

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



246729

รหัสโครงการ SUT7-703-48-12-77



รายงานการวิจัย

การจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งในเอกซ์ทรูเดอร์

ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

Flow Simulation of Starch in Extruder with
Computational Fluid Dynamics Programming

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

600251364

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



246729

๗

รหัสโครงการ SUT7-703-48-12-77



รายงานการวิจัย

การจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งในเอกซ์ทรูดเดอร์

ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

**Flow Simulation of Starch in Extruder with
Computational Fluid Dynamics Programming**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2548

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม/2553



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีใน

การสนับสนุนงบประมาณเพื่อโครงการวิจัยนี้

งานวิจัยเรื่องการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งในเอกซ์ทรูเดอร์ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเป็นการศึกษาถึงการใช้แบบทำนายทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิทยากระแสของวัตถุดิบอาหารจำพวกแป้ง ควบคู่กับ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้ง โดซึ่งจัดเป็นของไหลประเภทนอนนิวโทเนียนที่เกิดในเครื่องเอกซ์ทรูชัน เพื่อให้เข้าใจและได้แบบสมการคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าของกลุ่มตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแป้งโดของเครื่องเอกซ์ทรูชัน ได้แก่ ความชื้นของวัตถุดิบ ค่าความร้อนในรูปของอุณหภูมิที่ใช้แปรรูปแป้งโด ความเร็วรอบหมุนของเพลาสกรู และตัวแปรด้านรูปทรงทางเรขาคณิตของแบบสกรู (ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูต่อความลึกของช่องทางการไหล) ขอบเขตการศึกษาวิจัยเป็นการศึกษาพฤติกรรมการไหลของแป้งโดเข้าไว้ในเครื่องเอกซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว การจำลองทำโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Fluent[®] ซึ่งกำหนดให้มีสภาวะแปรรูปแบบอุณหภูมิคงตัว และสมมติให้สภาวะการไหลเป็นแบบไม่อัดตัว การตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองพฤติกรรมการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยืนยัน โดยการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำเชื่อมข้าวโพดซึ่งจัดเป็นของไหลชนิดนิวโทเนียนกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ตามแบบสมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li และ Hsieh สำหรับของไหลชนิดนิวโทเนียนในเครื่องเอกซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว ส่วนการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของแป้งโดในเครื่องเอกซ์ทรูชันทำ โดยเทียบกับทั้งผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Rauwendaal สำหรับของไหลชนิดนอนนิวโทเนียนในเครื่องเอกซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว และค่าจากผลการทดสอบผลิจจริง

The research report entitled “Flow Simulation of Starch Dough in Extruder with Computational Fluid Dynamics Programming” studied an application of the computational fluid dynamics program together with the rheological model of starch dough to create the predictive models for flow behavior of starch dough, which is considered to be a non-Newtonian fluid, in the extruder. The study was aimed to understand and obtain the mathematical models for the prediction of the change of flow behavior under the effect of process variables for extrusion process listing as a moisture content of raw material, a heating value in term of process temperature, rotating speed, and screw configuration (only for the channel depth ratio). The research scope was to study the flow behavior of rice starch dough in the single screw extruder by applying Fluent® program. Flow simulation was limited to an isothermal process under the incompressible fluid flow. Validation of predictive results was carried out by comparison to either the analytical solution or the experimental measurements. For the validation of simulation procedures, corn syrup, a Newtonian fluid, was used and the flow simulation results were compared to the analytical solutions for flow behavior proposed by Li and Hsieh. Where as, the simulated results of rice starch dough, a Non-Newtonian fluid, in the single screw extruder were compared to both analytical solutions proposed by Rauwendaal and the actual measuring data.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย และการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	1
ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	5
ทางด้านเศรษฐกิจ.....	5
ทางด้านวิชาการ.....	6
หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
สมการควบคุมการไหล.....	6
การวิเคราะห์การไหล.....	6
สมการอนุรักษ์มวล.....	8
สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	8
สมการอนุรักษ์พลังงาน.....	9

