

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อิทธิพลของสกรู ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

Effect of Main Screw in Extrusion Process

นางสาว ณัฐริยา ทรัพย์มูล
นาย วรยุทธ ปัญญาพิทยสกุล
นางสาว อภาภรณ์ ป้องศรี

๑๖๖
๐๕๓๕๑๑
๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72083
วัน,เดือน,ปี..... - 8 ส.ย. 2550

.b. 11762895
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

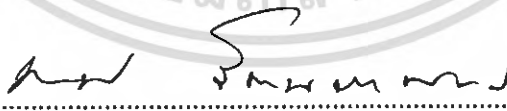
ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อิทธิพลของสกรูในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

ผู้จัดทำ

นางสาว ณัฐริยา ทวีชัยมุต
นาย วรรษุทธ ปิณฑุชาติพิทยสกล
นางสาว อภาภรณ์ ป็องศรี


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. สาทิพย์ รัตนภาสกร)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์เจษฎา ชัยโถม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของสกรูในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

นางสาว ณัฐริยา ทรัพย์มูล

นาย วรยุทธ ปัญญาพิทยสกุล

นางสาว อภาภรณ์ ป้องศรี

รศ.สาทิป รัตนภาสกร อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.เจษฎา ชัยโถม อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกับ ความดัน, ความเร็วรอบ, อัตราการเข็นและแรงบิดในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว (Single-screw) โดยใช้สกรูสองปาก และใช้น้ำเป็นวัสดุดิบ ในการจำลองกระบวนการ ใช้วิธีเชิงตัวเลข ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการที่ต้องการศึกษาประกอบด้วย ระยะพิทช์ (pitch) ความลึกร่องเกลียว และความเร็วรอบของสกรู โดยใช้ระยะพิทช์ 22, 25 และ 28mm ความลึกร่องเกลียว 2.75, 3.5 และ 4.25 mm ความเร็วรอบ 100, 200 และ 300 rpm แบบจำลองของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันถูกสร้างขึ้นโดยสมมติให้น้ำมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดเนื้อสาร (isotropic) กำหนดสถานะโดยผนังชิ้นงานด้านนอก (บารเรล) หยุดนิ่งและผนังชิ้นงานด้านใน (สกรู) หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับความเร็วรอบของสกรู อัตราการไหลมวลทางเข้า 0.0035 kg/s และความดันที่ทางออกเท่ากับความดันบรรยากาศ ไม่คิดถึงผลของความร้อนและแรงเสียดทานในการขึ้นรูปตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้แบบจำลองในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสูงสุด 7.1%

จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่คำนวณได้สรุปว่า ความเร็วของอนุภาค อัตราเข็นและแรงบิดแปรผันเชิงเส้นกับความเร็วรอบแต่แปรผกผันกับระยะพิทช์ (Pitch) และความลึกร่องเกลียว ส่วนความดันของอนุภาคไม่ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรที่ทำการศึกษา และทำผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่คำนวณได้มาสร้างฟังก์ชัน หากความเร็วของอนุภาค อัตราเข็น และแรงบิด ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ที่แปรผันกับความเร็วรอบและแปรผกผันกับระยะพิทช์กับความลึกร่องเกลียว ด้วยสมการการทดลองแบบดัดดอยเชิงเส้นหลายเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Main screw in Extrusion Process

Nattriya Supmoon

Vorayoot Panyatipsakul

Apapom Pongsri

Assoc. Prof. Satip Rattanapaskom Advisor

Jedsada Chaishome Advisor

2006

Abstract

According to this analysis, a numerical investigation on the extrusion cooking process for water in a single screw extruder was carried out, using a fluid-dynamic, numerical simulation model, varying pitch, channel depth and screw rotation. Pitch is 22, 25, 28 mm., channel depth is 2.75, 3.5, 4.25 mm. And screw rotation is 100, 200, 300 rpm. The boundary conditions were assumed, mass flow rate at the inlet section is 0.0035 kg/m^3 , pressure at the outlet section is atmosphere pressure, on the barrel surface a zero velocity conditions were defined, which the screw surfaces were considered moving parts. Extrusion model is made by being supposed the water is an isotropic, and being quite not concentrated on heat and friction force. Model corrective checked by comparing the model and experiment. Found that there are some error at maximum torque 7.1%

From numerical result, the conclusion is that the increasing of screw rotation makes velocity, shear rate and torque increase. In contrastly, the increasing of pitch and channel depth make velocity, shear rate and torque decrease, while there has no effect on pressure in extruder. Moreover, numerical results which are calculated can make function to find out velocity, shear rate and torque by using independent variables are pitch, channel depth and screw rotation by multiple linear regression method.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้โดยความกรุณา และความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สาทิพย์ รัตนภาสกร และ อ.เจษฎา ชัยโสม ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ คำชี้แนะและแนวทางในการปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำงานที่ดี

ขอขอบพระคุณพ่อ แม่ และทุกคนในครอบครัวสำหรับกำลังใจ ความห่วงใย และการสนับสนุนเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้

ขอขอบพระคุณ คุณวิวัฒน์ ภูเจริญ คุณสมชาย แยมใส คุณวาโย ช้างเจริญ คุณภาควงศิริวัฒน์ และคุณอาทิตย์ ฤทธิเลื่อน ที่ได้คำปรึกษาจนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณนันทวัน แหนคำ คุณอำนาจ คุตะคุ และ คุณบุญนำ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณณัฐชัย นพพรพิทักษ์ สำหรับการเขียนแบบ กำลังใจ และความห่วงใยเสมอมา

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	IV
สารบัญรูป	V
รายการสัญลักษณ์	XXI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	16
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	16
3.2 วิธีการทดลอง	16
บทที่ 4 วิเคราะห์และทำนายผลการทดลอง	25
4.1 วิเคราะห์ผลการจำลองของจำนวนกริดที่เหมาะสม	25
4.2 วิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่เลือกใช้	27
4.3 การวิเคราะห์ผลอิทธิพลของรูปแบบสกรูที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดัน ความเร็วของอนุภาค อัตราการเข็นและแรงบิด	28
บทที่ 5 สรุปผล	73
บรรณานุกรม	75
ภาคผนวก ก	78
ภาคผนวก ข	93
ภาคผนวก ค	98
กิตติกรรมประกาศ	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงกรณีการศึกษาผลของการปรับค่าตัวแปรที่สนใจ	23
4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันที่ความยาวต่างๆตามแนวแกน X ของแต่ละจำนวนกริด	25
4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จากการทดลองกับการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้น้ำเป็นวัสดุดิบ	27
ค.1 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระได้แก่ ระยะเวลาพิตช์ ความลึกร่องเกลียว และความเร็วรอบสกรู ตัวแปรตาม ได้แก่ อัตราการเจียน ความดัน ความเร็ว และแรงบิด	98
ค. 2 แสดงการใช้สมการแบบถดถอยเชิงเส้น สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว กับ ระยะเวลาพิตช์ ความลึกร่องเกลียว และ ความเร็วรอบสกรู	99
ค. 3 แสดงการใช้สมการแบบถดถอยเชิงเส้น สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเจียน กับ ระยะเวลาพิตช์ ความลึกร่องเกลียว และ ความเร็วรอบสกรู	100
ค. 4 แสดงการใช้สมการแบบถดถอยเชิงเส้น สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิด กับ ระยะเวลาพิตช์ ความลึกร่องเกลียว และ ความเร็วรอบสกรู	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์แบบสกรูเดี่ยว	7
3.1 แสดงแบบของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและจำลองกระบวนการ	17
3.2 แสดงแบบของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและจำลองกระบวนการ	17
3.3 แสดงแบบของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและจำลองกระบวนการ	18
3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	18
3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD	19
3.6 แสดงลักษณะกริดภายนอกเหนือของวัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 240	19
3.7 แสดงลักษณะกริดภายในเหนือของวัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 240	19
3.8 แสดงลักษณะกริดภายนอกเหนือของวัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 260	20
3.9 แสดงลักษณะกริดภายในเหนือของวัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 260	20
3.10 แสดงลักษณะกริดภายนอกเหนือของวัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 300	20
3.11 แสดงลักษณะกริดภายในเหนือของวัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 300	20
3.12 แสดงลักษณะกริดภายนอกเหนือของวัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 350	20
3.13 แสดงลักษณะกริดภายในเหนือของวัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 350	20
4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทราชันโดยใช้น้ำเป็นวัตถุดิบที่จำนวนกริดต่างๆ	26
4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จากการทดลองกับการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทราชันโดยใช้น้ำเป็นวัตถุดิบ	27
4.3 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนระยะพิทช์ต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็ว	28
4.4 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความถี่ร่อนเกลียวต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็ว	29
4.5 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรูต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็ว	29
4.6 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนระยะพิทช์ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเจือ	30
4.7 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความถี่ร่อนเกลียวต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเจือ	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิต เจียน	31
4.9 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	32
4.10 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	32
4.11 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	33
4.12 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	33
4.13 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	34
4.14 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	34
4.15 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	35
4.16 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	35
4.17 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	36
4.18 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	36
4.19 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	37
4.20 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	37
4.21 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	38
4.23 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	39
4.24 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	39
4.25 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	40
4.26 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	40
4.27 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	41
4.28 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	41
4.29 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	42
4.30 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	42
4.31 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	43
4.32 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	43
4.33 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm	44
4.34 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm	44
4.35 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเจือปน ในการเอ็กซ์ทราซันสำหรับ ระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	46
4.37 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	46
4.38 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	46
4.39 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	46
4.40 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	46
4.41 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	46
4.42 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	47
4.43 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	47
4.44 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	47
4.45 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	47
4.46 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	47
4.47 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	47
4.48 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	48
4.49 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.50 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	48
4.51 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	48
4.52 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	48
4.53 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	48
4.54 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	49
4.55 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	49
4.56 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	49
4.57 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	49
4.58 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	49
4.59 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	49
4.60 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	50
4.61 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	50
4.62 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	50
4.63 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.64 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	50
4.65 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	50
4.66 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	51
4.67 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	51
4.68 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	51
4.69 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	51
4.70 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	51
4.71 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	51
4.72 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	52
4.73 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	52
4.74 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	52
4.75 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	52
4.76 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	52
4.77 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.78 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	53
4.79 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	53
4.80 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	53
4.81 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	53
4.82 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	53
4.83 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	53
4.84 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	54
4.85 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	54
4.86 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	54
4.87 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	54
4.88 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	54
4.89 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	54
4.90 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	55
4.91 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.92 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	55
4.93 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	55
4.94 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	55
4.95 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	55
4.96 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	56
4.97 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	56
4.98 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	56
4.99 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	56
4.100 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่อง เกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	56
4.101 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	56
4.102 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	57
4.103 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	57
4.104 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	57
4.105 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.106 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	57
4.107 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	57
4.108 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	58
4.109 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	58
4.110 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	58
4.111 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	58
4.112 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	58
4.113 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	58
4.114 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	59
4.115 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	59
4.116 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	59
4.117 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	59
4.118 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	59
4.119 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.120 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	60
4.121 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	60
4.122 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	60
4.123 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	60
4.124 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	60
4.125 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	60
4.126 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	61
4.127 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	61
4.128 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	61
4.129 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	61
4.130 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	61
4.131 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	61
4.132 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	62
4.133 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.134 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	62
4.135 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	62
4.136 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	62
4.137 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	62
4.138 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	63
4.139 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	63
4.140 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	63
4.141 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	63
4.142 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	63
4.143 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาคสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	63
4.144 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	64
4.145 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	64
4.146 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	64
4.147 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.148 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75mm ความเร็วรอบ 300 rpm	64
4.149 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	64
4.150 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5mm ความเร็วรอบ 100 rpm	65
4.151 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	65
4.152 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	65
4.153 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	65
4.154 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	65
4.155 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	65
4.156 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	66
4.157 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	66
4.158 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	66
4.159 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	66
4.160 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	66
4.161 แสดงค่าของอัตราการเจียนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทต์ 22 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.162 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	67
4.163 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	67
4.164 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	67
4.165 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	67
4.166 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	67
4.167 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	67
4.168 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	68
4.169 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	68
4.170 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	68
4.171 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	68
4.172 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	68
4.173 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	68
4.174 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	69
4.175 แสดงค่าของอัตราการผลิตเงินสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.176 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	69
4.177 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	69
4.178 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	69
4.179 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	69
4.180 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	70
4.181 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	70
4.182 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	70
4.183 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	70
4.184 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	70
4.185 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	70
4.186 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	71
4.187 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	71
4.188 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	71
4.189 แสดงค่าของอัตราความเร็วเฉือนสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.190 แสดงค่าของอัตราความเร็วรอบสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	71
4.191 แสดงค่าของอัตราความเร็วรอบสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	71
4.192 แสดงค่าของอัตราความเร็วรอบสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm	72
4.193 แสดงค่าของอัตราความเร็วรอบสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25mm ความเร็วรอบ 100 rpm	72
4.194 แสดงค่าของอัตราความเร็วรอบสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25mm ความเร็วรอบ 200 rpm	72
4.195 แสดงค่าของอัตราความเร็วรอบสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm	72
4.196 แสดงค่าของอัตราความเร็วรอบสำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	72
4.197 แสดงค่าของอัตราความเร็วรอบสำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28mm ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm	72
ก.1 แสดงการนำแบบจำลองที่เป็นไฟล์สกุล .STEP เข้ามาในโปรแกรม	78
ก.2 แสดงการสร้างชิ้นงานทรงกระบอกเพื่อใช้เป็นเนื้อวัสดุในกระบวนการ	79
ก.3 แสดงหน้าต่างการกำหนด Subtract Real Volume	79
ก.4 แสดงวิธีการ Unite ชิ้นงาน	80
ก.5 แสดงชิ้นงานที่เป็นเนื้อของไหลทั้งหมดเมื่อไม่มีสกรู	80
ก.6 แสดงการ subtract ชิ้นงาน	81
ก.7 แสดงชิ้นงานที่เป็นเนื้อวัสดุทั้งหมดที่อยู่ในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	81
ก.8 แสดงชิ้นงานที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน	82
ก.9 แสดงวิธีการสร้างกริด	82
ก.10 แสดงการสร้างกริด	83
ก.11 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว	83
ก.12 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบ	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.13 แสดงข้อมูลของชิ้นงานที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ	85
ก.14 แสดงหน้าตาของการเลือกวัสดุ	86
ก.15 แสดงรายชื่อของเงื่อนไขขอบ	86
ก.16 แสดงการกำหนดค่าเริ่มต้นให้แก่โปรแกรม	87
ก.17 แสดงหน้าตาของการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้	88
ก.18 แสดงการเลือกแสดงผลเป็นตัวแปรตามต้องการ	89
ก.19 การแสดงผลในลักษณะต่าง ๆ	89
ก.20 แสดงการแสดงผลลัพธ์ที่ต้องการทราบจากส่วนต่างๆของชิ้นงาน	90
ก.21 แสดงหน้าตาของการสร้างหน้าต่างเพื่อใช้ในการอ่านค่าผลลัพธ์	90
ก.22 แสดงการแสดงผลลัพธ์แบบเวกเตอร์	91
ก.23 แสดงการแสดงผลแบบเวกเตอร์	91
ก.24 แสดงการแสดงผลในรูปแบบของกราฟ	92
ก.25 แสดงการเลือกอ่านค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้น	92
ข.1 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm. ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm.	93
ข.2 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm. ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm.	93
ข.3 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm. ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm.	94
ข.4 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 25 mm. ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm.	94
ข.5 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 25 mm. ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm.	95
ข.6 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 25 mm. ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm.	95
ข.7 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm. ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm.	96
ข.8 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm. ความลึกร่องเกลียว 3.5mm.	96
ข.9 แสดงแบบสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm. ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm.	97

