



บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

แป้งเมล็ดขนุนดัดแปรทางกายภาพด้วยความร้อนชื้น (HMT-JFS)

ปริมาณอะมิโลส (Amylose Content, AC)

แป้งดิบเมล็ดขนุนมีปริมาณอะมิโลส 26.4% ซึ่งใกล้เคียงกับที่มีรายงานไว้โดย Tongdang (2008) (24.4%) Oates และ Powell (1996) (27.7-28.5%) Dutta และคณะ (2011) (27.1%) และ Bobbio และคณะ (1978) (28.1%) ขณะที่แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นแล้ว มีค่ามีปริมาณอะมิโลส อยู่ในช่วง 24.7-28.4% ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ร้อยละปริมาณอะมิโลสในแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วยความร้อน-ความชื้น (HMT) จำนวน 75 สภาวะ

MC (%)	Temperature (°C)					h
	80	90	100	110	120	
N	26.8	26.9	27.4	26.8	26.8	6
	26.9	26.5	26.8	26.8	26.6	12
	26.7	26.2	27.6	26.8	26.5	16
20	26.7	27.3	28.4	27.3	26.3	6
	26.7	27.5	28.2	27.5	27.3	12
	26.6	26.9	27.3	27.2	27.7	16
25	27.0	27.3	27.4	27.5	25.9	6
	27.3	26.7	28.3	26.3	26.3	12
	27.9	26.1	27.4	27.0	26.4	16
30	26.5	27.5	26.7	27.4	25.3	6
	27.4	28.0	26.2	26.0	26.1	12
	26.8	26.6	27.3	26.7	25.9	16
35	26.3	24.7	25.7	25.8	25.3	6
	26.7	26.1	25.8	25.6	25.2	12
	26.5	26.1	26.3	25.6	25.0	16



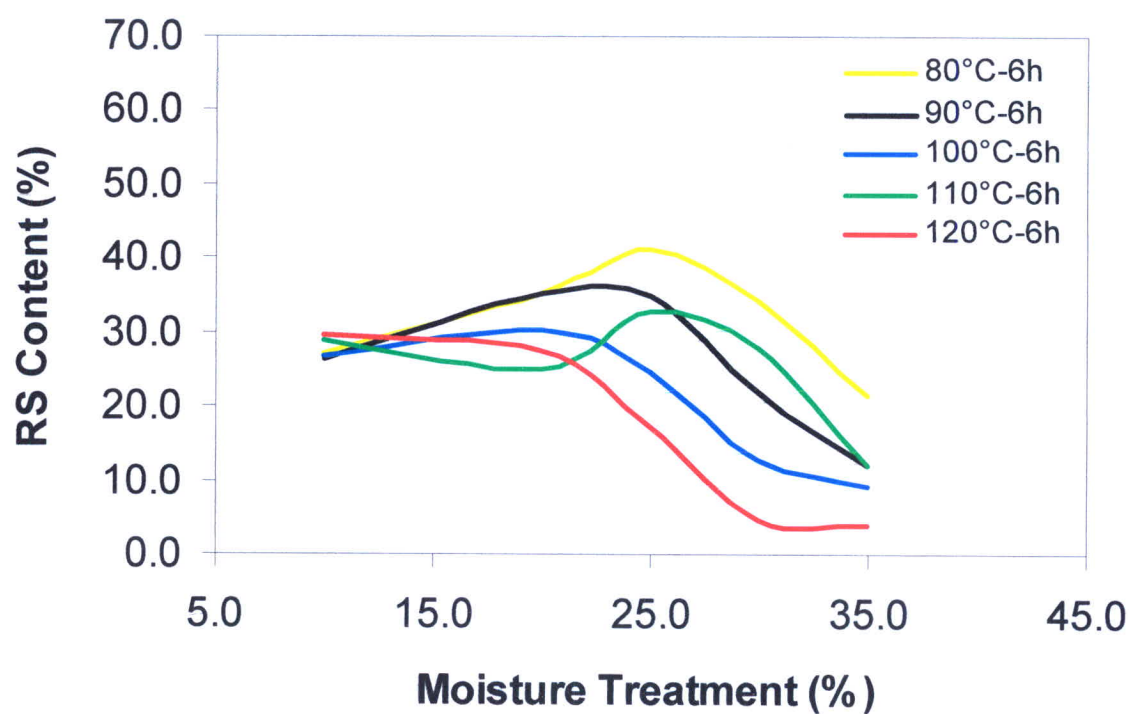
ปริมาณแป้งต้านทานการย่อย (Resistant Starch, RS)

แป้งดิบเมล็ดขนุนมีปริมาณแป้งต้านทานการย่อย $29.7 \pm 2.4\%$ ซึ่งสูงกว่าปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งเมล็ดขนุนที่มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ที่ 8.0% (Hettiaratchi et al., 2011) และ 8.1% (Lima et al., 2014) ปริมาณที่ตรวจวิเคราะห์ได้ในการศึกษานี้มีค่าต่ำกว่าปริมาณในแป้งต้านทานการย่อยมาตรฐานที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์คือ Hi-Maize 260 ที่หาค่าปริมาณแป้งต้านทานการย่อยด้วยวิธีการเดียวกันได้เท่ากับ $41.3 \pm 0.7\%$ อยู่ประมาณหนึ่งในสี่ โดย Hi-Maize เป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (high-amylose corn starch) (AC = 52%) ความแตกต่างของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งแต่ละชนิด นอกจากปัจจัยด้านองค์ประกอบภายในแกรนูลแป้ง เช่น ปริมาณอะมิโลส ฟอสเฟต แล้ว ยังขึ้นกับคุณสมบัติเชิงโครงสร้างและทางกายภาพ ได้แก่ รูปร่างและขนาดแกรนูล รูปแบบผลึก อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล และการจัดเรียงตัวภายในโมเลกุล ของแป้งแต่ละชนิดด้วย (Fuentes-Zaragoza et al., 2010)

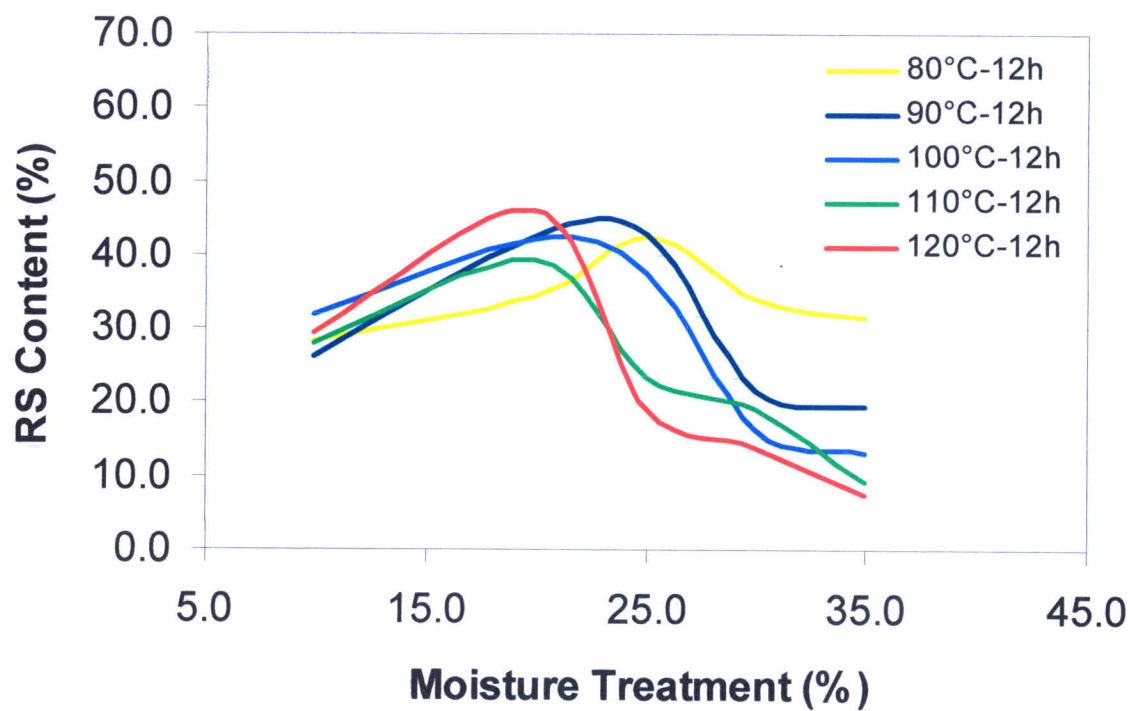
เมื่อทำการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นพบว่า ตัวอย่างที่ให้ความชื้น 10% ที่ทุกอุณหภูมิและระยะเวลาการดัดแปรที่ใช้ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับความชื้นที่ต่ำเกินไปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลแป้งเมื่อได้รับความร้อน ขณะที่ในกลุ่มที่ได้รับความชื้น 20% พบว่าตัวอย่างที่ให้อุณหภูมิ $80-100^{\circ}\text{C}$ นาน 6 ชั่วโมง, $80-120^{\circ}\text{C}$ นาน 12 ชั่วโมง และ $80-110^{\circ}\text{C}$ นาน 16 ชั่วโมง มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งต้านทานการย่อย ส่วนกลุ่มตัวอย่างที่ได้รับความชื้น 25% ก่อนได้รับความร้อน แสดงการเพิ่มของปริมาณแป้งต้านทานการย่อย เมื่อสภาวะการเตรียมเป็น $80-90^{\circ}\text{C}$ นาน 6 ชั่วโมง (รูปที่ 3.1) หรือ $80-100^{\circ}\text{C}$ นาน 12 (รูปที่ 3.2) หรือ 16 ชั่วโมง (รูปที่ 3.3) โดยตัวอย่างในกลุ่มนี้เกือบทั้งหมดแสดงค่าปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในช่วง 35 ถึง 45% ตัวอย่างที่แสดงปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูงสุดคือแป้งเมล็ดขนุนที่ให้ความชื้น 25% และให้ความร้อนที่ 80°C นาน 16 ชั่วโมง (JF-25-80-16) ซึ่งให้ค่าแป้งต้านทานการย่อย 52.2% ปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูงที่พบในตัวอย่าง JF-25-80-6 และ JF-25-80-12 แสดงให้เห็นว่าความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยมากกว่าระยะเวลาของการได้รับความร้อน ที่ปริมาณความชื้น 30% ตัวอย่างที่ให้ความร้อน 80°C แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแป้งดิบ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นพบว่าปริมาณแป้งต้านทานการย่อยมีค่าลดลง ขณะที่กลุ่มตัวอย่างที่ให้ความชื้น 35% ก่อนการให้ความร้อนพบว่า หลังการดัดแปรปริมาณแป้งต้านทานการย่อยลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะตัวอย่างที่ได้รับความชื้นสูงเป็นระยะเวลานาน โดยตัวอย่าง JF-35-120-16 ให้ค่าแป้งต้านทานการย่อยต่ำสุดที่ 7.0% (รูปที่ 3.3) ผลการทดลองนี้



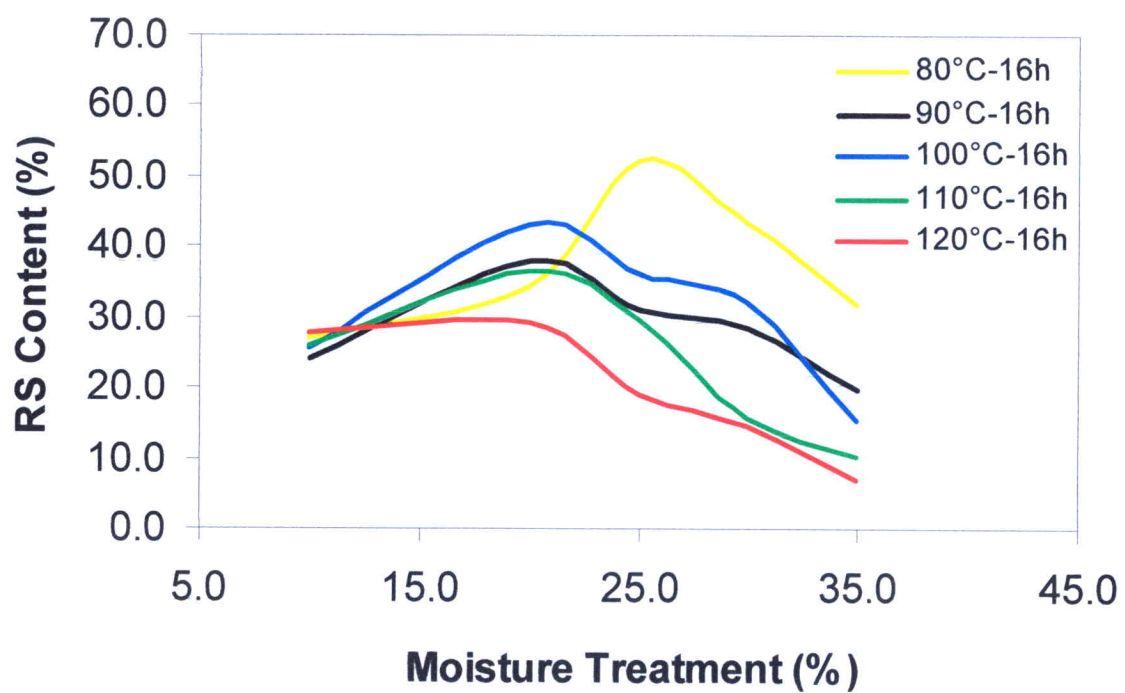
เป็นไปในแนวทางเดียวกับรายงานในแป้ง Faba bean ซึ่งพบการเพิ่มขึ้นของแป้งด้านทานการย่อย หลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ 80°C แต่มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิถูกเพิ่มเป็น 120°C (Ambigaipalan, Hoover, Donner, & Liu, 2014) ตัวแปรทั้งสองคือความชื้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีผลต่อการจัดเรียงตัวของส่วนผลึกในแกรนูลแป้ง โดยอุณหภูมิและความชื้นสูงจะทำให้การเข้าถึงของเอนไซม์สู่แกรนูลเกิดได้มากขึ้น นอกจากนี้ การลดลงของปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในตัวอย่างที่ได้รับความชื้นสูง 30-35% และอุณหภูมิสูง ($100\text{-}120^{\circ}\text{C}$) ยังอาจเกิดจากการกลายเป็นเจลบางส่วน (partial gelatinization) ได้อีกด้วย (Eerlingen, Jacobs, Van Win, & Delcour, 1997)



รูปที่ 3.1 ปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งขนุนที่ผ่าน HMT ภายใต้สภาวะความชื้น และ อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 ปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งขนุนที่ผ่าน HMT ภายใต้สภาวะความชื้น และ อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



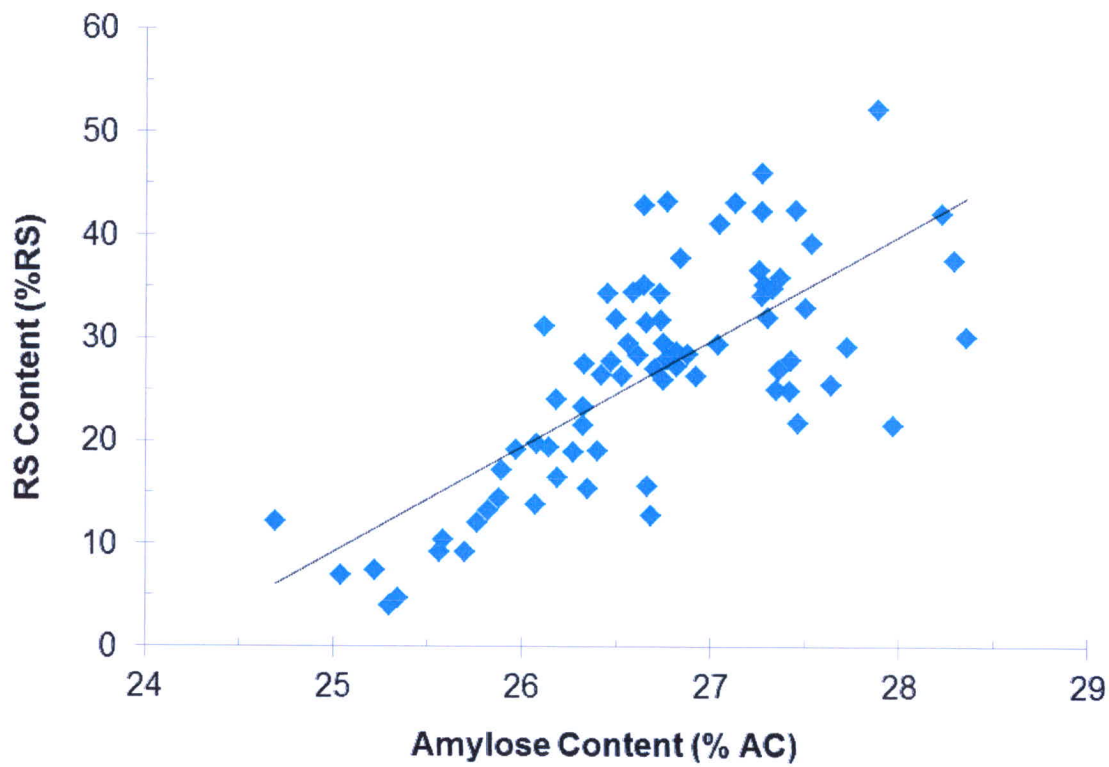
รูปที่ 3.3 ปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งขนุนที่ผ่าน HMT ภายใต้สภาวะความชื้น และ อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง



ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งด้านทานการย่อยกับปริมาณอะมิโลส

ปริมาณอะมิโลสในแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 24.7-28.4% โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $26.7 \pm 0.8\%$ ซึ่งในเบื้องต้นดูเหมือนว่าค่าจะไม่แตกต่างจากค่าที่วิเคราะห์ได้ในแป้งดิบ แต่เมื่อพิจารณาในเชิงความสัมพันธ์ของค่าปริมาณอะมิโลสกับปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในแต่ละตัวอย่างในการศึกษานี้พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งด้านทานการย่อยภายหลังการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะมิโลสในตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปร โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองในตัวอย่างแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น จำนวน 75 ตัวอย่าง (รูปที่ 3.4) ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.73

มีรายงานการวิจัยที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งด้านทานการย่อยกับปริมาณอะมิโลส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแป้งชนิดเดียวกัน (Vatanasuchart et al., 2012; Zavareze, El Halal, Santos, Helbig, Pereira & Guerra Dias, 2012) เนื่องจากโครงสร้างการเรียงตัวของอะมิโลสในแกรนูลแป้งจะมีลักษณะอัดตัวแน่น (tightly packed structure) ทำให้มีความต้านทานต่อการย่อยของเอนไซม์มากกว่าโมเลกุลอื่น ดังจะเห็นจากแป้งข้าวโพดอะมิโลส สูง (high amylose corn starch, HACS) ซึ่งมีปริมาณแป้งด้านทานการย่อยสูงกว่าแป้งข้าวโพดปกติ การเพิ่มขึ้นของปริมาณอะมิโลสและแป้งด้านทานการย่อยในแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น มีรายงานในแป้งถั่วเขียว (Li et al., 2011) ซึ่งอธิบายว่าเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างสายพอลิเมอร์แป้งภายในบริเวณสัณฐานของแกรนูล ขณะที่การลดลงของปริมาณอะมิโลสในแป้งดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะมิโลสเนื่องจากการเหนี่ยวนำด้วยความร้อน ซึ่งไปจำกัดความสามารถของอะมิโลสในการเกิดเป็นส่วนเกลียวที่ยาวหรือเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้ลดลง



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งต้านทานการย่อยกับปริมาณอะมิโลส



ลักษณะปรากฏทั่วไป

แป้งดิบเมล็ดขนุนและแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น มีลักษณะเป็นผง สีขาวนวลถึงเหลืองอ่อน ไม่พองฟู การทดสอบเบื้องต้นพบว่าการไหลไม่ดี

ปริมาณความชื้น (MC, %)

แป้งดิบเมล็ดขนุนมีปริมาณความชื้นเริ่มต้น 10.8% เมื่อผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นแล้ว พบว่าปริมาณความชื้นของแป้งดัดแปรมีการเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึง 3.6 โดยส่วนใหญ่แล้ว ตัวอย่างมีปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างที่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 80-100°C มีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 12-13% ขณะที่ตัวอย่างที่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 110-120°C มีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 10-12%

ตารางที่ 3.2 ความชื้นของแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ภายใต้ความชื้นและเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (MC, %)
JH-N-80-6	13.47
JH-20-80-6	12.59
JH-25-80-6	12.71
JH-30-80-6	9.87
JH-35-80-6	9.43
JH-N-80-12	12.68
JH-20-80-12	11.01
JH-25-80-12	9.18
JH-30-80-12	13.35
JH-35-80-12	13.84
JH-N-80-16	12.43
JH-20-80-16	13.63
JH-25-80-16	11.94
JH-30-80-16	12.26
JH-35-80-16	13.12



ตารางที่ 3.3 ความชื้นของแป้งขนุนตัดแปรด้วย HMT ภายใต้ความชื้นและเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (MC, %)
JH-N-90-6	13.56
JH-20-90-6	13.10
JH-25-90-6	12.18
JH-30-90-6	12.98
JH-35-90-6	12.67
JH-N-90-12	13.99
JH-20-90-12	14.07
JH-25-90-12	13.32
JH-30-90-12	13.16
JH-35-90-12	12.47
JH-N-90-16	13.57
JH-20-90-16	12.61
JH-25-90-16	12.35
JH-30-90-16	12.32
JH-35-90-16	12.64



ตารางที่ 3.4 ความชื้นของแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ภายใต้ความชื้นและเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100°C

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (MC, %)
JH-N-100-6	13.16
JH-20-100-6	13.12
JH-25-100-6	12.64
JH-30-100-6	12.66
JH-35-100-6	13.03
JH-N-100-12	13.37
JH-20-100-12	13.77
JH-25-100-12	13.34
JH-30-100-12	12.97
JH-35-100-12	13.18
JH-N-100-16	13.57
JH-20-100-16	11.45
JH-25-100-16	13.32
JH-30-100-16	12.06
JH-35-100-16	12.35



ตารางที่ 3.5 ความชื้นของแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ภายใต้ความชื้นและเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 110°C

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (MC, %)
JH-N-110-6	12.95
JH-20-110-6	12.07
JH-25-110-6	11.73
JH-30-110-6	12.68
JH-35-110-6	12.23
JH-N-110-12	11.67
JH-20-110-12	11.62
JH-25-110-12	11.76
JH-30-110-12	11.16
JH-35-110-12	11.00
JH-N-110-16	12.78
JH-20-110-16	11.45
JH-25-110-16	10.73
JH-30-110-16	11.72
JH-35-110-16	10.46



ตารางที่ 3.6 ความชื้นของแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ภายใต้ความชื้นและเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120°C

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (MC, %)
JH-N-120-6	12.72
JH-20-120-6	12.06
JH-25-120-6	10.47
JH-30-120-6	10.96
JH-35-120-6	10.33
JH-N-120-12	12.78
JH-20-120-12	11.87
JH-25-120-12	12.15
JH-30-120-12	10.39
JH-35-120-12	10.97
JH-N-120-16	11.15
JH-20-120-16	11.45
JH-25-120-16	9.83
JH-30-120-16	12.34
JH-35-120-16	11.09



