

การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลและการจำลองการบีบอัดขึ้นรูปเนื้อปลาบด

Mechanical Property Testing and Extrusion Simulation of Surimi

สมพจน์ วิบูลย์เกียรติ และ อนุชา พรหมวังชา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อปลาบดซึ่งเป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด และการจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปด้วยวิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผ่านหัวไค้แบบปากกลมและแบบปากแบน การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลได้สร้างอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เพื่อทดสอบหาค่าโมดูลัสการเฉือนและค่าความหนืดที่อุณหภูมิระหว่าง 27 ถึง 50 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าโมดูลัสการเฉือนและค่าความหนืดของเนื้อปลาบดจะมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 33 องศาเซลเซียส มีค่าโมดูลัสการเฉือนเท่ากับ 206.5 N/m^2 ค่าความหนืดเท่ากับ $8,274 \text{ N.s/m}^2$ โดยคุณสมบัติที่ได้นำไปเป็นข้อมูลป้อนของแบบจำลองในการจำลองสภาพด้วยวิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะพิจารณาผลของลักษณะรูปร่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของวัสดุที่ออกมาจากหัวไค้ ซึ่งจะขึ้นตัวและมีขนาดไม่เท่ากับปลายปากของหัวไค้ ผลที่ได้จะเปรียบเทียบความถูกต้องกับการทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่าย จากผลการวิจัยพบว่า การบีบอัดขึ้นรูปเนื้อปลาบดผ่านหัวไค้แบบปากกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจากปลายปาก 27% มีค่ามากกว่าการทดลอง 22% การบีบอัดขึ้นรูปเนื้อปลาบดผ่านหัวไค้แบบปากแบนมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นจากปลายปาก 58.2 % มีค่ามากกว่าการทดลอง 39 % ผลของการจำลองสภาพทางคณิตศาสตร์สามารถที่จะทำนายรูปร่างหลังจากการบีบอัดขึ้นรูปได้ แต่ยังคงมีความผิดพลาดสูงอยู่ ทั้งนี้เนื่องมาจากการจำลองสภาพเป็นโมเดลแบบสองมิติ และโจทย์ปัญหาเป็นวัสดุแบบเชิงไม่เส้นตรง

ABSTRACT

This article represents a mechanical property testing of viscoelastic material which is surimi, and to simulate the simple extrusion processes using finite element analysis. Two extrusion dies are circle and flat. The results are compared with experiment results. Interested mechanical properties are rigidity and viscosity. Thermal scanning rigidity monitor (TSRM) is built to perform the testing. Temperature range of the testing is 27 to 50 °C. The rigidity of surimi is 206.5 N/m² and viscosity is 8274 N.s/m², with temperature lower than 33 °C. Rigidity and viscosity are rapidly changed at the higher temperatures. The properties tested are used as input data for the simulation model. The results are shape, diameter or thickness of the material after passing through the die. For circular die extrusion, the diameter of surimi is increased by 27% which differs from experiment result of 22%. For flat die extrusion, the thickness of surimi is increased by 58% which differs from the experiment result of 39%. Finite element simulation could be used to predict to the final shapes of viscoelastic extrusion. However more accurate procedures should be emphasized. This study simplifies 3D to 2D problems. Highly material non-linearity is also a concerned factor. Theory and advance finite element code having higher accuracy should be studied.

1. บทนำ

คุณสมบัติของวัสดุอาหารที่มีโครงสร้างโปรตีน จะแสดงพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด (Viscoelastic) ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุประเภทนี้จะขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น เวลา อุณหภูมิ โครงสร้างพันธะโปรตีน และอัตราการให้ความร้อน เป็นต้น การหาคุณสมบัติวัสดุเชิงยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืดนั้นได้มีการศึกษากันมานานโดย Yasui [1] ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าโมดูลัสของการเลื่อนโดยสร้าง อุปกรณ์ทดสอบหาค่าโมดูลัสของการเลื่อน Montejan [2], และ Wu [3] สร้างอุปกรณ์วัดคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (Thermal scanning rigidity monitor, TSRM) แบบต่างๆเพื่อทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลคือ ค่าโมดูลัสการเลื่อนและค่าความหนืดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