รายการสัญลักษณ์

T_r	เวลากักพักในกระบวนการ (s)
V_f	ปริมาตรวัตถุดิบในกระบวนการ (m^3)
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวัตถุดิบตลอดกระบวนการเอ็กซ์ทรักชัน (m^3/s)
$\dot{\gamma}$	อัตราการเฉือน (1/s)
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)
N	ความเร็วรอบของสกรู (rpm)
Γ	แรงบิด (Nm)
ω	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
d	ความลึกร่องเกลียว (mm)
n	ความเร็วรอบสูงสุดมอเตอร์ (rpm)
p	กำลังมอเตอร์เชิงกล (W)
P	ระยะพิตช์ (mm)
V	ความเร็วของอนุภาค (m/s)
X	ระยะทาง (m)

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารเป็นอย่างมาก โดยสามารถผลิตอาหารได้หลากหลายชนิด เช่น ขนมขบเคี้ยว (Snack) อาหารเด็ก อาหารเช้า ธัญพืช (Breakfast Cereal) พาสตา เป็นต้น กระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันนี้มีกำลังผลิตที่สูงและต่อเนื่อง สามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีลักษณะที่แห้งและเหนียวมากได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง โดยสามารถใช้ทำลายเชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์ที่ไม่ต้องการได้

ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัตถุดิบทั้งทางเคมีและกายภาพ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้นทำให้คุณสมบัติภายในโมเลกุลเปลี่ยนไป อธิบายได้จากกระบวนการเจลาตินไนซ์เซชัน (Gelatinization) และเดกซ์ทรินไนซ์เซชัน (Dextrinization) เป็นต้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพจะส่งผลต่อเนื้อสัมผัส (Texture) ของผลิตภัณฑ์ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความยืดหยุ่น (Elasticity) เป็นต้น

คุณสมบัติที่หลากหลายและการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยภายนอกของวัตถุดิบรวมทั้งการประพฤติตัวเป็นของไหล (Fluid Dynamic Behavior) ของอาหาร สิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำให้ยากต่อการออกแบบเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) รวมทั้งในขั้นตอนของการปรับแต่งค่าต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายในแบบที่ต้องการ ดังนั้นเพื่อให้การออกแบบและปรับแต่งกระบวนการเป็นไปอย่างเกิดประสิทธิผลสูงสุด คณะผู้จัดทำจึงได้เลือกการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์โวลูม (Finite Volume) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD เป็นเครื่องมือ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้สามารถเข้าใจปรากฏการณ์การไหลได้เป็นอย่างดี เป็นผลให้สามารถปรับปรุงและดัดแปลงรูปแบบของการออกแบบโดยการแสดงแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ ก่อนนำไปสร้างจริง หรือทำการวิจัยต่อ ซึ่งกระบวนการออกแบบด้วยการคำนวณดังกล่าวจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาที่ใช้ในสร้างเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ได้เป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองเพียงอย่างเดียว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์การแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของของไหลด้วย CFD (Computational Fluid Dynamics)
2. เพื่อศึกษาค่าอัตราการเฉือน ความดัน ความเร็ว และแรงบิด ในแต่ละสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปของความเร็วรอบของสกรู ความลึกของร่องเกลียว และระยะพิทช์ (Pitch) ของสกรู

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ CFD ในการวิเคราะห์อัตราอัตราการเฉือน (Shear Rate) การเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของอนุภาคสารภายในกระบวนการ และค่าแรงบิด โดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ คือ ความเร็วรอบของสกรู ความลึกของร่องเกลียว และระยะพิทช์ (pitch) ของสกรูได้
2. สามารถทราบแนวโน้มในการออกแบบ และปรับแต่งค่าต่างๆ ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันได้ โดยวิเคราะห์ fluid-dynamic behavior โดยใช้ CFD ได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. สมมติให้วัสดุที่ศึกษามีคุณสมบัติดังนี้
 - 1.1 เป็นสารที่มีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดเนื้อสารหรือเรียกว่า Isotropic
 - 1.2 ไม่มีความยืดหยุ่น (Inelastic)
 - 1.3 เป็นของไหลประเภทไม่อัดตัว (Incompressible)
 - 1.4 เป็นของไหลประเภท Newtonian

โดยวัสดุที่เลือกศึกษาคือ น้ำ
มีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

ความหนืด	0.001003 kg/m-s
อุณหภูมิเริ่มต้น	25 °c
ความหนาแน่น	998.2 kg/m ³

2. ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD ในการวิเคราะห์ปัญหา
3. ตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะพิทช์ (Pitch) ความลึกของร่องเกลียว (Channel Depth) และ ความเร็วรอบของสกรู (Screw Speed)
4. ตัวแปรตามที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความดัน ความเร็ว อัตราการเฉือน และ แรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ไม่คำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ

6. เครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ที่เลือกศึกษามีขนาดสกรูดังนี้

- ระยะพิทช์ = 25 mm
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน(d)= 28 mm
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก(D)= 35 mm
- ความยาวเกลียว (L)= 317.5 mm
- ความลึกของร่องเกลียว (H)= 3.5 mm
- Clearance=1 mm
- สกรูมีลักษณะเป็นเกลียว 2 ปาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

ในการศึกษาโครงการนี้มีความจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐาน พร้อมทั้งเข้าใจในทฤษฎี รวมถึงการศึกษาผลงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการทำการวิจัย ดังนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion Cooking)

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารประเภทขนมขบเคี้ยว (Snack) หรืออาหารเช้าธัญชาติ (Breakfast Cereal) ซึ่งเตรียมจากธัญชาติที่มีรูปร่างและกลิ่นรสที่แตกต่างกันมากมาย ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารเหล่านี้ผลิตจากการเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยบีบสกรู เพื่อทำหน้าที่อัดให้วัตถุดิบต่างๆที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเกิดเป็นมวลกึ่งแข็ง โดยอัดให้ผ่านช่องเล็ก ๆ ที่เรียกว่า ดาย (Die) ซึ่งอยู่ทางออกของปลายสกรู ถ้าอาหารได้รับความร้อนระหว่างกระบวนการด้วยจะเรียกว่า คุกกึ่งเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Cooking Extruder)

กระบวนการผลิตอาหารแบบเอ็กซ์ทรูชันเป็นการผลิตอาหารเพียงขั้นตอนเดียว โดยอาศัยสกรู (Screw) ซึ่งมีร่องเกลียว (Flight) หมุนอยู่ในท่อรูปทรงกระบอกที่เรียกว่า บาร์เรล (Barrel) ร่องเกลียวจะทำหน้าที่ลำเลียงอาหารเข้ามาในเครื่องและอัดผ่านรูหน้าแปลน ที่เป็นช่องเปิดให้อาหารไหลออกจากเครื่อง ในระหว่างที่อาหารถูกลำเลียงผ่านเครื่อง อาหารจะมีอุณหภูมิสูงถึง 120-150 องศาเซลเซียส เมื่ออาหารผ่านรูหน้าแปลนจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกอาหารอย่างมาก น้ำในอาหารจะระเหยอย่างรวดเร็วทำให้อาหารมีลักษณะพอง หรือสามารถควบคุมให้มีลักษณะอื่นได้ด้วยการลดอุณหภูมิก่อนออกจากรูหน้าแปลน โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือ สภาพวะการเดินเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ และคุณสมบัติทางรีโอโลยีของอาหาร ตัวแปรที่สำคัญที่สุดของการเดินเครื่อง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน เวลา และอัตราการเฉือน (Shear Rate) โดยมีอัตราการเฉือนขึ้นกับการออกแบบสกรูและความเร็วรอบของสกรู ส่วนคุณสมบัติของส่วนผสมที่ป้อนเข้าสู่เครื่องก็มีผลต่อลักษณะของเนื้อสัมผัสและสีของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหรือเอ็กซ์ทรูเดท (Extrudate) โดยคุณสมบัติที่สำคัญที่สุด ได้แก่ ความชื้น ขนาดของสาร และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งส่วนผสมที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักมักประกอบด้วยธัญชาติ แป้งและโปรตีนที่ได้จากพืช นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมที่เป็นวัตถุดิบรองอื่น ได้แก่ ไขมัน น้ำตาล เกลือ กรด หรือด่าง สารอิมัลซิไฟเออร์ สี และกลิ่น รวมทั้งน้ำที่เติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปเพื่อปรับส่วนผลสมให้มีความชื้นอยู่ในระดับ 10-40% เมื่อเอ็กซ์ทรูเดอร์ผ่านแม่พิมพ์ออกมาแล้วจะเกิดการขยายตัว โครงสร้างของเซลล์เปิด ซึ่งประกอบด้วยเซลล์แต่ละเซลล์ที่ถูกล้อมรอบด้วยเมมเบรน (Membrain) ของแป้งหรือโปรตีน ขนาดของเซลล์เหล่านี้จะควบคุมลักษณะเฉพาะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ คือ ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) โดยการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพหรือความเสียหายของส่วนผลสมที่เกิดขึ้น (Degree Of Deformation) โดยมีปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบเป็นอย่างมากต่อกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ได้แก่ เวลา อุณหภูมิ ความชื้นและอัตราการเจือ

2.1.1.1 ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

1. เวลา (Time)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีลักษณะเป็น Equilibrium Process ดังนั้นในการเปลี่ยนแปลงสถานะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ จึงต้องการเวลาในการปรับตัวให้เข้าสู่สมดุล ตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการนี้ตัวหนึ่ง คือ เวลาซึ่งผลิตภัณฑ์ถูกกระทำ หรือเรียกว่า Residence Time เป็นเวลาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโดยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและขนาดของอุปกรณ์ อธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Residence time} = T_r = \frac{V_f}{Q} \quad (1)$$

โดยที่ T_r = residence time in process (s)
 V_f = filled volume of process (m^3)
 Q = volumetric flow rate of product through the process (m^3/s)

2. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย เนื่องจากปฏิกิริยาหลักของกระบวนการนี้คือปฏิกิริยาการเกิดเจล (Gelatinization) โดยที่คุณสมบัติของกลีลิน ซี รวมทั้งเนื้อสัมผัส ล้วนเป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ทั้งสิ้น ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนไปคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะเปลี่ยนไปด้วย หากต้องการให้เกิดการพองตัวของผลิตภัณฑ์ จะต้องควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ เมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านแม่พิมพ์ (Die) แล้ว น้ำในอาหารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นไอ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์พองตัวคล้ายบอลูนที่ถูกเป่าลม เพื่อให้กระบวนการเป็นไปตามนี้ นอกจากจะต้องควบคุมอุณหภูมิแล้ว จำเป็นต้องควบคุมความดันให้สูงพอที่จะป้องกันไม่ให้น้ำเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอน้ำภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์อีกด้วย

3. ความชื้น (Moisture)

ความชื้นเป็นส่วนสำคัญในปฏิกิริยาการเกิดเจล (Gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งดูดความชื้นจะทำให้เกิดการพองตัว ถ้ามีอุณหภูมิที่สูงเพียงพอในการทำละลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล เม็ดแป้งจะพองตัวขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การพองตัวเช่นนี้จะทำให้สูญเสียการจัดเรียงตัว ถ้าให้ความร้อนต่อไปจะทำให้โครงสร้างภายในหลวมขึ้น ทำให้น้ำเข้าไปได้มากขึ้น ถ้ามีการกวนที่แรงเพียงพอ หรืออุณหภูมิสูงเพียงพอ กรานูล (Granule) ที่พองตัวเหล่านี้จะแยกออกจากกัน [ประเสริฐ สุทธิประสิทธิ์ และคณะ ,2543] หากความชื้นไม่สม่ำเสมอ จะทำให้ปฏิกิริยาการเกิดเจลในแต่ละส่วนของอาหารไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายไม่ได้คุณภาพตามต้องการ

4. อัตราการเฉือน (Shear Rate)

