

บทที่ 3

ผลการทดลอง

3.1 สมบัติของรำข้าวสาคัดน้ำมัน

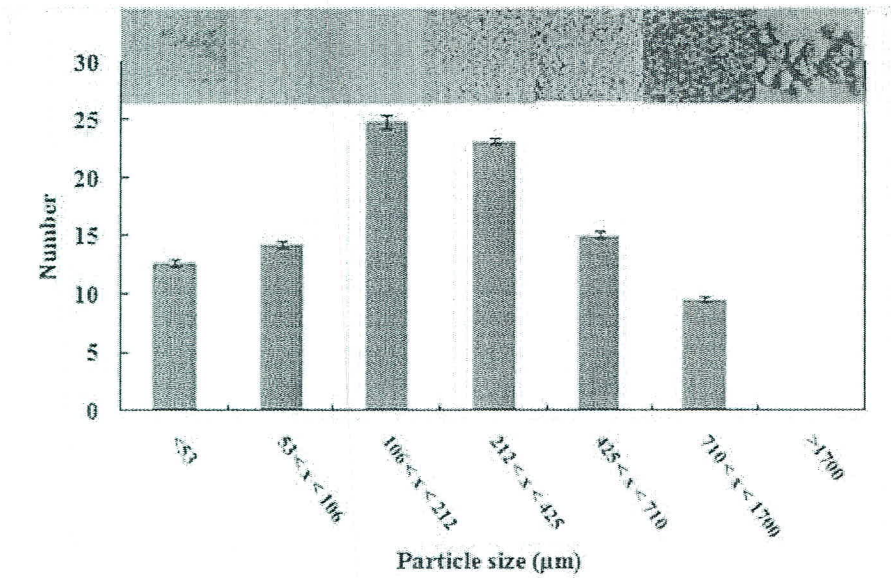
องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวสาคัดน้ำมันแสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ คือ มีปริมาณโปรตีนอย่างน้อย 15% ไฟเบอร์ไม่เกิน 10% และไขมันไม่เกิน 2% [13] สำหรับปริมาณไฟเบอร์นั้นรวมถึงเปลือกรำข้าวบางส่วนที่ปนอยู่ในรำสาคัดน้ำมันแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งพบว่ามีไฟเบอร์ปนอยู่ในช่วงขนาด 212-710 ไมครอน ทั้งนี้ตัวอย่างรำข้าวบางส่วนมีขนาดใหญ่ > 1.7 มิลลิเมตร อาจเนื่องจากอนุภาคเกิดการรวมกันระหว่างให้กระบวนการให้ความร้อนในการสาคัดน้ำมันออกจากรำข้าว [14]

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวสาคัดน้ำมัน

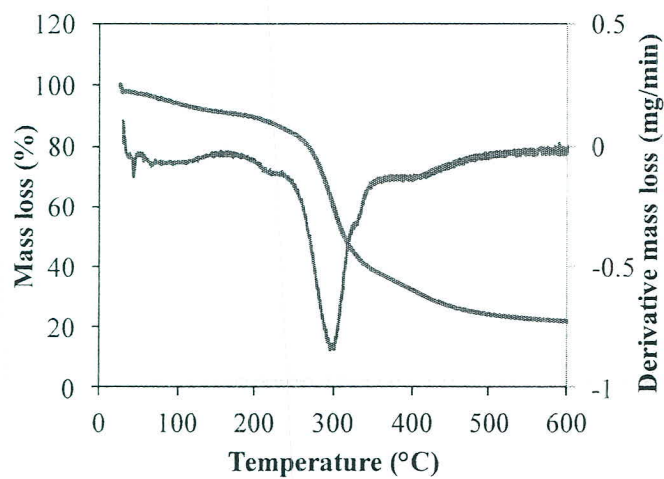
องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
ความชื้น	10.41±0.55
ไขมัน	1.13±0.10
โปรตีน	15.17±0.12
เถ้า	9.66±0.003
ไฟเบอร์	8.11±0.17
แป้ง	55.52±0.60

