหนืดต่ำสุดที่อยู่ระหว่างการทำให้เย็น ซึ่งแป้งถั่วเขียวดิบมีค่าเท่ากับ 446.00 มีค่าสูงกว่ารายงานของ Thao and Noomhorm (2011) ที่มีความหนืดต่ำสุดเท่ากับ 332.33 RVU

ค่าการสูญเสียความหนืด (*break down*) คือ ค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุดกับค่าความหนืดต่ำสุด (*peak viscosity - through*) ซึ่งแสดงถึงความคงตัวของเม็ดสตาร์ชต่อการแตกตัวหลังการเกิดเจลลิตินเซชัน เป็นค่าที่ได้ในช่วงระดับอุณหภูมิคงที่ เมื่อเม็ดสตาร์ชแตกตัว โมเลกุลของอะไมโลสจะหลุดออกมาสู่สารละลายมากยิ่งขึ้น (รุ่งนภา, 2543) ค่าการสูญเสียความหนืดของแป้งถั่วเขียวดิบมีค่าเท่ากับ 128.33 RVU มีค่าสูงกว่ารายงานของ Thao and Noomhorm (2011) ที่มีค่าการสูญเสียความหนืด 94.97 RVU

ค่าความหนืดสุดท้าย (*final viscosity*) คือ ค่าความหนืดสุดท้ายหลังจากผ่านการทำให้เย็นเป็นความหนืดที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งเรียงตัวกันอีกครั้ง เรียกการคืนตัวของแป้งสุก (*retrogradation*) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งถั่วเขียวดิบมีค่าเท่ากับ 871.67 RVU มีค่าสูงกว่ารายงานของ Thao and Noomhorm (2011) ที่มีค่าความหนืดสุดท้าย 599.69 RVU

ค่าการคืนตัว (*setback*) คือ ค่าการเพิ่มความหนืดก่อนแป้งสุกเมื่อผ่านการทำให้เย็นลง หรือผลต่างของค่าความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (*final viscosity - through*) เป็นผลมาจากเมื่อมีการต้มแป้งเม็ดสตาร์ชจะมีการพองตัวและแตกตัวทำให้โมเลกุลของสตาร์ชบางส่วนละลายออกมา โดยโมเลกุลที่ละลายออกมาจากเม็ดสตาร์ชสามารถเคลื่อนที่มาจับกันเป็นโครงสร้างร่างแหที่มีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อแป้งสุกเย็นตัวลง เป็นผลทำให้ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น เรียกว่า การเกิดรีโทรกราเดชัน จากผลการศึกษาค่าการคืนตัวของแป้งถั่วเขียวดิบมีค่าเท่ากับ 871.67 RVU มีค่าสูงกว่ารายงานของ Thao and Noomhorm (2011) ที่มีค่าการคืนตัว 267.36 RVU

อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น (pasting temperature, PT) คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืดหรืออุณหภูมิที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ใน 20 วินาที โดยอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้นของแป้งถั่วเขียวดิบเท่ากับ 78.10 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับรายงานของ Thao and Noomhorm (2011) ที่อุณหภูมิ 76.83 องศาเซลเซียส

#### 4.2 ผลของการนึ่งและการอบแห้งถั่วเขียวต่อสมบัติทางกายภาพ เคมีและดัชนีไกลซีมิก

##### 4.2.1 ผลของการเตรียมแป้งถั่วเขียวปรับสภาพ

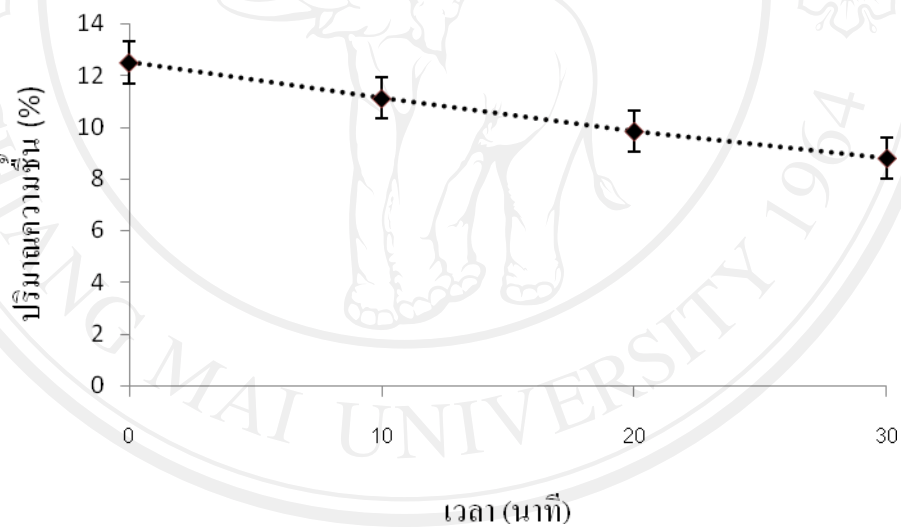
แป้งถั่วเขียวละลายเปลือกในน้ำเป็นเวลา 30 นาที อัตราส่วนถั่วเขียว 0.5 กิโลกรัม ต่อ น้ำ 2 ลิตร หลังจากนั้นนึ่งถั่วเขียวเพื่อให้เกิดเจลบางส่วน โดยกำหนดเวลานึ่งแตกต่างกันเป็นเวลา 10 20 และ 30 นาที (นึ่ง 30 นาที ถั่วเขียวจะเกิดเจลตาในซ้ทั้งหมด) จากนั้นนำไปอบให้แห้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วิเคราะห์ความหนาแน่นของเมล็ดถั่วเขียวปรับสภาพ จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบค้อนผ่านตะแกรงขนาด 0.8 มิลลิเมตร และร่อนเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคในช่วง 50 – 100 เมช วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการละลายน้ำ ค่า GI และค่าความหนืด วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของการนึ่งถั่วเขียวที่เวลาแตกต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และดัชนีไกลซีมิกของถั่วเขียว

| คุณสมบัติ                | เวลานึ่ง (นาที)         |                         |                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                          | 0                       | 10                      | 20                       | 30                      |
| ปริมาณความชื้นหลังอบ (%) | 12.49±0.11 <sup>a</sup> | 11.11±0.08 <sup>b</sup> | 9.84±0.10 <sup>c</sup>   | 8.80±0.11 <sup>d</sup>  |
| ความหนาแน่น (g/ml)       | 0.85±0.01 <sup>a</sup>  | 0.71±0.00 <sup>b</sup>  | 0.66±0.05 <sup>b,c</sup> | 0.65±0.01 <sup>c</sup>  |
| การละลายน้ำ (%)          | 33.89±2.73 <sup>a</sup> | 14.98±1.53 <sup>b</sup> | 13.81±1.35 <sup>b</sup>  | 13.72±2.17 <sup>b</sup> |
| การดูดซึมน้ำ             | 2.84±0.11 <sup>b</sup>  | 3.90±0.16 <sup>a</sup>  | 3.88±0.05 <sup>a</sup>   | 3.98±0.12 <sup>a</sup>  |
| ดัชนีไกลซีมิก            | 66.10±0.59 <sup>a</sup> | 64.21±0.64 <sup>b</sup> | 63.05±0.88 <sup>b</sup>  | 60.03±0.39 <sup>c</sup> |