อัตราการเฉือนเป็นตัววัดค่าการผสมกันของวัตถุดิบว่าอยู่ในระดับใด (Mixing Intensity) โดยวัตถุจะสัมผัสกับบาร์เรล (Barrel) ที่อยู่กบที่และสกรูที่เคลื่อนที่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เลื่อนไหลจากกันและกัน โดยอัตราการเฉือนจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วที่เปลี่ยนไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta V}{h} = \frac{\pi DN}{h} \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{\gamma}$ = shear rate (1/s)
 ΔV = velocity change (m/s)
 h = distance (m)
 D = diameter (m)
 N = screw speed (rpm)

ดังนั้นอัตราการเฉือนจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู หรือลดความลึกของร่องเกลียว (Channel Depth)

นอกจากทำให้อาหารเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว อัตราการเฉือนยังส่งผลต่อปฏิกิริยาต่างๆ อีก กล่าวคือ หากมีความชื้นสูง อัตราการเฉือนจะช่วยให้ น้ำและแป้งสัมผัสกันได้เร็วขึ้น เม็ดแป้งจะสูญเสียสภาพโดยถูกทำลายทางกล (Mechanical Starch Granule Degradation) ในปฏิกิริยาการเกิดเจล (Gelatinization)

5. ความเร็วรอบของสกรู (Screw Speed)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะใช้ความเร็วรอบของสกรูที่เหมาะสม ซึ่งแตกต่างกัน หากต้องการให้พองมาก จะปรับความเร็วรอบที่ค่าสูง ความเร็วรอบนี้ไม่ส่งผลต่อค่าความชื้น แต่จะส่งผลต่อเวลา อุณหภูมิ และอัตราการเฉือน ดังนี้

5.1 เวลา (Time) ในสภาวะที่ความเร็วรอบของสกรูที่มีค่าสูง เป็นผลให้เวลากักพัก

(Residence Time) ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 อัตราการเฉือน (Shear Rate) ความเร็วรอบของสกรูที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น หากต้องการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของอาหาร เช่น การเกิด puffing ด้วยการเพิ่มแรงทางกล จึงสามารถปรับได้ด้วยการเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของสกรูได้ และเนื่องจากอาหารประเภทที่สนใจจัดอยู่ในกลุ่ม Shear Thinning หรือ Pseudo Plastic ดังนั้น ความหนืดของอาหารจึงลดลงในขณะที่ความเร็วรอบสูงขึ้น

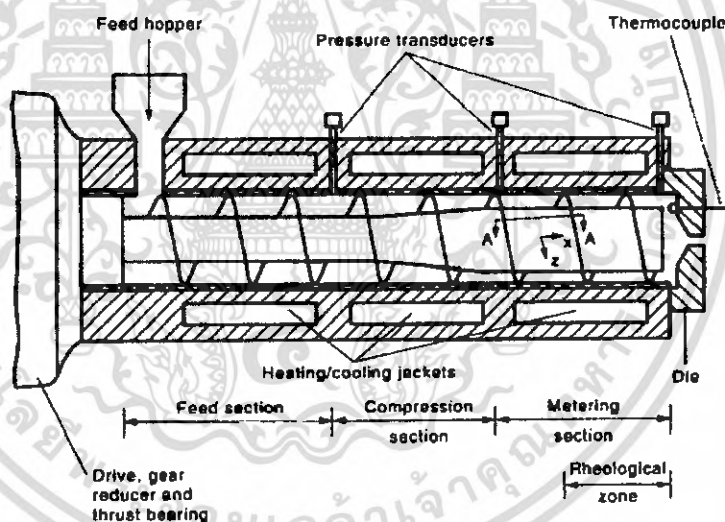
5.3 อุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลง (Temperature) หากค่าความหนืดลดลงและความเร็วรอบสูงมาก แต่โดยปกติที่ค่าความเร็วรอบที่ใช้กันทั่วไปจะทำให้อุณหภูมิมียังสูงขึ้น

2.1.1.2 ชนิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ชนิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิดสกรูเดี่ยว (Single-Screw Extruder)
2. ชนิดสกรูคู่ (Double-Screw Extruder)

แต่ในที่นี้ขอกล่าวถึงเพียงแบบสกรูเดี่ยว (Single-Screw Extruder) เพียงชนิดเดียวเท่านั้น



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

ที่มา : C. Mercier , P. Linko and J.M. Harper

รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single – Screw Extruder) โดยมีส่วนของ Precondition ทำหน้าที่เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เพื่อเพิ่มระยะเวลา (Residence Time) และลดค่า Mechanical Power Consumption โดยวัตถุดิบจะถูกเพิ่มความชื้นหรือถูกให้ความร้อน หรือทั้งสองอย่าง โดยที่น้ำหรือไอน้ำก่อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ส่วนภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ประกอบด้วยสกรู ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงวัตถุดิบที่ป้อนเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาและอัดให้เกิดการรวมตัวจนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไป จากนั้นจึงอัดผ่านช่องเล็กๆที่หน้าแปลน สกรูแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- Feed Section เป็นสกรูส่วนแรกที่ทำหน้าที่ลำเลียงวัตถุดิบที่ป้อนเข้ามา โดยทั่วไปจะยาวประมาณ 25%ของความยาวทั้งหมดของสกรู และมีความลึกของร่องเกลียวมากกว่าส่วนอื่น

-Compression Section หรือ Transition Section เป็นสกรูช่วงกลาง ทำหน้าที่เพิ่มแรงอัดให้กับอาหาร โดยการลดลงของระยะพิทช์ (Pitch) ของสกรู ซึ่งวัตถุดิบจะได้รับความร้อนและรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน สกรูในช่วงนี้จะยาวประมาณครึ่งหนึ่งของสกรูทั้งหมด

-Metering Section เป็นส่วนปลายของสกรู โดยความลึกของร่องเกลียวจะน้อยกว่าส่วนอื่นๆมาก จึงทำให้เกิดแรงกระทำต่ออาหารสูงสุด เกิดการคายพลังงานไปสู่อาหาร ทำให้ความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.1.2 ไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume)

วัตถุประสงค์หลักของบทนี้คือการสร้างกฎพื้นฐานโดยใช้สมการทางฟิสิกส์ของการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งประกอบด้วยกฎการอนุรักษ์มวล ได้สมการที่เรียกว่า สมการความต่อเนื่อง กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม นำไปสู่สมการนาเวียร์-สโตกส์ และสมการอนุรักษ์พลังงานความร้อนนำไปสู่สมการพลังงาน

2.1.2.1 สมมติฐานของการมีสภาพต่อเนื่อง

ของไหลเป็นสสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมากจับตัวกันอย่างหลวมๆ สามารถเสียรูปได้อย่างต่อเนื่องเมื่อมีความเค้นเฉือนมากระทำ ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมของไหล สมมติให้ของไหลนั้นมีคุณสมบัติต่างๆอยู่ในสถานะต่อเนื่องกันทั้งหมด นั่นคือไม่พิจารณาอนุภาคของไหลถึงระดับโครงสร้างและช่องว่างระหว่างโมเลกุล เพราะขนาดของช่องว่างระหว่างโมเลกุลทำให้ค่าคุณสมบัติของอนุภาคของไหลที่พิจารณามีค่าไม่ต่อเนื่อง แต่มองอนุภาคของไหลในระดับที่ใหญ่ขึ้น(มีค่าตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรขึ้นไป) นั่นคืออนุภาคของไหลที่พิจารณาประกอบด้วยโมเลกุลหลายๆโมเลกุลรวมกัน โดยที่ขนาดของอนุภาคที่พิจารณาน้อยมากเมื่อเทียบกับระบบที่สนใจ แต่มีขนาดใหญ่พอเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างโมเลกุล ทำให้สามารถนำทฤษฎีทางกลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้กับค่าคุณสมบัติของสารที่มีสภาพต่อเนื่องนี้ได้

2.1.2.2 กรอบอ้างอิงแบบออยเลอร์เรียนและแบบลากรางเกียน

กรอบอ้างอิงที่ใช้ในการสร้างกฎการอนุรักษ์นั้นมี 2 ระบบพิกัดพื้นฐานที่เราสามารถนำมาใช้นั้นคือ พิกัดลากรางเกียน (Lagrangian) และพิกัดออยเลอร์เรียน (Eulerian)

ในกรอบอ้างอิงแบบลากรางเกียน (Lagrangian) เป็นการอธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคของ ของไหลโดยการติดตามอนุภาคแต่ละตัวไป โดยค่าคุณสมบัติต่างๆของอนุภาคของของไหลแต่ละอนุภาคเป็นฟังก์ชันกับเวลาและพิกัดของตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งเหมาะกับการอธิบาย

ทางกลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับมวลที่มีจำนวนแน่นอน และอยู่ในรูปของระบบ กรอบอ้างอิงอีกแบบหนึ่งคือ แบบออยเลอร์เรียน (Eulerian) ซึ่งกรอบอ้างอิงแบบนี้ใช้อธิบายคุณสมบัติต่างๆของอนุภาคของของไหล เป็นฟังก์ชันกับตำแหน่ง และเวลาในลักษณะของสนาม การอธิบายลักษณะนี้บอกคุณสมบัติของอนุภาคของของไหลที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุมที่ตรึงอยู่กับที่ เมื่อเวลาผ่านไปจะอธิบายคุณสมบัติของอนุภาคตัวใหม่ที่ผ่านมายังตำแหน่งที่กำหนด ซึ่งนิยมนำมาวิเคราะห์ของไหลที่เกิดการไหล

2.1.2.3 ปริมาตรควบคุม

แนวคิดของปริมาตรควบคุมใช้พิสูจน์การได้มาของกฎการอนุรักษ์พื้นฐาน ไม่ว่าจะเป็นกรอบอ้างอิงแบบใด มี 2 ปริมาตรหลักให้เลือกใช้ ชนิดแรกคือ ปริมาตรควบคุมที่มีด้านขนานกัน ซึ่งแต่ละด้านยาว Δx_1 , Δx_2 และ Δx_3 แต่ละสมบัติของการไหล เช่น ความเร็ว ความดัน ใช้ออนุกรมเทย์เลอร์กระจายค่าคุณสมบัติการไหลรอบๆจุดศูนย์กลางของปริมาตรควบคุม เพื่อใช้แสดงค่าสมบัติการไหลที่ผิวแต่ละด้านของปริมาตรควบคุม และเมื่อเกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์ กำหนดให้ Δx_1 , Δx_2 และ $\Delta x_3 \rightarrow 0$ ได้สมการอนุพันธ์สำหรับการอนุรักษ์ และเพื่อความกระชับ จะใช้เพียงพจน์แรกของอนุกรมเทย์เลอร์

แบบที่ 2 ของปริมาตรควบคุมคือ ปริมาตรควบคุมที่มีรูปร่างใดๆที่ใช้กับหลักการอนุรักษ์ โดยการอินทิเกรตเหนือปริมาตรควบคุม ยกตัวอย่าง เช่น มวลในปริมาตรควบคุม คือ $\int_V \rho dV$ เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล และการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตร V ของของไหลที่บรรจุอยู่ในปริมาตรควบคุม ผลของการใช้กับแต่ละกฎของการอนุรักษ์ได้สมการอินทิเกรต - อนุพันธ์ ซึ่งเป็นสมการในรูปของ

$$\int_V \{L\alpha\} dV = 0 \quad (3)$$

เมื่อ L คือตัวดำเนินการอนุพันธ์ (Differential Operation) และ α คือคุณสมบัติบางตัวของของไหล เมื่อปริมาตร V เป็นรูปทรงใดๆ ที่เลือกด้วยวิธีการนี้สามารถกำหนดให้ $L\alpha = 0$ ซึ่งได้สมการอนุพันธ์ของกฎการอนุรักษ์ ปริมาตรควบคุมแต่ละชนิดมีข้อดี และในที่นี้ การเลือกใช้แต่ละจุดขึ้นอยู่กับว่า แบบใดให้มุมมองทางกายภาพได้ดีกว่า

2.1.2.4 สมการอนุรักษ์มวล

ถ้าพิจารณาก่อนมวลจำเพาะของของไหลที่มีปริมาตร V ใดๆ ถ้าให้มวลของของไหลนี้ไหลไปกับการไหล สังเกตได้ว่าขนาดและรูปร่างมีการเปลี่ยนแปลง แต่มวลยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งนี่คือหลักการของกฎการอนุรักษ์มวล ใช้กับของไหลซึ่งไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น สมการทางคณิตศาสตร์ของกฎการอนุรักษ์มวลในอนุพันธ์ลากรางเกียน D/Dt ของมวลของของไหลที่มีปริมาตร V ซึ่งก็คือ $\int_V \rho dV$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการที่แสดงการอนุรักษ์มวล คือ

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho dV = 0 \quad (4)$$

กรณีนี้ สมบัติของการไหลคือ ความหนาแน่นของมวล ρ จะได้

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) \right] dV = 0 \quad (5)$$

เมื่อปริมาตร V เป็นปริมาตรใดๆที่เลือก มีทางเดียวที่เป็นไปได้คือ พจน์ที่อินทิเกรตจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ สมการแสดงกฎการอนุรักษ์มวลสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \quad (6)$$

จากสมการที่ 6 แสดงถึงความจริงที่ว่า มวลมีการอนุรักษ์ ซึ่งสมการนี้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ซึ่งบอกเป็นนัยว่าความเร็วมีความต่อเนื่อง โดยทั่วไปมักเรียกสมการนี้ว่า สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

ในกรณีที่การไหลของของไหลไม่พิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น เช่น กรณีการไหลของของเหลว ซึ่งการไหลลักษณะนี้เรียกว่า การไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) ในทางคณิตศาสตร์ สถานะนี้สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (7)$$