การละลายและการพองตัวในน้ำ

แป้งดิบเมล็ดขนุนและแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงของการพองตัวที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (temperature-dependent) แป้งดิบแสดงการพองตัวต่ำมากในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70°C โดยมีค่าการพองตัวเท่ากับ 1.1, 1.3, 2.3 และ 2.5 g/g ที่อุณหภูมิห้อง 50, 60 และ 70°C ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 80°C แป้งดิบมีการพองตัวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ 6.8 g/g และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 7.7 g/g ที่อุณหภูมิ 90°C Madruga และคณะ (2014) รายงานรูปแบบการพองตัวที่คล้ายคลึงกันในแป้งเมล็ดขนุนชนิดนิ่มและชนิดแข็ง (soft and hard jackfruit seed starches) โดยการพองตัวอย่างมีนัยสำคัญจะพบที่อุณหภูมิสูงกว่า 75°C และเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดระหว่าง 15-18 g/g ที่ $85-95^{\circ}\text{C}$ แป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น แสดงการพองตัวที่ใกล้เคียงกับแป้งดิบที่อุณหภูมิระหว่าง $50-70^{\circ}\text{C}$ แต่มีการพองตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ 80 และ 90°C ตามลำดับ โดยรวมแล้วแป้งดัดแปรส่วนใหญ่มีค่าการพองตัวสุดท้ายต่ำกว่าแป้งดิบ ซึ่งผลการทดลองแสดงว่าสภาวะความร้อนขึ้นที่แตกต่างกันมีผลทำให้การพองตัวแตกต่างกันไปด้วย แต่ไม่พบว่ามีสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง การลดลงของการพองตัวน่าจะเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ (rearrangement) ภายในโครงสร้างแกรนูลแป้ง การลดลงของการรับน้ำ รวมถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะมิโลส-อะมิโลส และอะมิโลส-อะมิโลเพคติน ที่ถูกชักนำให้เกิดจากการได้รับความร้อน (Klein et al., 2013; Sun, Wang, Xiong, & Zhao, 2013) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานที่มีมาก่อนหน้านี้ในแป้งถั่วเขียว (Li et al., 2011) แป้งข้าวโพด (Chung et al., 2009a) และแป้ง faba bean, black bean และ pinto bean (Ambipaijalan et al., 2013)

ผลของสภาวะความร้อนขึ้นต่อการละลายของแป้งมีความแตกต่างจากผลต่อการพองตัว นั่นคือแป้งขนุนดัดแปรที่ได้รับความร้อนขึ้นมีค่าการละลายไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ โดยแป้งดิบมีค่าการละลายที่อุณหภูมิห้อง 50, 60, 70, 80 และ 90°C เท่ากับ 0.4, 1.3, 2.4, 2.8, 7.2 และ 9.5% ตามลำดับ แป้งดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นส่วนใหญ่แสดงค่าการละลายในช่วงใกล้เคียงกับแป้งดิบ ยกเว้นตัวอย่างแป้งที่ได้รับความร้อนขึ้นที่สภาวะ 100°C ซึ่งพบการลดลงของค่าการละลายอย่างมีนัยสำคัญในตัวอย่างที่ได้รับความร้อนขึ้นสูงในทั้ง 3 ช่วงเวลาการทดสอบ โดยมีค่าการละลายสูงสุดในช่วง 6.7 ถึง 7.9% (ตารางที่ 3.7 ถึง 3.9) รายงานการศึกษาที่มีมาก่อนหน้าพบการลดลงของการละลายในแป้งที่ได้รับความร้อนขึ้นที่เตรียมจากแป้ง African yam bean (Adebowale, Henle, Schwarzenbolz, & Doert., 2009) ข้าวเจ้า มันสำปะหลัง pinhão (Klein et al., 2013) ข้าว (Sun et al., 2013) และข้าวฟ่าง (Sun, Han, Wang, & Xiong, 2014)



ส่วนการเพิ่มขึ้นของการละลายพบในกรณีของแป้งที่ได้รับความร้อนขึ้นที่เตรียมจากถั่วเขียว (Li et al., 2011) และ finger millet (Adebowale, Afolabi, & Olu-Owolabi, 2005) มีข้อสันนิษฐานว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ซึ่งรวมถึงลักษณะของแกรนูล รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ กำลังการพองตัวและการละลาย และสมบัติทางอุณหภูมิจึงมีความแตกต่างหลากหลายขึ้นกับชนิดและแหล่งที่มาของแป้ง และสภาวะของการให้ความร้อนและความชื้น (Li et al., 2011)



ตารางที่ 3.7 ความสามารถในการพองตัวและค่าการละลายของแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วย
ความร้อนชื้น (HMT) 10-35% MC, 80-120°C นาน 6 ชั่วโมง

ตัวอย่าง		Swelling Power at T (°C)						Solubility at T (°C)					
		RT	50	60	70	80	90	RT	50	60	70	80	90
80°C	10% MC	1.0	1.3	2.2	2.8	5.5	7.2	0.4	1.4	2.3	2.8	7.0	8.1
	20% MC	1.1	1.4	2.4	3.2	5.3	6.9	0.6	1.4	2.4	3.0	6.9	8.2
	25% MC	1.0	1.2	2.6	3.4	6.2	7.1	0.6	1.6	2.2	3.1	7.1	8.9
	30% MC	1.2	1.5	2.8	3.3	4.3	6.5	0.5	1.5	2.4	3.1	7.0	9.0
	35% MC	1.1	1.3	2.7	3.1	5.0	6.3	0.4	1.6	2.5	3.2	7.2	9.4
90°C	10% MC	1.1	1.3	2.4	3.3	5.8	7.2	0.4	1.4	2.3	2.8	6.8	8.3
	20% MC	1.2	1.4	2.6	3.4	5.4	6.8	0.5	1.5	2.3	3.1	7.1	8.6
	25% MC	1.1	1.3	2.5	3.1	5.8	7.3	0.4	1.5	2.5	3.0	6.9	9.1
	30% MC	1.2	1.4	2.6	3.3	5.5	7.2	0.3	1.4	2.5	3.2	7.1	8.9
	35% MC	1.1	1.5	2.8	3.1	5.6	7.4	0.4	1.5	2.4	3.1	7.3	9.6
100°C	10% MC	1.1	1.3	2.5	3.2	5.8	7.7	0.6	1.3	2.5	3.1	6.8	8.7
	20% MC	1.2	1.5	2.6	3.3	5.7	6.9	0.3	1.3	2.4	2.9	5.6	8.3
	25% MC	1.2	1.3	2.8	3.9	5.8	6.8	0.4	1.4	2.4	2.9	5.1	7.8
	30% MC	1.1	1.2	2.4	3.4	5.6	7.2	0.4	1.4	2.4	2.8	4.9	7.2
	35% MC	1.1	1.3	2.5	2.8	4.3	5.6	0.5	1.2	2.3	2.7	4.8	6.7
110°C	10% MC	1.0	1.3	2.2	3.2	5.4	6.2	0.4	1.3	2.5	3.3	7.3	9.1
	20% MC	1.1	1.3	2.5	3.2	5.5	6.9	0.4	1.4	2.4	3.4	7.4	8.7
	25% MC	1.1	1.3	2.6	3.7	5.6	7.3	0.3	1.3	2.4	3.5	7.3	8.9
	30% MC	1.2	1.4	2.7	3.5	5.9	6.7	0.4	1.4	2.5	3.6	7.4	8.9
	35% MC	1.1	1.5	2.6	3.6	5.6	6.6	0.3	1.5	2.6	3.5	7.7	9.1
120°C	10% MC	1.2	1.2	2.4	3.4	5.7	7.3	0.4	1.5	2.3	3.4	7.5	9.1
	20% MC	1.3	1.3	2.5	3.6	5.9	6.9	0.4	1.5	2.4	3.5	7.5	9.0
	25% MC	1.2	1.4	2.6	3.1	5.6	6.7	0.6	1.7	2.4	3.5	7.6	8.8
	30% MC	1.1	1.4	2.7	3.3	5.7	6.8	0.4	1.8	2.6	3.6	7.5	9.1
	35% MC	1.2	1.5	2.8	3.4	5.9	7.2	0.4	1.7	2.5	3.4	7.6	9.0



ตารางที่ 3.8 ความสามารถในการพองตัวและค่าการละลายของแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วย
ความร้อนชื้น (HMT) 10-35% MC, 80-120°C นาน 12 ชั่วโมง

ตัวอย่าง		Swelling Power at T (°C)						Solubility at T (°C)					
		RT	50	60	70	80	90	RT	50	60	70	80	90
80°C	10% MC	1.1	1.2	2.3	2.8	5.4	6.9	0.4	1.3	2.4	3.3	7.0	9.6
	20% MC	1.1	1.3	2.4	2.9	5.2	7.1	0.5	1.4	2.5	3.2	7.2	9.5
	25% MC	1.2	1.4	2.4	3.2	3.9	6.7	0.6	1.5	2.6	3.4	7.1	9.4
	30% MC	1.3	1.3	2.5	3.0	3.8	6.3	0.5	1.5	2.7	3.4	7.4	9.6
	35% MC	1.1	1.3	2.7	2.9	4.1	6.7	0.6	1.6	2.8	3.4	7.2	9.4
90°C	10% MC	1.1	1.3	2.6	3.2	5.4	7.1	0.6	1.5	2.6	3.5	6.6	9.2
	20% MC	1.2	1.4	2.2	3.2	5.2	7.3	0.5	1.6	2.7	3.5	7.0	9.5
	25% MC	1.1	1.5	2.3	3.0	5.4	7.2	0.5	1.7	2.6	3.6	6.7	9.4
	30% MC	1.1	1.4	2.4	3.3	5.5	7.2	0.5	1.6	2.7	3.2	7.1	9.5
	35% MC	1.0	1.5	2.8	3.4	5.3	7.6	0.6	1.7	2.8	3.3	7.2	9.6
100°C	10% MC	1.0	1.4	2.6	3.3	5.5	6.9	0.7	1.4	2.6	3.1	6.9	9.3
	20% MC	1.0	1.3	2.5	3.4	5.3	6.2	0.5	1.3	2.7	2.8	6.5	9.6
	25% MC	1.1	1.3	2.6	3.1	4.9	6.4	0.6	1.2	2.5	2.7	5.9	8.7
	30% MC	1.2	1.4	2.3	2.9	4.4	6.1	0.6	1.4	2.4	2.8	6.7	7.9
	35% MC	1.1	1.3	2.0	2.4	4.0	5.6	0.5	1.2	2.5	2.9	6.2	7.5
110°C	10% MC	1.1	1.4	2.2	3.3	5.2	7.4	0.4	1.4	2.6	3.3	6.6	9.2
	20% MC	1.0	1.4	2.3	3.3	5.3	6.7	0.4	1.1	2.6	3.6	7.0	8.6
	25% MC	1.1	1.5	2.6	3.4	5.3	6.9	0.5	1.1	2.7	3.5	6.7	8.4
	30% MC	1.1	1.3	2.6	3.5	5.6	7.1	0.5	1.4	2.8	3.8	7.1	8.7
	35% MC	1.2	1.4	2.7	3.3	4.9	6.8	0.6	1.2	2.6	3.7	7.2	9.1
120°C	10% MC	1.0	1.3	2.4	3.3	5.5	7.0	0.5	1.3	2.4	3.5	7.1	9.3
	20% MC	1.1	1.4	2.5	3.4	5.6	6.9	0.6	1.4	2.5	3.5	6.9	8.7
	25% MC	1.2	1.4	2.6	3.5	5.4	6.8	0.7	1.6	2.6	3.7	6.8	8.9
	30% MC	1.2	1.4	2.5	3.2	5.4	6.8	0.5	1.4	2.8	3.6	7.1	9.0
	35% MC	1.1	1.4	2.7	3.5	5.7	7.5	0.6	1.5	2.6	3.4	7.1	9.3



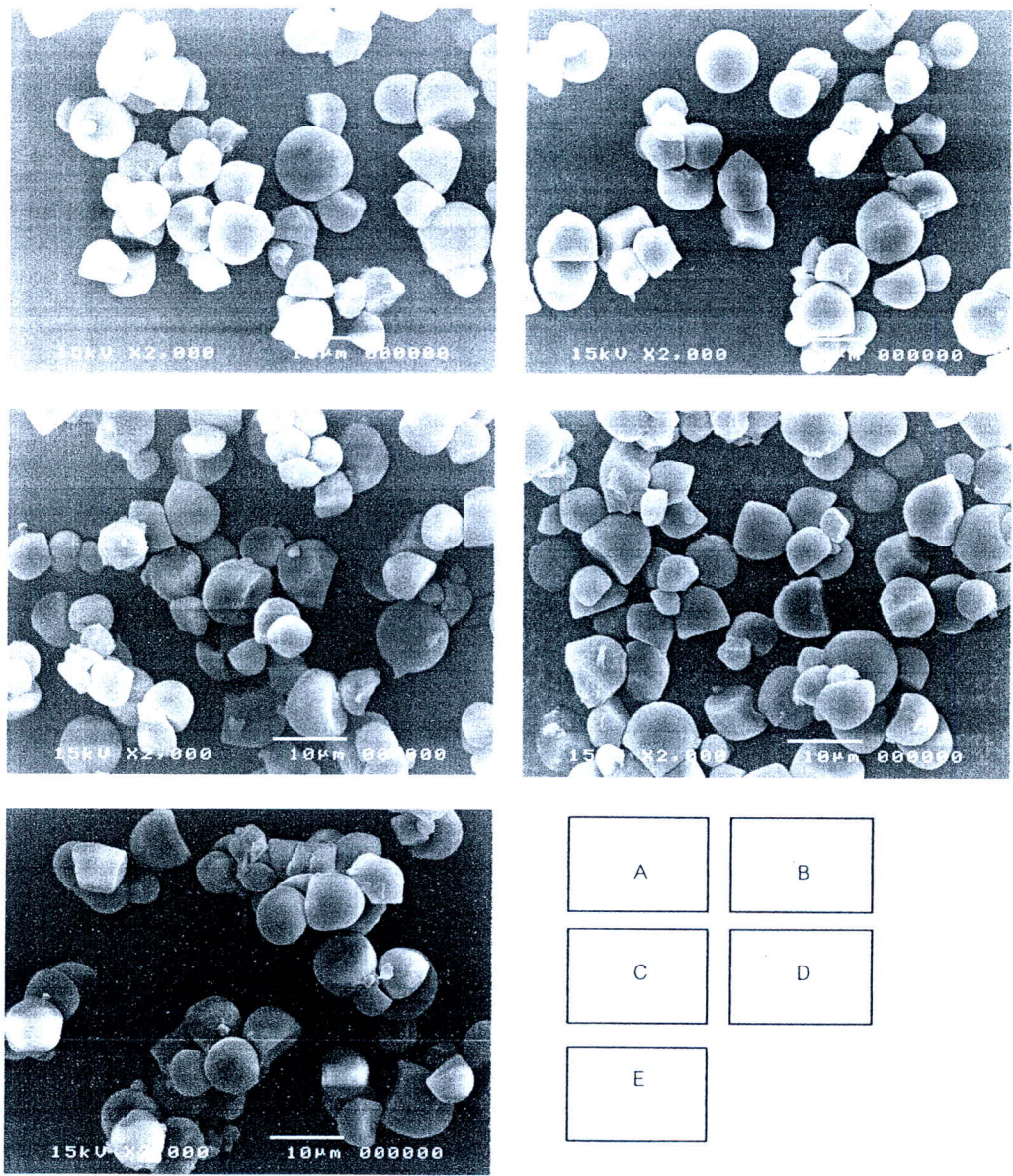
ตารางที่ 3.9 ความสามารถในการพองตัวและค่าการละลายของแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วย
ความร้อนชื้น (HMT) 10-35% MC, 80-120°C นาน 16 ชั่วโมง

ตัวอย่าง		Swelling Power at T (°C)						Solubility at T (°C)					
		RT	50	60	70	80	90	RT	50	60	70	80	90
80°C	10% MC	1.1	1.3	2.1	2.9	5.3	7.0	0.5	1.5	2.2	2.9	7.2	9.3
	20% MC	1.0	1.4	2.3	2.9	5.0	6.7	0.7	1.5	2.3	3.1	7.1	9.2
	25% MC	1.1	1.5	2.5	2.8	3.2	5.7	0.7	1.7	2.3	3.2	7.3	9.1
	30% MC	1.1	1.2	2.4	2.7	4.3	5.5	0.6	1.6	2.5	3.0	7.2	9.2
	35% MC	1.2	1.2	2.6	2.6	5.0	6.1	0.5	1.7	2.6	3.1	7.3	9.6
90°C	10% MC	1.0	1.2	2.3	3.1	5.9	7.3	0.4	1.4	2.3	2.9	6.8	9.1
	20% MC	1.1	1.5	2.7	3.3	5.5	6.9	0.4	1.5	2.4	3.2	7.0	9.3
	25% MC	1.1	1.4	2.6	2.9	5.6	6.7	0.3	1.6	2.4	3.1	6.8	9.2
	30% MC	1.0	1.3	2.5	3.2	5.3	6.2	0.4	1.5	2.6	3.1	7.0	9.3
	35% MC	1.0	1.4	2.7	2.9	5.4	6.6	0.4	1.8	2.6	3.0	7.0	9.5
100°C	10% MC	1.1	1.3	2.2	3.1	5.6	6.5	0.5	1.2	2.3	3.0	6.6	8.9
	20% MC	1.1	1.2	2.3	3.2	5.2	5.8	0.4	1.1	2.3	2.9	5.7	8.2
	25% MC	1.0	1.2	2.5	2.9	4.8	5.4	0.5	1.1	2.4	2.8	5.0	7.5
	30% MC	1.0	1.1	2.2	2.8	4.0	5.3	0.5	1.3	2.3	2.7	4.7	7.2
	35% MC	1.1	1.1	2.2	2.5	3.3	4.6	0.4	1.1	2.2	2.6	4.4	6.9
110°C	10% MC	1.0	1.3	2.3	3.2	5.8	7.2	0.3	1.3	2.4	3.4	7.0	9.0
	20% MC	1.0	1.3	2.4	3.2	5.4	6.8	0.3	1.3	2.5	3.5	7.2	8.8
	25% MC	1.2	1.6	2.7	3.3	5.5	6.5	0.4	1.2	2.5	3.4	7.2	8.7
	30% MC	1.2	1.4	2.7	3.4	4.9	6.1	0.4	1.3	2.6	3.7	7.3	8.9
	35% MC	1.2	1.5	2.8	3.6	4.8	6.5	0.4	1.4	2.5	3.6	7.6	9.4
120°C	10% MC	1.1	1.2	2.2	3.2	5.7	7.0	0.5	1.6	2.2	3.3	7.4	9.2
	20% MC	1.1	1.3	2.4	3.3	5.9	6.8	0.4	1.6	2.3	3.4	7.3	9.3
	25% MC	1.3	1.4	2.5	2.9	5.5	6.6	0.5	1.8	2.3	3.6	7.5	9.6
	30% MC	1.3	1.5	2.6	3.1	5.5	6.9	0.5	1.9	2.5	3.5	7.4	9.4
	35% MC	1.2	1.5	2.6	3.4	5.8	7.2	0.5	1.6	2.6	3.3	7.5	9.5

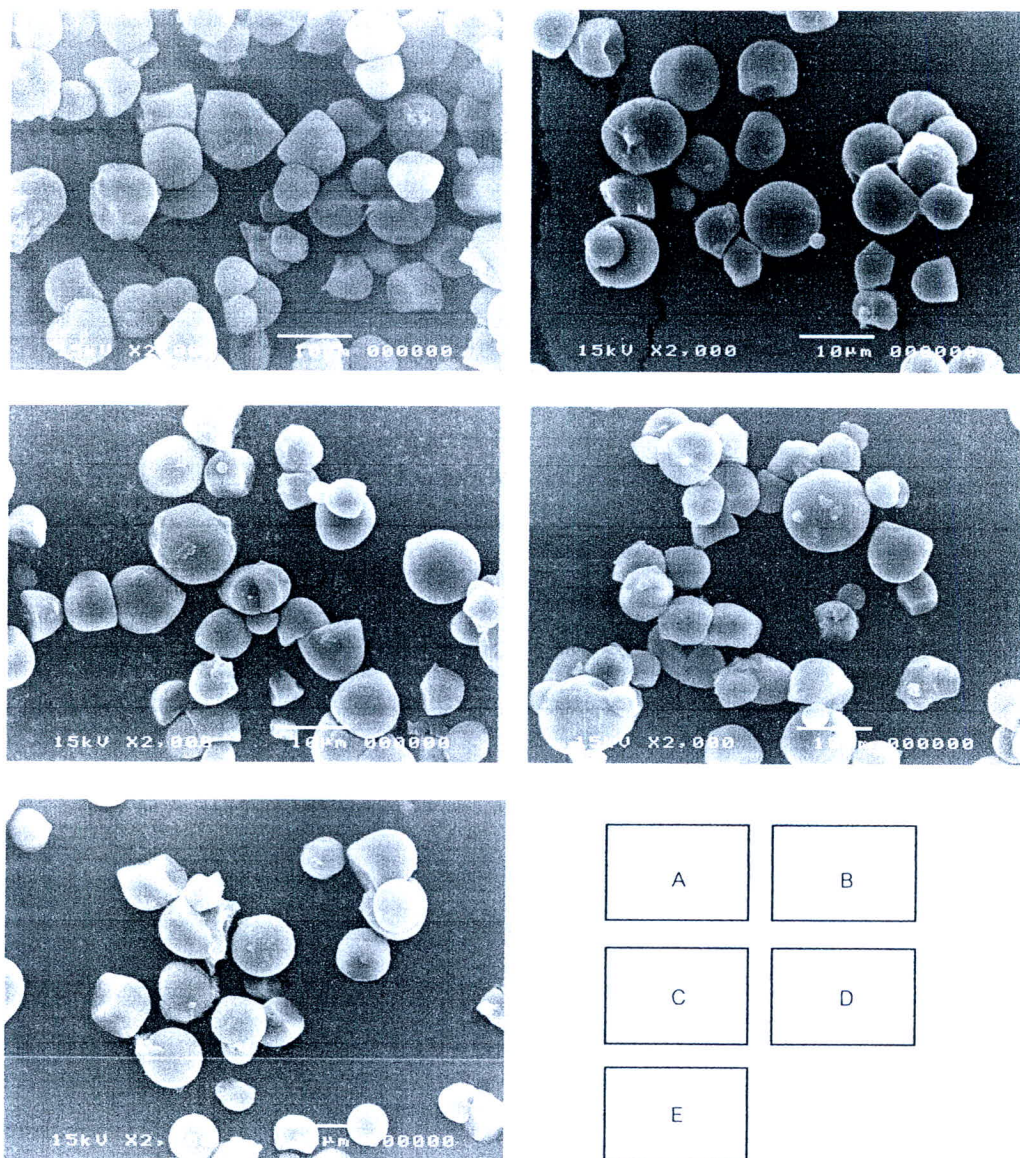


ลักษณะพื้นผิวและรูปร่างแกรนูลภายใต้ SEM

ภาพถ่าย SEM ของแป้งดิบเมล็ดขนุนและแป้งดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (HMT) แสดงในรูปที่ 3.5 ถึง 3.19 แป้งดิบเมล็ดขนุนมีลักษณะเป็นทรงกลมตัด ผิวเรียบ มีการแตกหักเล็กน้อย แกรนูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4-10 ไมครอน ผลการศึกษานี้ สอดคล้องกับรายงานที่มีมาก่อนหน้า (Bobbio และคณะ, 1978; Tongdang, 2008) แป้งดัดแปรที่สภาวะความชื้น 10-25% และอุณหภูมิช่วง 80-100°C ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างแกรนูลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ ที่สภาวะการดัดแปรด้วยความชื้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้นคือความชื้น 30-35% และอุณหภูมิ 110-120°C แกรนูลมีลักษณะการพองมากขึ้น และมีการเปลี่ยนรูปร่างจากเดิมที่มีลักษณะกลมหรือคล้ายระฆังเป็นลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน (irregular) มากขึ้น การหลอมรวมของแกรนูลและการกร่อนของบริเวณผิวน้ำยังถูกตรวจพบได้ ซึ่งน่าจะเกิดจากการเกิดการกลายเป็นเจลบางส่วน (partial gelatinization) เนื่องจากผลร่วมกันของความชื้นและความร้อนสูงที่ใช้ในการดัดแปร (Ovando-Martinez, Whitney, Reuhs, Doehlert & Simsek, 2013; Pancha-arnon & Uttapap, 2013).