บทความนี้นำเสนอการหาคุณสมบัติเชิงกลคือ ค่าโมดูลัสการเลื่อนและค่าความหนืดของวัสดุ และจำลองสภาพกระบวนการบีบอัดขึ้นรูป (Extrusion) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบผลกับการทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่าย โดยจะทำการทดสอบเนื้อปลาสด (Surimi)

2. ทฤษฎี

2.1 การยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด

ลักษณะของวัสดุยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืดจะมีสถานะเป็นกึ่งของแข็ง กึ่งของเหลว พฤติกรรมของวัสดุนี้เป็นการรวมเอาคุณสมบัติของแข็งและของเหลวไว้ด้วยกัน โดยของแข็งสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการยืดหยุ่น (Elasticity) โดยความเค้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด ของไหลอธิบายโดยทฤษฎีการหน่วงหนืด โดยความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเทียบกับเวลา เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาของวัสดุยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด ในกรณีการทดสอบแบบรีแลกเซชัน (Relaxation test) คือการทดสอบในกรณีที่ความเครียดคงที่ขณะใดขณะหนึ่ง และผลของความเค้นเป็นฟังก์ชันกับเวลาคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาสามารถอธิบายด้วยโมดูลัสของการรีแลก

(Relaxation modulus, G_r) คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นเป็นฟังก์ชันกับเวลาต่อความเครียดคงที่ โดยค่าโมดูลัสของการรีแลก หาได้โดยใช้อินทิกรัลของโพรี ดังสมการ

$$G_r(t) = G_\infty + \sum_{i=1}^N G_i e^{(-t/\lambda_i)} \quad (1)$$

เมื่อ t คือเวลา G คือค่าโมดูลัสการเลื่อน และ λ คือเวลาของการรีแลกมีค่าเท่ากับค่าความหนืดต่อค่าโมดูลัสการเลื่อน (η/G) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นการเลื่อนและความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุ ดังแสดงในสมการ

$$\tau(t) = G_0 \left[\gamma - \sum_{i=1}^N \gamma_i \right] \quad (2.1)$$

โดย
$$\gamma_i = \frac{G_i}{\lambda_i} \int_0^t e^{(-t_i/\lambda_i)} \gamma(t-t_i) dt_i \quad (2.2)$$

เมื่อ τ คือค่าความเค้น γ คือค่าความเครียด

2.2 การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกล

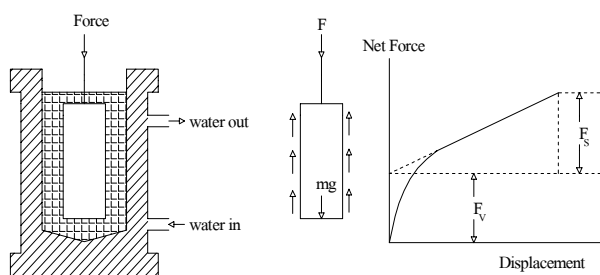
การหาคุณสมบัติของวัสดุยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืดจะสามารถหาได้โดยการสร้างอุปกรณ์ TSRM โดยอาศัยหลักการของ Wu [3] ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะประกอบด้วยภาชนะรูปถ้วยทรงกระบอกบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ผงของภาชนะจะเป็น 2 ชั้น มีน้ำไหลเวียนภายในซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิ ภายในถ้วยทรงกระบอกจะมีกะเปาะทรงกระบอกจมอยู่ในวัสดุตัวอย่าง ซึ่งจะถูกรัดแรง (F) กดให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนทำให้เกิดแรงเลื่อน (τ) เนื่องจากการไหลของวัสดุตัวอย่างและการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างกะเปาะกับภาชนะรูปถ้วยทำให้สามารถวัดแรงที่ใช้กดกะเปาะทรงกระบอกได้ โดยที่แรงดันที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเนื่องจากความหนืดและความยืดหยุ่น มีค่าเท่ากับแรงที่ใช้กดกะเปาะทรงกระบอกบวกด้วยมวลของกะเปาะทรงกระบอก (Net force = $F + mg$) ซึ่งจะสามารถแบ่งแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุได้เป็น 2 ส่วนคือแรงคงที่เนื่องจากเอลิเมนต์ความหนืด (F_V) และแรงที่เป็นสัดส่วนกับระยะทางเนื่องจากเอลิเมนต์ความยืดหยุ่น (F_S) ซึ่งได้มาจากการแสดงผลการทดลองซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกะเปาะทรงกระบอกเทียบกับระยะทาง