2.1.2.5 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเป็นการประยุกต์ใช้กฎข้อที่ 2 ของนิวตันต่อก้อนของของไหลเล็กๆ นั่นคือ เมื่อพิจารณาก้อนมวลของของไหลในกรอบอ้างอิงลากวางเกยในสถานะที่อัตรา การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของมวลของของไหล มีค่าเท่ากับ แรงภายนอกสุทธิที่กระทำต่อก้อนมวลนั้นแรงภายนอกที่กระทำต่อก้อนมวลของของไหล สามารถพิจารณาแบ่งได้เป็น แรงวัตถุ (Body Force) ซึ่งเป็นแรงที่กระทำโดยสนามภายนอก (สนามความโน้มถ่วงของโลก สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามความต่างศักย์ไฟฟ้า) ต่อปริมาตรของของไหลทั้งก้อน และแรงดังกล่าวนี้ กระทำกระจายไปทั่วทั้งปริมาตรของของไหล เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งคือน้ำหนักของของไหลนั่นเอง และแรงภายนอกอีกชนิดหนึ่งก็คือ แรงผิว (Surface Force) ซึ่งเป็นแรงที่มีการสัมผัสทางกายภาพเกิดขึ้นที่ผิวของของไหล เช่น แรงดัน หรือความเค้นอันเนื่องมาจากความหนืด ถ้ากำหนดให้ \vec{f} เป็นเวกเตอร์ซึ่งแสดงผลลัพธ์ของแรงวัตถุต่อหนึ่งหน่วยมวล แรงวัตถุภายนอกสุทธิที่กระทำบนมวลปริมาตร V จะเป็น $\int_V \rho \vec{f} dV$ และกำหนดให้ \vec{p} เป็นเวกเตอร์ของแรงที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยมวลพื้นที่ ดังนั้นแรงสุทธิที่ผิวที่กระทำบนพื้นผิว s ทั้งหมดของปริมาตร V คือ $\int_V \rho \vec{p} dS$

มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ ρ และโมเมนตัมของก้อนมวลคือ $\rho \vec{u}$ ดังนั้นโมเมนตัมของปริมาตร V คือ $\int_V \rho \vec{u} dV$ ถ้ามวลของปริมาตรที่ควบคุมใดๆ ถูกควบคุมบนกรอบควบคุมแบบ

ลากวางเกียน อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของก้อนมวลที่อยู่ในปริมาตร V คือ $\frac{D}{Dt} \int_V \rho \vec{u} dV$

ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ของสมการอนุรักษ์โมเมนตัมคือ $\frac{D}{Dt} \int_V \rho \vec{u} dV = \int_S \rho \vec{v} dS + \int_V \rho \vec{f} dV$

โดยทั่วไปมี 9 องค์ประกอบย่อยของความเค้นที่จุดใดๆ ในของไหล ซึ่งมีองค์ประกอบตั้งฉากและ 2 องค์ประกอบเฉือนบนแต่ละระนาบโคออร์ดิเนต ทั้ง 9 องค์ประกอบย่อยของความเค้นนี้ อธิบายโดยใช้ก้อนลูกบาศก์ ซึ่งแต่ละด้านของลูกบาศก์ตั้งฉากกับพิคตคาร์ทีเซียน x, y, z แสดงโดย x_1, x_2 และ x_3 ตามลำดับขององค์ประกอบย่อยของความเค้นระบุโดยสัญลักษณ์แบบ 2 ตัวห้อย คือ σ_{ij} ซึ่งตัวห้อยแรก (i) แสดงถึงองค์ประกอบย่อยของความเค้นที่กระทำบนระนาบ $x_i \equiv$ คงที่ และตัวห้อยที่ 2 แสดงถึงความเค้นกระทำในทิศทาง x_j

บนพื้นผิวปริมาตรควบคุม สังเกตได้ว่า มีเวกเตอร์ของแรงที่แต่ละจุด และแรงนี้สามารถแสดงโดย \vec{p} เวกเตอร์ของแรงที่ผิว \vec{p} สัมพันธ์กับเทนเซอร์ความเค้น σ_{ij} ตามสมการ $p_j = \sigma_{ij} n_i$ ซึ่ง i เป็นตัวห้อยที่ซ้ำกัน 2 ครั้ง หมายถึงการบวกจาก 1 ถึง 3 ดังนั้นสัญลักษณ์เทนเซอร์ของสมการที่แสดงการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho u_j dV = \int_S \sigma_{ij} n_i dS + \int_V \rho f_j dV \quad (8)$$

ทางซ้ายมือของสมการนี้สามารถเปลี่ยนไปสู่การอินทิเกรตปริมาตร ได้ดังนี้

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_j u_k) \right] dV = \int_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} dV + \int_V \rho f_j dV \quad (9)$$

ทางด้านซ้ายสามารถกระจายได้โดย

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (10)$$

พจน์ที่ 2 และ 3 ทางด้านซ้ายมือของสมการที่ 10 มีผลรวมเป็นศูนย์ตามสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นสมการแสดงการอนุรักษ์โมเมนตัม จึงกลายเป็น

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (11)$$

ทางด้านซ้ายมือของเครื่องหมายเท่ากับ แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของไหล โดยพจน์แรกเป็นความเร่งที่ขึ้นกับเวลา พจน์ที่ 2 คือความเร่งโดยการพา สังเกตว่าพจน์ที่ 2 นี้มีความไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อความเร็วปรากฏ 2 ครั้งใน 1 พจน์ ทางด้านขวาของสมการแสดงถึงแรงที่เป็นสาเหตุให้เกิดความเร่ง ซึ่งแรงทางด้านมือเป็นแรงเนื่องจาก

เกรเดียนต์ของความเค้นเฉือนที่ผิว ในขณะที่พจน์ที่ 2 คือแรงวัตถุ เช่นแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อก่อนมวลของของไหล

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะมีการวิเคราะห์การเอ็กซ์ทรูชันอาหารโดยการสร้างแบบจำลองซึ่งมีซอฟต์แวร์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้มีผู้ใช้วิธีดังกล่าวในการวิเคราะห์ปัญหาอื่นๆที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวกับอาหาร

สมชาย แยมใส (2548) ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปโลหะก่อนโดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORM2D เป็นเครื่องมือในการแก้สมการ ในการแก้ปัญหาของงานวิจัยนี้ได้เลือกกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนในการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของวัสดุเชิงประกอบที่มีโลหะเป็นเนื้อหลักซึ่งถูกเสริมความแข็งแรงแบบอนุภาค โดยเนื้อวัสดุหลักคืออลูมิเนียม เกรด 6061 และสารเสริมความแข็งแรงแบบอนุภาคคือ อลูมินา (Al_2O_3) ที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรที่ร้อยละ 10 และร้อยละ 20 และเนื้อวัสดุที่ไม่ได้เสริมความแข็งแรงแบบอนุภาค โดยมีติของชั้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30.48 มิลลิเมตร และความยาว 50.8 มิลลิเมตร โดยอุณหภูมิที่ขึ้นงานเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส และมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง โดยแบบจำลองดังกล่าวนี้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปถูกกำหนดให้อยู่ในสภาวะแข็งเกร็งโดยไม่มี การเปลี่ยนรูปภายใต้กระบวนการอัดขึ้นรูป แห่งบิลเลทถูกพิจารณาว่าเกิดการเสียรูปแบบดาวในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความแปรผันของปัจจัยที่สำคัญคือ ค่าสัดส่วนลดทอนพื้นที่หน้าตัด มุมเอียงของแม่พิมพ์และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยกำหนดค่าที่ต้องการวิเคราะห์คือ อัตราส่วนการลดทอนพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 40 ที่ร้อยละ 60 และที่ร้อยละ 75 มุมเอียงของแม่พิมพ์ที่ขนาดมุม 30 ,60 และ 90 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวแม่พิมพ์กับชิ้นงาน เท่ากับ 0.3 จากการทดลองพบว่าการเสริมสร้างความแข็งแรงแบบอนุภาคจะมีผลต่อการอัดขึ้นรูปของวัสดุ โดยอลูมิเนียมที่เสริมความแข็งแรงของอลูมินาที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรที่ร้อยละ 20 ให้แรงอัดขึ้นรูปมากกว่าอลูมิเนียมที่เสริมความแข็งแรงของอลูมินา ที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรร้อยละ 10 และอลูมิเนียมที่ไม่ได้เสริมความแข็งแรงแบบอนุภาคตามลำดับ และผลของการลดอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดมากๆ จะทำให้แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปมากขึ้นด้วย

อาทิศย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว (2545) และคณะได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่งโดยใช้ซอฟต์แวร์ฟลูเอนท์ในการจำลองแบบตัวเลข คุณสมบัติของอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์เปลี่ยนแปลงตามรูปลักษณะ เนื่องจากรูปทรงภายนอกเป็นแหล่งกำเนิด หลักของการไหล ส่งผลให้เกิดแรงและโมเมนต์กระทำกับตัวรถ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอากาศพลศาสตร์ด้วยการจำลองเชิงตัวเลขของการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสองกรณี ประกอบด้วย การศึกษาระยะห่างระหว่างพื้นถนนกับพื้นรถ และมุมลาดเอียงขึ้นของพื้นด้านท้ายรถ จำลองขนาด 1/5 เท่าของรถยนต์จริง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบกลไกการลดแรงต้าน แรงยกและและการเปลี่ยนรูปแบบของสนามการไหลด้านท้ายรถ ซึ่งการวิจัยปรากฏว่า ผลของความสูงระหว่างพื้นรถกับพื้นถนนและผลของความลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถ จะได้ว่าระยะความสูงระหว่างพื้นรถกับพื้นถนนที่น้อยลงและความลาดเอียงของท้ายรถที่มีมากขึ้น ควรนำมาใช้ในการออกแบบรถยนต์เพื่อให้มีสถานะทางอากาศพลศาสตร์ที่ดี

Raman V. และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาการเอ็กซ์ทรูชันแป็ง โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single- Screw Extruder) ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Study) ในสภาวะระดับความชื้นต่ำและอุณหภูมิสูง โดยการศึกษารีโวลยี (Rheology) ของอาหารในช่วงสุดท้ายของสกรู ซึ่งแป็งจะประพฤติตัวเป็นของไหลชนิด Non-Newtonian โดยใช้วิธี Finite Different Approximate โดยมี 3 สมการ คือ สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านเคมีและกายภาพ ซึ่งเงื่อนไขเริ่มต้นใช้ค่าที่ได้จากการสังเกตผลการทดลองและเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆของสกรูและตัวแปร เช่น อุณหภูมิของบาร์เรล (Barrel Temperature) ความเร็วรอบของสกรูและผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Throughput) เพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของแป็ง ในการศึกษาพบว่าการกระจายของความหนืด (Viscous Dissipation) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแป็ง 28 % ในขณะที่อีก 6 % คือ ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิของบาร์เรลที่แต่ละความเร็วรอบของสกรู ค่าอัตราการไหล (Flow Rate) ลดลงเนื่องจากการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่หน้าแป็ง ซึ่งทำให้ระดับของการเปลี่ยนแปลง (Degree Of Conversion) มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ สัดส่วนการอัดของสกรู (Compression Ratio Of Screw) ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความดันการเพิ่มขึ้นของ Bulk Temperature และการลดลงของเวลากักพักเฉลี่ย (Average Residence Time)

F.Edi – Soetaredjo (2003) และคณะได้ทำการศึกษาลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Product Characteristics) เช่น Extend Of Cook การยืดตัว (Expansion) และคุณสมบัติทางรีโวลยี (Rheology Properties) โดยศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการออกแบบแม่พิมพ์ (die) เป็นหลัก ซึ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์ต่างๆ นี้มีผลมาจากรูปแบบและเวลาในการเคลื่อนที่ภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) ในการทดลองได้ใช้การออกแบบของ Vergnes et al (1993, Rheological Auto ,32 : 465-476) โดยมีเครื่องรีโวลมิเตอร์ (Rheometer) แบบออนไลน์เพื่อทำการเก็บข้อมูลของ Rheological date ของการละลายของแป็งในแต่ละสภาวะที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลอง เพื่อเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Simulation) ซึ่งจะช่วยให้มีความเข้าใจใน Velocity Profile ของการละลายของแป็งในบาร์เรล และการกระจายของเวลากักพัก (Residence Time Distribution : RTD) ที่แม่พิมพ์ได้ดีขึ้น โดยความรู้ที่ได้ทั้งหมดสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้ในการตัดสินใจ (Optimization) ในการเลือกแม่พิมพ์ รวมทั้งออกแบบแม่พิมพ์ได้ในกรณีที่ไม่สามารถทดลองได้

Antonio และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษากระบวนการเอ็กซ์ทรูชันธัญพืช (Cereal) ด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่ (Double-Screw Extruder) แบบไหลย้อนกลับ (Co-Rotating) โดยการปรับค่าอุณหภูมิ ความเร็วรอบสกรู อัตราการไหลเชิงมวลและลักษณะของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder Geometry) เพื่อนำมาประเมินค่าตัวแปร (Fluid – Dynamic Parameter) ต่าง ๆ เช่น อัตราเฉือน (Shear Rate) เวลาพัก (Residence Time) และ ความสามารถในการผสม (Mixing Index) โดยพบว่ารูปแบบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เป็นตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการ เนื่องจากจะส่งผลต่อค่าอัตราเฉือน (Shear Rate) เวลาพัก (Residence Time) และคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Final Product) โดยสกรูลักษณะปกติจะทำให้ค่าของอัตราเฉือน (Shear Rate) มีความใกล้เคียงกันตลอดความยาวของสกรู แต่เนื่องจากค่าที่น้อยกว่าของอัตราเฉือน (Shear Rate) จึงส่งผลให้เกิดเจล (Gelatinization) ของส่วนประกอบมีค่าน้อยตามไปด้วย ในทางตรงกันข้าม สกรูที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน เช่น Reverse Screw จะทำให้เกิดอัตราเฉือน (Shear Rate) ที่สูงกว่า แต่มีความยากในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายเนื่องจากมีความแปรปรวนของค่าอัตราเฉือน (Shear Rate) มากกว่า