สมการวิทยากระแสของแบ่ง.....	9
สมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับเครื่องเอกซ์ทูล์รุ่น ชนิดสกรูเดี่ยว.....	10
สมการสำหรับของไหลแบบนิว โทเนียน.....	10
สมการสำหรับของไหลแบบนอนนิว โทเนียน.....	14
สมการคำนวณตัวแปรไร้มิติผลต่างความดัน และตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลเชิงมวล ของผลิตภัณฑ์.....	15
สมการคำนวณวิธีเชิงตัวเลขเพื่อการจำลองการไหล.....	16
การทำ Discretization ให้กับการถ่าย โอนปริมาณสเกลาร์.....	17
การทำ Discretization ให้กับสมการการถ่าย โอน โมเมนตัม.....	18
การทำ Discretization ให้กับสมการ การอนุรักษ์มวล.....	19
รูปแบบสมการเชิงเส้นของสมการไม่ต่อเนื่อง.....	20
Under Relaxation.....	20
การประมาณค่าอนุพันธ์.....	20
Cell-Based Derivative Evaluation.....	21
Node-Based Derivative Evaluation.....	21
The Coupled Solver.....	22
สมการควบคุมในรูปเวกเตอร์.....	22
Preconditioning.....	23
Time Marching for Steady-State Flows.....	24
Implicit Scheme.....	25

บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย

มิติและรายละเอียดของสกรู.....	1
กรรมวิธีการสร้าง Mesh Element	4
กรรมวิธีการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้ง โคข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	4
กรรมวิธีตรวจสอบความถูกต้องของจำนวนเซลล์ที่สร้างเพื่อวิเคราะห์ พฤติกรรมการไหลของแป้ง โคข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	5
กรรมวิธีแปลงรูปผลการจำลองการไหลเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ระหว่างตัวแปรหลักที่มีผลต่ออัตราการผลิต.....	7
วิธีการทดลองคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล.....	7
วิธีการวัดความชื้น.....	7
วิธีการวัดความหนาแน่น.....	8
วิธีการวัดความหนืด.....	8

บทที่ 3 ผลการวิจัย

คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล.....	1
ผลการวัดความหนาแน่น.....	1
ผลการวัดความหนืด.....	1
ลักษณะทางกายภาพของแป้งข้าวเจ้า.....	1
ความชื้นของแป้ง โคข้าวเจ้าสุกที่ผลิตได้จาก เครื่องวัดความหนืด.....	2
ผลของค่าความหนืด.....	3
แบบสมการวิทยากระแสของแป้ง โคข้าวเจ้า.....	7
ผลการสร้าง mesh element ให้กับช่องทางการไหลของแป้งข้าวเจ้า.....	8
ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของกรรมวิธีที่ใช้เพื่อการจำลองการไหล	11
ผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงเส้นในแนว axial แนว tangential และ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิง	

วิเคราะห์ของน้ำเชื่อมข้าว โทคที่ความเร็วรอบ 9 18 และ 30 รอบต่อนาที.....	11
ผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงเส้นในแนว axial แนว tangential และ อัตราการผลิตของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิง วิเคราะห์ของแป้งโคข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว.....	13
ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ์ทรูดชัน.....	15
ความดันที่ปรากฏในเนื้อแป้งข้าวเจ้า.....	15
ความเร็วและอัตราเฉือนที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้า.....	21
อุณหภูมิที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้า.....	23
อัตราการผลิต.....	24
ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการผลิตของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง.....	29
มิติของสกรูที่มีผลต่อความดัน.....	36
ตัวแปรไร้มิติ.....	37
บทที่ 4 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	1
บรรณานุกรม	1
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก สัญลักษณ์.....	1
ภาคผนวก ข มิติสกรู.....	3
ประวัติผู้วิจัย	1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรูที่ใช้ใน โครงการวิจัย.....	2
ตารางที่ 3.1 ความชื้นของแป้ง โคข้าวเจ้าและแป้ง โคข้าวเจ้าสุกที่ผลิตได้ จากเครื่องวัดความชื้น.....	2
ตารางที่ 3.2 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแป้ง โคข้าวเจ้า.....	4
ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียด mesh element.....	9
ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ของผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าว โทค ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 9 18 และ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 °C.....	13
ตารางที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของแป้ง โคข้าวเจ้า ที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 30 รอบต่อนาที.....	14
ตารางที่ 3.6 ผลการจำลองค่าความดันภายในหัวคายใกล้ทางออกแป้ง ข้าวเจ้าความชื้น 47 %.....	16
ตารางที่ 3.7 ผลการจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแป้ง ข้าวเจ้าความชื้น 54 %.....	17
ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแป้ง ข้าวเจ้าความชื้น 60 %	17
ตารางที่ 3.9 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้ง โค ข้าวเจ้าที่ความชื้น 47 %.....	25
ตารางที่ 3.10 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้ง โค ข้าวเจ้าที่ความชื้น 54%.....	25
ตารางที่ 3.11 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้ง โค ข้าวเจ้าที่ความชื้น 60 %.....	26
ตารางที่ 3.12 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง สำหรับแป้ง โคความชื้น 54 %.....	30
ตารางที่ 3.13 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง สำหรับแป้ง โคความชื้น 40 %.....	31