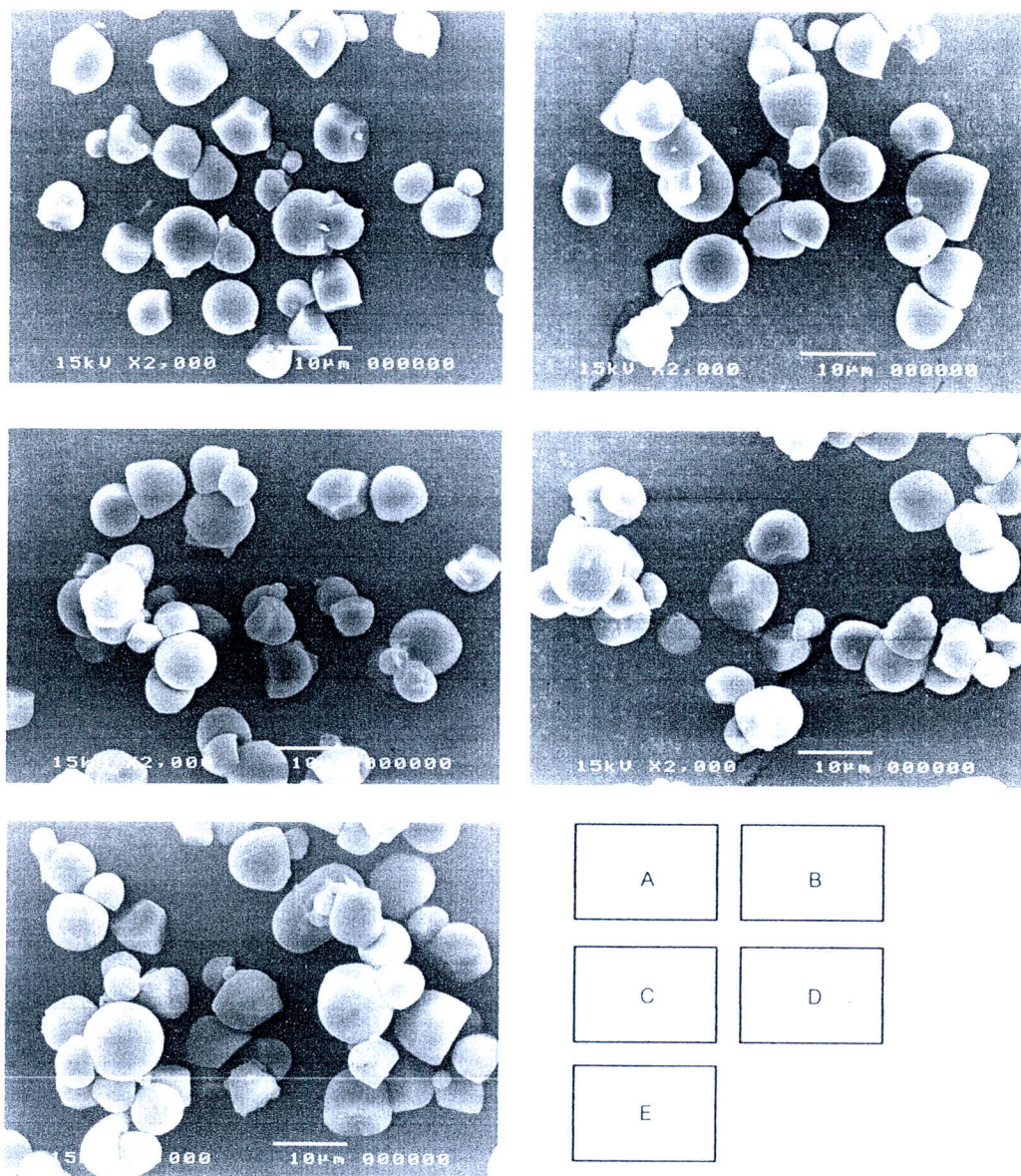


รูปที่ 3.5 SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะ ความชื้น 20-35% ความร้อน 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (A) JH-N-80-6; (B) JH-20-80-6; (C) JH-25-80-6; (D) JH-30-80-6; (E) JH-35-80-6



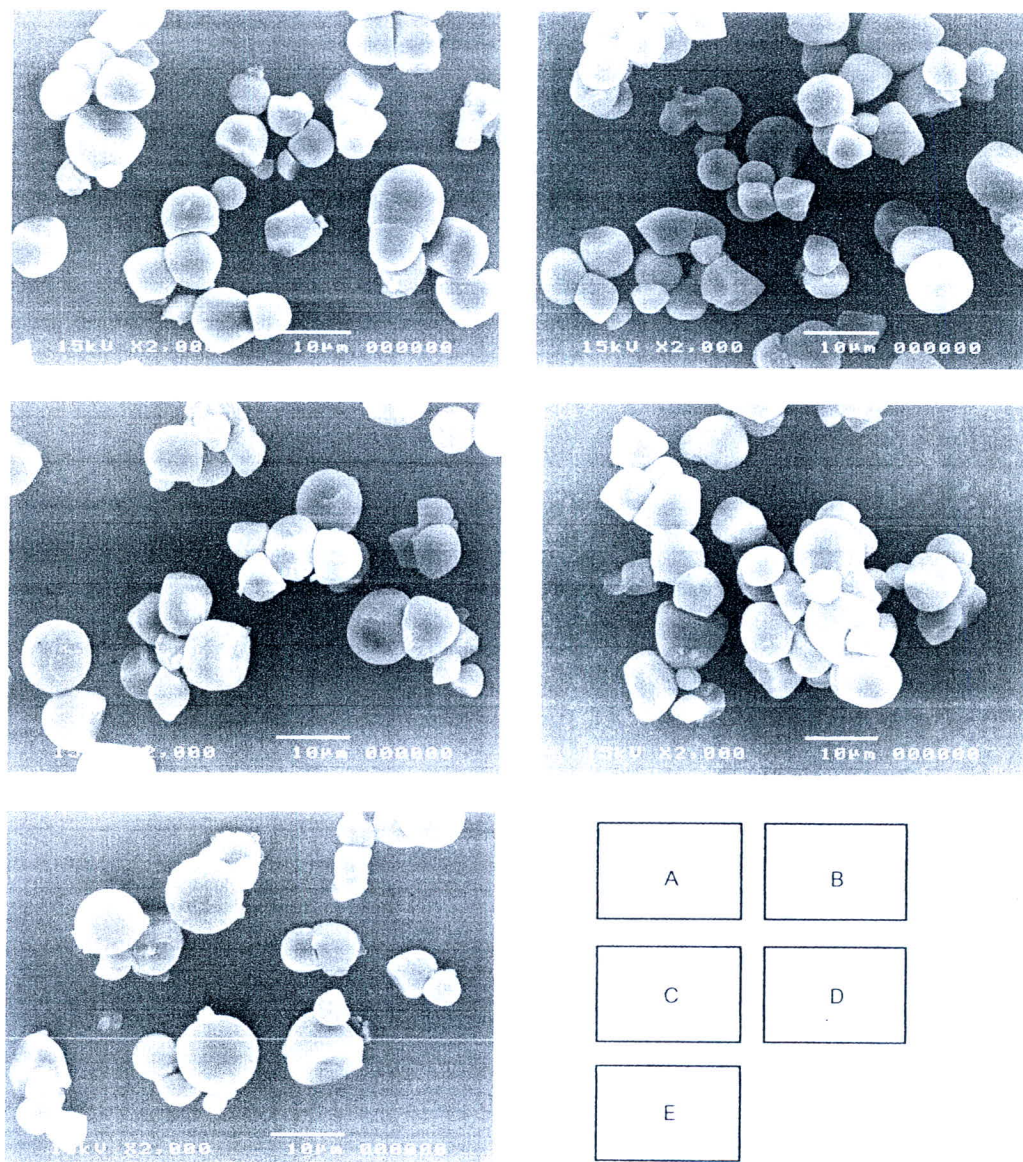
รูปที่ 3.6

SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (A) JH-N-90-6; (B) JH-20-90-6; (C) JH-25-90-6; (D) JH-30-90-6; (E) JH-35-90-6



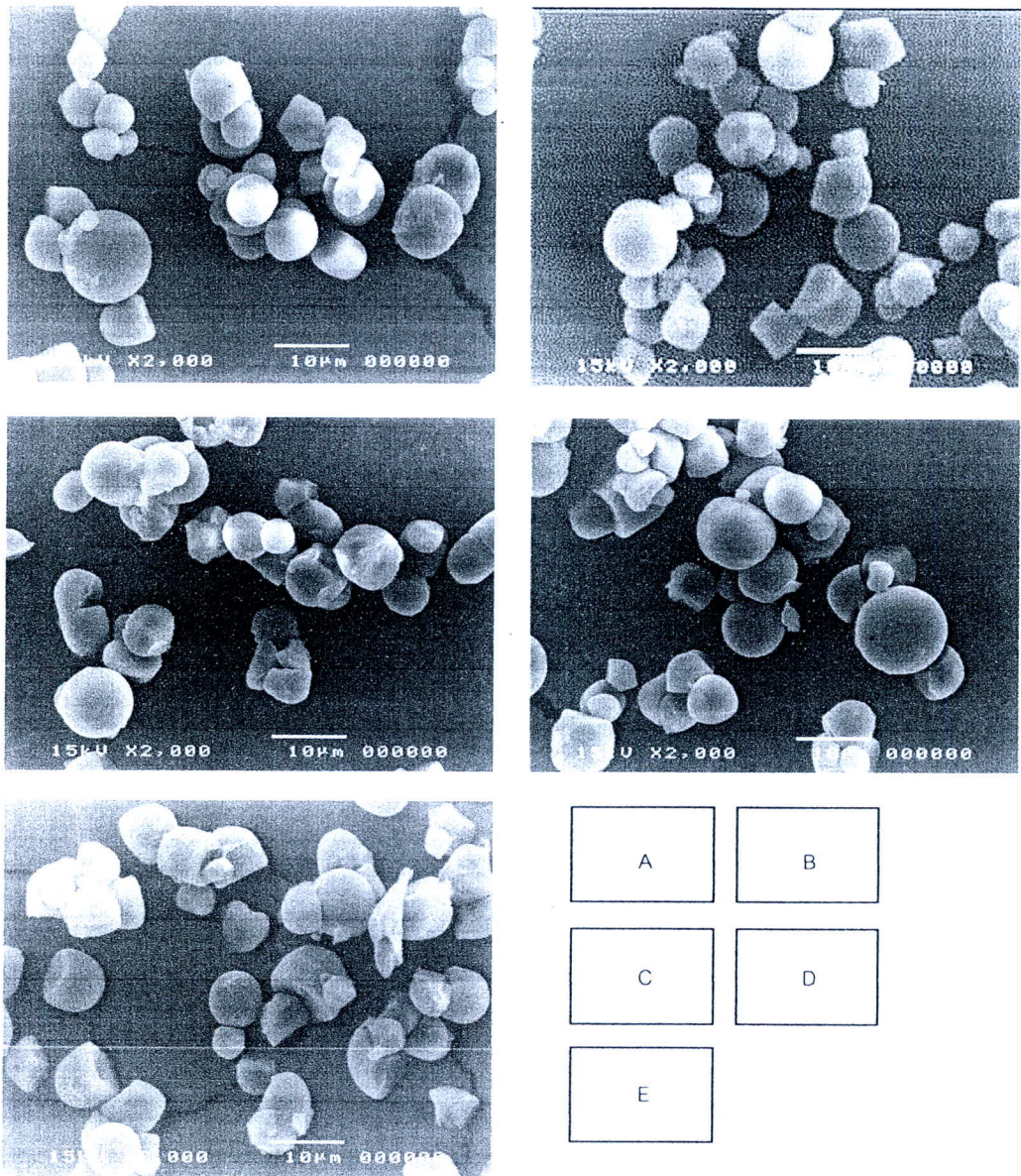
รูปที่ 3.7

SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 100°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (A) JH-N-100-6; (B) JH-20-100-6; (C) JH-25-100-6; (D) JH-30-100-6; (E) JH-35-100-6



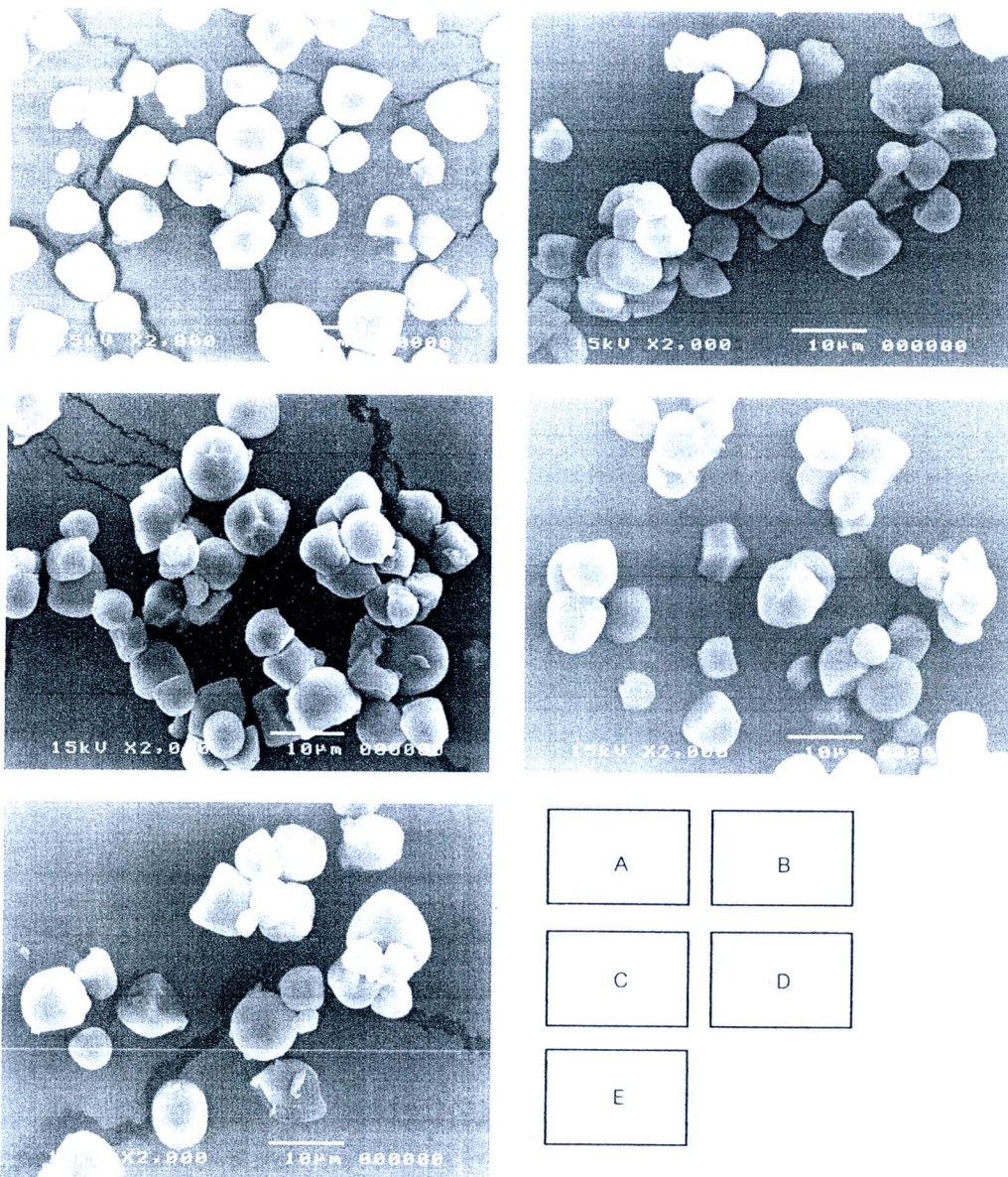
รูปที่ 3.8

SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 110°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (A) JH-N-110-6; (B) JH-20-110-6; (C) JH-25-110-6; (D) JH-30-110-6; (E) JH-35-110-6

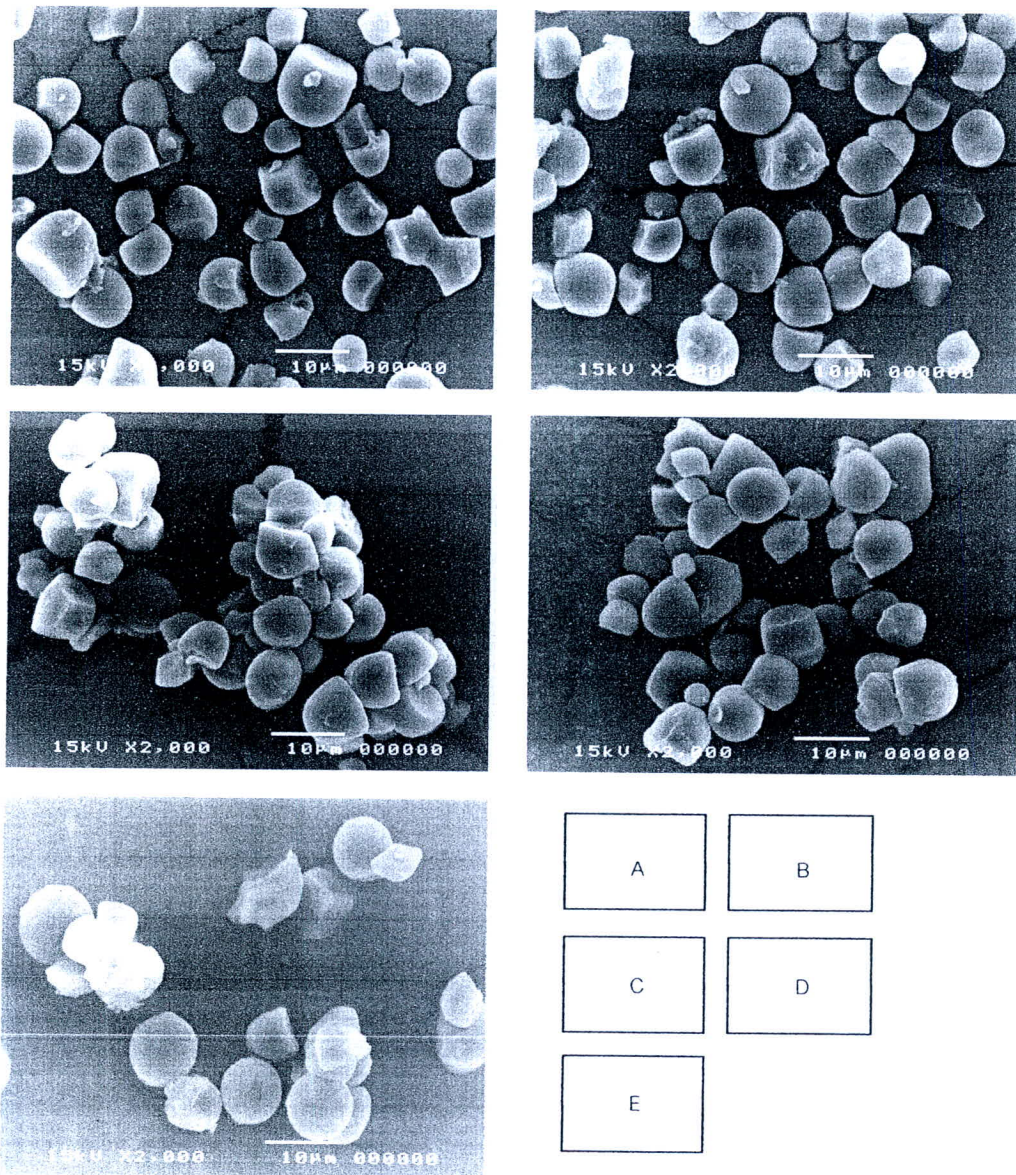


รูปที่ 3.9

SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 120°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (A) JH-N-120-6; (B) JH-20-120-6; (C) JH-25-120-6; (D) JH-30-120-6; (E) JH-35-120-6

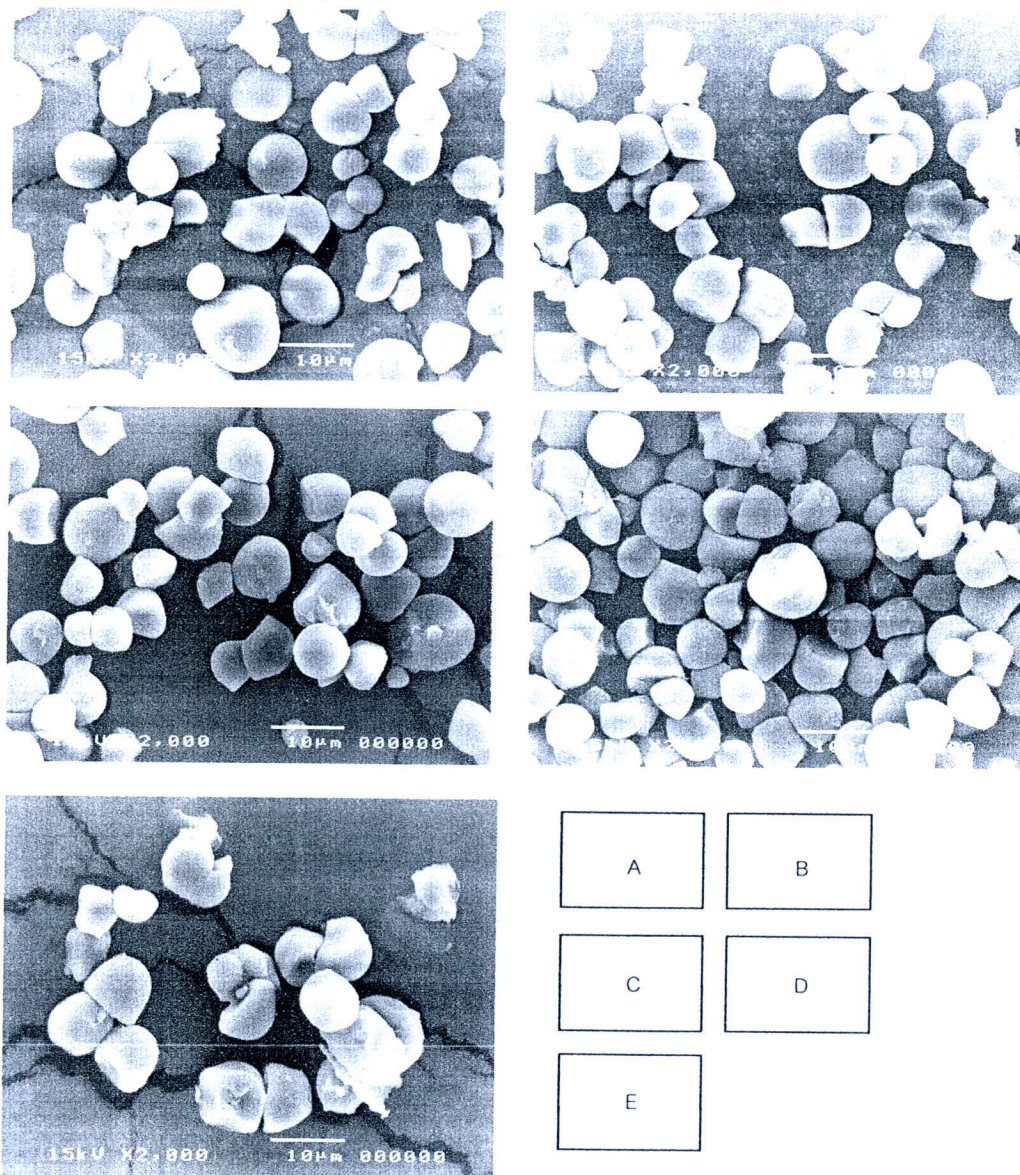


รูปที่ 3.10 SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (A) JH-N-80-12; (B) JH-20-80-12; (C) JH-25-80-12; (D) JH-30-80-12; (E) JH-35-80-12