Antonio และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาต่อจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นโดยทำการศึกษากระบวนการเอ็กซ์ทรูชันของธัญพืช ด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (Double-Screw Extruder) ชนิด ไหลย้อนกลับ (Co-Rotating) ด้วย ANOVA (Analysis Of Variance) โดยใช้การจำลองของการเคลื่อนที่ของไหลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Fluid – Dynamic Simulation Mode) เพื่อศึกษาอัตราเฉือน (Shear Rate) เวลาพัก (Residence Time) และความสามารถในการผสม (Mixing Index) ภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยการปรับค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ คือ อุณหภูมิ ความเร็วรอบของสกรู อัตราการไหลและรูปแบบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder Geometry) ซึ่งพบว่าความเร็วรอบของสกรูและอัตราส่วนแกน (Screw Axis Ratio) ที่เปลี่ยนไปจะส่งผลต่อค่าอัตราเฉือน (Shear Rate) มากกว่าอุณหภูมิและอัตราการไหล และ อัตราการไหลและอัตราส่วนแกน (Screw Axis Ratio) ที่เปลี่ยนไปยังส่งผลต่อค่าเวลาพัก (residence time) มากกว่าความเร็วรอบและอุณหภูมิ

Kumar M. และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษา Scale-Up Of Mixing และการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single-Screw Extruder) ด้วยวิธี Non-Isothermal numerical simulations โดยใช้แบบจำลองของ Mackey และ Ofoli สำหรับข้าวสาลีที่มีความชื้นต่ำถึงปานกลางในช่วง Metering Zone โดยแบบจำลองนี้ได้อธิบายถึงการกระจายของความหนืด (viscous dissipation) และลักษณะการไหลในแบบ 3 มิติ ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการได้เลือกใช้ค่าการกระจายเวลากักพัก (Residence Time Distribution : RTD) ใน การศึกษา Scale-Up ของการผลิตและได้เลือกใช้ Specific Mechanical Energy (SME) สำหรับ การศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยอ้างอิงจาก Rauwendaal (Polymer Extrusion, Hansen publisher, New York, 1986) ในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ของแบบสกรู เช่น Helix Angle, Channel Depth, Screw Diameter To Channel Depth Rate, Screw Length To Screw Diameter Ratio และ Clearance ระหว่าง Screw Flight และ บาร์เรล (Barrel) โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง RTD หรือ SME กับตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ ด้วย การทำการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Simulation)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการดำเนินโครงการเพื่อหาผลของรูปแบบสกรู ได้แก่ ระยะพิทช์ (Pitch) ความลึกร่องเกลียว (Channel Depth) และความเร็วรอบสกรู (Screw Rotation) ที่มีต่อความดันในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ความเร็ว อัตราการเข็้นและแรงบิด คำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD การสร้างแบบจำลองในระยะเริ่มแรกใช้รูปแบบสกรูจากภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อตรวจสอบผลการคำนวณจากแบบจำลองกับผลจากการทดลอง หลังจากนั้นจึงใช้แบบจำลองที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. โปรแกรม Computer Aided Design
3. โปรแกรมสำเร็จรูป CFD
4. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์
5. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer)
6. เทอร์โมมิเตอร์
7. เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาลักษณะของสกรูที่มีผลต่อกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ซึ่งตัวแปรต้นที่ทำการศึกษาได้แก่

1. ระยะพิทช์ (Pitch)
2. ความลึกของร่องเกลียว (Channel Depth)
3. ความเร็วรอบของสกรู (Screw Speed)

ในการทดลองนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยตอนที่ 1 และ 2 ใช้สกรูที่มีขนาดและลักษณะเหมือนกันกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ของภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีขนาดดังนี้

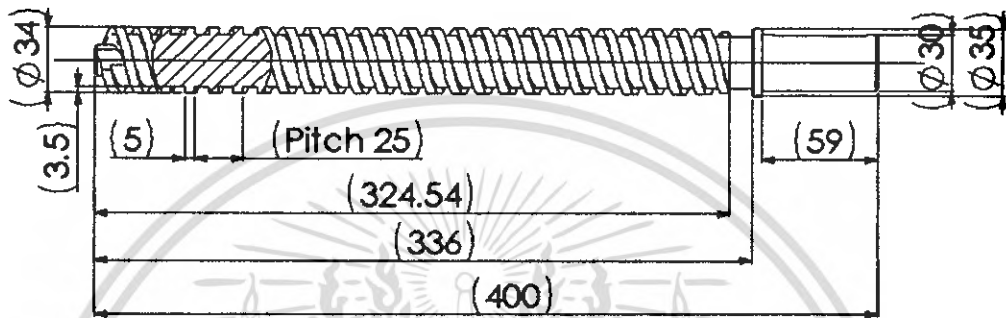
ระยะพิทช์ = 25 mm

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน(d) = 28 mm

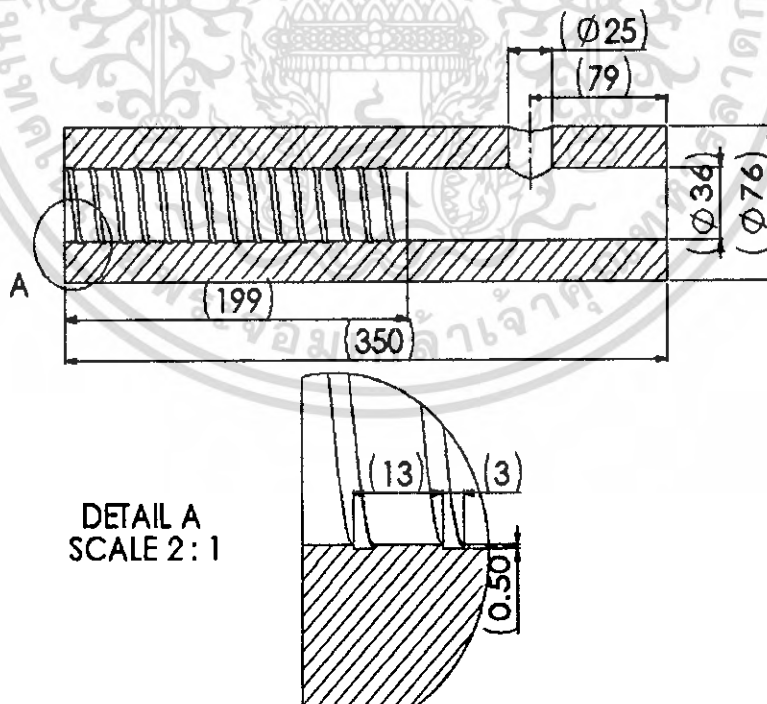
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก(D) = 35 mm
 ความยาวเกลียว (L) = 317.5 mm
 ความลึกของร่องเกลียว (H) = 3.5 mm
 Clearance = 1 mm

รูปร่างและขนาดของสกรูแสดงดังรูปที่ 3.1-3.3

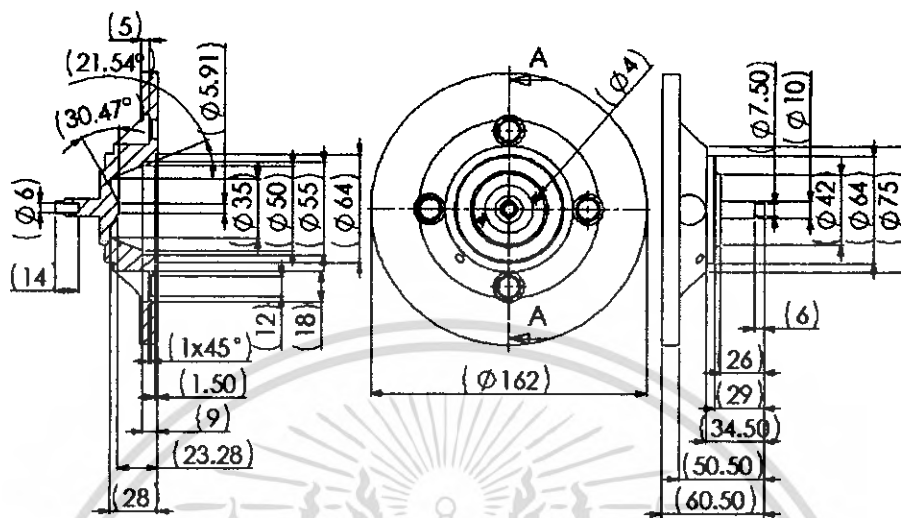


รูปที่ 3.1 แสดงแบบของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ใช้ในการทดลองและจำลองกระบวนการ

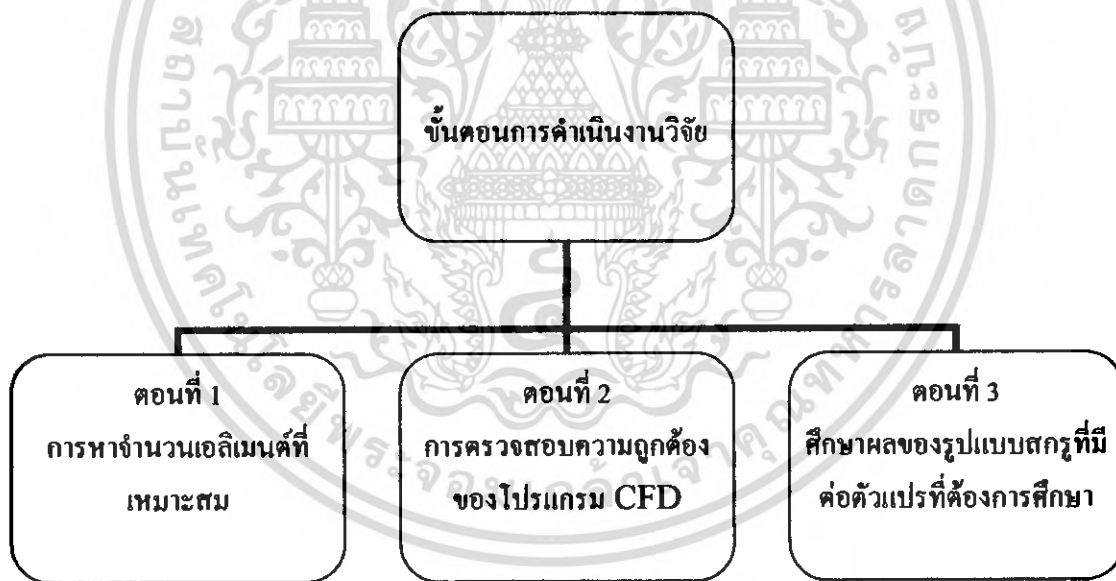


รูปที่ 3.2 แสดงแบบบาเรลของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ใช้ในการทดลองและจำลองกระบวนการ

SECTION A-A
SCALE 1 : 2



รูปที่ 3.3 แสดงแบบหน้าแปลนของเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ใช้ในการทดลองและจำลองกระบวนการ



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

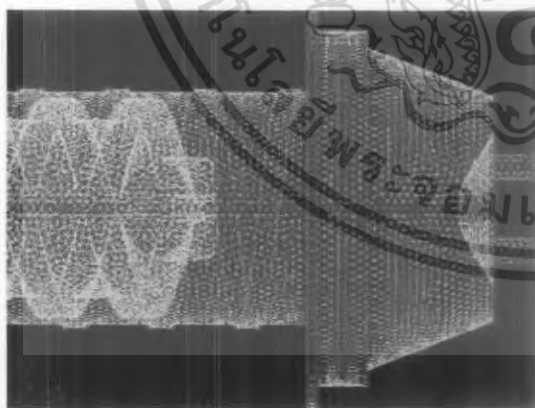
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



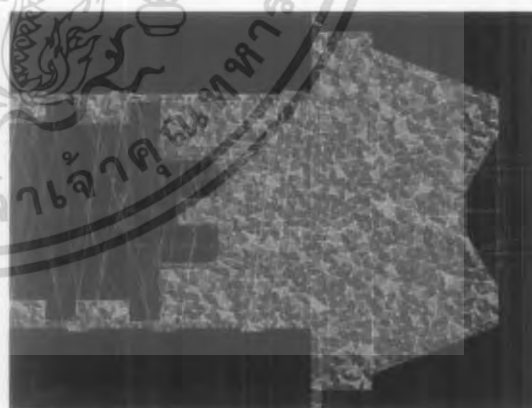
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนกริดต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง (Grid Independent)

1.1 นำแบบจำลองของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ที่เขียนโดยโปรแกรม CAD มาทำการแบ่งกริด กำหนดความแตกต่างของจำนวนกริดที่ใช้โดยเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge เป็น 240, 260, 280, 300, 350, 400, 450 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 3.6-3.13

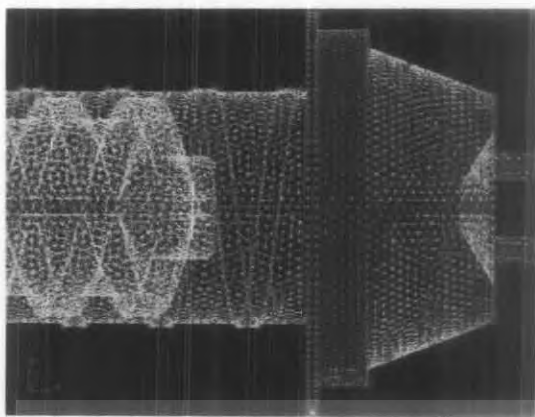


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะกริดภายนอกเนื้อของ วัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge เท่ากับ 240

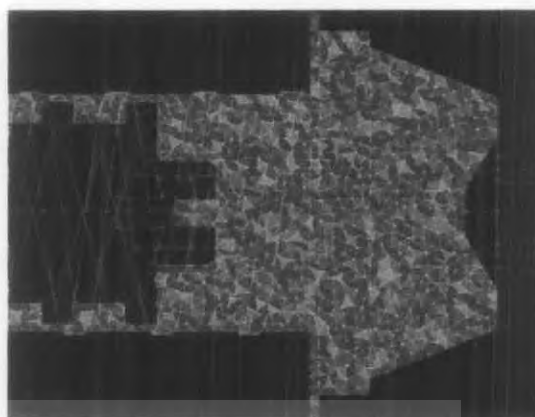


รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะกริดภายในเนื้อของ วัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge เท่ากับ 240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะกิริตภายนอกเนื้อของ
วัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge
เท่ากับ 260