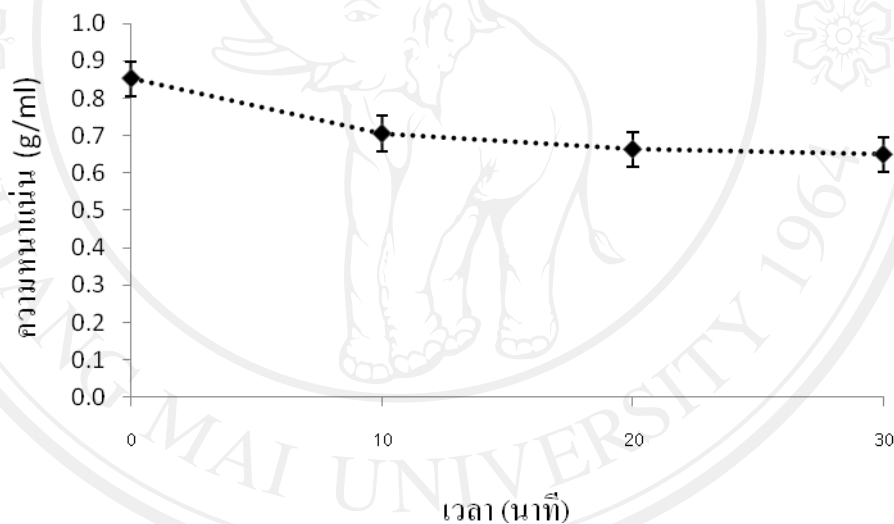
ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในแถวเดียวกัน หมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากตารางที่ 4.3 พบว่าระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ความชื้นของเมล็ดถั่วเขียวนึ่งจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาในการนึ่งถั่วเขียวเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.1 ถั่วเขียวนึ่งเป็นเวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ยความชื้นต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการนึ่งเพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเสียหายของเมล็ดถั่วเขียวทำให้เมล็ดถั่วเขียวสุกจนแตกและขยายตัวมีพื้นผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการนึ่งไปอบแห้งเพื่อลดความชื้นด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการนึ่ง 30 นาทีซึ่งมีเมล็ดถั่วเขียวสุกจนแตกและขยายตัวมีพื้นผิวสัมผัสมากที่สุด สามารถระเหยน้ำได้มาก ทำให้ความชื้นลดลงได้มากที่สุด



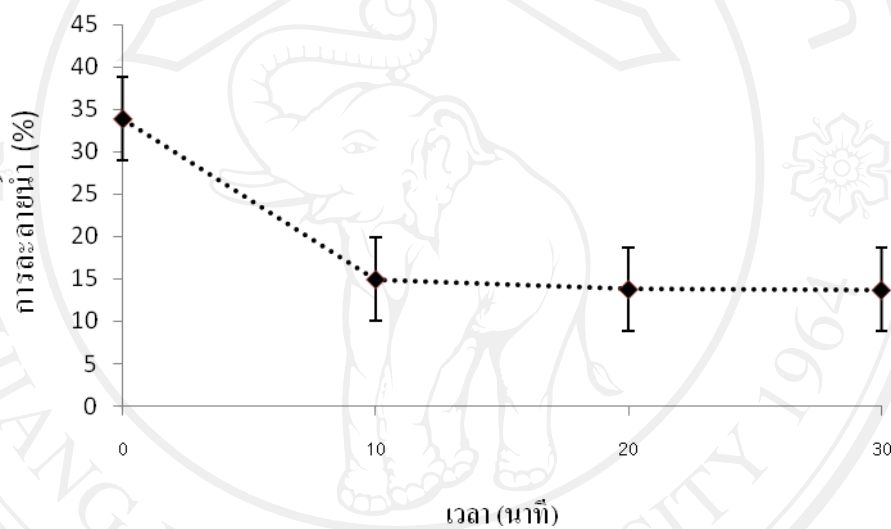
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวและปริมาณความชื้นหลังอบถั่วเขียว

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ความหนาแน่น คือ อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตร ความหนาแน่นของเมล็ดถั่วเขียวนึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาในการนึ่งถั่วเขียวเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.2 ถั่วเขียวนึ่งเป็นเวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นต่ำที่สุด เนื่องจากผิวของเมล็ดถั่วเขียวแตกและขยายตัวมากขึ้น เมื่ออบแห้ง ทำให้มีน้ำหนักเบา และปริมาตรลดลง เนื่องจากน้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญของอาหารสด การกำจัดน้ำส่วนใหญ่ออกจากอาหาร ทำให้มีความหนาแน่นรวมลดลง (James *et al.*, 2005)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวและความหนาแน่นหลังอบถั่วเขียว

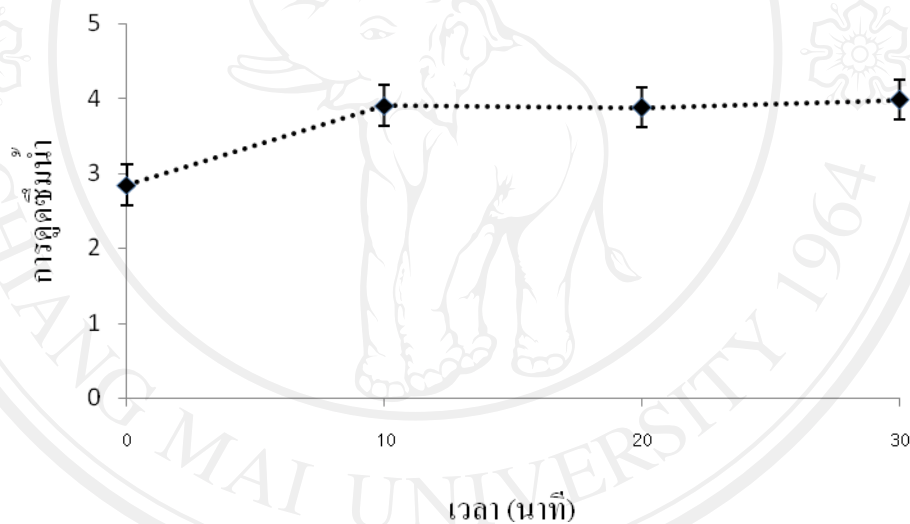
จากตารางที่ 4.3 พบว่า ถั่วเขียวที่ผ่านการนึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า ถั่วเขียวดิบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการนึ่งทำให้โครงสร้างของเมล็ดแป้งถั่วเขียวมีการจัดเรียงตัวใหม่มีความแข็งแรงของผลึกมากขึ้น ทำให้ละลายน้ำได้ยากขึ้น (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2550; นิธิยา, 2549) ส่วนระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวไม่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวและค่าการละลายน้ำ หลังอบถั่วเขียว