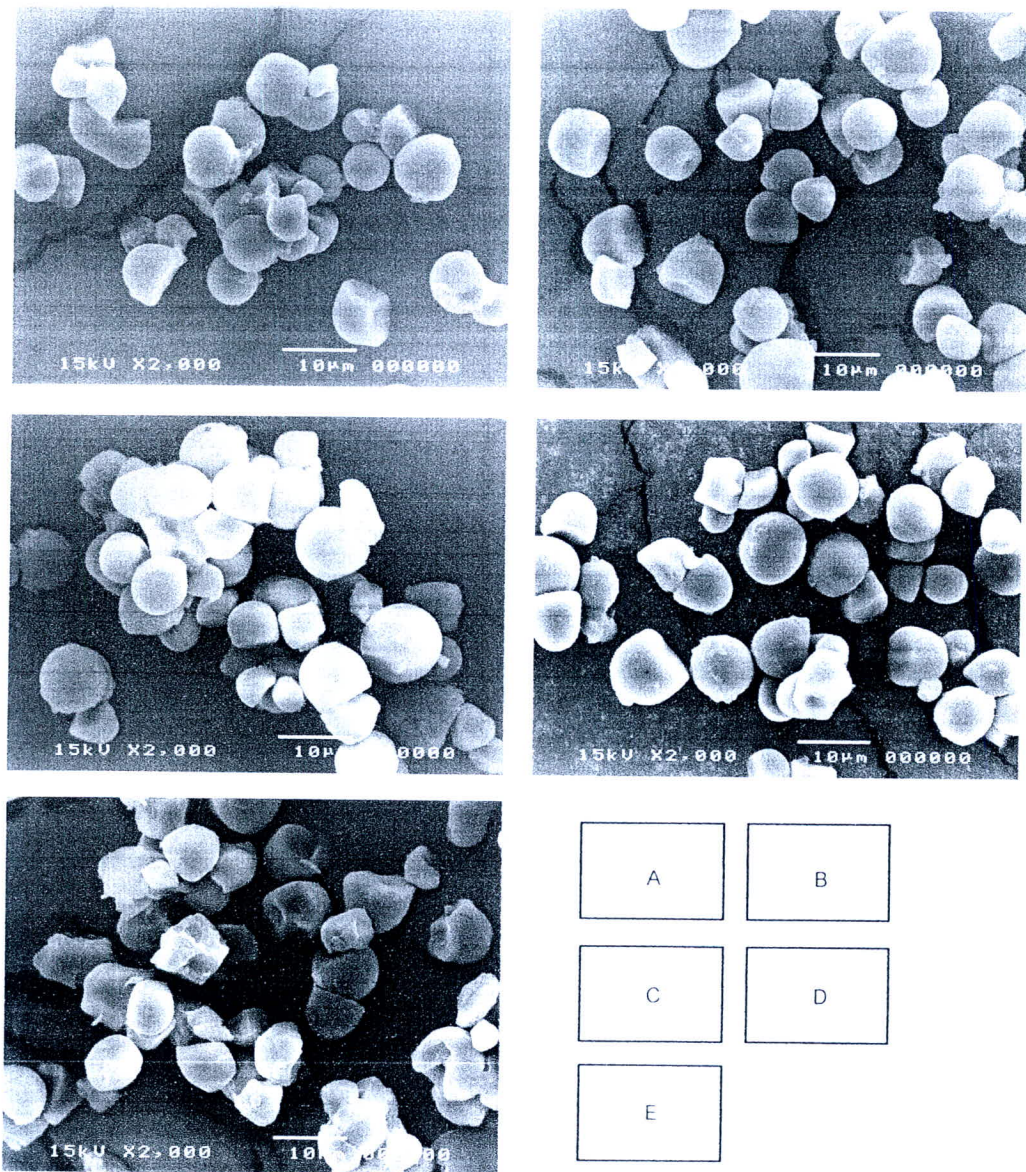


รูปที่ 3.11

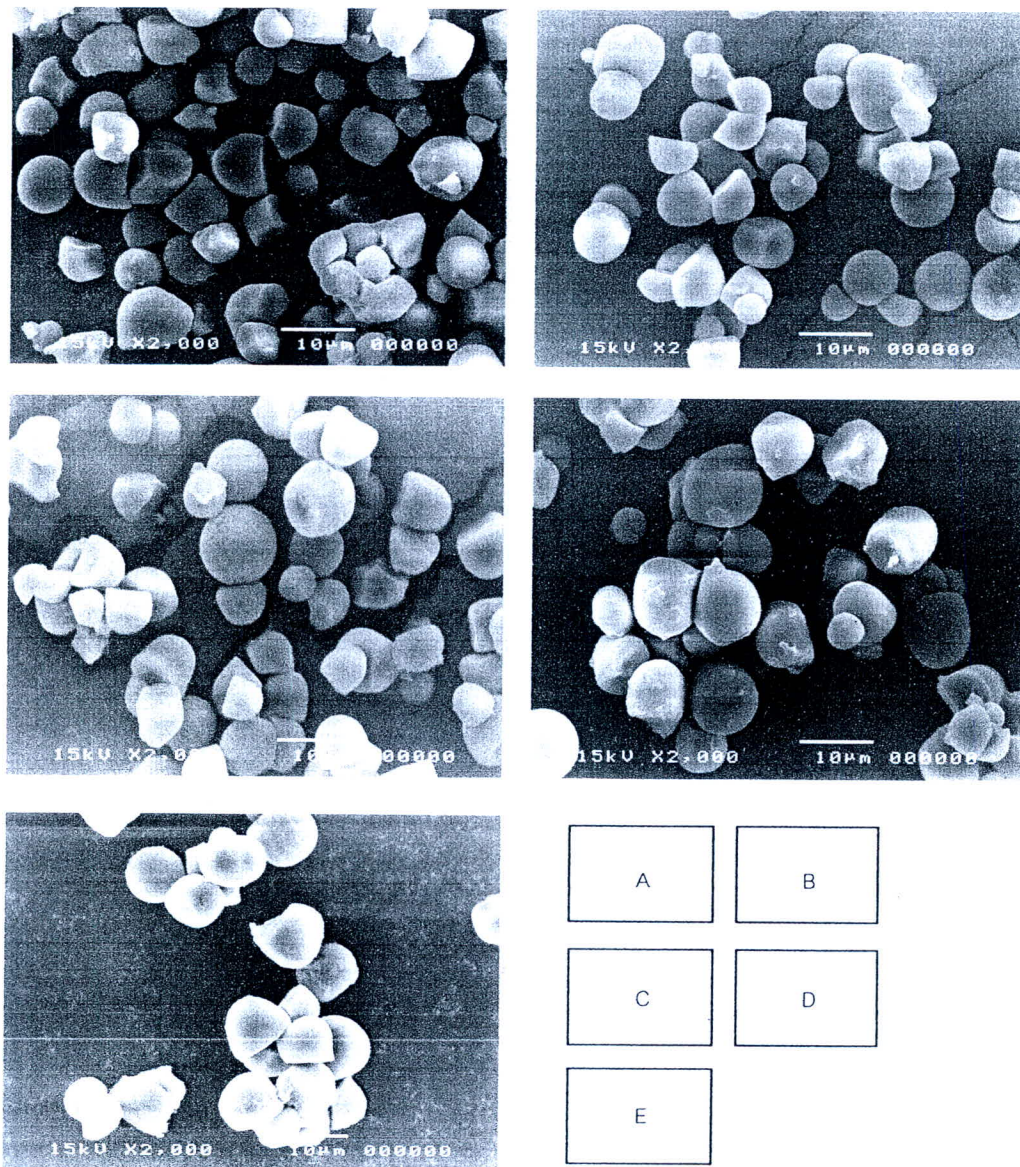
SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (A) JH-N-90-12; (B) JH-20-90-12; (C) JH-25-90-12; (D) JH-30-90-12; (E) JH-35-90-12



รูปที่ 3.12 SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (A) JH-N-100-12; (B) JH-20-100-12; (C) JH-25-100-12; (D) JH-30-100-12; (E) JH-35-100-12

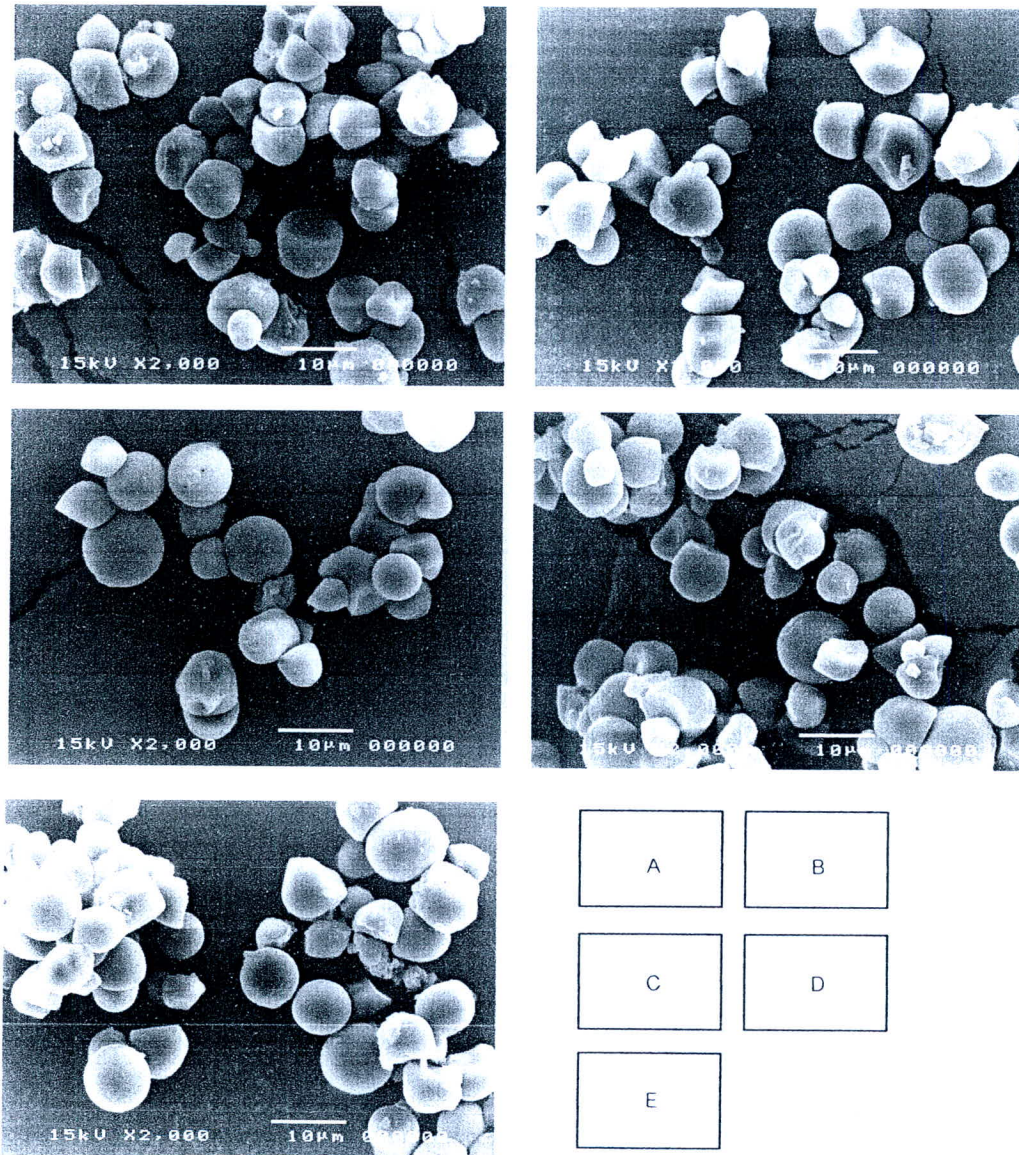


รูปที่ 3.13 SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 110°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (A) JH-N-110-12; (B) JH-20-110-12; (C) JH-25-110-12; (D) JH-30-110-12; (E) JH-35-110-12

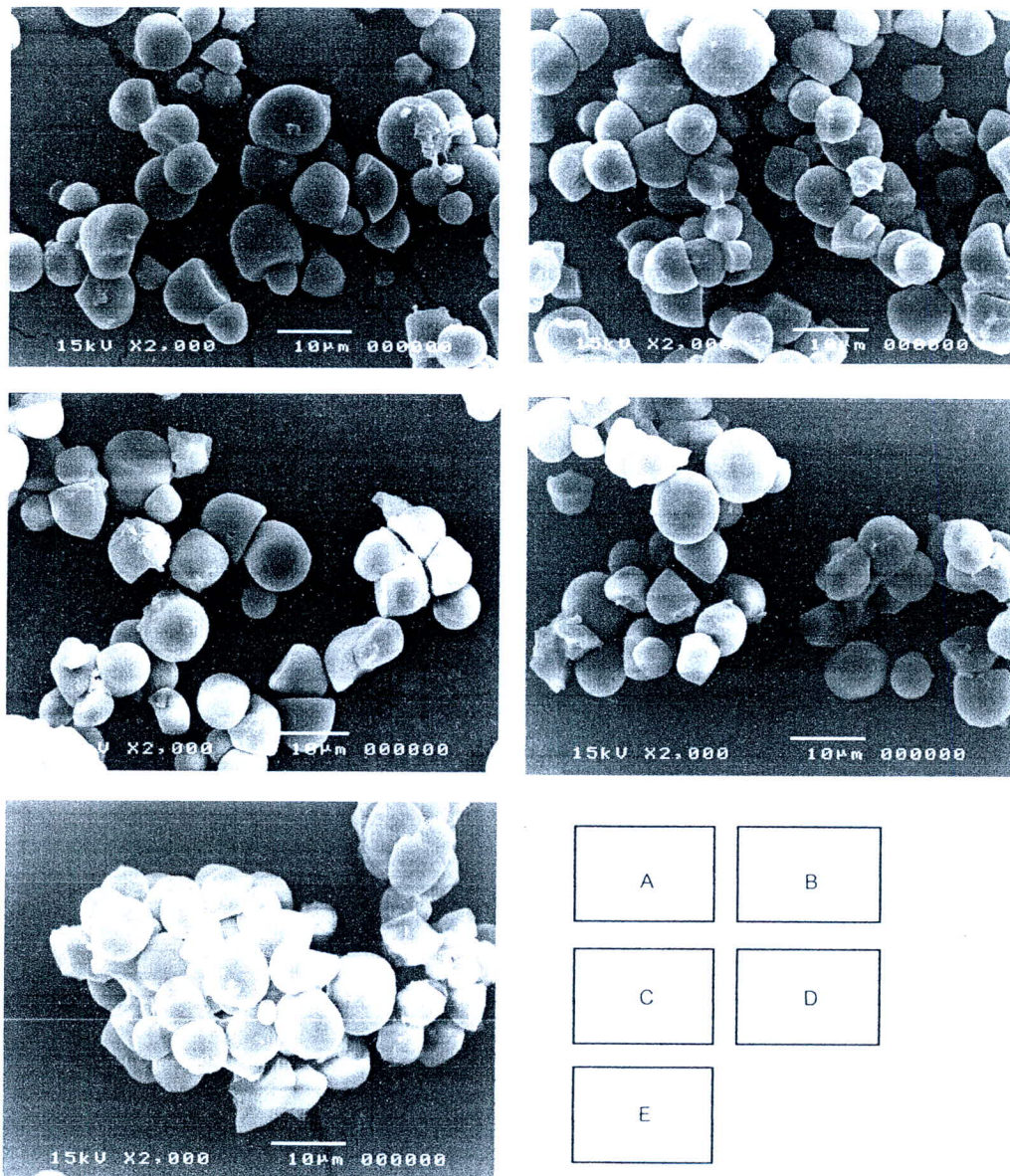


รูปที่ 3.14

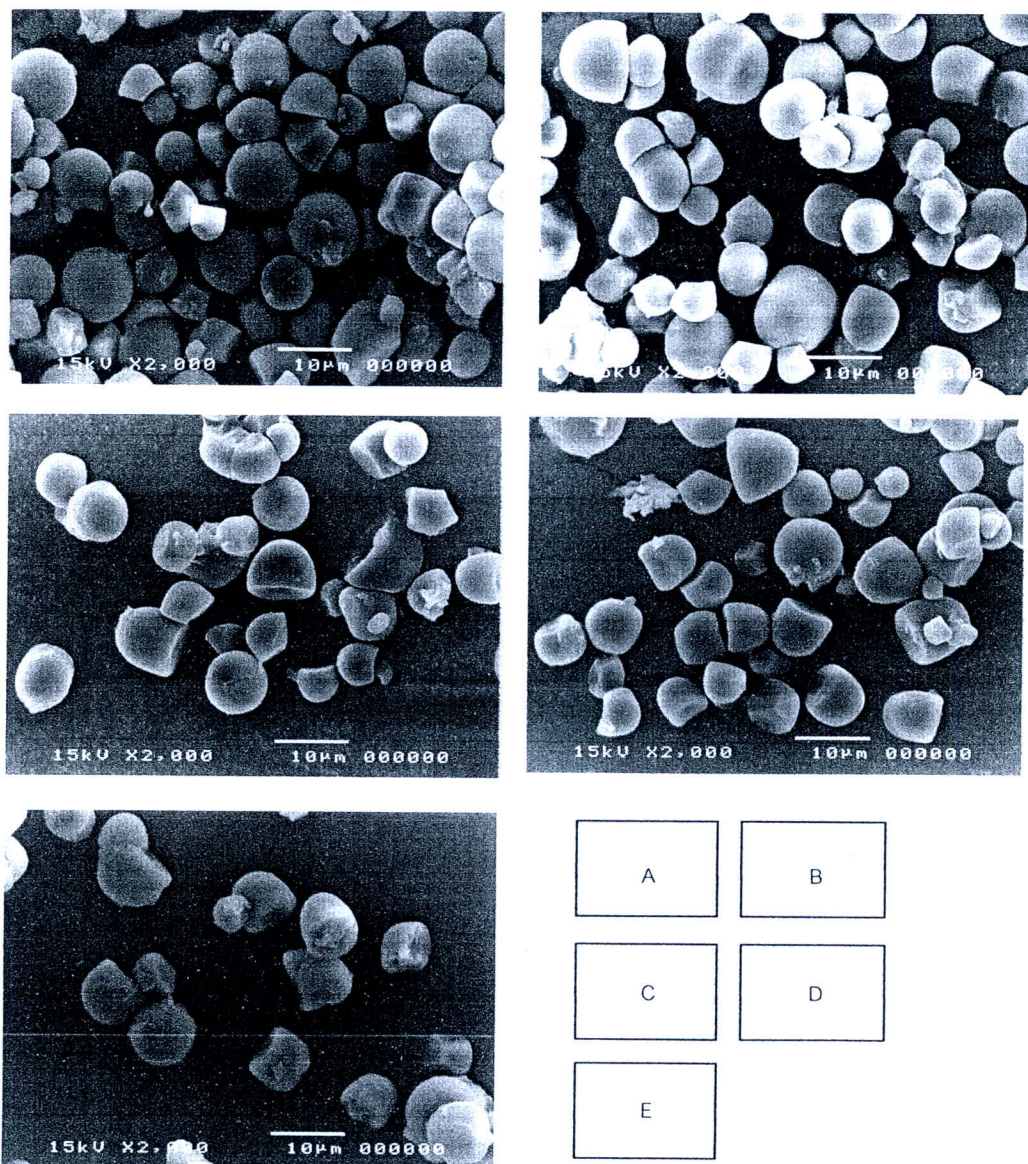
SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (A) JH-N-120-12; (B) JH-20-120-12; (C) JH-25-120-12; (D) JH-30-120-12; (E) JH-35-120-12



รูปที่ 3.15 SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 80°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (A) JH-N-80-16; (B) JH-20-80-16; (C) JH-25-80-16; (D) JH-30-80-16; (E) JH-35-80-16