นอกจากนี้ได้วิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักของรำข้าวในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 600 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์ thermal stability ของรำข้าวสาคัดน้ำมันแสดงดังรูปที่ 3.2 พบว่าในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส รำข้าวเกิดการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการระเหยของน้ำจากตัวอย่าง หลังจากนั้นใน ในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 150 ถึง 230 องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำมันประมาณ 8% ของน้ำหนักเริ่มต้น อาจเนื่องจากการเกิด

ปฏิกิริยาเมลลาร์ด ทั้งนี้การสูญเสียน้ำหนักส่วนใหญ่ของตัวอย่างประมาณ 55% ของน้ำหนักเริ่มต้นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 230 องศาเซลเซียส อาจเนื่องจากการสลายตัวของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เช่น แป้ง เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้การสูญเสียน้ำหนักในช่วง 350 ถึง 440 องศาเซลเซียส อาจเนื่องจากการสลายตัวของลิกนิน [15] ดังนั้นในกระบวนการผลิตวัสดุจากรำข้าวควรใช้อุณหภูมิไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส เพื่อหลีกเลี่ยงการสลายตัวของรำข้าว ซึ่งใกล้เคียงกับ thermal stability ของตัวอย่าง sunflower cake ซึ่งอยู่ในช่วง 190-220 องศาเซลเซียส [15]



รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดอนุภาคของรำข้าวสกัดน้ำมัน



รูปที่ 3.2 Thermogravimetric และ derivative thermogravimetric ของรำข้าวสกัดน้ำมัน

นอกจากนี้วิเคราะห์โปรตีนของรำข้าวสาคัดน้ำมัน สกัดโดยใช้วิธีของ Osborne และ Campbell แสดงดังตารางที่ 3.2 เนื่องจากโปรตีนมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดรวมตัวกัน (cross-linking) ระหว่างกระบวนการผลิตส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ จากการวิเคราะห์แบ่งโปรตีนได้เป็น 4 ชนิด โดยการสกัดด้วยตัวทำละลายต่างกัน รวมทั้งโปรตีนที่ไม่สามารถสกัดออกได้ จากตารางที่ 3.2 พบว่าโปรตีนหลักในรำข้าวสาคัดนั้น คือ กลูเตลิน ซึ่งมีปริมาณ 17% ทั้งนี้มีโปรตีน โกลบูลิน อัลบูมิน และโพรลามินในปริมาณน้อย นอกจากนี้พบว่าโปรตีนที่สามารถสกัดได้มีปริมาณถึง 80% อาจเนื่องจากในรำข้าวที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ รำข้าวสาคัดน้ำมันทางการค้า ซึ่งผ่านกระบวนการให้ความร้อนในระหว่างการสกัดน้ำมัน เพื่อยับยั้งเอนไซม์ lipoxygenase [14] ดังนั้นจึงส่งผลให้โปรตีนเกิดการรวมตัวกันและไม่สามารถละลายได้