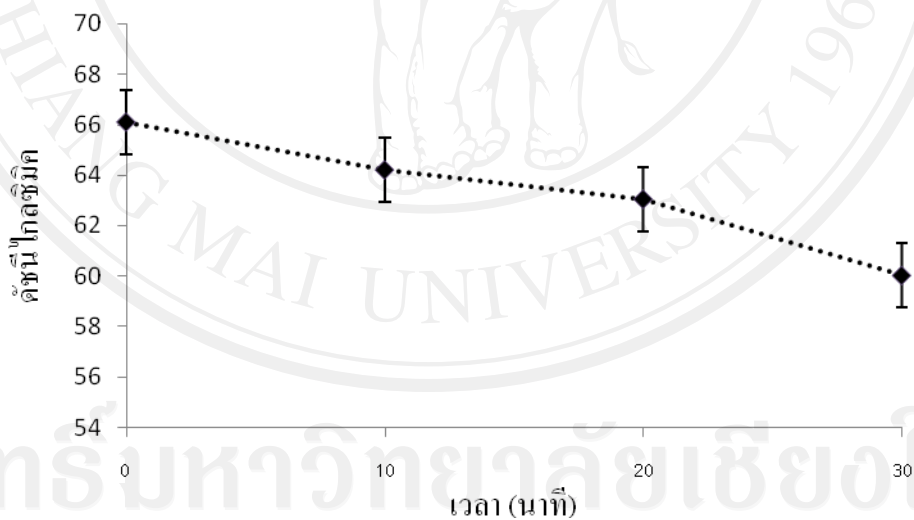
จากตารางที่ 4.3 พบว่า ถั่วเขียวที่ผ่านการนึ่งมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้มากกว่า ถั่วเขียวดิบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ดังรูปที่ 4.4 แป้งมีสมบัติไม่ละลายในน้ำเย็น แต่สามารถดูดซึมน้ำและเกิดการพองตัวได้ เมื่อถั่วเขียวผ่านการนึ่งทำให้เม็ดแป้งได้รับความร้อน จะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อยโมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ทำให้เกิดสภาพเป็นเมทริกซ์ซึ่งยึดอยู่ด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น (นิธิยา, 2549)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวและค่าการดูดซึมน้ำ หลังอบถั่วเขียว



จากตารางที่ 4.3 พบว่าผลของการนึ่งและระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวมีความสัมพันธ์กับค่า GI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ค่า GI ของเมล็ดถั่วเขียวนึ่งจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาในการนึ่งถั่วเขียวเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.5 ถั่วเขียวนึ่งเป็นเวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ย GI ต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการนึ่งส่งผลต่อโครงสร้างของเมล็ดแป้งทำให้โครงสร้างของเมล็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้เอนไซม์ทำงานได้ยากขึ้น สามารถย่อยแป้งได้น้อยลง ทำให้วิเคราะห์ค่า GI ได้ต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ คลฤดีและคณะ (2550) รายงานว่าการเก็บข้าวเปลือกด้วยวิธีธรรมชาติไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า GI ในขณะที่การเร่งความแก่ด้วยวิธีทางความร้อนจะส่งผลต่อค่า GI ให้ลดลง แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเมล็ดแป้ง หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน มีส่วนไปขัดขวางการย่อยของเอนไซม์ทำให้ย่อยได้ยากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นและระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศนานขึ้นยังส่งผลให้ค่า GI ลดลงอีกด้วย



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการนึ่งถั่วเขียวและค่าดัชนีไกลซีมิก หลังอบถั่วเขียว

#### 4.2.2 ความหนืดของแป้งถั่วเขียวปรับสภาพขณะเกิดเจลลิตไนซ์

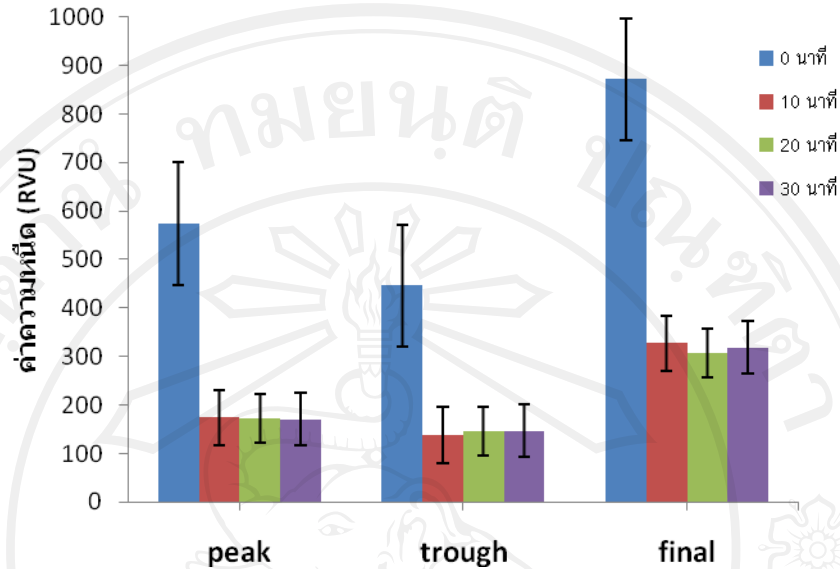
พฤติกรรมด้านความหนืดของแป้งถั่วเขียวปรับสภาพขณะเกิดเจลลิตไนซ์ที่ได้จากถั่วเขียวเลาะเปลือก ตราไรทิพย์ ซึ่งผ่านการนึ่งที่เวลา 10 20 และ 30 นาที โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งปรับสภาพโดยการนึ่งที่เวลาต่างๆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) ได้ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 ผลของการนึ่งต่อคุณสมบัติที่วัดได้จากเครื่อง RVA

| ค่าที่วัดได้จากเครื่อง RVA | เวลานึ่ง (นาที)           |                           |                          |                            |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
|                            | 0                         | 10                        | 20                       | 30                         |
| peak viscosity (RVU)       | 574.33±5.51 <sup>b</sup>  | 174.00±10.58 <sup>a</sup> | 172.33±6.66 <sup>a</sup> | 171.00±4.58 <sup>a</sup>   |
| holding strength (RVU)     | 446.00±13.89 <sup>b</sup> | 138.67±4.73 <sup>a</sup>  | 145.00±9.54 <sup>a</sup> | 146.67±3.06 <sup>a</sup>   |
| breakdown (RVU)            | 128.33±15.04 <sup>b</sup> | 35.33±9.07 <sup>a</sup>   | 27.33±3.51 <sup>a</sup>  | 24.33±4.04 <sup>a</sup>    |
| final viscosity (RVU)      | 425.67±28.87 <sup>b</sup> | 327.00±6.00 <sup>a</sup>  | 307.67±3.06 <sup>a</sup> | 318.67±3.61 <sup>a</sup>   |
| setback form through (RVU) | 871.67±24.01 <sup>c</sup> | 188.33±2.08 <sup>b</sup>  | 162.67±7.37 <sup>a</sup> | 172.00±5.69 <sup>a,b</sup> |
| pasting temperature (°C)   | 70.80±0.78 <sup>a</sup>   | 81.60±0.36 <sup>c</sup>   | 94.86±0.22 <sup>d</sup>  | 78.10±0.21 <sup>b</sup>    |

ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากตารางที่ 4.4 พบว่าการนึ่งถั่วเขียวมีผลต่อค่าความหนืดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ส่วนระยะเวลาในการนึ่งไม่มีผลต่อค่าความหนืดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) พบว่าแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวปรับสภาพมีอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น (PT) ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และระยะเวลาในการนึ่งมีผลต่อ PT อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) อีกด้วยโดยแป้งถั่วเขียวดิบมีค่าเฉลี่ย PT ต่ำที่สุด 70.80 องศาเซลเซียส แป้งถั่วเขียวนึ่งเป็นเวลา 30 10 20 นาที มีค่าเฉลี่ย PT เท่ากับ 78.10, 81.60, 94.86 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าความหนืดจากการทดลองให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองของ Chung *et al.*, (2000) ซึ่งทำการทดลอง annealed ถั่วเขียวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ สภาวะควบคุมอุณหภูมิห้อง, 45, 50, 55, 60 องศาเซลเซียสมี PT อยู่ในช่วง 71.90 - 80.40 องศาเซลเซียส แป้งถั่วเขียวปรับสภาพทำให้มี PT สูงขึ้นเนื่องจากการนึ่งทำให้เม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างใหม่ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องให้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อเกิดเจลลิตไนเซชันของแป้ง (นิธิยา, 2549)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งถั่วเขียวปรับสภาพ