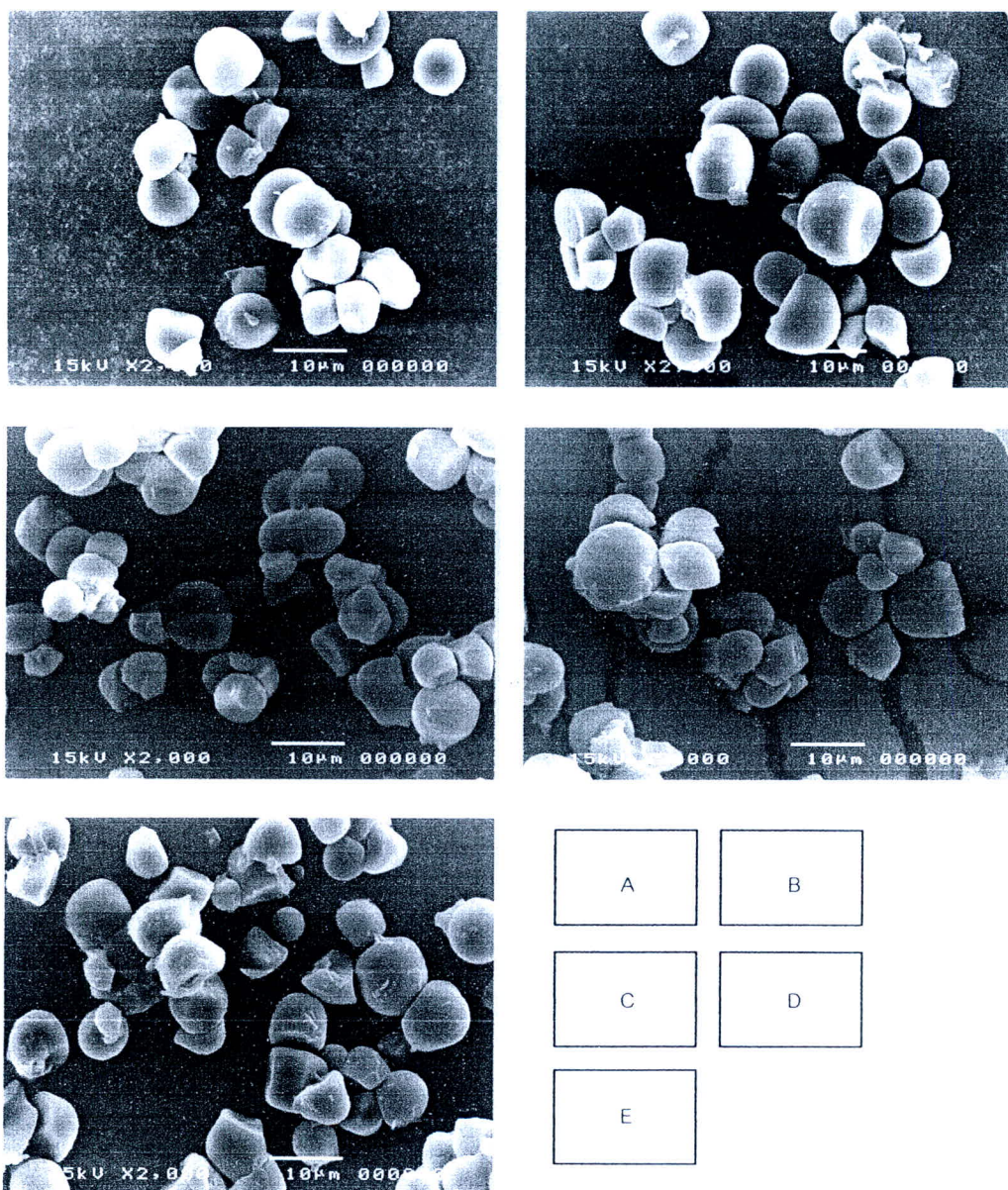


รูปที่ 3.16 SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะ ความชื้น 20-35% ความร้อน 90°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (A) JH-N-90-16; (B) JH-20-90-16; (C) JH-25-90-16; (D) JH-30-90-16; (E) JH-35-90-16



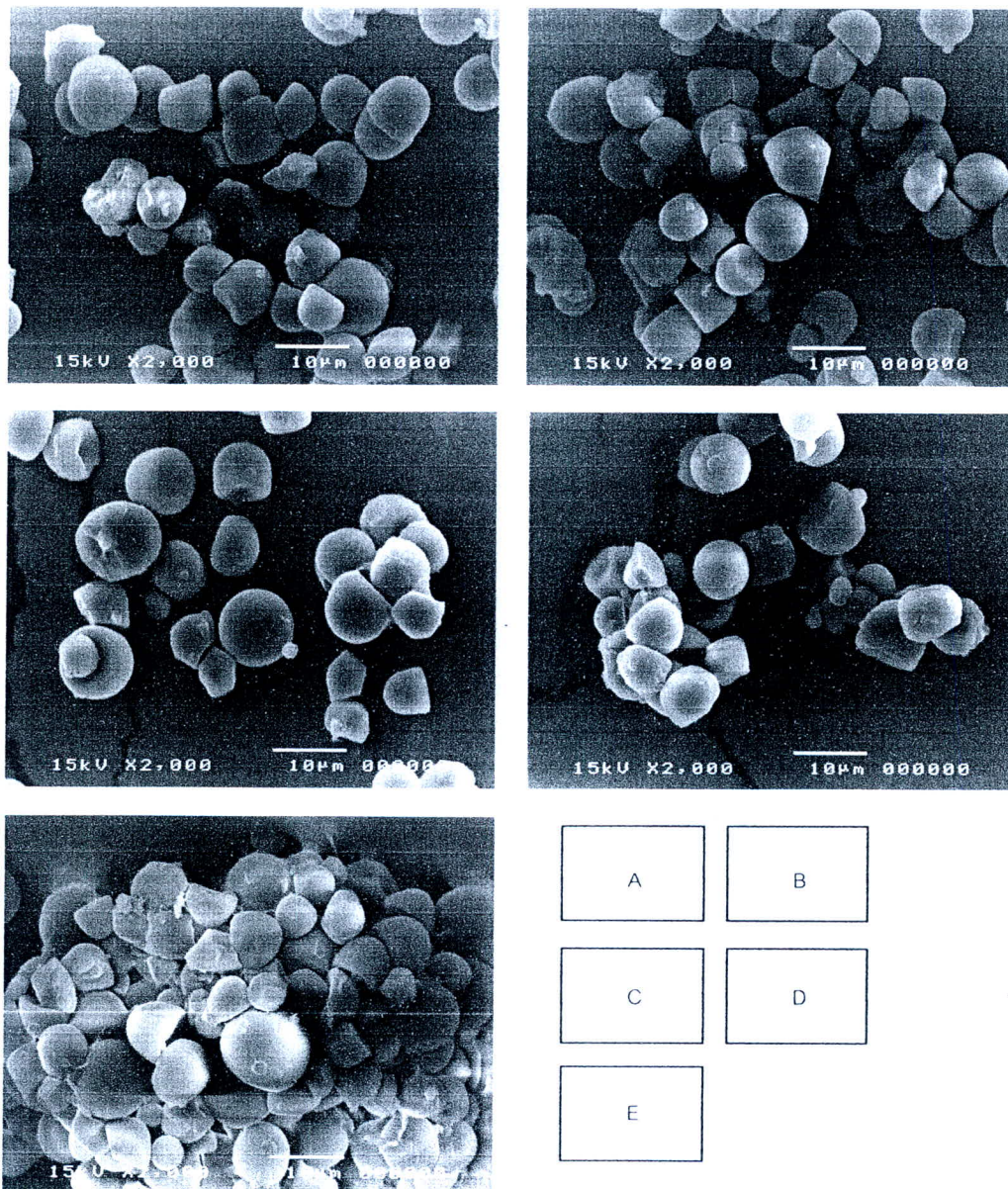
รูปที่ 3.17

SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 100°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (A) JH-N-100-16; (B) JH-20-100-16; (C) JH-25-100-16; (D) JH-30-100-16; (E) JH-35-100-16



รูปที่ 3.18

SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะความชื้น 20-35% ความร้อน 110°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (A) JH-N-110-16; (B) JH-20-110-16; (C) JH-25-110-16; (D) JH-30-110-16; (E) JH-35-110-16



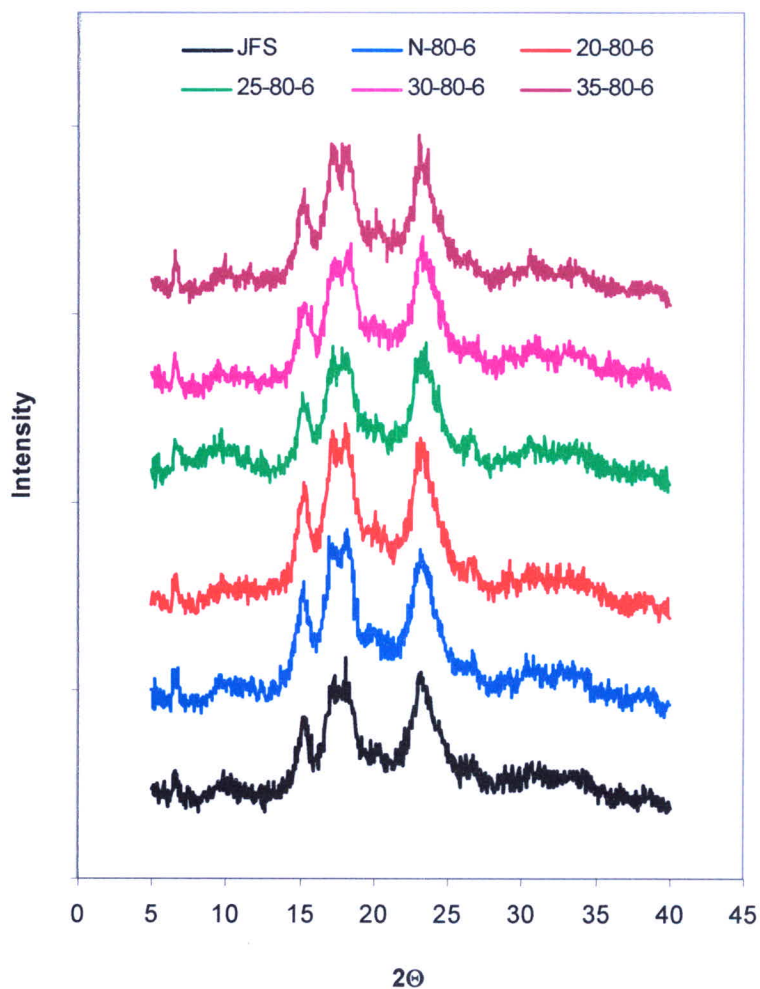
รูปที่ 3.19

SEM (2000X) ของแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่าน heat-moisture treatment ที่สภาวะ ความชื้น 20-35% ความร้อน 120°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (A) JH-N-120-16; (B) JH-20-120-16; (C) JH-25-120-16; (D) JH-30-120-16; (E) JH-35-120-16

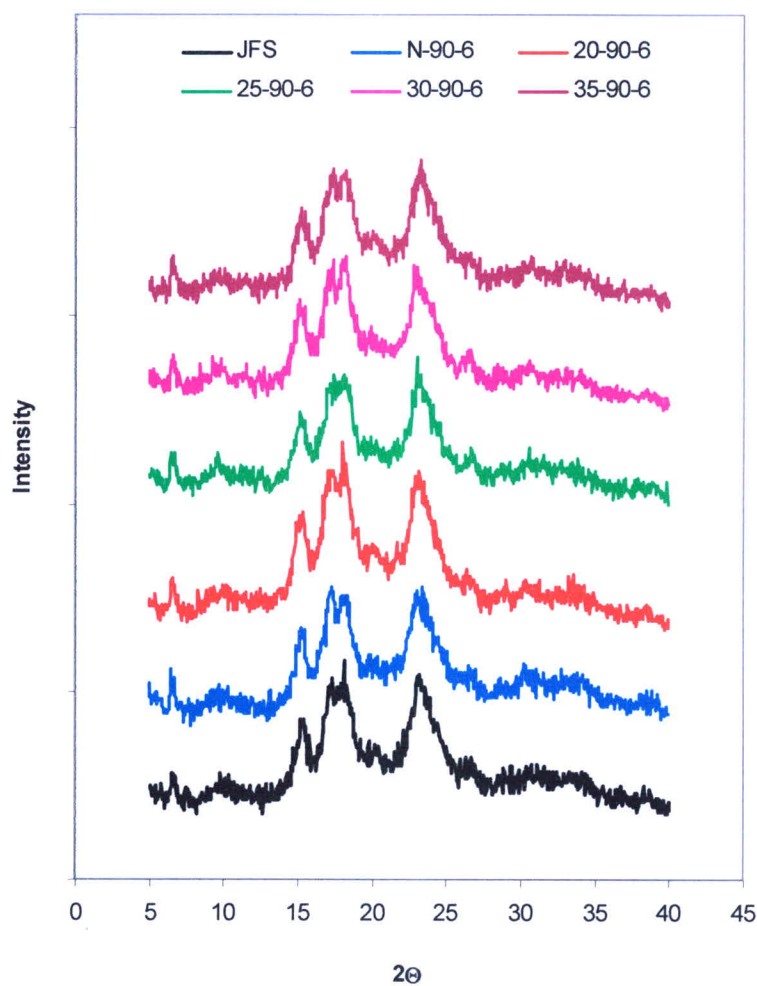


การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

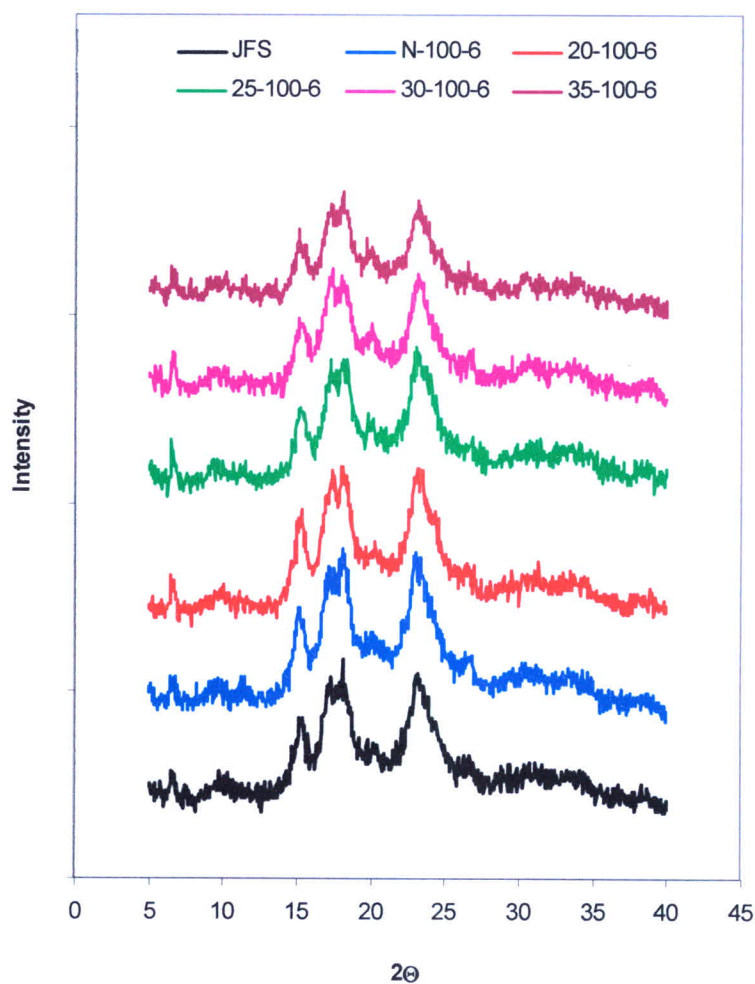
รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งดิบเมล็ดขนุน (รูปที่ 3.20) แสดงค่าพีคการสะท้อนหลักที่ Bragg angles 2θ เท่ากับ 15.3, 17.2, 18.1 และ 23.1° ซึ่งสอดคล้องกับรูปผลึกแบบ A-type ที่ได้มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Kittipongpatana & Kittipongpatana, 2011; Tulyathan et al., 2002) หลังจากการผ่านกระบวนการความร้อน แป้งดัดแปรทุกอย่างยังคงรูปผลึกแบบ A-type ไว้ แต่มีความเข้มของแต่ละพีคการสะท้อนแตกต่างกัน (รูปที่ 3.20 ถึง 3.34) ตัวอย่างที่ให้ความร้อน 10% ทุกอุณหภูมิและระยะเวลาการดัดแปร ให้รูปแบบ XRD ที่เหมือนกับแป้งดิบทุกประการ แสดงให้เห็นว่า และความร้อนในตัวแป้งเริ่มต้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดัดแปรด้วยความร้อน ตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยความร้อนและอุณหภูมิปานกลางมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มพีคการสะท้อน แสดงถึงการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากขึ้น (more-ordered rearrangement) ภายในแกรนูลแป้ง ในทางตรงข้าม ตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยความร้อนและอุณหภูมิสูง มีการลดลงของความเข้มพีคการสะท้อนเล็กน้อย (30% MC) ถึงปานกลาง (35%MC) (รูปที่ 3.30 ถึง 3.34) ซึ่งข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับผล SEM และสนับสนุนคำอธิบายที่ว่าความร้อนและอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการดัดแปรส่งเสริมการเกิด destabilization ของ lamellar array (Klein et al., 2013)



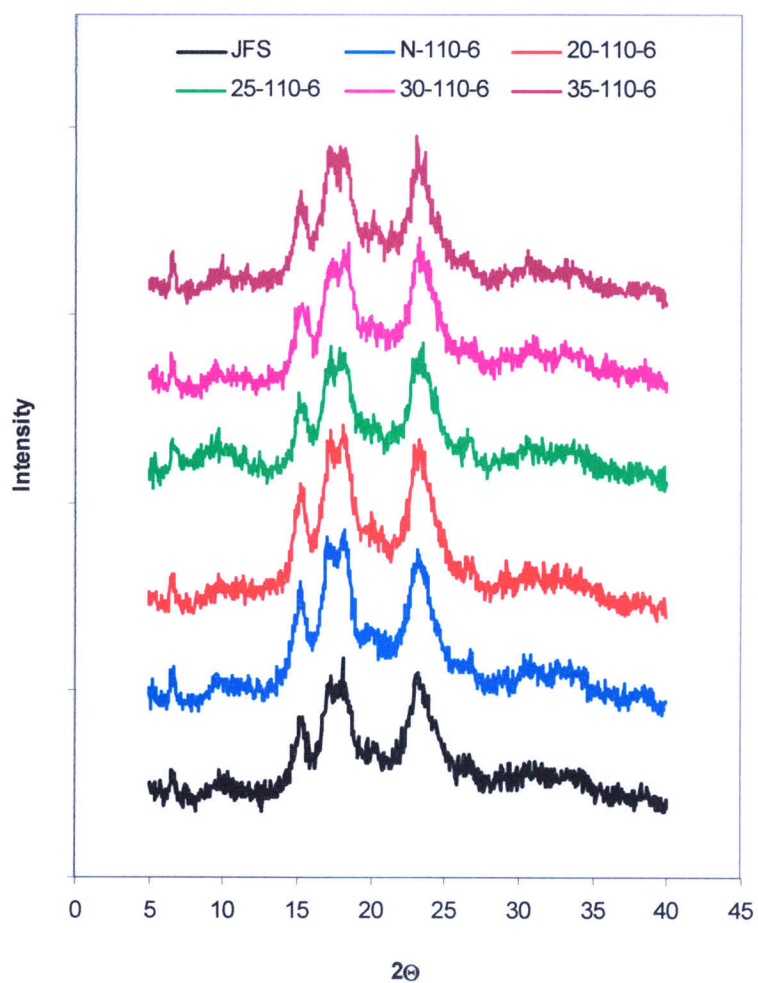
รูปที่ 3.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 80°C นาน 6 ชั่วโมง



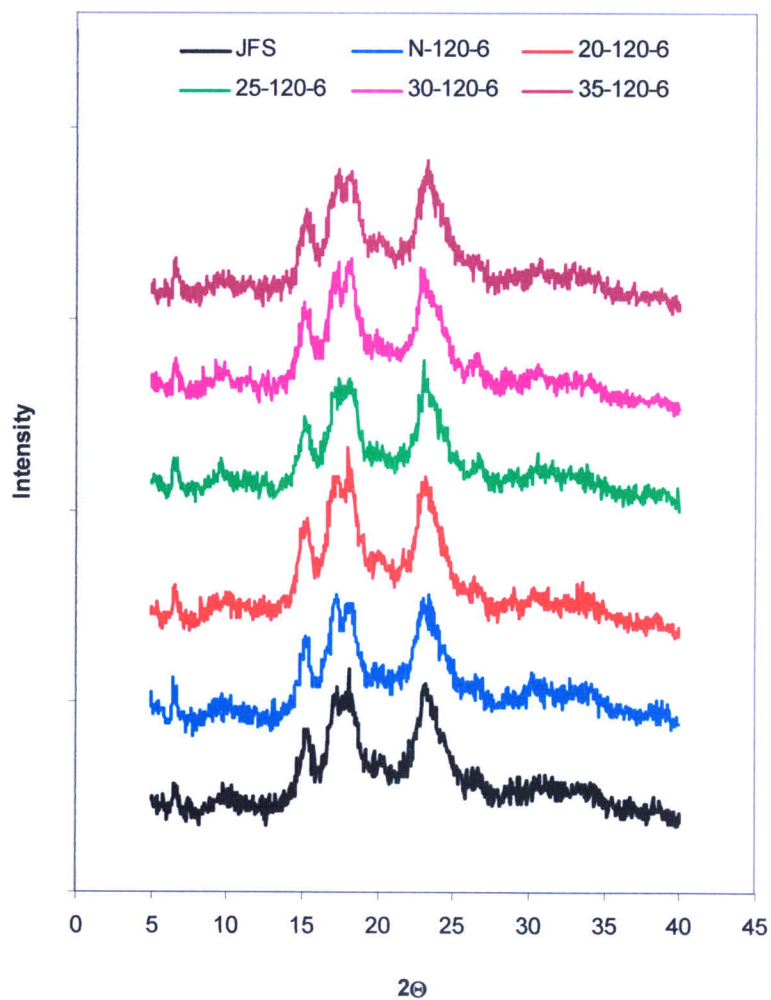
รูปที่ 3.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 90°C นาน 6 ชั่วโมง



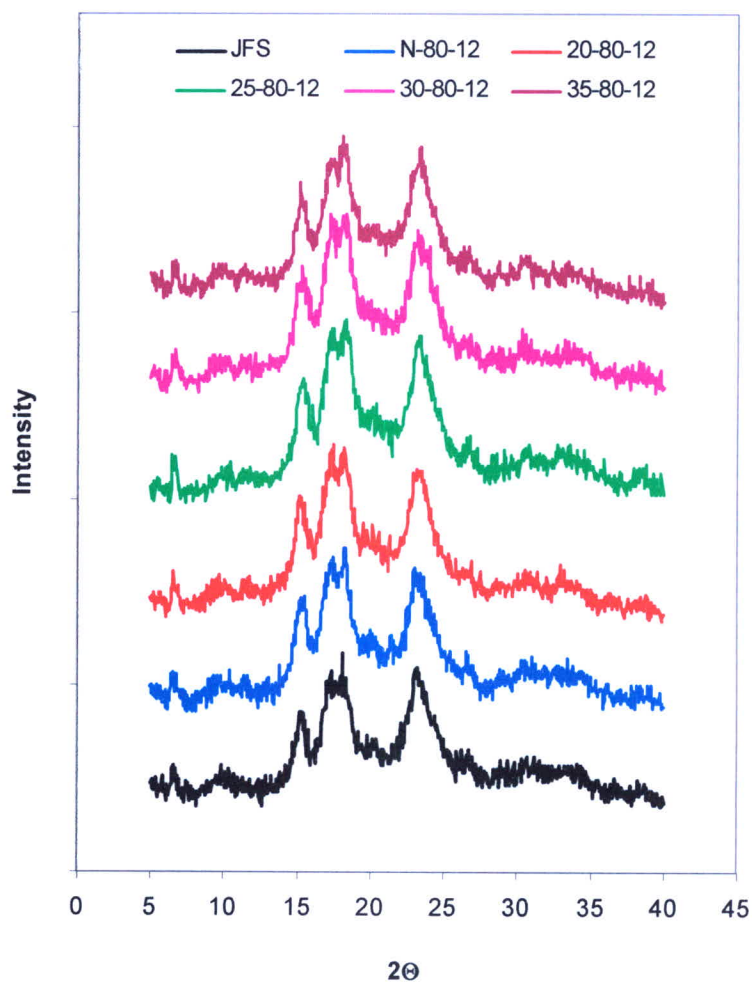
รูปที่ 3.22 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 100°C นาน 6 ชั่วโมง