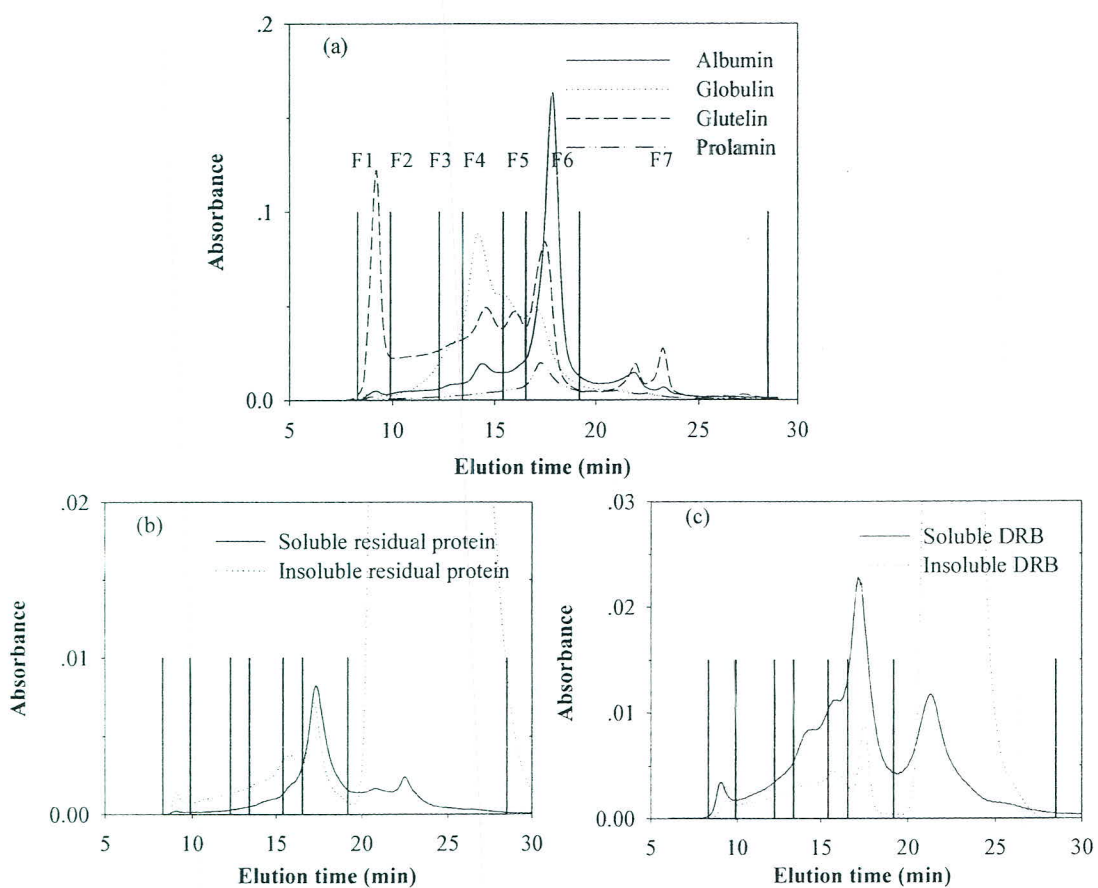
ตารางที่ 3.2 โปรตีนจากรำข้าวสาคัดน้ำมัน สกัดโดยใช้วิธีของ Osborne และ Campbell

โปรตีน	ตัวทำละลาย	ผลผลิต (% Yield)
อัลบูมิน	น้ำกลั่น	0.30±0.02
โกลบูลิน	5% NaCl	1.85±0.13
กลูเตลิน	0.1 M NaOH	17.5±1.6
โพรลามิน	70% ethanol	0.13±0.02
โปรตีนที่ไม่สามารถสกัดออกได้	-	80.3±1.7

ทั้งนี้ได้วิเคราะห์การกระจายขนาดของโปรตีนด้วยเทคนิค size-exclusion high performance liquid chromatography (SE-HPLC) โดยละลายโปรตีนในบัฟเฟอร์ sodium dodecyl sulfate (SDS) สำหรับส่วนที่ไม่ละลายใน SDS นำไปทำให้ละลายโดยใช้สาร dithioerythritol (DTE) เพื่อทำลายพันธะไดซัลไฟด์ รูปที่ 3.3a แสดงโปรตีนทั้ง 4 ชนิดที่ละลายได้ใน SDS (โปรตีนส่วนใหญ่ 75% สามารถละลายได้ใน SDS) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 7 พีก โดย F1 คือ โปรตีนโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งออกจากคอลัมน์ก่อน ส่วน F7 คือ โปรตีนขนาดเล็ก ซึ่งออกจากคอลัมน์ช้าที่สุด จากรูปโปรตีนกลูเตลิน มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพีก 1 (F1) ขนาดใหญ่