การเคลื่อนที่ตามแนวแกนของกะเปาะทรงกระบอกค่าโมดูลัสการเลื่อน (G) และค่าความหนืด (η) หาได้จากสมการ (Wu [3])

$$G = \frac{F_S}{2\pi LD} \left[\ln \frac{R_2}{R_1} \right] \quad (3)$$

และ
$$\eta = \frac{F_V}{2\pi LV} \left[\ln \frac{R_2}{R_1} \right] \quad (4)$$

เมื่อ D คือระยะทางในแนวแกน V คือความเร็วตามแนวแกน L คือความยาวของกะเปาะทรงกระบอก R_1 คือรัศมีของกะเปาะทรงกระบอก และ R_2 คือรัศมีของภาชนะรูปถ้วย



รูปที่ 1 หลักการของอุปกรณ์ TSRM

3. การดำเนินการวิจัยและผล

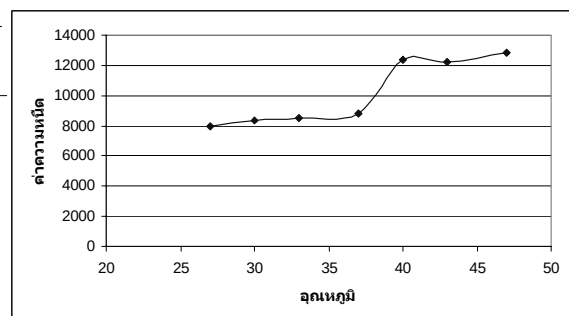
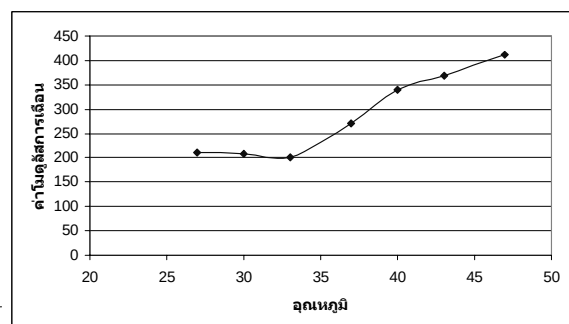
3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อปลาสด จะทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสการเลื่อนและค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 27-50 องศาเซลเซียส โดยเนื้อปลามีความหนาแน่น 982 kg/m³

การทดสอบจะให้ความร้อนผ่านน้ำไหลเวียนในอุปกรณ์ TSRM เป็นเวลา 25 นาทีเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ กดกะเปาะทรงกระบอกให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 35 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกค่าแรงกดเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ และคำนวณค่าโมดูลัสการเลื่อนและค่าความหนืดจากสมการที่ (3) และ (4) ได้ค่าโมดูลัสการเลื่อนและค่าความหนืดของเนื้อปลาสดที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัส

การเลื่อนและค่าความหนืดของเนื้อปลาสดที่อุณหภูมิต่างๆ จะแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกค่าทั้งสองจะมีค่าน้อยและมีค่าคงที่ ช่วงหลังค่าทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่ามากที่สุด และจะมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ช่วงอุณหภูมิที่พิจารณาใช้สำหรับการบีบอัดขึ้นรูปเนื้อปลาสดคือ อุณหภูมิไม่เกิน 33 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าโมดูลัสการเลื่อนคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 206.5 N/m² ค่าความหนืดคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 8,274 N.s/m²