#### 4.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่า GI ระหว่างการเตรียมแป้งถั่วเขียว

จากการทดลองผลของการนึ่งและการอบแห้งถั่วเขียวที่มีต่อค่า GI พบว่าค่า GI ลดลงเมื่อระยะเวลาในการนึ่งเพิ่มขึ้น จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาการลดลงของค่า GI ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมแป้งปรับสภาพ โดยวางแผนการทดลองแบบ 2x3 Factorial Design กำหนดเวลาในการนึ่งเป็น 2 ระดับได้แก่ 10 และ 30 นาที และขั้นตอนในการวิเคราะห์ 3 ขั้นตอน

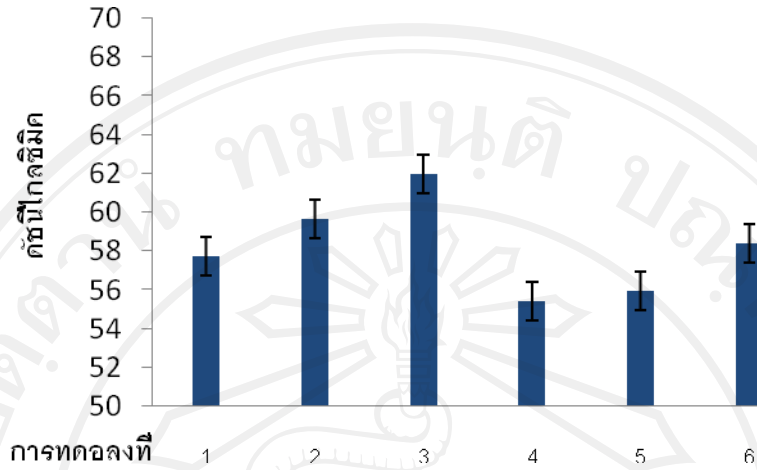
- (1) ถั่วเขียวนึ่งนำมาวิเคราะห์ทันที
- (2) ถั่วเขียวนึ่งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- (3) ถั่วเขียวนึ่งอบแห้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่า GI ระหว่างการเตรียมแป้งข้าวเจ้า

| การทดลองที่ | ขั้นตอนที่นำมาวิเคราะห์  | GI                        |
|-------------|--|---------------------------|
| 1.          | นึ่งข้าว 10 นาที นำมาวิเคราะห์ทันที  | 57.72±0.21 <sup>b,c</sup> |
| 2.          | นึ่งข้าว 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์                             | 59.68±0.47 <sup>b</sup>   |
| 3.          | นึ่งข้าว 10 นาที อบแห้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์ | 61.95±0.31 <sup>a</sup>   |
| 4.          | นึ่งข้าว 30 นาที นำมาวิเคราะห์ทันที  | 55.40±0.70 <sup>c</sup>   |
| 5.          | นึ่งข้าว 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์                             | 55.93±0.62 <sup>c</sup>   |
| 6.          | นึ่งข้าว 30 นาที อบแห้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์ | 58.43±0.53 <sup>b</sup>   |

ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 4.5 พบว่าขั้นตอนที่นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ มีความสัมพันธ์กับค่า GI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ที่ระยะเวลาการนึ่ง 10 และ 30 นาทีเป็นไปในทางเดียวกันคือ เมื่อเริ่มการวิเคราะห์เร็วขึ้นค่า GI ที่ได้จะน้อยลง ค่า GI ของเมล็ดข้าวที่วิเคราะห์แต่ละขั้นตอนมีค่าดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากการวิเคราะห์แต่ละตัวอย่าง ใช้ปริมาณน้ำหนักเท่ากัน แต่การนำตัวอย่างแต่ละขั้นตอนมาวิเคราะห์นั้นความชื้นและปริมาณน้ำในตัวอย่างจะลดลงตามลำดับ จึงทำให้ค่า GI ที่วิเคราะห์ได้แต่ละขั้นตอนมีปริมาณมากขึ้นจากปริมาณของตัวอย่างที่ชั่งนำมาวิเคราะห์เพิ่มขึ้น และมีน้ำหนักคงที่ สะดวกต่อการวิเคราะห์และการคำนวณ



หมายเหตุ : 1 คือ นึ่งข้าว 10 นาที นำมาวิเคราะห์ทันที

2 คือ นึ่งข้าว 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำมาวิเคราะห์

3 คือ นึ่งข้าว 10 นาที อบแห้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์

4 คือ นึ่งข้าว 30 นาที นำมาวิเคราะห์ทันที

5 คือ นึ่งข้าว 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำมาวิเคราะห์

6 คือ นึ่งข้าว 30 นาที อบแห้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนที่นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่เวลานึ่ง

10 และ 30 นาที กับค่าดัชนีคลอโรฟิลล์

#### 4.3 ผลของปริมาณความชื้นของแป้งข้าวเขียวและอุณหภูมิของเครื่องเอกซ்தูเตอร์แบบสกรูเดี่ยว ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและดัชนีไกลซีมิก

ในการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งข้าวเขียวปรับสภาพโดยผ่านการนึ่ง 30 นาที ซึ่งมีค่า GI น้อยที่สุดมาเข้ากระบวนการเอกซ்தูชัน โดยใช้แผนการทดลองแบบ  $2^3$  (CCD) กำหนดสภาวะการทดลองดังต่อไปนี้ แปรปริมาณความชื้นในช่วง 14–20 % อุณหภูมิโซนที่ 2 ในช่วง 80-120 องศาเซลเซียส อุณหภูมิไคในช่วง 120-160 องศาเซลเซียส อุณหภูมิโซนที่ 1 เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วของใบมีดคัตเตอร์ 150 รอบต่อนาที ความเร็วสกรู เท่ากับ 100 รอบต่อนาที อัตราการป้อนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที หัวไคแบบกลมขนาด 3 มิลลิเมตร ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บดและร่อนให้มีขนาดอนุภาคในช่วง 50 – 100 เมช วัดคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและดัชนีไกลซีมิกได้ผลดังตารางที่ 4.6

นำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป design-expert 6.0 เพื่อหาสมการถดถอย สมการที่ได้เป็นสมการที่มีรหัสของตัวแปรอิสระต่างๆ (coded equation) (ตารางภาคผนวก ง.1) และนำสมการมาถอดรหัสของตัวแปรอิสระ (decoded equation) ซึ่งสมการที่เลือกเป็นสมการที่มีค่า adjust  $R^2$  (coefficient of determination) เข้าใกล้ 1 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้ดี ตัวแปรต้นได้แก่ อุณหภูมิโซนที่ 2 ( $Z_2$ ) อุณหภูมิโซนไค ( $Z_3$ ) และปริมาณความชื้น (M) และตัวแปรตามที่ศึกษาได้แก่ พลังงานกลจำเพาะ อัตราการพองตัว ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การละลายน้ำ ความหนืด และดัชนีไกลซีมิก นำสมการถดถอยถอดรหัสที่ได้ไปสร้างกราฟพื้นที่ตอบสนอง (response surface) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้น ภายในขอบเขตระดับต่ำถึงระดับสูงได้

ผลของการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซ்தูเตอร์แบบสกรูเดี่ยว ต่อพลังงานกลจำเพาะ อัตราการพองตัว ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การละลายน้ำ ความหนืด และดัชนีไกลซีมิกของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซเรย์แบบสกรูเดี่ยว  
ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและดัชนีไกลซีมิก

| สภาวะ | อุณหภูมิโชน 2 (°C) | อุณหภูมิโชน 1 (°C) | ปริมาณความชื้น (%) | สมบัติ          |           |                     |           |            |                 |                |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------|---------------------|-----------|------------|-----------------|----------------|
|       |                    |                    |                    | SME (k.w.hr/kg) | expansion | bulk density (g/ml) | WAI       | WSI (%)    | viscosity (RVU) | glycemic index |
| 1     | 80                 | 120                | 14                 | 0.08±0.00       | 1.21±0.05 | 0.65±0.00           | 6.16±0.02 | 14.84±0.93 | 150.33±6.66     | 58.32±1.00     |
| 2     | 120                | 120                | 14                 | 0.09±0.00       | 1.26±0.02 | 0.63±0.02           | 6.75±0.07 | 14.73±1.26 | 152.67±4.12     | 57.79±0.32     |
| 3     | 80                 | 160                | 14                 | 0.10±0.00       | 1.42±0.03 | 0.45±0.03           | 7.25±0.15 | 14.12±0.92 | 127.33±5.69     | 57.97±1.48     |
| 4     | 120                | 160                | 14                 | 0.09±0.01       | 1.38±0.02 | 0.46±0.00           | 7.35±0.11 | 12.52±1.18 | 127.33±4.62     | 54.92±1.05     |
| 5     | 80                 | 120                | 20                 | 0.11±0.01       | 1.53±0.06 | 0.47±0.01           | 6.84±0.20 | 13.62±0.18 | 146.33±4.04     | 55.78±1.50     |
| 6     | 120                | 120                | 20                 | 0.10±0.01       | 1.70±0.06 | 0.32±0.02           | 6.55±0.15 | 12.21±0.65 | 107.67±6.11     | 56.53±1.11     |
| 7     | 80                 | 160                | 20                 | 0.09±0.01       | 1.24±0.03 | 0.49±0.02           | 6.01±0.62 | 13.20±0.75 | 153.33±11.06    | 54.28±1.10     |
| 8     | 120                | 160                | 20                 | 0.10±0.01       | 1.42±0.06 | 0.50±0.02           | 7.00±0.11 | 13.54±1.14 | 128.33±8.14     | 53.31±0.45     |
| 9     | 66                 | 140                | 17                 | 0.09±0.01       | 1.25±0.03 | 0.51±0.01           | 6.27±0.18 | 12.57±1.08 | 155.67±6.50     | 58.29±0.99     |
| 10    | 134                | 140                | 17                 | 0.08±0.00       | 1.64±0.03 | 0.40±0.02           | 6.29±0.15 | 10.80±0.65 | 109.00±10.82    | 55.19±1.02     |
| 11    | 100                | 106                | 17                 | 0.14±0.00       | 1.78±0.04 | 0.40±0.03           | 6.38±0.37 | 11.85±0.93 | 101.67±6.43     | 57.32±1.06     |
| 12    | 100                | 174                | 17                 | 0.09±0.00       | 1.37±0.03 | 0.47±0.02           | 6.81±0.27 | 12.89±0.21 | 121.33±9.29     | 56.87±0.41     |
| 13    | 100                | 140                | 12                 | 0.12±0.00       | 1.52±0.07 | 0.46±0.03           | 6.83±0.58 | 13.96±0.90 | 120.33±12.74    | 56.92±1.06     |
| 14    | 100                | 140                | 22                 | 0.10±0.01       | 1.39±0.09 | 0.48±0.01           | 6.40±0.36 | 11.16±0.28 | 128.33±5.13     | 57.91±0.45     |
| 15    | 100                | 140                | 17                 | 0.11±0.01       | 1.29±0.04 | 0.49±0.00           | 6.70±0.12 | 11.44±0.20 | 156.00±7.21     | 57.72±0.40     |
| 16    | 100                | 140                | 17                 | 0.11±0.00       | 1.30±0.04 | 0.49±0.00           | 6.53±0.08 | 10.88±0.35 | 156.00±11.00    | 57.44±1.00     |
| 17    | 100                | 140                | 17                 | 0.11±0.01       | 1.31±0.03 | 0.50±0.00           | 6.48±0.28 | 10.16±0.19 | 154.33±6.03     | 57.40±1.16     |
| 18    | 100                | 140                | 17                 | 0.12±0.01       | 1.32±0.03 | 0.50±0.00           | 6.63±0.04 | 10.60±0.67 | 155.33±4.04     | 57.61±1.14     |
| 19    | 100                | 140                | 17                 | 0.11±0.01       | 1.30±0.03 | 0.50±0.00           | 6.62±0.06 | 11.04±0.73 | 156.67±3.79     | 57.86±1.13     |
| 20    | 100                | 140                | 17                 | 0.11±0.00       | 1.33±0.03 | 0.49±0.01           | 6.72±0.37 | 10.84±0.67 | 155.33±7.77     | 57.37±0.93     |

\* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

All rights reserved



#### 4.3.1 ค่าพลังงานกลจำเพาะของเครื่องเอกซโทเตอร์

ผลของการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซโทเตอร์แบบสกรูเดี่ยว ต่อค่าพลังงานกลจำเพาะของเครื่องเอกซโทเตอร์ดังตารางที่ 4.6 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อค่าพลังงานกลจำเพาะของเครื่องเอกซโทเตอร์