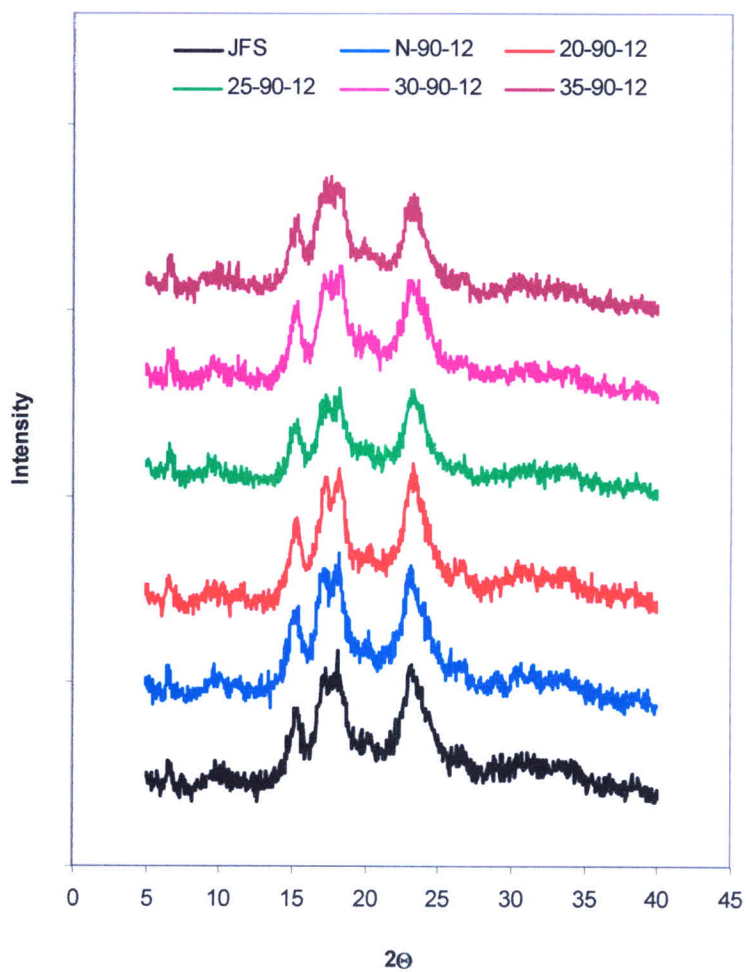
รูปที่ 3.23 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 110°C นาน 6 ชั่วโมง



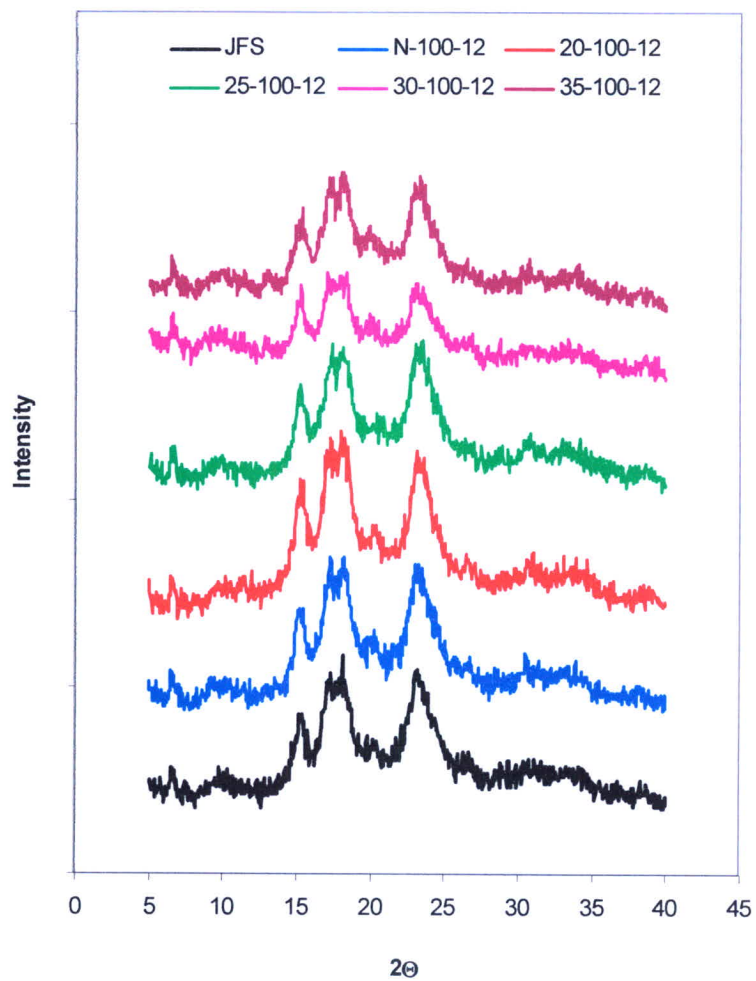
รูปที่ 3.24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 120°C นาน 6 ชั่วโมง



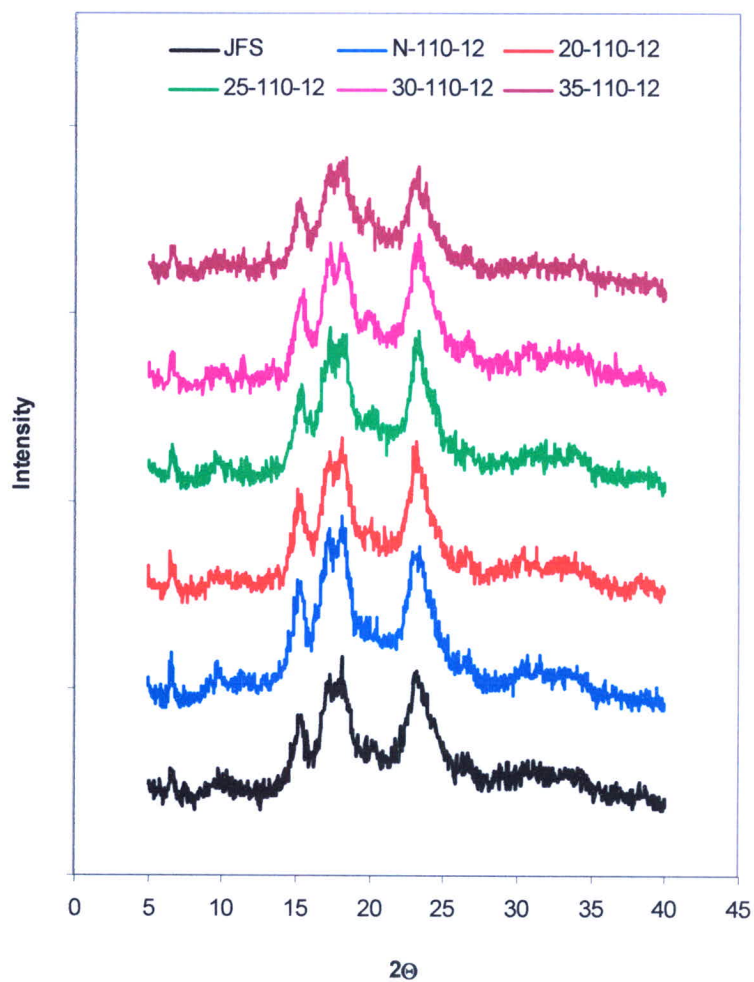
รูปที่ 3.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 80°C นาน 12 ชั่วโมง



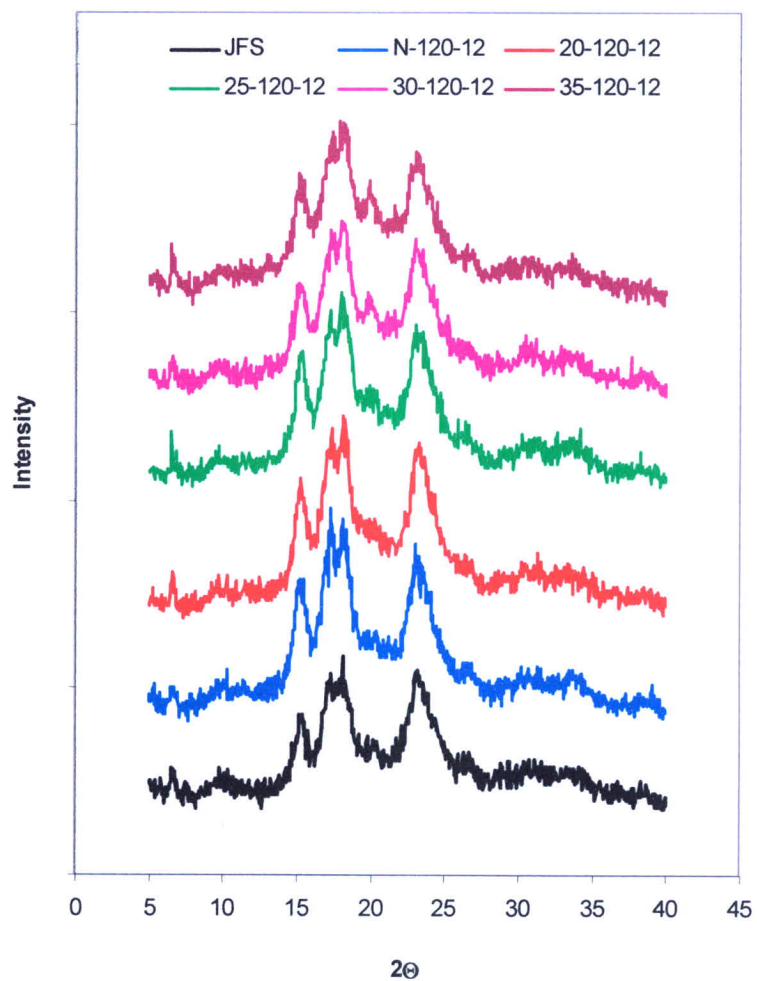
รูปที่ 3.26 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 90°C นาน 12 ชั่วโมง



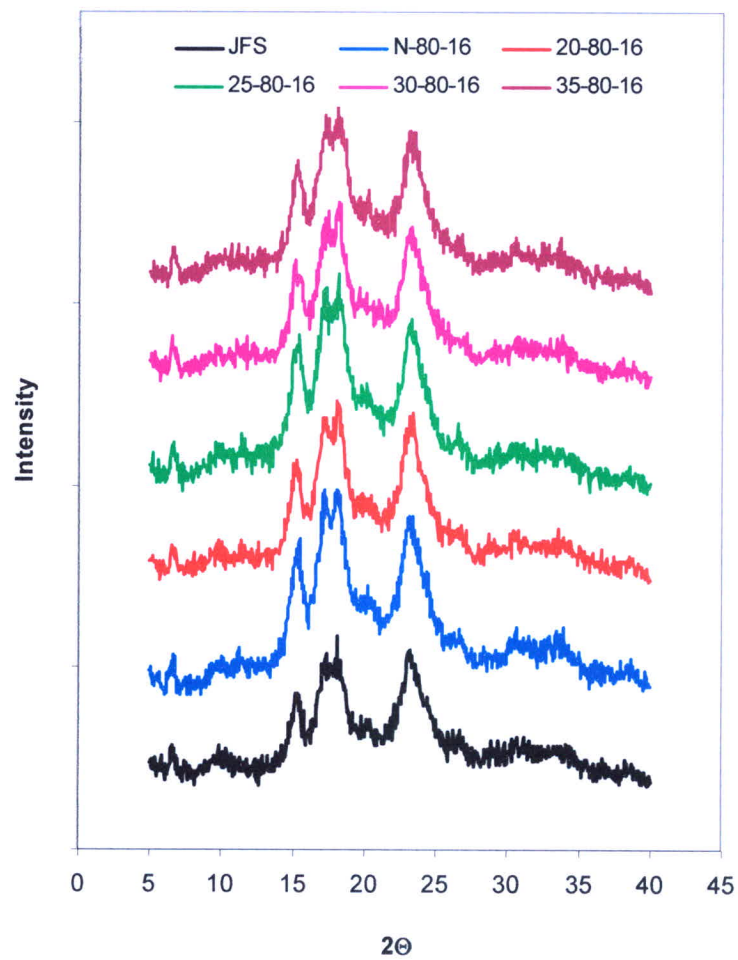
รูปที่ 3.27 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 100°C นาน 12 ชั่วโมง



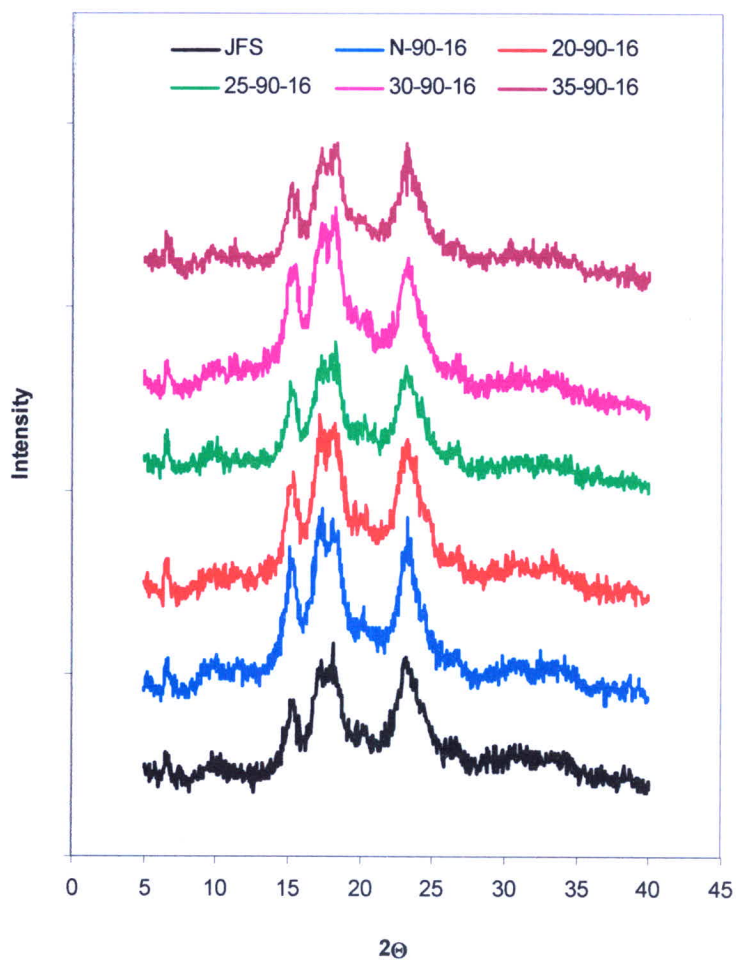
รูปที่ 3.28 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 110°C นาน 12 ชั่วโมง



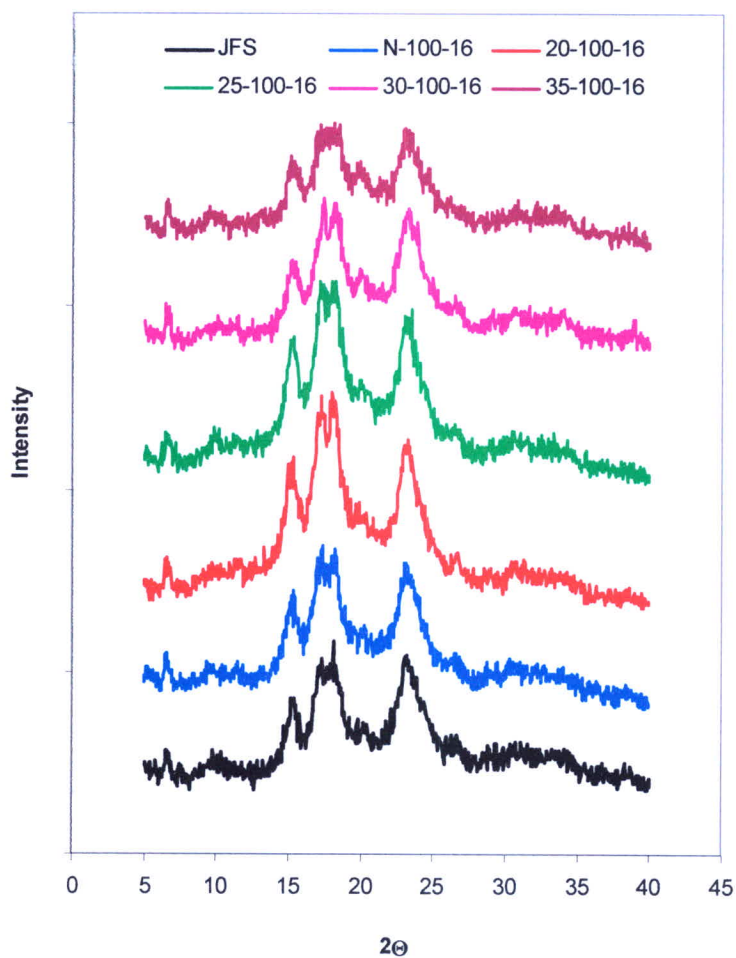
รูปที่ 3.29. รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขุ่นดิบ (JF) และแป้งขุ่นดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 120°C นาน 12 ชั่วโมง



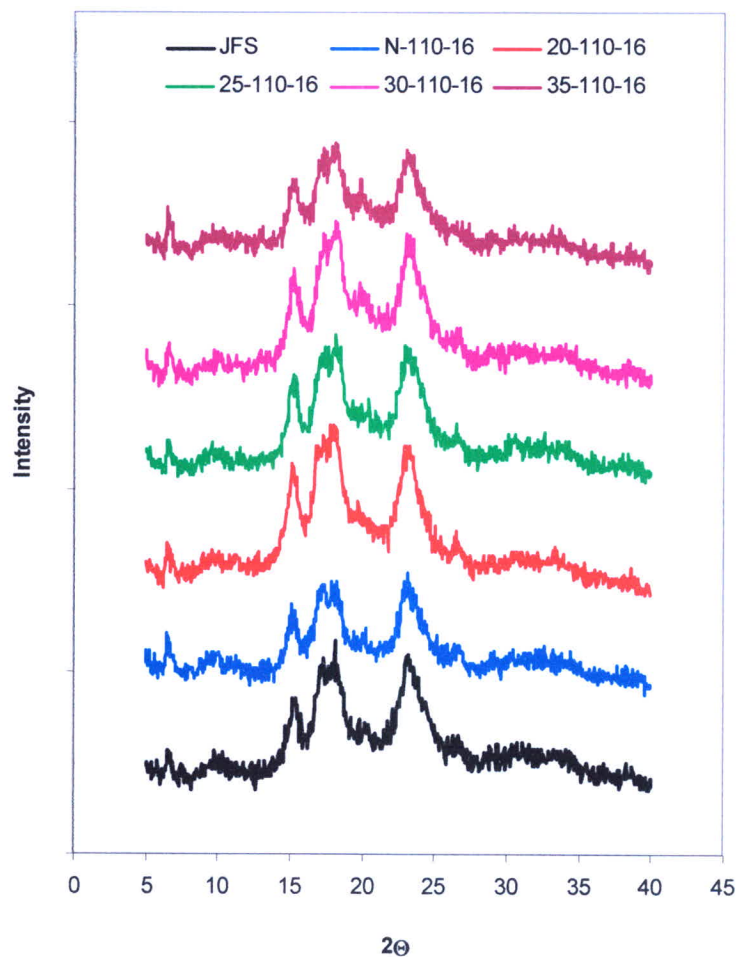
รูปที่ 3.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 80°C นาน 16 ชั่วโมง



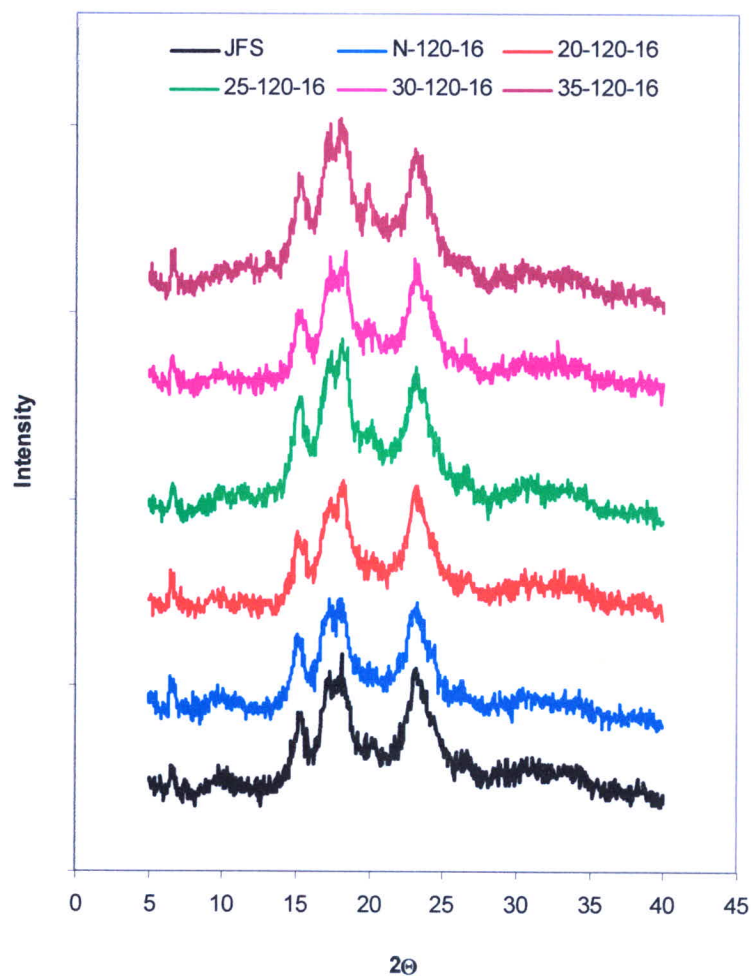
รูปที่ 3.31 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 90°C นาน 16 ชั่วโมง



รูปที่ 3.32 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 100°C นาน 16 ชั่วโมง



รูปที่ 3.33 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 110°C นาน 16 ชั่วโมง



รูปที่ 3.34 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแป้งขนุนดิบ (JF) และแป้งขนุนดัดแปรด้วย HMT ที่สภาวะความชื้น 20-35% อุณหภูมิ 120°C นาน 16 ชั่วโมง