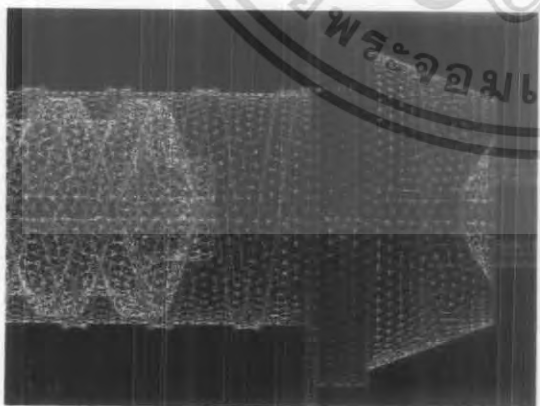
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะกิริตภายในเนื้อของ
วัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge
เท่ากับ 260



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะกิริตภายนอกเนื้อของ
วัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge
เท่ากับ 300



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะกิริตภายในเนื้อของ
วัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge
เท่ากับ 300



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะกิริตภายนอกเนื้อของ
วัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge
เท่ากับ 350



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะกิริตภายในเนื้อของ
วัสดุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ shortest edge
เท่ากับ 350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 นำแบบจำลองที่ได้จากข้อ 1.1 มาทำการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทราซัน โดยใช้ น้ำ เป็นวัตถุติบ ความเร็วรอบ 500rpm เก็บค่า ความดันสัมบูรณ์ ความเร็ว อัตราการเฉือน แรงบิด

1.3 นำผลลัพธ์จากการจำลองกระบวนการมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างผลลัพธ์ ที่ได้กับระยะทางในแนวแกนเอ็กซ์

1.4 สังเกตความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละจำนวนกริด เลือกจำนวนกริดที่น้อย ที่สุดที่ทำให้ผลลัพธ์เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเพื่อใช้ในการทดลอง

ตอนที่ 2 การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD จำลองการเอ็กซ์ทราซันเพื่อทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม

2.1 หาค่าแรงบิด (Torque) จากการทดลอง

2.1.1) ทดลองเอ็กซ์ทราซันโดยใช้น้ำเป็นวัตถุติบ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ใช้ ค่าความเร็วรอบสกรู 0 ,103 ,207 ,312 และ 416 รอบต่อนาที ตามลำดับ

2.1.2) วัดค่า แรงบิด ที่ปรากฏบนจอแสดงผลของเครื่องเอ็กซ์ทราซัน และวัด ค่าอัตราการไหลที่แต่ละความเร็วรอบของสกรู บันทึกผล

โดยที่ ค่าแรงบิดที่แสดงบนจอแสดงผลของเครื่องเอ็กซ์ทราซันนั้นอยู่ในรูปของ เปอร์เซ็นต์แรงบิด สามารถคำนวณหาค่าแรงบิดจริงได้จากการเทียบกับค่าแรงบิดสูงสุดที่ มอเตอร์สามารถสร้างได้จากสมการ Nominal Torque ของมอเตอร์ ดังสมการที่ 12

$$\Gamma = 9550 \times \frac{P}{n} \quad (12)$$

โดยที่ Γ = Torque (Nm)

P = Mechanical motor (kW)

n = Maximum motor speed (rpm)

2.2 หาค่าแรงบิด (Torque) จากการจำลองกระบวนการ (Simulation)

2.2.1) จำลองกระบวนการเอ็กซ์ทราซันโดยใช้น้ำที่สถานะเดียวกันเป็นวัตถุติบ

2.2.2) วัดค่าแรงบิดที่ได้จากการจำลอง แล้วนำค่าที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ แนวโน้มเพื่อยืนยันความถูกต้องของโปรแกรม CFD ที่เลือกใช้

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร

3.1 กำหนดสภาวะในการเอ็กซ์ทรูชันซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเอ็กซ์ทรูชัน

3.1.1) วัสดุดิบที่ศึกษา คือ น้ำ (Water Liquid)

3.1.2) คุณสมบัติของวัสดุดิบ

ค่าความหนืด 0.001003 kg/m-s

อุณหภูมิเริ่มต้น 25 °c

ความหนาแน่น 998.2 kg/m³

3.1.3) สภาวะที่ใช้จำลองการเอ็กซ์ทรูชัน

- กำหนดให้วัสดุที่ใช้ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดเนื้อของวัสดุ (Isothermal) และ ไม่มีการป้อนความร้อนให้แก่กระบวนการ (จำลองที่อุณหภูมิห้อง)

- กำหนดให้การไหลไม่เกิดการไหล (No Slip)

3.2 กำหนดลักษณะสกรูที่ต้องการศึกษา

ในการทดลองได้นำเอาสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเตอร์ของภาควิชาวิศวกรรมอาหารมาเป็นต้นแบบ โดยทำการปรับค่าต่างที่ต้องการศึกษา ได้แก่

1. ระยะพิทช์ (Pitch)
2. ความลึกของร่องเกลียว (Channel Depth)
3. ความเร็วรอบของสกรู (Screw Speed)

โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรดังกล่าว ตัวแปรละ 3 ค่า ทำให้ได้จำนวนการจำลองการเอ็กซ์ทรูชันทั้งหมด 27 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงกรณีการศึกษามลของการปรับค่าตัวแปรที่สนใจ

Pitch (mm)	Channel depth (mm)	Screw speed (rpm)
22	2.75	100
		200
		300
	3.5	100
		200
		300
	4.25	100
		200
		300
25	2.75	100
		200
		300
	3.5	100
		200
		300
	4.25	100
		200
		300
28	2.75	100
		200
		300
	3.5	100
		200
		300
	4.75	100
		200
		300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการจำลองกระบวนการ

3.3.1) ออกแบบสกรู 3 มิติ โดยการยึดลักษณะสกรูเดิมที่ใช้ในเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ของภาควิชาวิศวกรรมอาหาร แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าระยะพิทช์ (Pitch) และ ความลึกของร่องเกลียว (Channel Depth) ดังตารางที่ 3.1 โดยแสดงแบบสกรูในภาคผนวก ข.

3.3.2) จำลอง (Simulation) กระบวนการเอ็กซ์ทราชันด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CFD โดยการจำลองกระบวนการที่สภาวะที่กำหนดในข้อ 3.2 และทำการเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรูตามตารางที่ 1

3.3.3) ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation) กระบวนการ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร 4 ตัว ได้แก่

1. ความเร็ว
2. ความดัน
3. อัตราการเจือปน
4. แรงบิด



บทที่ 4 ผลการทดลอง

จากการทดลองและการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน โดยใช้ไฟไนต์โวลูม (Finite Volume) เป็นเครื่องมือสำหรับทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดัน ความเร็วของอนุภาค อัตราการเฉือน (Shear Rate) และแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบสกรู ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

4.1 วิเคราะห์ผลการจำลองของจำนวนกริดที่เหมาะสม

สำหรับการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กำหนดสภาวะการจำลองดังนี้

อัตราการไหล 0.0035 kg/s

ความเร็วรอบของสกรู 500 rpm

ไม่มีการถ่ายเทความร้อนและไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

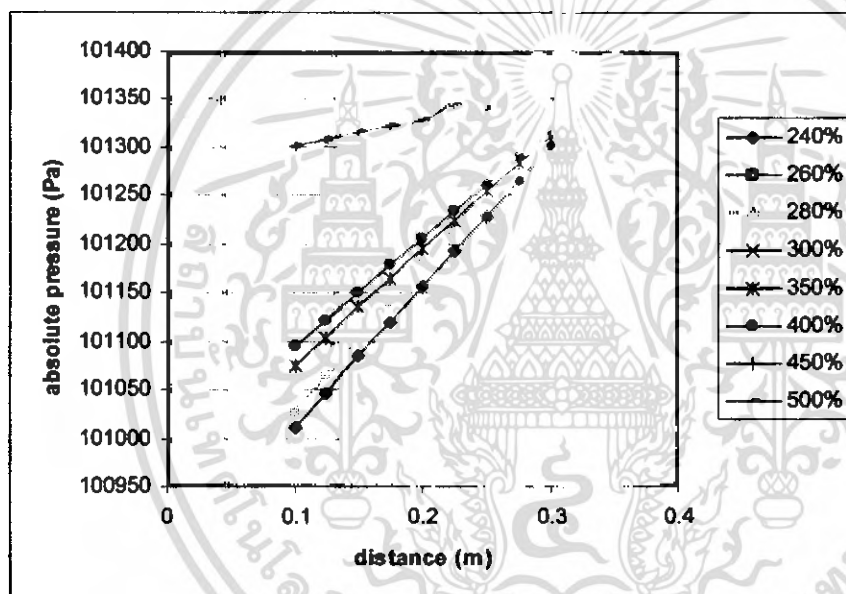
ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นการจำลองเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความดันที่ความยาวต่างๆตามแนวแกนเอ็กซ์ของแต่ละจำนวนกริด พบว่าจำนวนกริดที่ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกันคือกริดที่สร้างด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 280% กับ 300% และ 450% กับ 500% แต่กริดที่สร้างด้วยเปอร์เซ็นต์ Shortest Edge สูงๆ นั้นจะทำให้ได้รูปร่างของกริดที่ยาวจนเกินไป อาจส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนมากเกินไปด้วย ดังนั้น เลือกใช้จำนวนกริดในการจำลองกระบวนการที่เปอร์เซ็นต์ Shortest Edge 300 %

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันที่ความยาวต่างๆตามแนวแกนเอ็กซ์ของแต่ละจำนวนกริด

ระยะหน้าตัด (m)	ความดันสัมบูรณ์ (Pa)			
	240%	260%	280%	300%
0.100	101011.72	101027.98	101055.44	101055.44
0.125	101045.70	101064.91	101088.45	101088.45
0.150	101084.22	101101.67	101121.41	101121.41
0.175	101120.41	101137.77	101155.35	101155.35
0.200	101156.70	101173.29	101187.66	101187.66
0.225	101193.04	101209.58	101220.34	101220.34
0.250	101229.03	101245.28	101254.09	101254.09
0.275	101264.92	101279.63	101284.71	101284.71
0.300	101300.92	101314.78	101317.09	101317.09

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันที่ความยาวต่างๆ
ตามแนวแกนเอ็กซ์ของแต่ละจำนวนกริด (ต่อ)

ระยะหน้าตัด (m)	ความดันสัมบูรณ์ (Pa)			
	350%	400%	450%	500%
0.100	101073.81	101094.58	101302.08	101302.08
0.125	101103.07	101121.28	101308.76	101308.76
0.150	101135.30	101150.43	101315.35	101315.35
0.175	101165.19	101178.36	101321.84	101321.84
0.200	101195.01	101206.12	101327.91	101327.91
0.225	101224.77	101233.34	101344.10	101344.10
0.250	101254.05	101261.45	101340.24	101340.24
0.275	101283.02	101289.01	101346.23	101346.23
0.300	101312.19	101316.53	101351.81	101351.81

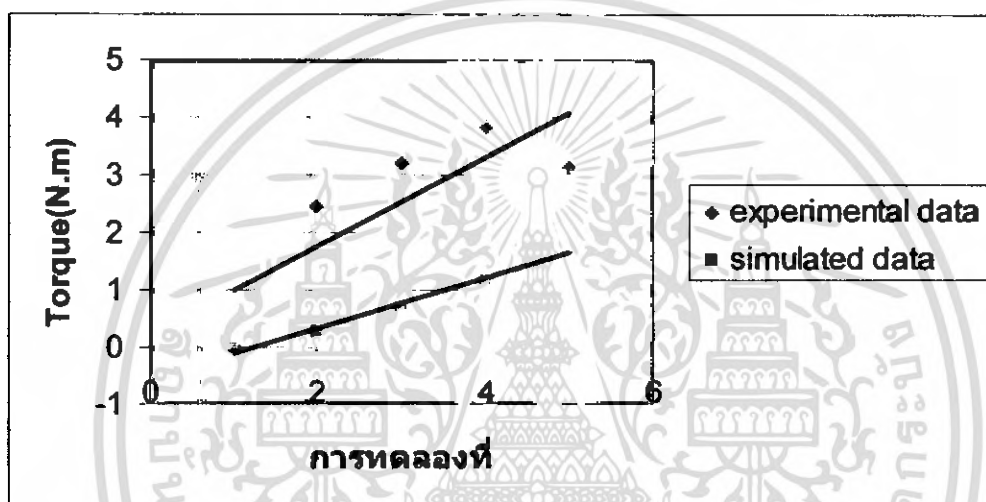


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน
โดยใช้น้ำเป็นวัตถุที่จำนวนกริดต่างๆ

4.2 วิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่เลือกใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จากการทดลองกับการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้น้ำเป็นวัตถุดิบ

motor speed rpm	screw speed rpm	mass flow rate kg/s	Experiment		Simulation
			%Torque	Torque N.m	Torque N.m
0	0	0.00371	0	0	0.0157
250	103	0.00366	6.8	2.463232	0.2630
500	207	0.00391	8.9	3.223936	0.6790
750	312	0.00391	10.6	3.839744	1.1800
1000	416	0.00401	8.7	3.151488	1.7400



รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จากการทดลองกับการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้น้ำเป็นวัตถุดิบ