#### 4.3.2 อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์

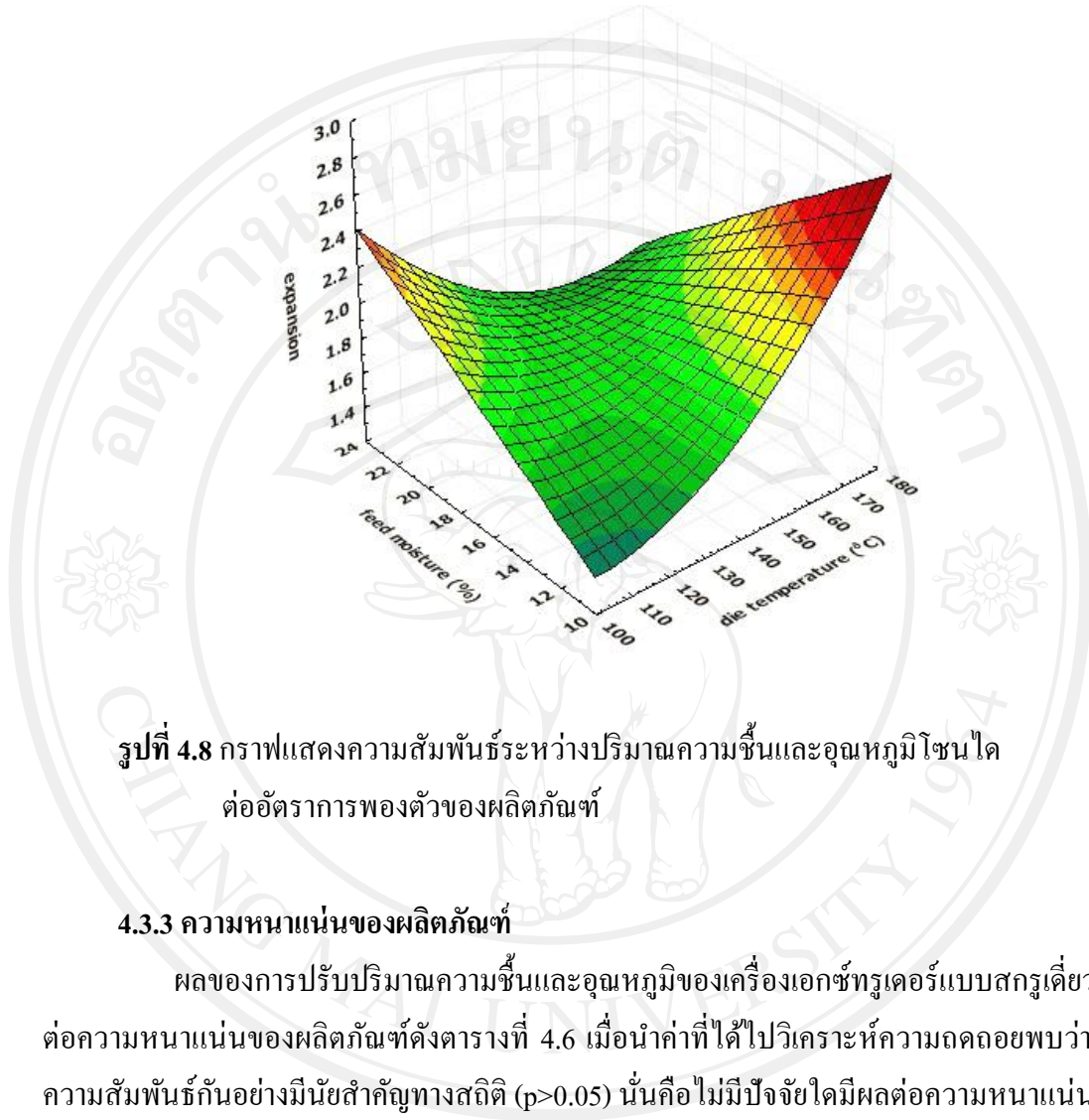
ผลของการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซโทเตอร์แบบสกรูเดี่ยว ต่ออัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.6 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าปัจจัยอุณหภูมิโซนที่ 2 อุณหภูมิโซนใด ปริมาณความชื้น และปัจจัยร่วมของอุณหภูมิโซนใดกับปริมาณความชื้น มีความสัมพันธ์กับอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) เมื่อนำสมการที่ได้ (สมการ (1)) ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ (รูปที่ 4.8) จะเห็นได้ว่าอัตราการพองตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น และอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิโซนใดเพิ่มขึ้นซึ่งขัดแย้งกับการทดลองของ Gomez and Aguilera (1984) ซึ่งศึกษาการพองตัวของผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวโพด พบว่า วัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำจะเคลื่อนที่ภายในบาร์เรลได้ยากทำให้เกิดแรงเสียดทานมากขึ้นและใช้เวลานานขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์พองตัวและละลายน้ำได้มากขึ้น สาเหตุที่ผลการทดลองของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งถั่วเขียวขัดแย้งกับผลิตภัณฑ์แป้งข้าวโพดอาจของเนื่องมาจาก เม็ดแป้งของแป้งถั่วเขียวมีความคงตัวสูง และทนทานต่อแรงเสียดทานได้ดี (Oates and Lee, 1992) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวลดลง

$$\text{expansion} = 0.091 + 0.004*Z_2 - 0.018*Z_3 + 0.272*M + 0.0002*Z_3^2 - 0.002*Z_3*M \dots\dots\dots(1)$$

$$R^2 = 0.659$$

$$\text{Adj.}R^2 = 0.538$$

|       |       |     |                                 |
|-------|-------|-----|---------------------------------|
| เมื่อ | $Z_2$ | คือ | อุณหภูมิโซนที่ 2 (องศาเซลเซียส) |
|       | $Z_3$ | คือ | อุณหภูมิโซนใด (องศาเซลเซียส)    |
|       | M     | คือ | ปริมาณความชื้น (%)              |



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอุณหภูมิโซนได  
ต่ออัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์

#### 4.3.3 ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว  
ต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.6 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มี  
ความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อความหนาแน่นของ  
ผลิตภัณฑ์

#### 4.3.4 การดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว  
ต่อการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.6 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มี  
ความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อการดูดซึมน้ำของ  
ผลิตภัณฑ์

#### 4.3.5 การละลายน้ำของผลิตภัณฑ์

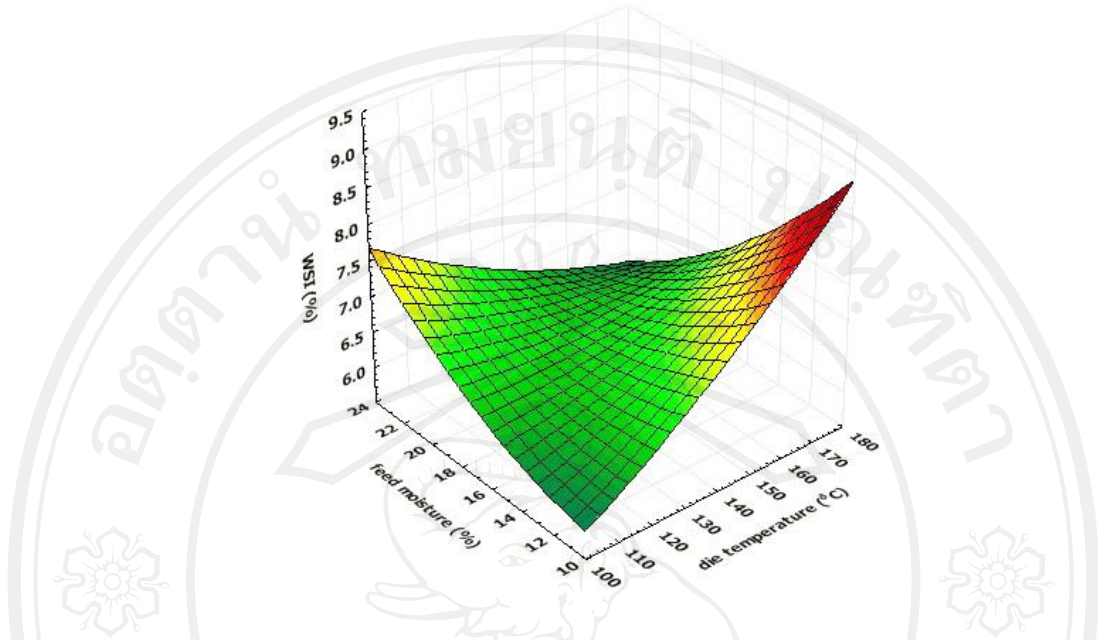
ผลของการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซทูเตอร์แบบสกรูเดี่ยว ต่อการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.6 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าปัจจัย อุณหภูมิโซนที่ 2 อุณหภูมิโซนไคและปริมาณความชื้น มีความสัมพันธ์กับการละลายน้ำของ ผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) เมื่อนำสมการที่ได้ (สมการ (2)) ไปสร้างกราฟแสดง ความสัมพันธ์ (รูปที่ 4.9) จะเห็นได้ว่าการละลายน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น การ ละลายน้ำของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำจะเคลื่อนที่ ภายในบาร์เรลได้ยากทำให้เกิดแรงเสียดทานมากขึ้นและใช้เวลานานขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ละลายน้ำได้ มากขึ้น (Gomez and Aguilera, 1984) สอดคล้องกับงานวิจัยของศราวูดีและอวยพร (2546) ; Ding *et al.*, (2006) ซึ่งรายงานถึงอุณหภูมิและความเร็วสกรูมีผลทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลาย มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นช่วยปกป้องโครงสร้างของ เม็ดแป้งไม่ให้ถูกทำลายจึงละลายน้ำได้น้อยลง

$$\text{WSI} = 99.806 - 0.311 * Z_2 - 0.576 * Z_3 - 3.562 * M + 0.001 * Z_2^2 + 0.002 * Z_3^2 + 0.099 * M^2 - 0.002 * Z_3 * M \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$R^2 = 0.724$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.596$$