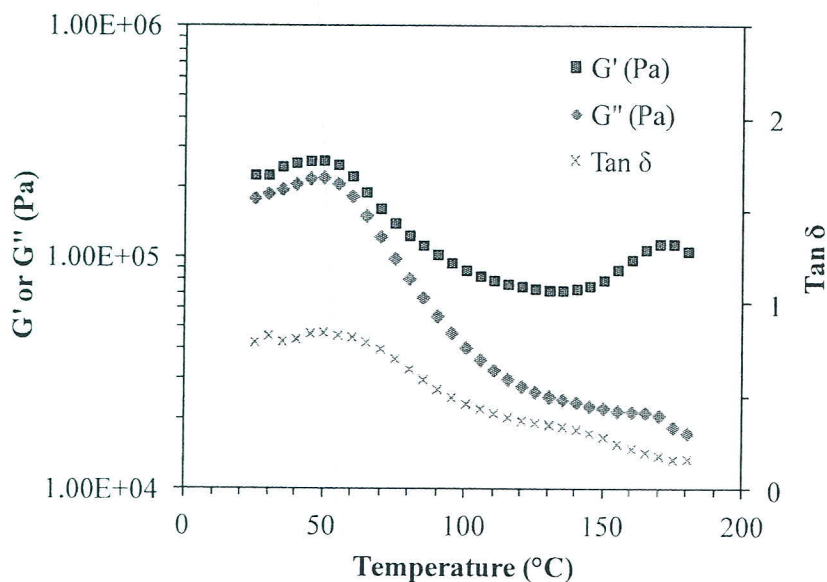
ในขณะที่โปรตีนอัลบูมิน มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็ก เนื่องจากมีพีค 6 (F6) ขนาดใหญ่ สำหรับโปรตีนโกลบูลิน มีขนาดโมเลกุลปานกลาง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Agboola (2005) [8] ซึ่งศึกษาโปรตีนของแป้งรำข้าว

รูปที่ 3.3b และ 3.3c แสดงโปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้ด้วยตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด และโปรตีนในรำข้าวสกัด ตามลำดับ โดยพีคใหญ่ที่พบระหว่างเวลา 18 และ 21 นาที คือ DTE จากรูปพบว่าประมาณ 50% โปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้ด้วยตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด ไม่ละลายใน SDS อาจเนื่องจากโปรตีนยึดติดกับองค์ประกอบอื่น เช่น แป้ง ทำให้ยากในการสกัด [8]



รูปที่ 3.3 size exclusion profiles ของโปรตีนที่สกัดจากรำข้าวสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย 4 ชนิด (a) โปรตีนที่ไม่ละลายตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด (b) และโปรตีนในรำข้าวสกัดน้ำมัน (c)

นอกจากนี้วิเคราะห์ viscoelastic ของโปรตีนรำข้าวผสมพลาสติกไฮเซอร์กลิเซอรอล 30% โดยวัดค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') แสดงดังรูปที่ 3.4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ storage modulus แบ่งได้เป็น 4 ช่วง ช่วงแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 25-60 °C มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบ plateau ในช่วงที่ 2 อุณหภูมิระหว่าง 60-100 องศาเซลเซียส ค่า G' ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น น่าจะเกิดจาก thermal agitation ของตัวอย่าง [11] ช่วงถัดไปที่อุณหภูมิระหว่าง 100-130 องศาเซลเซียส มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบ plateau อาจเกิดจากโปรตีนเกิดพันธะระหว่างกัน (protein cross-linking) [11] ในช่วงสุดท้ายค่า G' เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากโปรตีนเกิดการรวมกันมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น (protein aggregation) [11] ดังนั้นโปรตีนรำข้าวสามารถเกิดการรวมตัวกันที่อุณหภูมิการผลิตได้



รูปที่ 3.4 viscoelastic properties ของโปรตีนจากรำข้าวสกัดน้ำมันผสมกับ 30% กลีเซอรอล