ตารางที่ 3.14 แสดงผลการเปรียบเทียบความดันเนื่องจากความลึกของช่อง ทางการไหล สำหรับ model2 และ model3	36
--	----

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การวิเคราะห์ระบบการไหล แบบปริมาตรควบคุมแบบเอลิเมนต์ขนาดเล็ก.....	7
รูปที่ 1.2 (a) แสดงลักษณะของสกรูและ barrel, (b) แสดงลักษณะของช่องทางการไหล ที่ถูกล็อกและกำหนดให้อยู่ในระบบพิกัดฉาก.....	10
รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการคำนวณแบบ coupled solution method ของ Fluent.....	17
รูปที่ 1.4 ตัวอย่างภาพปริมาตรควบคุมย่อยแบบสามเหลี่ยมที่ปรากฏใน Fluent	17
รูปที่ 2.1 ภาพประกอบแสดงรายละเอียด โดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 1.....	2
รูปที่ 2.2 ภาพประกอบแสดงรายละเอียด โดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 2.....	3
รูปที่ 2.3 ภาพประกอบแสดงรายละเอียด โดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 3.....	3
รูปที่ 2.4 ภาพมิติของหัวค้ายที่ใช้ในการทดลองและใช้สำหรับการจำลองของสกรู Model1....	4
รูปที่ 2.5 แสดงรายละเอียดและตำแหน่งที่ใช้วัดความดัน.....	7
รูปที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของแปรง ไคข้าวเจ้าสุกหลังผ่านกระบวนการวัดความหนืด.....	1
รูปที่ 3.2 ค่าความหนืดของแปรงข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส.....	6
รูปที่ 3.3 ค่าความหนืดของแปรงข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส.....	6
รูปที่ 3.4 ค่าความหนืดของแปรงข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส.....	7
รูปที่ 3.5 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทราซัน Model 1 ณ ตำแหน่งปลายทางออก.....	9
รูปที่ 3.6 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทราซัน Model 2 ณ ตำแหน่งปลายทางออก.....	10
รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทราซัน Model 3 ณ ตำแหน่งปลายทางออก.....	10
รูปที่ 3.8 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงในแนว axial ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ กับผลจากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าว โทด ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 9,18 และ30 รอบต่อ นาทีที่อุณหภูมิ 40 °C.....	12

	หน้า
รูปที่ 3.9 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงในแนว tangential ระหว่าง ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าว โทค ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 9,18 และ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 °.....	12
รูปที่ 3.10 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนว axial ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ กับผลจากการจำลองของแป้ง โคข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุน สกรู 30 รอบต่อนาที.....	14
รูปที่ 3.11 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนว tangential ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ กับผลจากการจำลองของแป้ง โคข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุน สกรู 30 รอบต่อนาที.....	14
รูปที่ 3.12 แสดงผลการจำลองความดันที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีด โดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	16
รูปที่ 3.13 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 47 % ความชื้นเปียก.....	18
รูปที่ 3.14 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 54 % ความชื้นเปียก.....	18
รูปที่ 3.15 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 60 % ความชื้นเปียก.....	19
รูปที่ 3.16 อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 รอบต่อนาที.....	20
รูปที่ 3.17 แสดงผลการจำลองความเร็วที่ปรากฏในเนื้อของแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีด โดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	21
รูปที่ 3.18 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่ง 0.2027 m วัดจากตำแหน่งปลายทางออกหัวคายน.....	22
รูปที่ 3.19 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่งทาง ออกของหัวคายน.....	22
รูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่งทาง ออกของหัวคายนในลักษณะตัดขวางตัวสกรู.....	23

	หน้า
รูปที่ 3.21 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิต่างๆที่ปรากฏในเนื้อของแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีด โดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	24
รูปที่ 3.22 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่างๆและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวล ของแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 47 %ความชื้นเปียก.....	27
รูปที่ 3.23 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่างๆและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวล ของแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 54 %ความชื้นเปียก.....	27
รูปที่ 3.24 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่างๆและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวล ของแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 60 %ความชื้นเปียก.....	28
รูปที่ 3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ความเร็ว รอบต่างๆ ที่ความชื้น 40 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส.....	32
รูปที่ 3.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหมุนสกรูกับอัตราการไหลเชิงมวล และความดันของผลิตภัณฑ์ของ Model 2 และ Model 3 ตามลำดับ.....	37
รูปที่ 3.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง factor of drag flow (F^*_d) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมี ของปลอกสกรู (H/R_c).....	38
รูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง factor of pressure flow (F^*_p) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมี ของปลอกสกรู (H/R_c).....	38
รูปที่ 3.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลกับ ตัวแปรไร้มิติความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 20 30 และ 40 รอบต่อนาที.....	39