Differential Scanning Calorimetry

ค่าอุณหภูมิการเกิดเป็นเจล (T_g) ที่ค่อนข้างสูงของแป้งดิบเมล็ดขนุน ($84.24 \pm 0.37^\circ\text{C}$) แสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงตัวภายในแกรนูลแป้งเมล็ดขนุนมีความเป็นระเบียบมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นที่มีค่าอุณหภูมิการเกิดเป็นเจลที่ต่ำกว่า ตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นพบการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเป็นเจลคือค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) อุณหภูมิการเกิดเป็นเจล (T_g) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ดังแสดงในตารางที่ 3.10 ถึง 3.12 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานจากแป้งชนิดอื่นที่ดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (Chung, Hoover & Liu, 2009a; Klein et al., 2013; Li et al., 2011; Pancha-amon & Uttapap, 2013) ซึ่งแสดงว่าสายพอลิเมอร์แป้งภายในส่วนอสัณฐาน (amorphous) มีการเคลื่อนที่ได้จำกัด อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในแกรนูล แป้งจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะมิโลส-อะมิโลส อะมิโลส-อะมิโล-เพคติน และ/หรือ อะมิโลส-ไขมัน (Chung et al., 2009a) โดยที่การเพิ่มขึ้นนี้พบได้ในตัวอย่างที่ดัดแปรที่ทั้งสามช่วงระยะเวลา ตัวอย่างที่ถูกดัดแปรด้วยความร้อนที่สูงกว่าจะแสดงค่าอุณหภูมิการเกิดเป็นเจลที่สูงขึ้นตามไปด้วย ที่ทุกสภาวะอุณหภูมิและระยะเวลาของการดัดแปร (รูปที่ 3.35) ซึ่งแสดงว่าความร้อนในตัวอย่างเริ่มต้นมีผลต่อสมบัติแป้งดัดแปรที่ได้เป็นอย่างดี แม้ว่าจะยังไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการเกิดเป็นเจล กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในตัวอย่าง นอกจากนี้ การลดลงของค่า ΔT อย่างเล็กน้อยถึงปานกลาง ยังพบได้ในตัวอย่างแป้งดัดแปรที่ถูกให้ความร้อนในช่วง $80-100^\circ\text{C}$ ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับรายงานจากการทดลองในแป้งข้าวเจ้า มันสำปะหลัง และ pinhão (Klein et al., 2013) ขณะที่ตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นแสดงการเพิ่มขึ้นของค่า ΔT ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้บ่อยในการดัดแปรด้วยความร้อน (Chung et al., 2009b; Jacobs & Delcour, 1998) ค่าเอนทาลปีของการเกิดเป็นเจล (ΔH) มีค่าลดลงเล็กน้อยถึงปานกลาง ($0.5-4.0 \text{ J/g}$) ในตัวอย่างที่ดัดแปรที่ความชื้น 20-25% MC และอุณหภูมิ $80-100^\circ\text{C}$ การดัดแปรที่ความชื้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่าแป้งดัดแปรที่ได้มีค่า ΔH ลดลงอย่างชัดเจน ($5.5-9.5 \text{ J/g}$) ซึ่งการลดลงหรือไม่เปลี่ยนแปลงของค่า ΔH ของแป้งหลังจากการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น เป็นสิ่งที่พบได้บ่อยและมีรายงานมาแล้วก่อนหน้านี้ (Ambigaipalan et al., 2014; Chung et al., 2009b; Jacobs & Delcour, 1998; Klein et al., 2013; Ovando-Martínez et al., 2013) อันเป็นผลมาจากการเกิดการขัดขวางพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond disruption) ในเกลียวคู่ของบริเวณที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึกในแกรนูลแป้ง เนื่องจากการเคลื่อนไหวที่เพิ่มขึ้นจากการถูกชักนำด้วยความร้อน ยังเป็นไปได้ด้วยว่าการเกิดการเป็นเจลบางส่วน (partial gelatinization) เนื่องจากผลของความร้อนและความชื้นสูง (Pancha-amon & Uttapap, 2013) อย่างไรก็ตาม มี



รายงานการเพิ่มขึ้นของค่า ΔH ภายหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ในแป้งถั่วเขียว (Li et al., 2011) และ แป้งและฟลาวข้าวเจ้า (Puncha-amon & Uttapap, 2013) การเพิ่มขึ้นเหล่านี้มีการตั้งสมมติฐานว่าเกิดจากการที่สายแป้งมีการเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่เป็นจำนวนมาก หรือจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายแป้งในส่วนโดเมนที่เป็นผลึก (Li et al., 2011)



ตารางที่ 3.10 สมบัติทางอุณหภูมิจากของแข็งที่ผ่านการบำบัดผ่านกระบวนการ HMT ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (T, °C)			ΔT	ΔH
	T_{onset}	T_{peak}	T_{end}		
JH-N-80-6	81.41±0.45	84.45±0.22	88.10±0.00	6.69±0.45	5.06±1.02
JH-20-80-6	82.75±0.25	85.48±0.29	88.85±0.64	6.10±0.39	4.19±0.52
JH-25-80-6	84.78±0.22	87.08±0.38	89.60±0.42	4.83±0.65	2.97±1.09
JH-30-80-6	87.26±0.09	89.49±0.15	91.90±0.28	4.64±0.38	4.65±0.99
JH-35-80-6	88.96±0.12	90.86±0.05	93.15±0.35	4.19±0.47	4.91±1.51
JH-N-90-6	81.07±0.35	84.26±0.19	87.10±0.00	6.03±0.35	4.00±0.12
JH-20-90-6	84.34±0.52	87.33±0.59	91.30±0.85	6.96±0.33	5.26±1.58
JH-25-90-6	88.61±0.31	90.71±0.35	93.40±0.71	4.79±0.40	8.62±5.83
JH-30-90-6	89.76±0.47	91.73±0.46	94.20±1.13	4.44±0.66	10.73±4.14
JH-35-90-6	90.00±0.01	91.95±0.09	94.20±0.00	4.20±0.01	4.75±0.49
JH-N-100-6	83.19±0.47	85.54±0.03	88.95±1.63	5.76±2.10	6.69±7.13
JH-20-100-6	85.09±0.71	87.58±0.16	91.00±0.57	5.91±1.27	2.96±1.67
JH-25-100-6	91.09±0.26	93.63±0.27	98.00±2.26	6.91±2.00	13.58±0.51
JH-30-100-6	91.97±0.32	93.96±0.38	97.15±1.06	5.18±0.74	8.35±6.12
JH-35-100-6	92.20±0.58	94.27±0.53	96.80±1.56	4.60±0.98	5.61±5.65
JH-N-110-6	81.63±0.69	84.47±0.32	87.90±0.71	6.27±0.02	4.50±0.34
JH-20-110-6	83.76±0.14	86.76±0.06	90.75±0.21	6.99±0.35	3.75±0.10
JH-25-110-6	87.60±2.85	91.29±0.39	94.45±0.78	6.85±3.63	2.92±1.81
JH-30-110-6	88.59±0.02	91.68±0.15	95.15±0.07	6.56±0.09	3.66±1.77
JH-35-110-6	89.31±0.09	91.89±0.13	95.40±0.00	6.09±0.09	2.23±0.75
JH-N-120-6	81.20±0.07	84.35±0.07	88.30±0.14	7.10±0.07	4.99±0.10
JH-20-120-6	83.69±0.33	86.78±0.52	91.10±2.12	7.41±1.79	3.12±2.33
JH-25-120-6	84.11±0.21	90.05±0.54	94.35±0.21	10.24±0.42	4.79±0.51
JH-30-120-6	87.52±0.02	90.70±0.29	95.05±0.07	7.53±0.05	3.17±0.05
JH-35-120-6	87.99±0.01	90.92±0.02	94.05±0.92	6.06±0.90	1.12±0.51



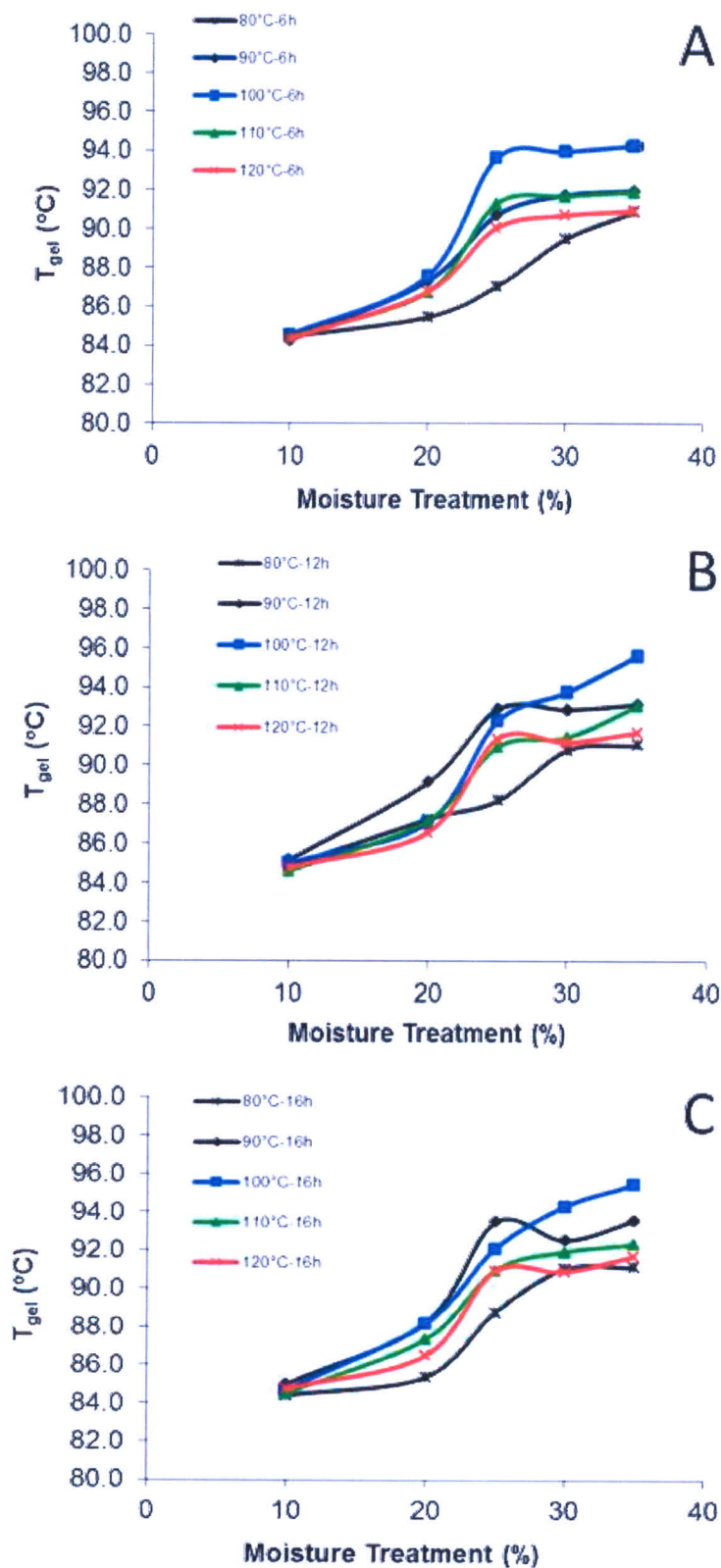
ตารางที่ 3.11 สมบัติทางอุณหภูมิจากของแข็งที่ผ่านการบำบัดผ่านกระบวนการ HMT ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (T, °C)			ΔT	ΔH
	T_{onset}	T_{peak}	T_{end}		
JH-N-80-12	81.46±1.19	84.83±0.15	88.25±0.21	6.80±1.40	5.17±0.41
JH-20-80-12	84.89±1.28	87.25±1.12	90.35±0.35	5.46±0.93	4.50±0.51
JH-25-80-12	85.64±1.56	88.21±1.39	91.25±2.33	5.61±0.77	4.53±1.02
JH-30-80-12	88.72±0.05	90.81±0.23	93.65±0.35	4.93±0.31	5.51±0.33
JH-35-80-12	89.34±0.40	91.06±0.07	93.70±1.13	4.36±1.53	9.12±0.23
JH-N-90-12	82.21±0.84	85.14±0.10	89.30±1.84	7.09±2.68	8.25±6.75
JH-20-90-12	86.05±0.51	89.16±0.56	94.00±1.56	7.95±1.05	15.43±0.31
JH-25-90-12	90.97±0.13	92.92±0.15	95.40±0.42	4.43±0.55	4.77±1.63
JH-30-90-12	91.01±0.28	92.89±0.02	94.95±0.64	3.94±0.92	4.88±1.93
JH-35-90-12	91.20±0.11	93.15±0.20	95.10±0.85	3.90±0.96	3.69±3.13
JH-N-100-12	82.13±0.01	84.98±0.05	89.35±0.35	7.22±0.63	12.16±2.70
JH-20-100-12	84.08±1.13	87.08±0.65	90.25±0.92	6.17±0.21	4.11±0.85
JH-25-100-12	88.88±0.41	92.30±0.15	96.55±0.21	7.67±0.20	14.46±0.49
JH-30-100-12	91.25±0.58	93.78±0.56	97.15±0.64	5.90±0.06	6.76±4.26
JH-35-100-12	93.16±0.05	95.62±0.23	97.70±0.28	4.54±0.23	8.53±4.90
JH-N-110-12	81.72±0.06	84.58±0.16	88.35±0.49	6.63±0.55	4.07±0.96
JH-20-110-12	84.18±0.34	87.17±0.68	91.75±1.20	7.57±0.86	4.89±1.95
JH-25-110-12	86.08±0.40	90.97±0.21	94.80±0.42	8.72±0.82	4.46±0.77
JH-30-110-12	89.41±1.04	91.45±0.06	95.25±0.21	5.84±0.83	3.82±0.63
JH-35-110-12	90.16±1.19	93.07±0.84	96.03±0.58	6.23±0.14	4.57±1.99
JH-N-120-12	81.77±0.67	84.78±0.45	89.45±1.63	7.68±0.96	5.33±1.63
JH-20-120-12	82.75±1.42	86.57±0.34	90.90±1.70	8.15±0.28	2.65±1.98
JH-25-120-12	88.78±2.61	91.38±2.40	94.73±2.84	5.88±0.33	1.97±0.50
JH-30-120-12	87.12±0.44	91.20±0.59	94.95±1.06	7.83±0.62	3.05±0.54
JH-35-120-12	88.79±0.60	91.70±0.67	95.25±0.21	6.46±0.38	2.79±0.58



ตารางที่ 3.12 สมบัติทางอุณหภูมิจากของแข็งที่ผ่านการบำบัดผ่านกระบวนการ HMT ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (T, °C)			ΔT	ΔH
	T_{onset}	T_{peak}	T_{end}		
JH-N-80-16	82.28±0.94	84.41±0.54	88.75±0.07	6.47±0.7	5.14±0.06
JH-20-80-16	82.52±0.31	85.38±0.24	88.25±0.21	5.73±0.10	3.44±0.26
JH-25-80-16	86.10±0.12	88.79±0.39	91.65±1.06	5.55±0.94	9.27±8.73
JH-30-80-16	89.22±0.27	91.03±0.13	93.25±0.21	4.03±0.06	4.49±0.03
JH-35-80-16	89.32±0.14	91.14±0.16	93.40±0.71	4.08±0.85	5.04±2.36
JH-N-90-16	82.14±1.20	85.01±0.63	88.05±0.92	5.91±0.28	7.20±2.95
JH-20-90-16	85.71±0.09	88.20±0.40	91.90±1.41	6.19±1.51	9.12±9.10
JH-25-90-16	91.62±0.20	93.49±0.55	96.20±1.13	4.58±0.93	8.41±7.12
JH-30-90-16	90.57±0.23	92.53±0.16	95.00±0.57	4.43±0.80	5.11±0.99
JH-35-90-16	91.35±0.48	93.57±0.56	96.50±1.56	5.15±1.08	9.87±7.37
JH-N-100-16	81.68±0.44	84.69±0.45	89.00±0.85	7.32±0.41	8.75±7.33
JH-20-100-16	85.37±0.32	88.18±0.51	91.75±1.20	6.38±0.88	8.93±8.04
JH-25-100-16	89.13±0.27	92.07±0.03	95.25±0.21	6.12±0.06	3.80±0.93
JH-30-100-16	92.12±0.09	94.29±0.05	97.60±0.00	5.48±0.09	4.38±0.64
JH-35-100-16	93.26±0.01	95.45±0.07	98.05±0.04	4.79±0.22	1.80±0.06
JH-N-110-16	81.66±0.38	84.50±0.27	88.25±0.21	6.59±0.59	4.35±1.33
JH-20-110-16	84.92±0.90	87.34±0.15	91.55±0.21	6.63±1.12	3.10±1.36
JH-25-110-16	86.49±1.25	90.95±0.12	94.80±0.85	8.31±0.40	4.55±0.84
JH-30-110-16	89.21±0.67	91.92±0.66	95.75±0.92	6.54±0.25	7.55±5.20
JH-35-110-16	89.29±0.17	92.31±0.18	95.55±0.21	6.26±0.05	1.63±0.07
JH-N-120-16	81.75±0.72	84.76±0.73	89.05±2.19	7.30±1.47	9.29±7.93
JH-20-120-16	86.05±4.47	86.48±0.21	90.65±0.07	4.60±4.54	4.14±0.25
JH-25-120-16	87.33±2.10	90.91±0.14	93.90±0.57	6.57±2.66	1.88±1.90
JH-30-120-16	86.92±0.27	90.88±0.96	95.80±0.99	8.88±1.26	3.88±2.74
JH-35-120-16	88.27±0.16	91.68±0.19	94.75±0.35	6.48±0.19	2.28±0.35



รูปที่ 3.35 ค่าอุณหภูมิการเกิดเป็นเจล (T_{gel}) ของแป้งดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่สภาวะความชื้น 10-35°C อุณหภูมิ 80-120°C เป็นเวลา 6-16 ชั่วโมง



แป้งเมล็ดขนุนตัดแปรทางเคมี

แป้งเมล็ดขนุนคาร์บอกซีเมทิล

ระดับการแทนที่ (DS) ของแป้งเมล็ดขนุนคาร์บอกซีเมทิลในการศึกษานี้มีค่าระหว่าง 0.25-0.31 โดยไม่พบมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่า DS กับสภาวะการเตรียมแป้ง ขณะที่ค่าปริมาณอะมิโลสที่อยู่ระหว่าง 2.8-4.3% มีค่าต่ำกว่าในแป้งดิบอย่างชัดเจน (ตารางที่ 3.13) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่หมู่ -OH ของอะมิโลสซึ่งอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐานของแกรนูลแป้งเป็นเป้าหมายของปฏิกิริยาการแทนที่ โดยปกติแล้วอะมิโลสจะอยู่ในรูปของสายพอลิเมอร์เกลียวเดี่ยวเวียนซ้าย (left-handed single helices) ที่มีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่างอะตอมของออกซิเจนที่ตำแหน่งที่ 2 (O-2) และตำแหน่งที่ 6 (O-6) ของหน่วยย่อยกลูโคส โครงรูปเกลียวนี้สามารถจับกับสายของโมเลกุลไอโอดีน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงินดำ แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาการคาร์บอกซีเมทิลกับอะตอมของออกซิเจนดังกล่าว ทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย โครงสร้างอะมิโลสจึงเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไปจากการเป็นเกลียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโอดีนได้ ค่าปริมาณอะมิโลสที่พบว่าลดลงในกรณีนี้จึงเป็นผลจากการเปลี่ยนรูปร่างของอะมิโลสเป็นคาร์บอกซีเมทิลอะมิโลส สอดคล้องกับรายงานการทำลายโครงสร้างเกลียวของสายพอลิเมอร์แป้งในระหว่างปฏิกิริยาการคาร์บอกซีเมทิลเลชัน ในกรณีของแป้งกลอยคาร์บอกซีเมทิล (Nattapulwat, Purkkao & Suwithayapanth, 2008)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในแป้งเมล็ดขนุนตัดแปรด้วยปฏิกิริยาการคาร์บอกซีเมทิลเลชันทั้ง 18 สภาวะ แสดงไว้ในตารางที่ 3.13 พบว่า การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาการคาร์บอกซีเมทิลเลชันมีผลลดปริมาณแป้งด้านทานการย่อยลงเหลือในช่วง 3.7 ถึง 10.4% หรือคิดเป็นร้อยละของการลดลง 65 ถึง 88% เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ ซึ่งแตกต่างจากรายงานบางฉบับที่แสดงว่าแป้งตัดแปรทางเคมีโดยเฉพาะด้วยปฏิกิริยาการคาร์บอกซีเมทิลเลชันสามารถเพิ่มปริมาณแป้งด้านทานการย่อยได้ เช่น การศึกษาของ Liu และคณะ (2012) ในแป้งมันฝรั่งคาร์บอกซีเมทิลที่พบว่าปริมาณแป้งด้านทานการย่อยเพิ่มขึ้นจาก 10.8% ในแป้งดิบ เป็น 15.4% ในแป้งคาร์บอกซีเมทิลที่มีค่า DS 0.08 และเพิ่มเป็น 20.4% ในแป้งคาร์บอกซีเมทิลที่มีค่า DS 0.30 ในกรณีของการศึกษานี้ การลดลงของปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในแป้งตัดแปรคาร์บอกซีเมทิล ส่วนหนึ่งน่าจะมาจากการที่แป้งคาร์บอกซีเมทิลสามารถละลายน้ำได้ ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงภายในของแกรนูล แป้งได้อย่างรวดเร็ว



ตารางที่ 3.13 ค่าระดับการแทนที่ ปริมาณอะมิโลส ปริมาณแป้งด้านทานการย่อย ของแป้ง
เมล็ดขนุนคาร์บอกซีเมทิลเลชัน จำนวน 18 สภาวะ

รหัสตัวอย่าง	DS	%AC	%RS
CMJF-1	0.27	4.3	6.8
CMJF-2	0.28	3.8	7.5
CMJF-3	0.26	4.2	7.2
CMJF-4	0.25	4.1	4.0
CMJF-5	0.25	3.9	5.4
CMJF-6	0.25	2.8	6.9
CMJF-7	0.26	3.4	3.7
CMJF-8	0.28	3.2	4.8
CMJF-9	0.29	4.0	5.5
CMJF-10	0.27	3.6	6.4
CMJF-11	0.25	3.8	8.7
CMJF-12	0.26	3.4	3.4
CMJF-13	0.27	2.9	10.4
CMJF-14	0.28	2.8	8.5
CMJF-15	0.29	4.2	6.5
CMJF-16	0.29	3.6	3.9
CMJF-17	0.31	2.8	4.6
CMJF-18	0.30	2.9	6.3



แป้งเชื่อมขวาง

แป้งเชื่อมขวางมีปริมาณอะมิโนลดลงจากแป้งดิบเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 3.14 สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ว่าการเชื่อมขวางทำให้ปริมาณอะมิโนลดลงได้ด้วย (AÇkar et al., 2010) ปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งเมล็ดขนุนเชื่อมขวาง มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารเชื่อมขวางที่ใช้ และระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 3.14 ปริมาณอะมิโน และแป้งต้านทานการย่อย ของแป้งเมล็ดขนุนเชื่อมขวาง จำนวน 15 สภาวะ

รหัสตัวอย่าง	%AC	%RS
CL-JF-1	25.5	23.6
CL-JF-2	24.8	23.4
CL-JF-3	25.2	22.8
CL-JF-4	25.1	21.6
CL-JF-5	23.9	19.9
CL-JF-6	24.1	23.5
CL-JF-7	24.5	23.1
CL-JF-8	23.8	21.5
CL-JF-9	24.3	20.8
CL-JF-10	24.8	18.9
CL-JF-11	23.5	22.3
CL-JF-12	24.4	20.4
CL-JF-13	24.6	18.6
CL-JF-14	25.4	17.4
CL-JF-15	25.7	16.7



สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแป้งขนุนด้านทานการย่อย

จากข้อมูลผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแป้งด้านทานการย่อยจากแป้งเมล็ดขนุนคือ แป้งเมล็ดขนุนที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ที่ความชื้น 25% อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (JF-25-80-16) ซึ่งมีปริมาณแป้งด้านทานการย่อย 52.5% หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 76.7 มีสมบัติทางเคมีกายภาพทั่วไปไม่แตกต่างจากแป้งดิบอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีความสามารถในการพองตัวในน้ำลดลง และมีค่าอุณหภูมิการเกิดเป็นเจลสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งดิบ แป้ง JF-25-80-16 ถูกนำมาเตรียมในปริมาณมาก (1 kg) เพื่อใช้ทดสอบสมบัติทางกลและเชิงหน้าที่ทางเภสัชกรรม รวมทั้งใช้ในการเตรียมตำรับผลิตภัณฑ์แป้งเมล็ดขนุนด้านทานการย่อย ผลการศึกษาสมบัติทางกลและเชิงหน้าที่ทางเภสัชกรรม เปรียบเทียบกับแป้งดิบ แสดงในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 สมบัติของแป้งเมล็ดขนุนที่มีปริมาณแป้งด้านทานการย่อยสูง (JF-25-80-16) ที่ได้จากการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นเปรียบเทียบกับแป้งดิบเมล็ดขนุน (JFS)