เมื่อ  $Z_2$  คือ อุณหภูมิโซนที่ 2 (องศาเซลเซียส)  
 $Z_3$  คือ อุณหภูมิโซนไค (องศาเซลเซียส)  
 M คือ ปริมาณความชื้น (%)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอุณหภูมิโชนได  
ต่อการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์

4.3.6 ความหนืดของผลิตภัณฑ์

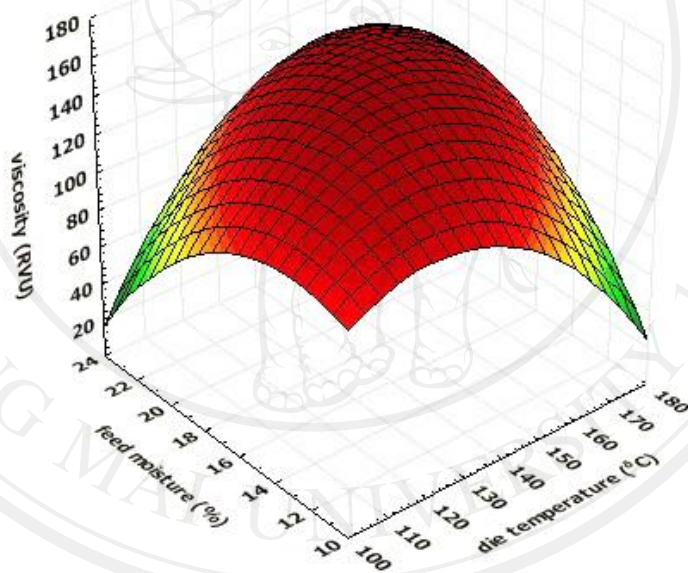
ผลของการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว  
ต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.6 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าปัจจัย  
อุณหภูมิโชนได และปริมาณความชื้น มีความสัมพันธ์กับความหนืดของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ  
ทางสถิติ (p>0.05) เมื่อนำสมการที่ได้ (สมการ (3)) ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ (รูปที่ 4.10)  
จะเห็นว่าความหนืดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิโชนไดเพิ่มขึ้น  
ส่งผลให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน สภาวะที่ความชื้นต่ำการเกิดเจลาติ  
ไนเซชันของเม็ดแป้งขึ้นกับผลรวมกันของความร้อนและแรงเฉือนทางกล เม็ดแป้งจะถูกเฉือน  
ขณะที่เคลื่อนผ่านเครื่องเอกซ์ทรูชันการกระทำทางกลนี้จะเปิด กราณูภายในของแป้งออก ส่งผลให้  
ผลิตภัณฑ์มีความหนืดลดลง (รุ่งนภา, 2541)

$$\begin{aligned} \text{viscosity} &= -230.963 - 5.119*Z_2 + 5.578*Z_3 + 4.872*M - 0.029*Z_3^2 - 0.801*M \\ &+ 0.158*Z_3*M \end{aligned} \dots\dots\dots(3)$$

$$R^2 = 0.683$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.536$$

เมื่อ  $Z_2$  คือ อุณหภูมิโซนที่ 2 (องศาเซลเซียส)  
 $Z_3$  คือ อุณหภูมิโซนใด (องศาเซลเซียส)  
 $M$  คือ ปริมาณความชื้น (%)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอุณหภูมิโซนใด  
 ต่ออัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์

#### 4.3.7 ดัชนีไกลซิมิกของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว  
 ต่อดัชนีไกลซิมิกของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.6 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มี  
 ความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อดัชนีไกลซิมิกของ  
 ผลิตภัณฑ์



#### 4.4 ผลของความเร็วสกรูและอัตราการป้อนของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์แบบสกรูเดี่ยว

##### ต่อสมบัติทางกายภาพ เคมมีและดัชนีโกลซิมิก

ในการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งถั่วเขียว ปรับสภาพ ใช้สภาวะในการเดินเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.3 ในการกำหนด สภาวะอุณหภูมิโซนที่ 2 อุณหภูมิโซนไค และปริมาณความชื้น โดยใช้แผนการทดลองแบบ  $2^2$  (CCD) กำหนดสภาวะการทดลองดังต่อไปนี้ แปรความเร็วสกรูในช่วง 80 – 100 รอบต่อนาที อัตราการป้อนในช่วง 20 -50 รอบต่อนาที ปริมาณความชื้นเท่ากับ 20 % อุณหภูมิโซนที่ 1 เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิโซนที่ 2 เท่ากับ 120 องศาเซลเซียส อุณหภูมิไคเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วของใบมีดคัตเตอร์ 150 รอบต่อนาที หัวไคแบบกลมขนาด 3 มิลลิเมตร ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง บดและร่อนให้มีขนาดอนุภาคในช่วง 50 – 100 เมช วัดคุณสมบัติทางกายภาพ เคมมีและดัชนีโกลซิมิกได้ผลดังตารางที่ 4.7

นำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป design-expert 6.0 เพื่อหา สมการถดถอย สมการที่ได้เป็นสมการที่มีรหัสของตัวแปรอิสระต่างๆ (coded equation) (ตาราง ภาคผนวก ง.2) และสมการที่ถอดรหัสของตัวแปรอิสระ (decoded equation) ที่มีค่า adjust  $R^2$  (coefficient of determination) เข้าใกล้ 1 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้ดี ตัวแปรต้นได้แก่ ความเร็วสกรู (S) อัตราการป้อน (F) และตัวแปรตามที่ศึกษาได้แก่ พลังงานกลจำเพาะ อัตราการพองตัว ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การละลายน้ำ ความหนืด และดัชนีโกลซิมิก นำสมการถดถอยถอดรหัสที่ได้ไปสร้างกราฟพื้นที่ตอบสนอง (response surface) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นภายในขอบเขตระดับต่ำถึงระดับสูงได้

ตารางที่ 4.7 ผลการปรับความเร็วสกรูและอัตราการป้อนของเครื่องเอกซ்தูเตอร์แบบสกรูเดี่ยว  
ต่อสมบัติทางกายภาพ เคมีและดัชนีไกลซีมิก