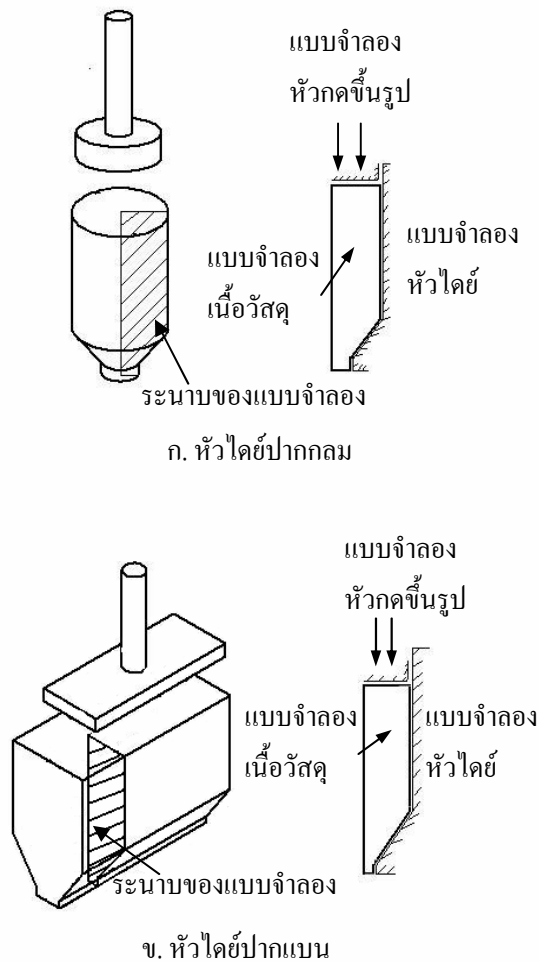
รูปที่ 2 ค่าโมดูลัสการเลื่อนและค่าความหนืดของเนื้อปลาสด

3.2 การจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูป

3.2.1 การเตรียมการจำลองสภาพ

การเตรียมการจำลองสภาพเป็นการเตรียมข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองสภาพ ได้แก่ การกำหนดขนาดของหัวไดซ์ การแบ่งเอลิเมนต์ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และการกำหนดคู่สัมผัส โดยได้จำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัวไดซ์ 2 แบบคือ การจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปเนื้อปลาสด ผ่านหัวไดซ์แบบปากกลมและปากแบน

เมื่อนำรูปร่างของหัวไค้มาสร้างแบบจำลองในการจำลองสภาพ ซึ่งจะประกอบด้วย แบบจำลองเนื้อวัสดุ แบบจำลองหัวกดขึ้นรูป และแบบจำลองหัวไค้ รูปร่างของหัวไค้ดังแสดงในรูปที่ 3



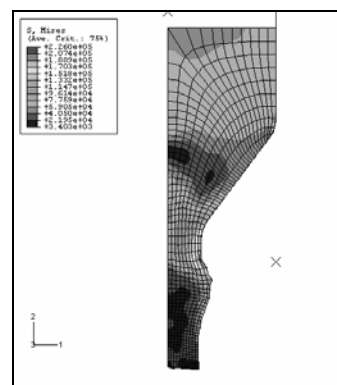
รูปที่ 3 รูปร่างของหัวไค้

การกำหนดคุณสมบัติของแบบจำลองของเนื้อวัสดุ จะกำหนดตามค่าที่ได้จากการทดสอบ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตได้กำหนดการบังคับการเคลื่อนที่ของแบบจำลองหัวไค้ไม่ให้มีการเคลื่อนที่ แบบจำลองหัวกดเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งเท่านั้น และกำหนดคู่สัมผัสระหว่างแบบจำลองเนื้อวัสดุกับแบบจำลองหัวไค้และแบบจำลองหัวกดขึ้นรูป และประเภทของการวิเคราะห์เป็นแบบควาซีสแตติก (Quasi-static analysis)

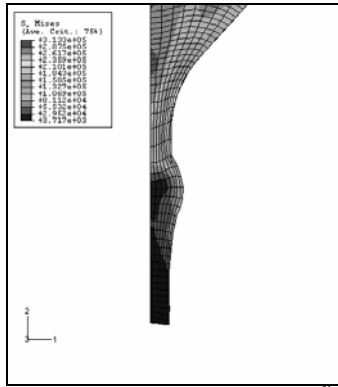
3.2.2 ผลการจำลองสภาพ

เมื่อทำการจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปโดยให้หัวกดขึ้นรูปเคลื่อนที่ลง ได้รูปร่างของวัสดุหลังถูกบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัวไค้ปากกลมดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อหัวกดขึ้นรูปเคลื่อนที่ลงจะทำให้แบบจำลองเนื้อวัสดุยุบตัวลงและไหลออกจากปลายปากของหัวไค้ โดยการไหลออกในช่วงแรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุจะมีขนาดเพิ่มขึ้นจากขนาดที่ปลายปากของหัวไค้ แล้วจึงลดลงจนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ปลายปากของหัวไค้ เมื่อผ่านออกจากหัวไค้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 25.4 มิลลิเมตร จากขนาดเดิม 20 มิลลิเมตร แล้วจะมีขนาดลดลงเหลือ 18.5 มิลลิเมตร แรงที่ใช้ในการบีบอัดขึ้นรูป 62.2 นิวตัน

รูปร่างของวัสดุหลังถูกบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัวไค้ปากแบนดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเมื่อหัวกดขึ้นรูปเคลื่อนที่ลงจะทำให้แบบจำลองเนื้อวัสดุยุบตัวลงและไหลออกจากปลายปากของหัวไค้ โดยการไหลออกในช่วงแรกขนาดความหนาของวัสดุจะมีขนาดเพิ่มขึ้นจากขนาดที่ปลายปากของหัวไค้ แล้วจึงลดลงจนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ปลายปากของหัวไค้ โดยเมื่อปลายปากของหัวไค้จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 8.7 มิลลิเมตร จากขนาดเดิม 5.5 มิลลิเมตร แล้วจะมีขนาดลดลงเหลือ 5.1 มิลลิเมตร แรงที่ใช้ในการบีบอัดขึ้นรูป 140.5 นิวตัน



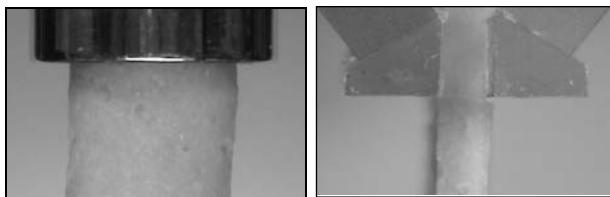
รูปที่ 4 รูปร่างวัสดุหลังจำลองสภาพบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัวไค้ปากกลม



รูปที่ 5 รูปร่างวัสดุหลังจำลองสภาพบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัว
ไค้ปากแบน

3.3 การทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่าย

การทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่ายมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลของขนาดวัสดุหลังจากผ่านออกจากหัวไค้ มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสภาพทางคณิตศาสตร์ โดยสร้างหัวไค้ 2 ชนิดคือ แบบปากกลมและแบบปากแบน ขนาดและลักษณะรูปร่างของหัวไค้ การทดลองจะบันทึกขนาดและรูปร่างของวัสดุหลังผ่านออกจากหัวไค้ด้วยกล้องถ่ายภาพวีดิโอระบบดิจิทัล ซึ่งจะทำการทดลอง 10 ครั้งต่อชนิดของหัวไค้ ในหนึ่งการทดลองจะแปลงไฟล์วิดีโอเป็นไฟล์รูปภาพ แล้วเลือกภาพการทดลองโดยการสุ่มมาเป็นจำนวน 10 ภาพ ทำการวัดขนาดและหาค่าเฉลี่ย โดยหัวไค้แบบปากกลมจะหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุหลังจากผ่านหัวไค้ หัวไค้แบบปากแบนจะหาขนาดความหนาของวัสดุหลังจากผ่านหัวไค้ โดยการทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่ายจะบีบอัดขึ้นรูปด้วยแรงกดที่ได้จากการจำลองสภาพคือ การทดลองบีบอัดขึ้นรูปเนื้อพลาสติกผ่านหัวไค้แบบปากกลมใช้แรงกด 62.2 นิวตัน และการทดลองบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัวไค้แบบปากแบนใช้แรงกด 140.5 นิวตัน



รูปที่ 6 รูปร่างของวัสดุหลังทดลองบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัว
ไค้ปากกลมและปากแบน

เมื่อได้ทำการทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่ายด้วยแรงกดดังกล่าวได้ภาพผลการทดลองบีบอัดขึ้นรูปเนื้อพลาสติกผ่านหัวไค้ทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าเมื่อเนื้อพลาสติกถูกบีบอัดผ่านหัวไค้แล้วขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากขนาดที่ปลายปากของหัวไค้ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเนื้อพลาสติกหลังจากถูกบีบอัดผ่านหัวไค้ปากกลมจะเพิ่มขึ้นเป็น 20.8 มิลลิเมตร ขนาดความหนาเนื้อพลาสติกหลังจากถูกบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัวไค้ปากแบนจะเพิ่มขึ้นเป็น 6.23 มิลลิเมตร