3.2 ผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อการอัดรีดรำข้าวสกัดน้ำมัน

ในขั้นแรกศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อการอัดรีดรำข้าวสกัดน้ำมัน เพื่อหาสภาวะอัดรีดที่เหมาะสมในการอัดรีด โดยศึกษาทั้งชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ แบ่งตัวอย่างได้เป็น 4 ตัวอย่าง คือ กลีเซอรอล 30% (G30:B70) น้ำ 30% (W30:B70) กลีเซอรอล 40% (G40:B60) น้ำ 10% ผสมกับกลีเซอรอล 30% (W10:G30:B60) ทั้งนี้สภาวะในการอัดรีด คือ อุณหภูมิหน้าตายที่ 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส ที่อัตราการป้อนตัวอย่าง 1.5 กิโลกรัม/ชั่วโมง ความเร็วสกรู 50 รอบต่อนาที

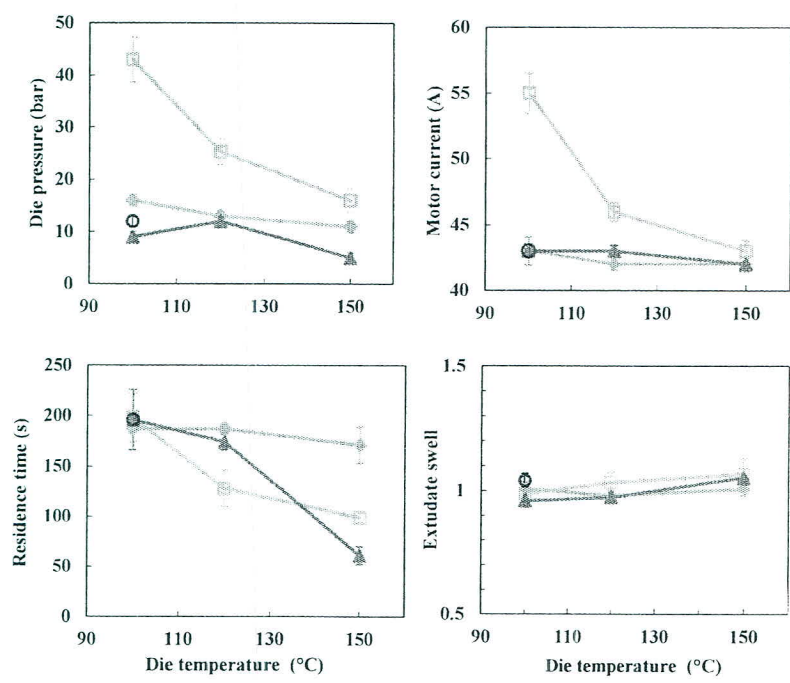
เมื่อพิจารณาการอัดรีดอุณหภูมิหน้าตายที่ 100 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 3.2 พบว่าตัวอย่างรำข้าวผสมกลีเซอรอล 30% (G30:B70) มีค่าความดัน กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นในทางตรงข้ามตัวอย่างรำข้าวผสมน้ำ 30% มีความสามารถในการอัดรีดดีกว่า เนื่องจากมีค่าความดันและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ต่ำที่สุด ดังนั้นน้ำมีประสิทธิภาพในการเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ดีกว่ากลีเซอรอลในการอัดรีด [16] อาจเนื่องจากน้ำมีประสิทธิภาพในการพลาสติกไซส์มากกว่าเพราะมีมวลโมเลกุลเล็กกว่ากลีเซอรอล [17] [18] [19] อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างรำข้าวที่ผสมน้ำ 30% ไม่สามารถอัดรีดได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากตัวอย่างไหม้และออกจากหน้าตายได้ไม่ดี นอกจากนี้ตัวอย่างที่อัดรีดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีความชื้นสูงถึง $31 \pm 1\%$ ส่งผลให้เกิดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษา

จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์จาก 30% เป็น 40% พบว่าการเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ส่งผลให้ความสามารถในการอัดรีดรำข้าวสกัดน้ำมันดีขึ้น ทั้งตัวอย่างรำข้าวที่ผสม 40% (G40:B60) และตัวอย่างรำข้าวสกัดน้ำมันที่ผสมน้ำ 10% ร่วมกับกลีเซอรอล 30% ดังตารางที่ 3.3 โดยตัวอย่างข้าวสกัดน้ำมันที่ผสมน้ำ 10% ร่วมกับกลีเซอรอล 30% มีค่าความดันต่ำที่สุด

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอัดรีดรำข้าวสกัดน้ำมันเป็น 120 และ 150 องศาเซลเซียส พบว่าความดันระหว่างการอัดรีดของทุกอย่างตัวอย่างลดลง แสดงดังรูปที่ 3.5 อาจเนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิการอัดรีดช่วยเร่งการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง ส่งผลให้ความหนืดลดลง [20] อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างรำข้าวอัดรีดอุณหภูมิในการอัดรีดที่ 150 องศาเซลเซียสมีผิวไม่เรียบ ในขณะที่ตัวอย่างรำข้าวอัดรีดอุณหภูมิในการอัดรีดที่ 120 องศาเซลเซียสมีลักษณะดี

ตารางที่ 3.3 ความดัน กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ เวลาที่อยู่ในเครื่องอัดรีด (residence time) และการพองตัวของ ตัวอย่างรำข้าวอัดรีดที่มีพลาสติกไซเซอร์ต่างกัน อุณหภูมิหน้าตาย 100 องศาเซลเซียสที่อัตราการป้อนตัวอย่าง 1.5 กิโลกรัม/ชั่วโมง ความเร็วสกรู 50 รอบต่อนาที

ตัวอย่าง	ค่าที่วัดได้			
	ความดัน (บาร์)	กระแสไฟฟ้า มอเตอร์ (แอมแปร์)	เวลาที่อยู่ใน เครื่องอัดรีด (วินาที)	การพองตัวของ ตัวอย่าง
G30:B70	43±4.3	55±1.5	198±24	0.98±0.02
W30:B70	12±0.5	43±0.5	196±6	1.04±0.03
G40:B60	16±3.0	43±1.1	187±4	1.01±0.03
W10:G30:B60	9±1.1	43±0.5	196±30	0.96±0.03