| สัปดาห์ | ความเร็วสกรู (rpm) | อัตราการป้อน (rpm) | สมบัติ             |           |                        |           |            |                    |                   |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------------|-----------|------------|--------------------|-------------------|
|         |                    |                    | SME<br>(k.w.hr/kg) | expansion | bulk density<br>(g/ml) | WAI       | WSI<br>(%) | viscosity<br>(RVU) | glycemic<br>index |
| 1       | 80                 | 20                 | 0.10±0.01          | 1.56±0.07 | 0.39±0.01              | 5.47±0.23 | 12.32±0.35 | 126.67±8.14        | 53.29±0.06        |
| 2       | 120                | 20                 | 0.11±0.01          | 1.63±0.03 | 0.31±0.01              | 5.57±0.39 | 12.12±0.26 | 122.00±8.00        | 52.61±0.43        |
| 3       | 80                 | 50                 | 0.09±0.01          | 1.63±0.02 | 0.30±0.00              | 5.15±0.28 | 11.35±0.21 | 127.33±5.69        | 52.55±0.63        |
| 4       | 120                | 50                 | 0.12±0.01          | 1.65±0.03 | 0.32±0.01              | 5.85±0.27 | 14.52±0.50 | 127.33±4.62        | 52.10±0.69        |
| 5       | 72                 | 35                 | 0.12±0.01          | 1.63±0.02 | 0.36±0.00              | 5.85±0.02 | 16.21±0.10 | 133.33±10.97       | 52.72±0.43        |
| 6       | 128                | 35                 | 0.11±0.01          | 1.66±0.03 | 0.30±0.01              | 4.48±0.24 | 12.30±0.51 | 127.33±4.16        | 51.43±1.16        |
| 7       | 100                | 14                 | 0.15±0.01          | 1.44±0.07 | 0.32±0.02              | 5.59±0.14 | 14.00±0.80 | 125.33±8.50        | 52.01±1.01        |
| 8       | 100                | 56                 | 0.06±0.00          | 1.43±0.02 | 0.33±0.01              | 5.80±0.24 | 12.48±0.45 | 122.00±2.65        | 52.00±0.78        |
| 9       | 100                | 35                 | 0.09±0.00          | 1.64±0.02 | 0.34±0.02              | 6.59±0.32 | 12.04±0.10 | 129.00±8.89        | 52.28±0.25        |
| 10      | 100                | 35                 | 0.09±0.00          | 1.65±0.02 | 0.33±0.01              | 5.78±0.33 | 12.73±0.40 | 128.00±3.61        | 52.21±0.21        |
| 11      | 100                | 35                 | 0.09±0.01          | 1.65±0.01 | 0.34±0.00              | 5.58±0.33 | 12.51±0.11 | 125.67±7.09        | 52.21±0.20        |
| 12      | 100                | 35                 | 0.09±0.01          | 1.65±0.02 | 0.33±0.00              | 6.27±0.21 | 12.15±0.50 | 128.33±8.50        | 52.27±0.26        |
| 13      | 100                | 35                 | 0.09±0.00          | 1.64±0.02 | 0.33±0.00              | 5.94±0.17 | 12.84±0.60 | 126.67±4.73        | 52.30±0.27        |

\* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

#### 4.4.1 ค่าพลังงานกลจำเพาะของเครื่องเอกซ்தูเตอร์

ผลของการปรับความเร็วสกรูและอัตราการป้อน ต่อค่าพลังงานกลจำเพาะของเครื่องเอกซ்தูเตอร์ดังตารางที่ 4.7 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อค่าพลังงานกลจำเพาะของเครื่องเอกซ்தูเตอร์



4.4.2 อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับความเร็วสกรูและอัตราการป้อน ต่ออัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.7 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าอัตราการป้อน มีความสัมพันธ์กับอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) เมื่อนำสมการที่ได้ (สมการ (4)) ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการป้อนและความเร็วสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของศราวดี และอวยพร (2546); Ding *et.al*, (2006) การเพิ่มความเร็วสกรูทำให้อัตราการพองตัวเพิ่มขึ้นความหนาแน่นและความแข็งลดลง

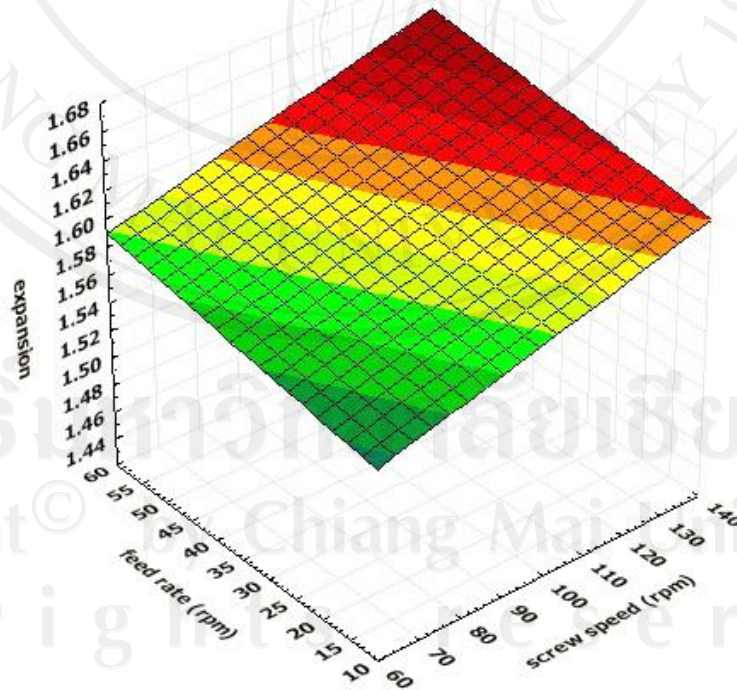
$$\text{expansion} = 1.152 + 0.028 * F - 0.0004 * F^2 \dots\dots\dots(4)$$

$$R^2 = 0.748$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.697$$

เมื่อ S คือ ความเร็วสกรู (rpm)

F คือ อัตราการป้อน (rpm)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและความเร็วสกรู ต่ออัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์

#### 4.4.3 ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับความเร็วสกรูและอัตราการป้อน ต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 4.7 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าความเร็วสกรูและอัตราการป้อน มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) เมื่อนำสมการที่ได้ (สมการ (5)) ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง และเมื่อเพิ่มความเร็วสกรูความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ สราวุฒิและอวยพร (2546); Ding *et.al*, (2006) การเพิ่มความเร็วสกรูทำให้ความหนาแน่นและความแข็งลดลง

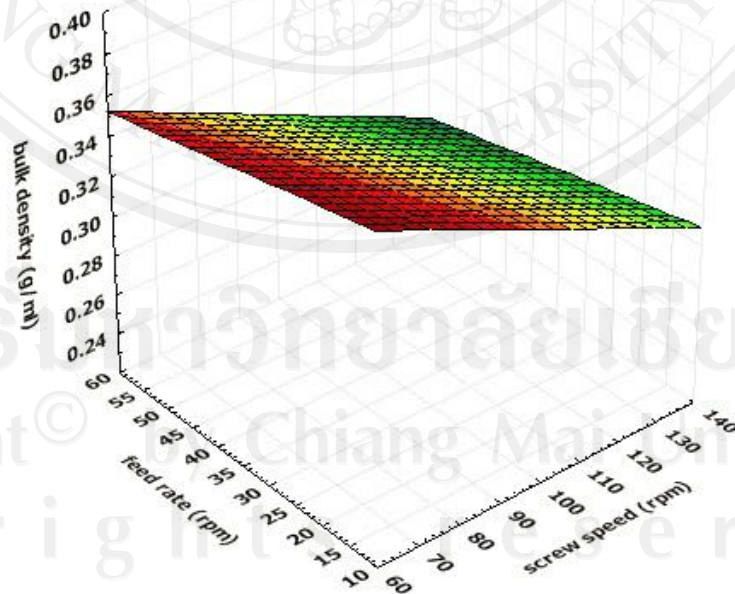
$$\text{bulk density} = 0.727 - 0.004*S - 0.009*F + 8.11 \times 10^{-5} * S * F \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$R^2 = 0.793$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.724$$

เมื่อ S คือ ความเร็วสกรู (rpm)

F คือ อัตราการป้อน (rpm)



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและความเร็วสกรู ต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

#### 4.4.4 การดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับความเร็วสกรูและอัตราการป้อน ต่อการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 4.7 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์

#### 4.4.5 การละลายน้ำของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับความเร็วสกรูและอัตราการป้อน ต่อการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 4.7 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์

#### 4.4.6 ความหนืดของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับความเร็วสกรูและอัตราการป้อน ต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.7 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์

#### 4.4.7 ดัชนีโกลซิมิกของผลิตภัณฑ์

ผลของการปรับความเร็วสกรูและอัตราการป้อน ต่อดัชนีโกลซิมิกของผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 4.7 เมื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) นั่นคือไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อดัชนีโกลซิมิกของผลิตภัณฑ์