ตัวแปร/ตัวชี้วัด	JFS	JF-25-80-16
ลักษณะปรากฏ	ผงละเอียดสีขาวเหลืองเทา	ผงละเอียดสีเทาถึงเทาเข้ม
ความชื้น (%)	10.8	11.9
ปริมาณอะมิโลส (%)	26.4	27.9
ปริมาณแป้งด้านทานการย่อย (RS, %)	29.7	52.5
Angle of repose	38.4 (fair)	32.8 (good)
Carr's compressibility index	27.6 (poor)	19.1 (fair)
Hausner ratio	1.38 (poor)	1.24 (fair)
FSC ที่ 15 นาที (g/g)	0.30	0.25
Water uptake ที่ 1 นาที (ml/500 mg)	0.22	0.04
Solubility (%) at		
70°C	2.8	3.2
80°C	7.2	7.3
90°C	9.5	9.1
Swelling Power (g/g) at		
70°C	2.5	2.8
80°C	6.8	3.2
90°C	7.7	5.7
Gelatinization Temperature (°C)	84.24±0.37	88.79±0.39



สมบัติเชิงหน้าที่ทางเภสัชกรรมของแป้งขนุนด้านทานการย่อยเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

การไหล (Flowability)

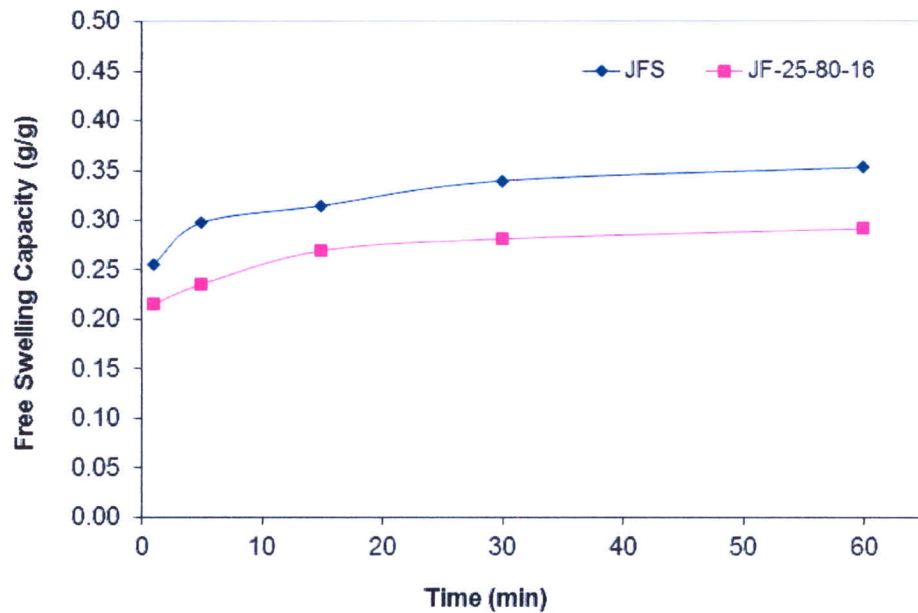
การไหลของผงแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้านทานการย่อย เปรียบเทียบกับแป้งดิบเมล็ดขนุน ประเมินได้จากการวัดมุมการไหล ค่า compressibility ratio และค่า Hausner ratio โดยค่ามุมการไหลของแป้งดิบเมล็ดขนุนเท่ากับ 38.4° ซึ่งอยู่ในช่วงพอใช้ ในขณะที่มุมการไหลของแป้งขนุนด้านทานการย่อย JF-25-80-16 มีค่า 32.8° ซึ่งอยู่ในช่วง ดี การประเมินการไหลของตัวอย่างแป้งโดยวิธีการวัดค่า % compressibility ratio (%CR) และ Hausner ratio ให้ผลที่แตกต่างจากวิธีการประเมินโดยใช้การวัดมุมการไหลเล็กน้อย โดยแป้งดิบซึ่งมีค่า bulk และ tapped densities เท่ากับ 0.55 และ 0.76 mg/l ตามลำดับ แสดงค่า %CR และ HR เท่ากับ 27.6 และ 1.38 ตามลำดับ มีการไหลอยู่ในเกณฑ์ไม่ดี ขณะที่แป้งเมล็ดขนุนดัดแปรที่มีปริมาณแป้งด้านทานการย่อยสูง มีค่า bulk และ tapped densities เท่ากับ 0.59 และ 0.73 mg/l ตามลำดับ แสดงค่า %CR และ HR เท่ากับ 19.1 และ 1.24 ตามลำดับ มีการไหลอยู่ในเกณฑ์ พอใช้ ผลการทดลองแสดงว่า การดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นช่วยปรับปรุงการไหลของแป้งที่ผ่านดัดแปรให้ดีขึ้นได้เล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

ความจุการพองตัวอิสระ (Free Swelling Capacity)

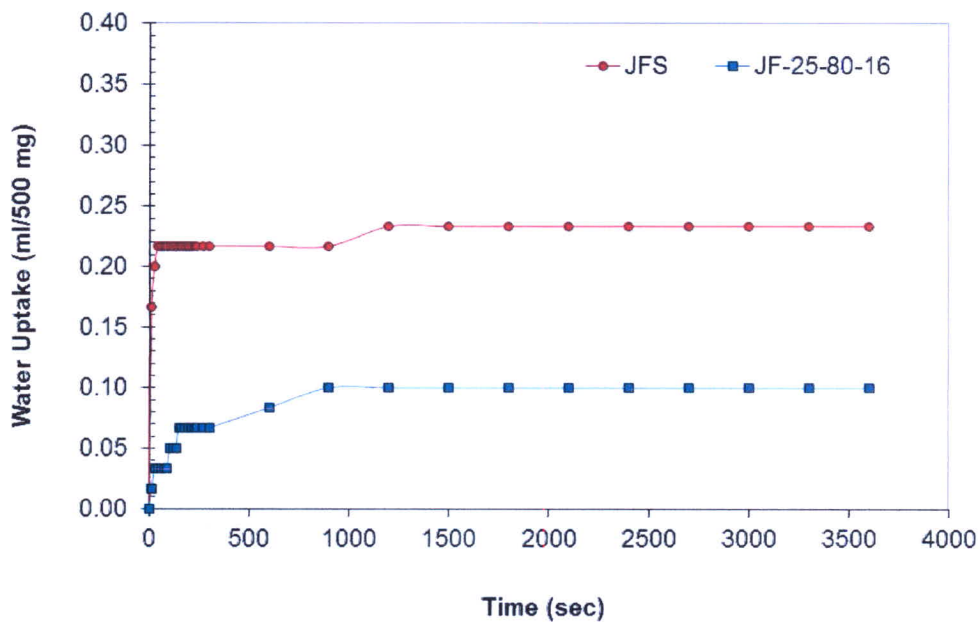
ค่าความจุการพองตัวอิสระ (FSC) แสดงในรูปของอัตราส่วนน้ำหนักน้ำที่ถูกดูดซับไว้ต่อ 1 กรัมของแป้งดัดแปรเปรียบเทียบกับแป้งดิบ เมื่อให้ตัวอย่างได้สัมผัสกับน้ำปริมาณเกินพออย่างเป็นอิสระในช่วงเวลาทดสอบ พบว่าตัวอย่างแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรที่มีปริมาณแป้งด้านทานการย่อยสูงมีความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยมาก และแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาการทดสอบ (0.21-0.29 g/g) (รูปที่ 3.36) ซึ่งพบว่าไม่แตกต่างจากแป้งดิบเมล็ดขนุนดิบที่มีค่า FSC ในช่วง 0.26-0.35 g/g ตลอดช่วงเวลาการศึกษา

ความสามารถในการดูดน้ำ (Water Uptake)

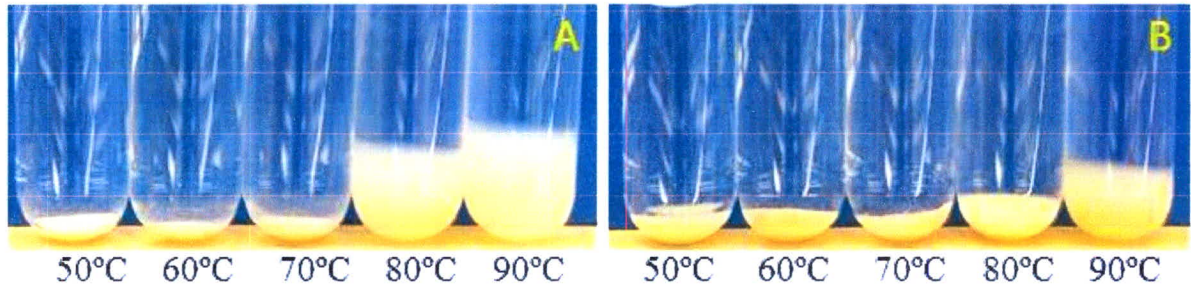
แป้งดิบเมล็ดขนุนมีความสามารถในการดูดน้ำค่า ที่ประมาณ 0.2 มล.ต่อ 500 มิลลิกรัม ในช่วงนาทีแรก และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตลอดช่วงเวลาการทดสอบหลังจากนั้น อย่างไรก็ตามพบว่าแป้งดัดแปรเมล็ดขนุนที่มีปริมาณแป้งด้านทานการย่อยสูง มีการดูดน้ำค้ำยั้งกว่าแป้งดิบ โดยมีการดูดน้ำสูงสุดที่น้อยกว่า 0.1 มล.ต่อ 500 มิลลิกรัม (รูปที่ 3.37) ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการทดสอบความจุการพองตัวอิสระการพิจารณาการพองตัว (รูปที่ 3.38) แล้ว เชื่อว่าแป้งดิบเมล็ดขนุนและแป้งเมล็ดขนุนด้านทานการย่อยไม่มีความสามารถในการดูดและดูดซับน้ำ ไม่เกิดการฟอร์มเจลหรือโครงข่ายไคที่อุ้มน้ำ และผลจากการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นทำให้แป้งมีสมบัติการดูดน้ำยิ่งต่ำลง จึงไม่น่าจะมีความสามารถในการเป็นสารช่วยทางเภสัชกรรมชนิดสารช่วยแตกตัวได้



รูปที่ 3.36 ความจุการพองตัวอิสระของแป้งดิบเมล็ดขนุน และแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรที่มีปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูง



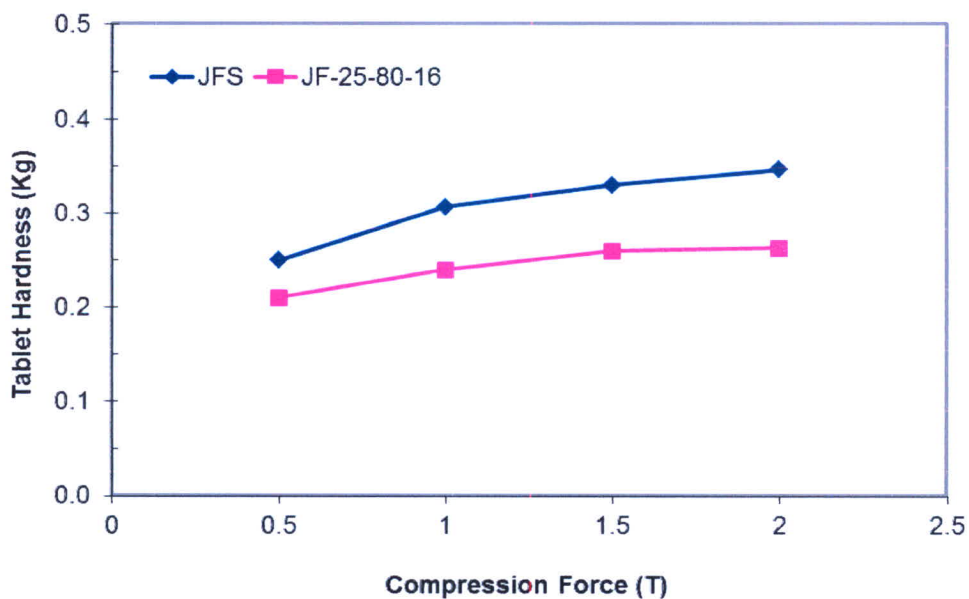
รูปที่ 3.37 รูปแบบการดูดน้ำ (water uptake) ของแป้งดิบเมล็ดขนุน และแป้งเมล็ดขนุนดัดแปรที่มีปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูง



รูปที่ 3.38 การฟองตัวในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ของแท็บเล็ตเมลิคซุน (A) และแท็บเล็ตปริมาณ
ต้านทานการย่อยสูง (B)

รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงตอกอัดกับความแข็ง (Pressure-Hardness Profile, PHP)

ทั้งแท็บเล็ตเมลิคซุนและแท็บเล็ตเมลิคซุนดัดแปรที่มีปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูง แสดงสมบัติการตอบสนองต่อแรงตอกอัดต่ำมาก (รูปที่ 3.39) โดยมีค่าความแข็งภายหลังการตอกอัดด้วยแรงสูงสุด 2 ตัน เพียง 0.32 และ 0.22 Kg ตามลำดับ ทั้งนี้จะเป็นผลจากลักษณะแกรนูลของแท็บเล็ตเมลิคซุนที่มีลักษณะทรงกลมที่มีความยืดหยุ่นสูง จึงไม่เอื้อต่อการตอกอัด ซึ่งเป็นข้อด้อยที่สำคัญที่จำกัดการใช้ประโยชน์ของแท็บเล็ตเมลิคซุนในกระบวนการผลิตยาเม็ด



รูปที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตอกอัดกับความแข็งของเม็ดยาที่เตรียมจากแท็บเล็ต
เมลิคซุน เปรียบเทียบกับแท็บเล็ตเมลิคซุนที่มีปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูง

การเตรียมผลิตภัณฑ์เสริมอาหารจากแป้งเมล็ดขนุนด้านทานการย่อยในรูปแบบยาเม็ด

ยาเม็ดแป้งเมล็ดขนุนด้านทานการย่อยขนาด 250 มิลลิกรัม ที่เตรียมโดยวิธีการทำแกรนูลเปียก โดยใช้แป้งขนุนคาร์บอกซีเมทิลเป็นสารยึดเกาะ และ Purified talcum กับ Magnesium stearate เป็นสารช่วยไหลและสารช่วยลื่นกันติด ตามลำดับ มีลักษณะปรากฏทั่วไปดี การวิเคราะห์ควบคุมคุณภาพพื้นฐาน พบว่าเม็ดยามีน้ำหนักเฉลี่ย 250.3 ± 3.7 มิลลิกรัม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.2 ± 1.2 มิลลิเมตร ความหนา 7.8 ± 0.2 มิลลิเมตร ความแข็ง 6.2 ± 0.4 กิโลกรัม ความกร่อนของเม็ดยาร้อยละ 0.71 และระยะเวลาในการแตกตัว 8.4 ± 1.2 นาที ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานในการผลิตยาเม็ด (ตารางที่ 3.17)

การทดสอบความคงสภาพของยาเม็ด

เม็ดยาที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน มีค่าน้ำหนักเฉลี่ย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา และความกร่อน ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจากเมื่อหลังเตรียมเสร็จใหม่ (0 เดือน) ในขณะที่ค่าความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยที่เวลา 6 เดือน และระยะเวลาในการแตกตัวมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังการเก็บรักษาไว้นาน 1, 3 และ 6 เดือน (ตารางที่ 3.17) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดยามีความคงสภาพดีภายใต้สภาวะการเก็บรักษานี้

เม็ดยาที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 40%RH อุณหภูมิ 30°C เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ส่วนใหญ่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากกลุ่มที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (ตารางที่ 3.18) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดยามีความคงสภาพดีภายใต้สภาวะการเก็บรักษานี้

เม็ดยาที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH อุณหภูมิ 30°C เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ส่วนใหญ่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากกลุ่มที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และกลุ่มที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH อุณหภูมิ 30°C ยกเว้นระยะเวลาในการแตกตัวที่มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 3.19) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดยายังคงมีความคงสภาพดีภายใต้สภาวะการเก็บรักษานี้ในด้านลักษณะปรากฏ แต่สภาวะความชื้นที่ได้รับมีผลทำให้ระยะเวลาการแตกตัวเร็วขึ้น

เม็ดยาที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75%RH อุณหภูมิ 30°C เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน มีค่าพารามิเตอร์ความแข็ง และระยะเวลาในการแตกตัวของเม็ดยาลดลงจากกลุ่มที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และกลุ่มที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 40%RH และ 50%RH อุณหภูมิ 30°C อย่างมีนัยสำคัญ เม็ดยาที่เก็บไว้เป็นเวลา 6 เดือน มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักและความหนาของเม็ดยาเพิ่มขึ้นจากกลุ่มที่เก็บไว้ 1 เดือน อย่างชัดเจน (ตารางที่ 3.20) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความคง



สภาพของเม็ดยาได้รับผลกระทบจากความชื้นของสภาวะการเก็บรักษา และส่งผลถึงค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ

เม็ดยาที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%RH อุณหภูมิ 30°C เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น และมีความแตกต่างจากกลุ่มที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่าก่อนหน้านี้อย่างชัดเจน (ตารางที่ 3.21) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความคงสภาพของเม็ดยาได้รับผลกระทบจากความชื้นของสภาวะการเก็บรักษา และส่งผลถึงค่าน้ำหนักเฉลี่ย ความหนา ความแข็ง และระยะเวลาการแตกตัวของเม็ดยาอย่างมีนัยสำคัญ

เม็ดยาที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90%RH อุณหภูมิ 30°C เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและที่ความชื้นอื่นๆ น้ำหนักเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเกิดจากการดูดความชื้น ขณะที่ความหนาที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการบวมของเม็ดยา ความชื้นยังทำให้ความแข็งและความกรอบของเม็ดยาลดลง ความแข็งที่ลดลงทำให้ระยะเวลาการแตกตัวลดลงด้วย (ตารางที่ 3.22) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความคงสภาพของเม็ดยาได้รับผลกระทบจากความชื้นของสภาวะการเก็บรักษา



ตารางที่ 3.17 ผลการควบคุมคุณภาพและความคงสภาพของยาเม็ดแป้งขนุนด้านทานการย่อย
ที่เวลา 0, 1, 3 และ 6 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)			
	0	1	3	6
น้ำหนักเฉลี่ย (มก.)	250.3±3.7	251.4±3.5	252.8±2.6	254.2±2.8
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	18.2±1.2	18.4±0.9	18.6±0.7	18.2±0.9
ความหนา (มม.)	7.8±0.2	8.0±1.2	8.1±1.5	7.9±1.3
ความแข็ง (Kg)	6.2±0.4	6.0±0.3	5.9±0.2	5.7±0.3
ความกร่อนของเม็ดยา (%)	0.71	0.73	0.88	0.84
ระยะเวลาในการแตกตัว (นาที)	8.4±1.2	9.1±2.2	9.6±1.8	9.5±2.7

ตารางที่ 3.18 ผลการควบคุมคุณภาพและความคงสภาพของยาเม็ดแป้งขนุนด้านทานการย่อย
ที่เวลา 1, 3 และ 6 เดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40%RH อุณหภูมิ 30°C

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)			
	0	1	3	6
น้ำหนักเฉลี่ย (มก.)	ND	251.2±1.5	252.2±1.4	253.2±1.1
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ND	18.4±0.3	18.5±0.6	18.3±0.5
ความหนา (มม.)	ND	8.0±0.3	8.2±0.5	8.1±0.4
ความแข็ง (Kg)	ND	6.3±0.2	6.2±0.4	6.4±0.6
ความกร่อนของเม็ดยา (%)	ND	0.45	0.58	0.47
ระยะเวลาในการแตกตัว (นาที)	ND	8.5±1.3	8.8±0.8	8.7±0.7



ตารางที่ 3.19 ผลการควบคุมคุณภาพและความคงสภาพของยาเม็ดแป้งขนุนด้านทานการย่อย
ที่เวลา 1, 3 และ 6 เดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH อุณหภูมิ 30°C

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)			
	0	1	3	6
น้ำหนักเฉลี่ย (มก.)	ND	250.8±0.8	252.8±1.7	255.3±1.4
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ND	18.2±0.2	18.2±0.3	18.4±0.4
ความหนา (มม.)	ND	8.0±0.5	8.1±0.7	8.0±0.5
ความแข็ง (Kg)	ND	6.0±0.4	5.9±0.3	6.1±0.9
ความกร่อนของเม็ดยา (%)	ND	0.88	0.62	0.71
ระยะเวลาในการแตกตัว (นาที)	ND	8.0±1.0	7.8±0.7	7.5±0.9

ตารางที่ 3.20 ผลการควบคุมคุณภาพและความคงสภาพของยาเม็ดแป้งขนุนด้านทานการย่อย
ที่เวลา 1, 3 และ 6 เดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%RH อุณหภูมิ 30°C

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)			
	0	1	3	6
น้ำหนักเฉลี่ย (มก.)	ND	253.5±0.7	256.7±1.1	263.2±1.1
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ND	18.0±0.3	18.1±0.2	18.4±0.3
ความหนา (มม.)	ND	8.1±0.6	8.2±0.4	8.2±0.4
ความแข็ง (Kg)	ND	5.8±0.2	5.7±0.4	5.4±0.7
ความกร่อนของเม็ดยา (%)	ND	0.97	0.75	0.62
ระยะเวลาในการแตกตัว (นาที)	ND	8.3±1.1	7.9±1.2	7.4±0.7



ตารางที่ 3.21 ผลการควบคุมคุณภาพและความคงสภาพของยาเม็ดแป้งขนุนด้านทานการย่อย
ที่เวลา 1, 3 และ 6 เดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80%RH อุณหภูมิ 30°C

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)			
	0	1	3	6
น้ำหนักเฉลี่ย (มก.)	ND	254.8±2.7	258.7±4.6	266.2±5.1
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ND	18.3±0.8	18.5±0.8	18.6±0.7
ความหนา (มม.)	ND	7.9±0.3	8.0±0.2	8.2±0.5
ความแข็ง (Kg)	ND	5.7±0.4	5.5±0.6	5.2±0.7
ความกร่อนของเม็ดยา (%)	ND	0.86	0.82	0.64
ระยะเวลาในการแตกตัว (นาที)	ND	8.0±1.2	7.5±0.9	7.0±1.3

ตารางที่ 3.22 ผลการควบคุมคุณภาพและความคงสภาพของยาเม็ดแป้งขนุนด้านทานการย่อย
ที่เวลา 1, 3 และ 6 เดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90%RH อุณหภูมิ 30°C

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)			
	0	1	3	6
น้ำหนักเฉลี่ย (มก.)	ND	258.2±5.7	269.6±6.2	274.7±8.6
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ND	18.3±0.8	18.5±1.1	18.6±1.5
ความหนา (มม.)	ND	8.1±0.3	8.2±0.4	8.3±0.6
ความแข็ง (Kg)	ND	5.5±0.3	4.9±0.5	5.0±1.2
ความกร่อนของเม็ดยา (%)	ND	0.53	0.48	0.46
ระยะเวลาในการแตกตัว (นาที)	ND	6.1±1.7	5.6±1.3	5.5±1.8