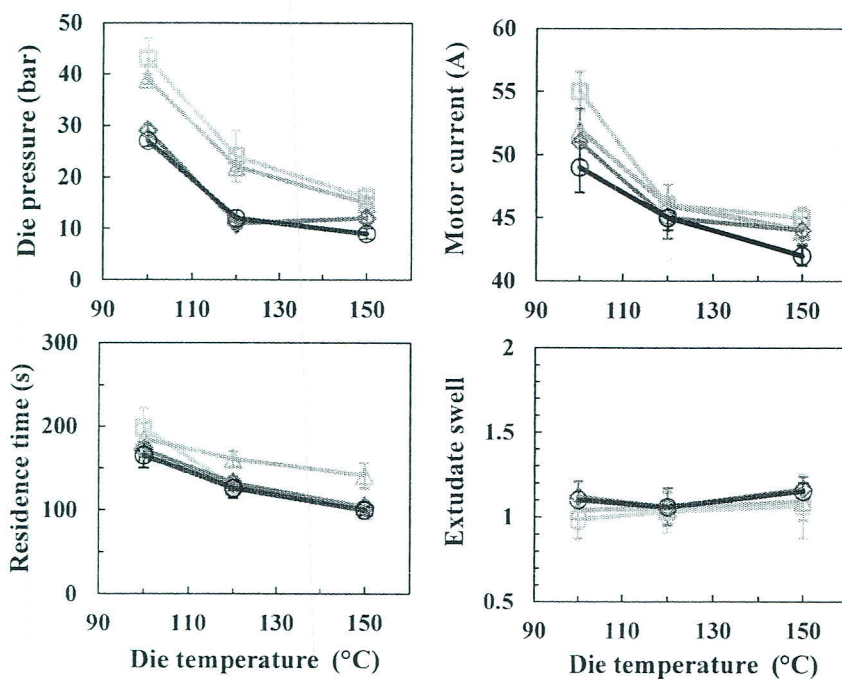


รูปที่ 3.5 ความดัน กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ เวลาที่อยู่ในเครื่องอัดรีด (residence time) และการพองตัวของ ตัวอย่างรำข้าวอัดรีดที่มีพลาสติกไซเซอร์ต่างกัน: 30% กลีเซอรอล (สี่เหลี่ยม), 30% น้ำ (วงกลม), 40%กลีเซอรอล (เพชร) และ 10%น้ำผสมกับ 30% กลีเซอรอล (สามเหลี่ยม)

3.3 ผลของลิกนินกราฟที่มีต่อการอัดรีดรำข้าวสาคัดน้ำมัน

ในการทดลองนี้ศึกษาผลของลิกนินเพื่อปรับปรุงความสามารถในการอัดรีดรำข้าว เนื่องจากลิกนินมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก จึงอาจช่วยทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ [21] ช่วยทำให้ความหนืดของตัวอย่างลดลงและอัดรีดได้ง่ายขึ้น [22] โดยตัวอย่างควบคุม คือ รำข้าวผสมกลีเซอรอล 30% สภาวะในการอัดรีด คือ อุณหภูมิหน้าตาย 100 120 และ 150 องศาเซลเซียสความเร็วสกรู 50 รอบต่อนาที และอัตราการป้อน 2.5 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ผลของการเติมลิกนินกราฟปริมาณ 10-30% ที่มีต่อการอัดรีดรำข้าวแสดงดังรูปที่ 3.6 พบว่าการเติมลิกนินกราฟส่งผลทำให้ความดัน และกระแสไฟฟ้ามอเตอร์ลดลง โดยลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณลิกนินมากกว่า 10% ดังนั้นการเติมลิกนินช่วยปรับปรุงความสามารถในการอัดรีดรำข้าวสาคัดน้ำมันได้

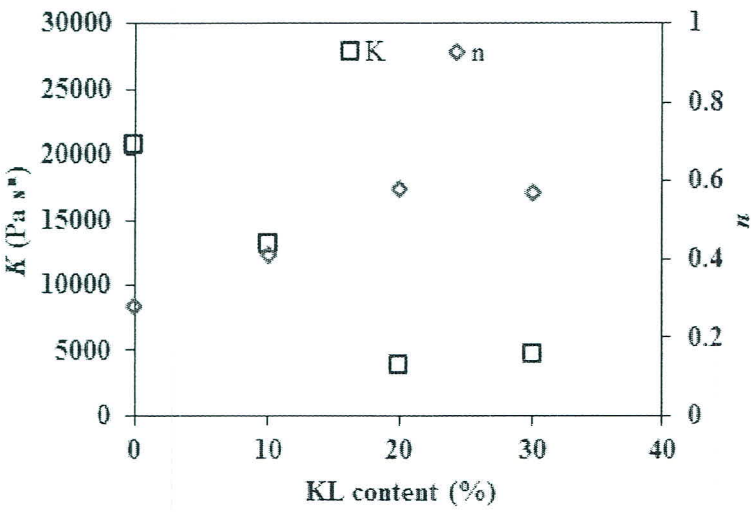


รูปที่ 3.6 ความดัน กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ เวลาที่อยู่ในเครื่องอัดรีด (residence time) และการพองตัวของตัวอย่างรำข้าวอัดรีดที่มีปริมาณกลีเซอรอล 30% และมีปริมาณลิกนินกราฟต่างกัน: 0% (สีเหลี่ยม), 10% (สามเหลี่ยม), 20% (เพชร) และ 30% KL (วงกลม)