3.4 การเปรียบเทียบผล

ในการเปรียบเทียบผลนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่ายและผลจากการจำลองสภาพ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเนื้อพลาสติกที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านออกจากหัวไค้ปากกลมจากการจำลองสภาพมีค่ามากกว่า การทดลองอย่างง่าย 22 เปอร์เซ็นต์ ขนาดความหนาของเนื้อพลาสติกที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านออกจากหัวไค้ปากแบนจากการจำลองสภาพมีค่ามากกว่า การทดลองอย่างง่าย 39 เปอร์เซ็นต์

ความผิดพลาดของการจำลองสภาพเทียบกับการทดลองมีค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก การจำลองสภาพพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับวัสดุเท่านั้น แต่ในการทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่ายผลที่เกิดขึ้นเกิดจากความเค้นดัดงอ และความเค้นเฉือน การจำลองสภาพเป็นการจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปในสองมิติ และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์แบบเชิงไม่เส้นตรงของรูปร่างของวัสดุ คือวัสดุมีการเสียรูปอย่างมากเมื่อเทียบกับรูปร่างเริ่มต้น นอกจากนี้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะพิจารณาการไหลที่มีความยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด โดยใช้สมการสนามพื้นฐานแบบเดียวกับการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของแข็งคือใช้สมการสนามการขจัด ทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองสภาพมีค่าแตกต่างจากการทดลอง และการจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัวไค้แบบปากแบน ได้พิจารณาปัญหาเป็น

สองมิติ กรณีความเครียดระนาบ เมื่อทำการทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่ายพบว่าอัตราส่วนความกว้างของหน้าตัดหัวไค้ต่อความยาวมีค่าน้อย ผลของแรงเสียดทานที่ผิวของหัวไค้ทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองสภาพมีค่าแตกต่างจากการทดลอง

4 สรุปผล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อปลาบด ที่อุณหภูมิต่างๆ ทำโดยใช้อุปกรณ์ TSRM พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสการเฉือนและค่าความหนืดจะแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกคุณสมบัติทั้งสองจะมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นช่วงที่พิจารณาใช้ในการจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูป สำหรับเนื้อปลาบดคือช่วงอุณหภูมิที่มีคุณสมบัติคงที่ไม่เกิน 33 องศาเซลเซียส มีค่าโมดูลัสการเฉือนเฉลี่ยเท่ากับ 206.5 N/m^2 ค่าความหนืดเฉลี่ยเท่ากับ $8,274 \text{ N.s/m}^2$ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคุณสมบัติทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็วจนมีค่ามากที่สุด ในช่วงอุณหภูมินี้จะใช้ในการคงรูปร่างของวัสดุ

การจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปเนื้อปลาบดด้วยวิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป และการเปรียบเทียบผลกับการทดลองบีบอัดขึ้นรูปอย่างง่าย ได้ทำการบีบอัดขึ้นรูปผ่านหัวไค้ 2 ชนิดคือแบบปากกลมและแบบปากแบน พบว่าวิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายรูปร่างของวัสดุหลังจากบีบอัดขึ้นรูปได้ โดยการจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปเนื้อปลาบดผ่านหัวไค้ปากกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจากปลายปาก 27 % มีค่ามากกว่าการทดลอง 22 % และการจำลองสภาพการบีบอัดขึ้นรูปเนื้อปลาบดผ่านหัวไค้แบบปากแบนมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นจากปลายปาก 58.2 % มีค่ามากกว่าการทดลอง 39 %

บรรณานุกรม

1. Yasui, T., Ishioroshi, M., Nakano, H., and Samejima, K. (1979). Changes in shear modulus, ultrastructure and spin-spin relaxation times of water associated with heat induced gelation of myosin. *Journal of Food Science*. 44, 1201-1211.
2. Montajano, J.C., Hamann, D.D., and Lanier, T.C. (1984). Thermally induced gelation of selected comminuted muscle systems-rheological changes during processing: final strengths and microstructures. *Journal of Food Science*. 49, 1496-1505.
3. Wu, M.C., Lanier, T.C., and Hamann, D.D. (1985). Rigidity and viscosity changes of croaker actomyosin during thermal gelation. *Journal of Food Science*. 50, 14-19.
4. Christensen, R.M. (1982). An Introduction: Theory of Viscoelasticity. New York, Academic Press.
5. ABAQUS (2000). ABAQUS Theory Manual. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
6. ABAQUS (2000). ABAQUS Example Problems Manual. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.