3.4 ผลของลิกนินกราฟที่มีต่อความหนืดของรำข้าวสกัดน้ำมัน

ผลของการเติมลิกนินกราฟที่มีต่อการความหนืดของตัวอย่างรำข้าวสกัดน้ำมัน วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง คาปิลารี่รีโอมิเตอร์ (capillary rheometer) วิเคราะห์ความหนืดของตัวอย่างรำข้าวสกัดน้ำมันที่เติมลิกนิน กราฟ 0-30% หลังจากการอัดรีด โดยอัดตัวอย่างผ่านหน้าตาย (capillary die) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าความหนืดของตัวอย่างลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น แสดงถึงตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบ shear thinning behavior คือ มีความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น

รูปที่ 3.7 แสดงค่า power-law index (n) และ consistency (K) ของตัวอย่าง 0-30% KL คำนวณด้วย สมการกฎยกกำลัง (power law) ดังสมการที่ 2.1 ค่า n แล K ของตัวอย่างรำข้าวสกัดน้ำมันอัดรีดที่ไม่ได้เติม ลิกนินกราฟ (0%KL) มีค่าเท่ากับ 0.28 พาสคาล.วินาที และ 2.1×10^4 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ทำ จากวัสดุทางการเกษตร เช่น ตัวอย่างโปรตีนถั่วเหลืองผสมแป้งข้าวโพดพลาสติกไซต์ด้วยกลีเซอรอล มีค่า K เท่ากับ 4.2×10^4 และ n เท่ากับ 0.29 [23]



รูปที่ 3.7 ความหนืดของรำข้าวผสมกับลิกนินกราฟ 0-30% วิเคราะห์ด้วยเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

การเติมลิกนินลงในรำข้าวสกัดน้ำมัน ส่งผลให้ค่า K ลดลง ลิกนินส่งผลให้ความหนืดของตัวอย่างลดลง อาจ เนื่องมาจากลิกนินกราฟมีขนาดโมเลกุลต่ำเมื่อเทียบกับโปรตีน หรือแป้งในรำข้าวสกัดน้ำมัน โดยลิกนินมี

น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 19,800 กรัม/โมล [24] นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติการพลาสติกไซด์ของลิกนินเนื่องจากลิกนินมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ความหนืดของตัวอย่างลดลงเมื่อลิกนินกราฟท์เพิ่มขึ้น [22] ทั้งนี้เมื่อเติมปริมาณลิกนินเพิ่มขึ้น ตัวอย่างมีค่า n และ K ของลดลง ดังนั้นการเติมลิกนินกราฟท์ช่วยให้ไหลของตัวอย่างดีขึ้น

3.5 ผลของลิกนินกราฟท์ที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุร่าข้าวสากัดน้ำมัน

ผลของปริมาณลิกนินที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุที่ทำจากโปรตีนร่าข้าวสากัดน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 4.6 การเติมลิกนินส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ ตารางที่ 3.4 แสดงค่ามอดูลัสของยัง ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าการยืดตัวจนขาด (elongation at break) ของวัสดุที่ทำจากร่าข้าวสากัดน้ำมันที่มีลิกนินกราฟท์ 0-30% การเติมลิกนินกราฟท์ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากลิกนินสามารถทำปฏิกิริยากับแป้งและโปรตีนได้ [5] [6] ส่งผลให้ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุ

ตารางที่ 3.4 สมบัติทางกลของวัสดุที่ทำจากร่าข้าวสากัดน้ำมันที่มีปริมาณลิกนินกราฟท์ 0-30% ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	มอดูลัสของยัง (MPa)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	ค่าการยืดตัวจนขาด (%)	
0%KL	8.14±0.47	0.44±0.04	8.10±1.75	—
10%KL	13.06±1.06	0.30±0.05	2.96±1.33	
20%KL	31.32±5.09	0.39±0.12	2.20±1.98	
30%KL	42.55±3.18	0.80±0.18	2.00±1.42	