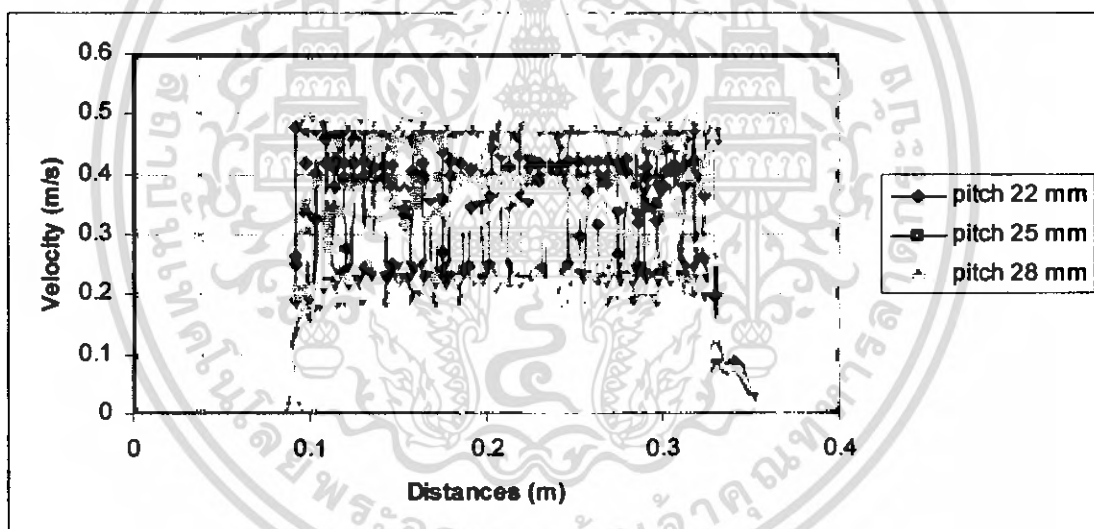
จากตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จากการทดลองกับการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้น้ำเป็นวัตถุดิบ ในสถานะการจำลองที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วสกรูและอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงตามค่าที่วัดได้จากการทดลอง นำค่าแรงบิดมาพล็อตกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อน พบว่าค่าที่ได้จากการจำลองกระบวนการนั้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง จึงเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD สำหรับการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบสกรูที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันความเร็วของอนุภาค และอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

4.3 การวิเคราะห์ผลอิทธิพลของรูปแบบสกรูที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดัน ความเร็วของอนุภาค อัตราการเจือปนและแรงบิด

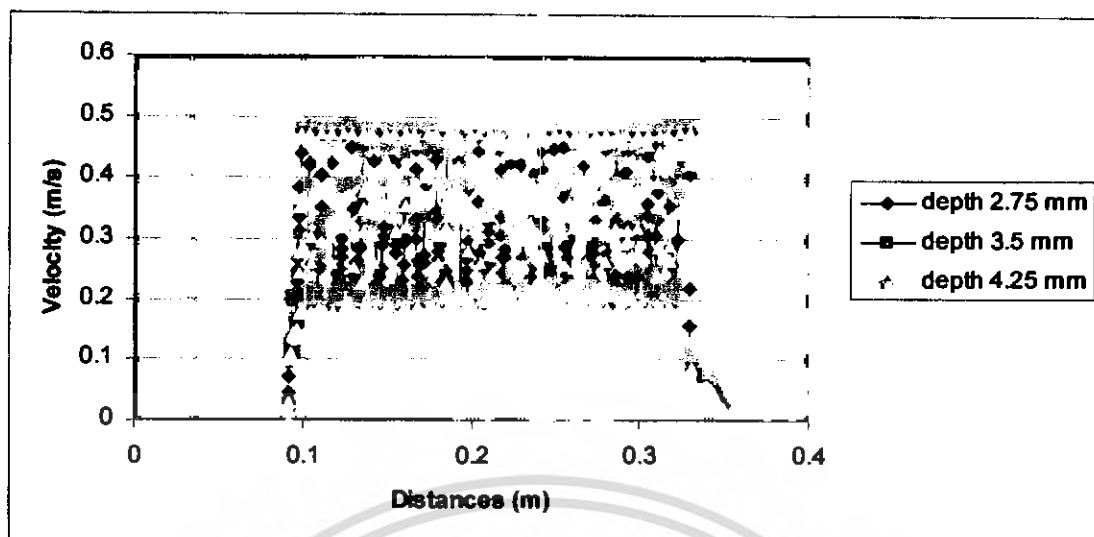
จากการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้น้ำเป็นวัตถุดิบ เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดัน ความเร็วของอนุภาคของไหล และอัตราการเจือปนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ได้นำข้อมูลมาพล็อตกราฟ แสดงการเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ต่อผลลัพธ์ที่ได้ ดังนี้

4.3.1 อิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

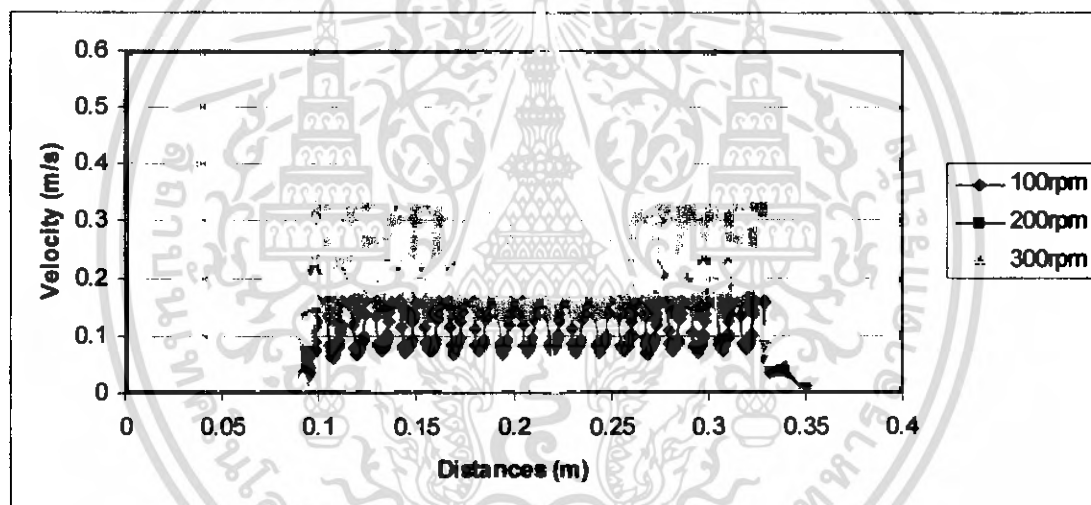
เมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะพิทช์ ความลึกร่องเกลียว และความเร็วรอบของสกรู โดยการจำลองกระบวนการที่สภาวะเดิม นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่แต่ละระยะความยาวในแนวแกนเอ็กซ์ แสดงแนวโน้มดังกราฟในรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วที่เกิดขึ้นในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันนั้นมีลักษณะแปรผกผันกับระยะพิทช์แต่ละความลึกร่องเกลียวแต่แปรผันตรงกับความเร็วรอบของสกรู



รูปที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนระยะพิทช์ต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็ว



รูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความลึกร่องเกลียวต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็ว



รูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรูต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

4.3.1) อิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเจียน

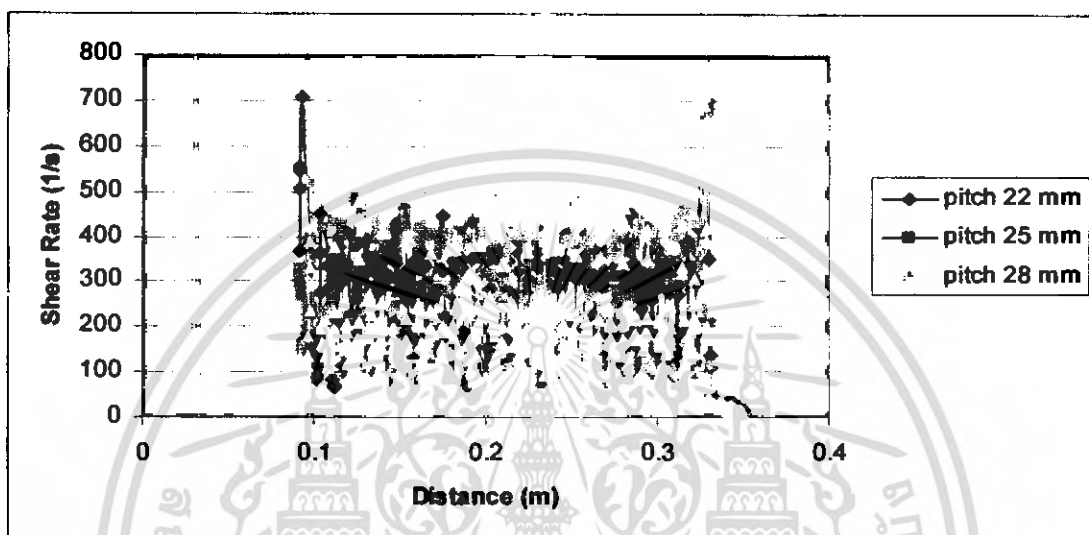
ในกรณีที่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเจียนเมื่อเปลี่ยนระยะพิทช์ ความลึกร่องเกลียวและความเร็วรอบของสกรูนั้น ผลที่ได้ปรากฏดังกราฟในรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ พบว่าการปรับเปลี่ยนความลึกร่องเกลียวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเจียนมากกว่าการปรับเปลี่ยนระยะพิทช์และความเร็วรอบตามลำดับ ซึ่งอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระยะพิทช์และความลึกร่องเกลียวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเจียน จะอยู่ในลักษณะที่แปรผกผัน ส่วนความสัมพันธ์กับความเร็วรอบจะเป็นความสัมพันธ์ที่เป็นการแปรผันตรง จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจียนกับความเร็วรอบที่ได้นั้นสอดคล้องกับสมการ 13

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad (13)$$

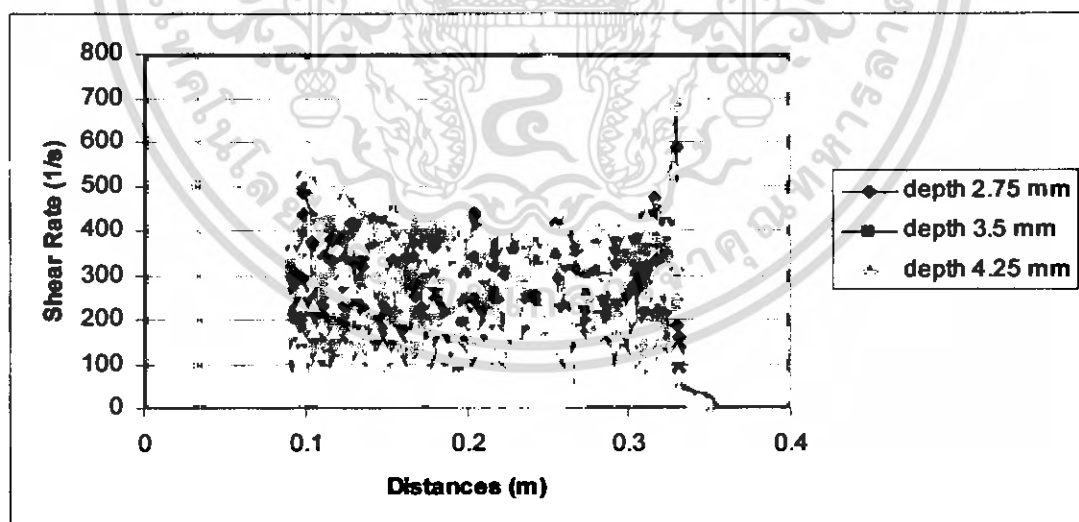
โดยที่ $\dot{\gamma}$ = อัตราการเฉือน (1/s)

Δx = ระยะทาง (m)

Δv = ความเร็ว (m/s)

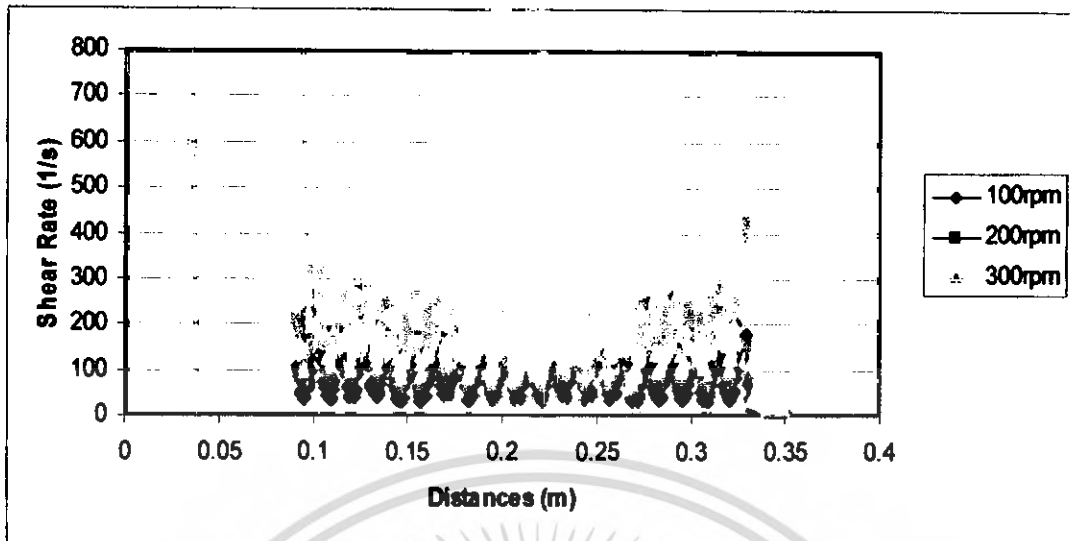


รูปที่ 4.6 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนระยะพิทต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเฉือน



รูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความลึกร่องเกลียวต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเฉือน

4.3.3) อิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิด

จากการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันด้วยน้ำ ปรากฏว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรทั้งสาม กล่าวคือ ค่าแรงบิดจะเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับความเร็วรอบและแปรผกผันกับระยะพิทช์และความลึกร่องเกลียวตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการ 14

$$P = \omega \Gamma \quad (14)$$

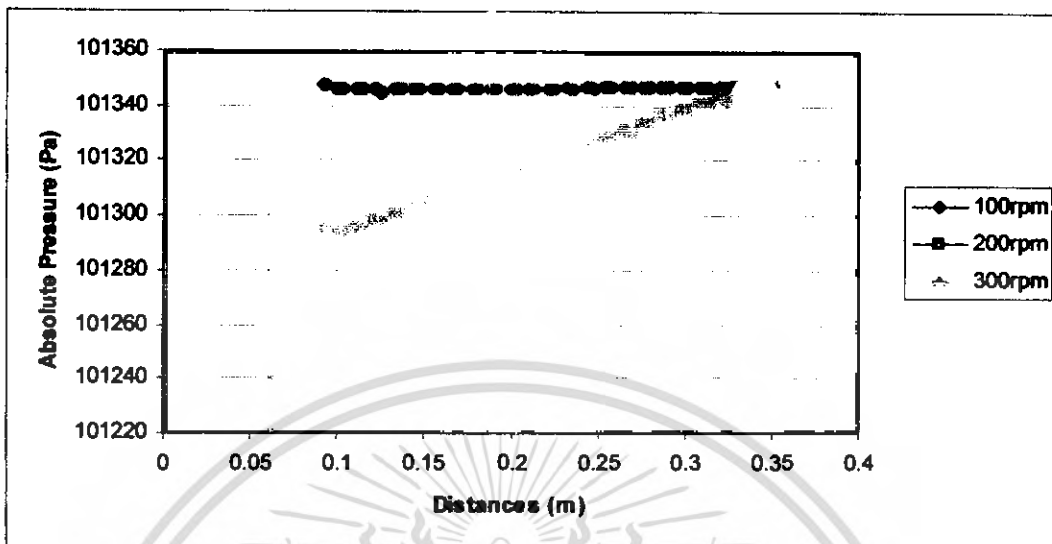
โดยที่

P = กำลัง (W)

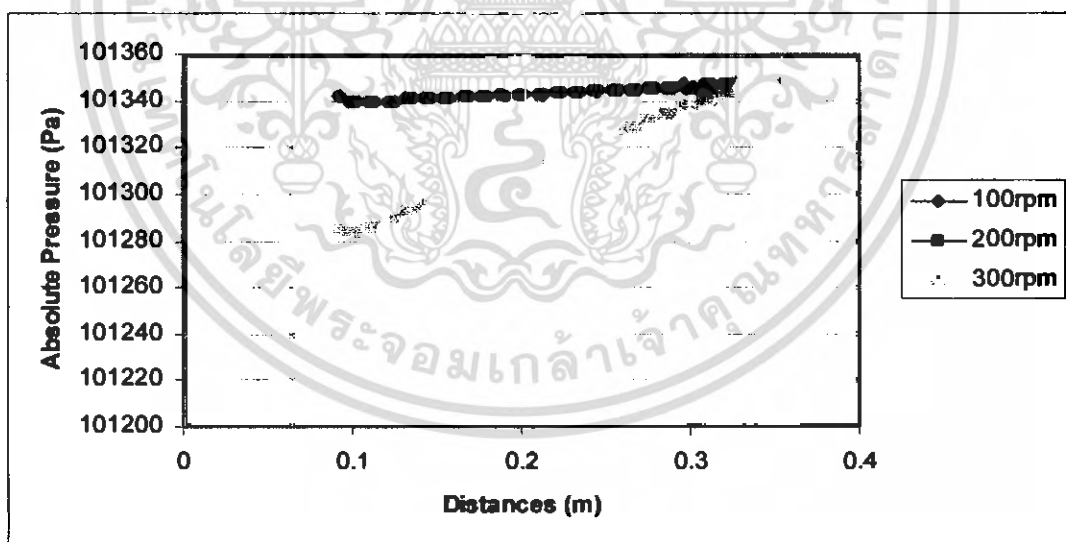
ω = ความเร็วเชิงมุม (rpm)

$\omega = 2\pi N$ และ $v = \omega r$

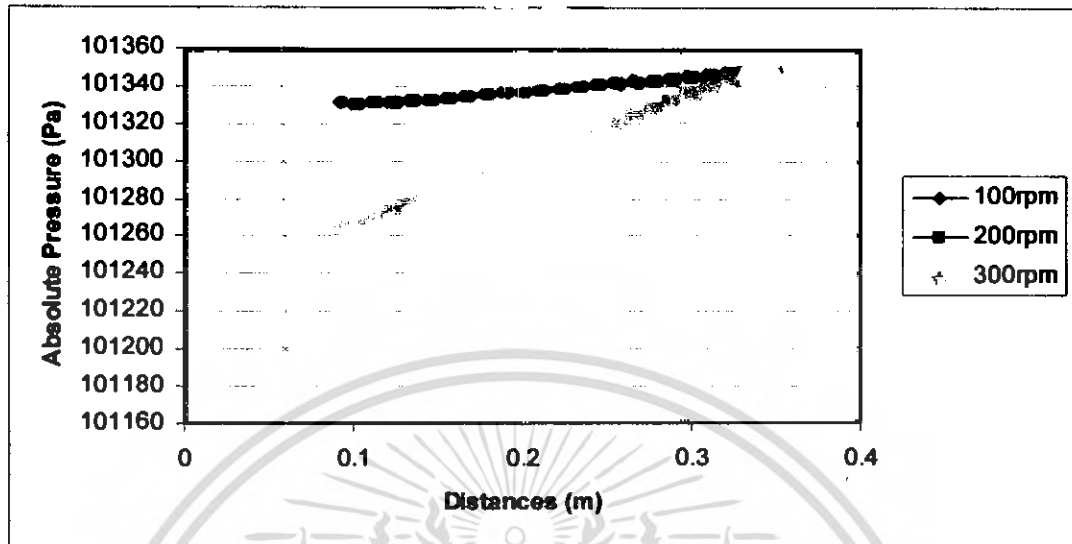
Γ = แรงบิด (Nm)



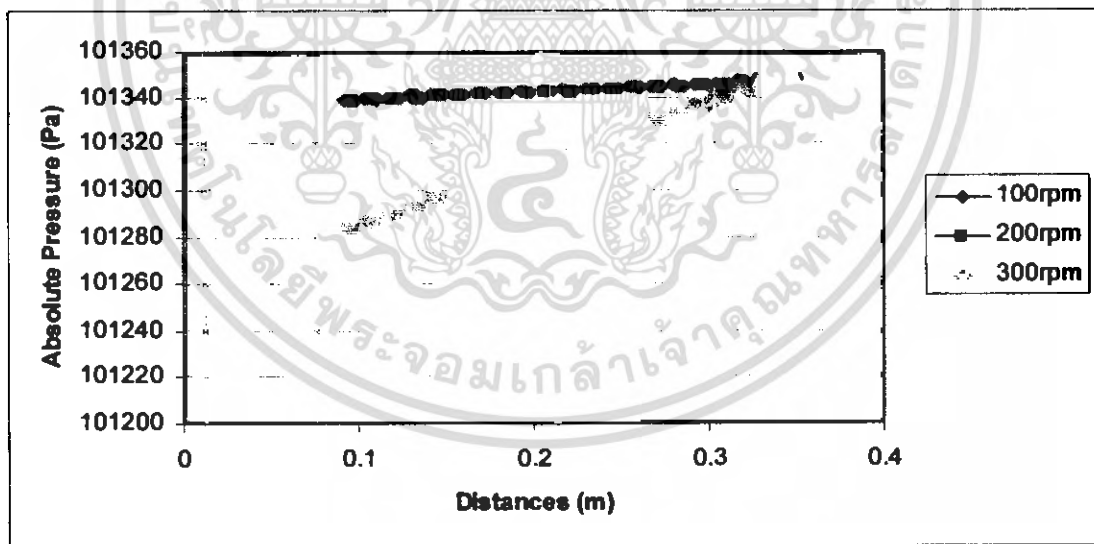
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทอร์ชัน สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm



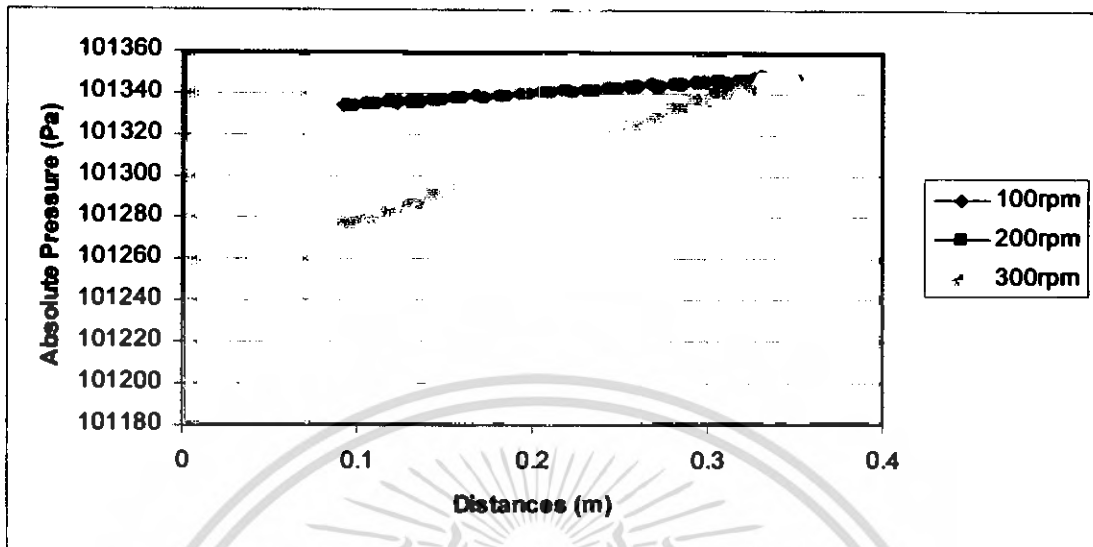
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทอร์ชัน สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm



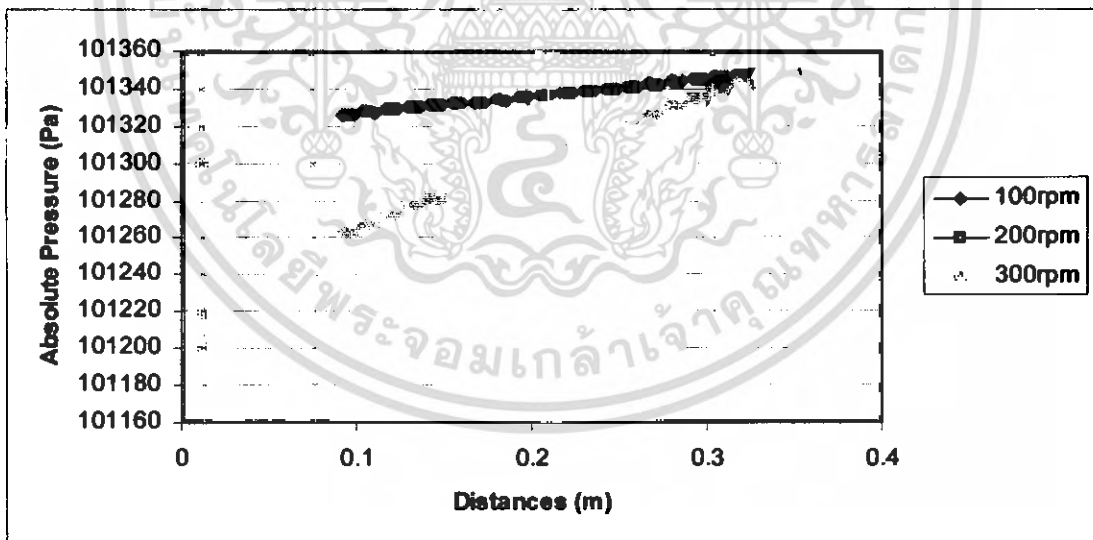
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm



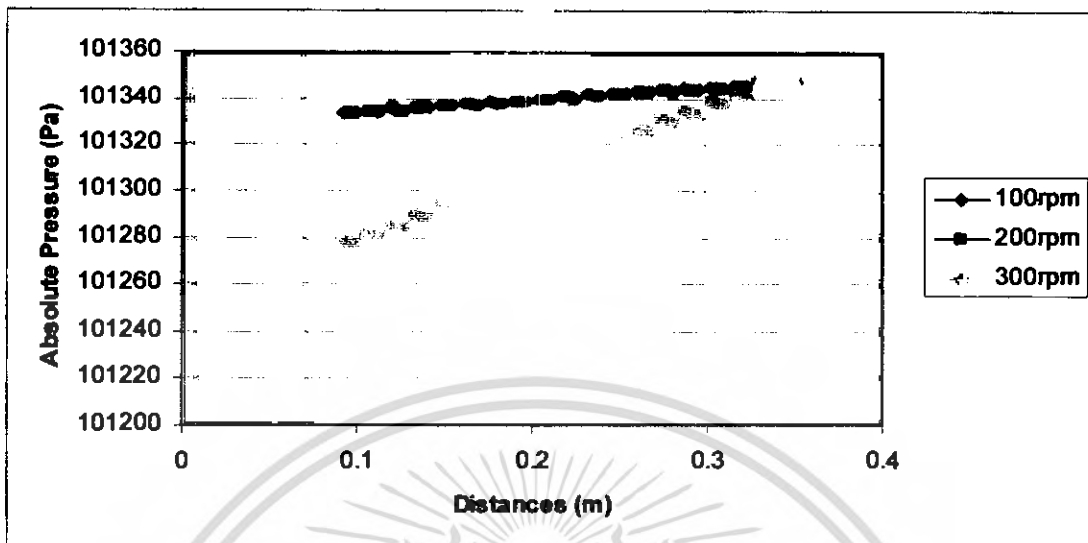
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm



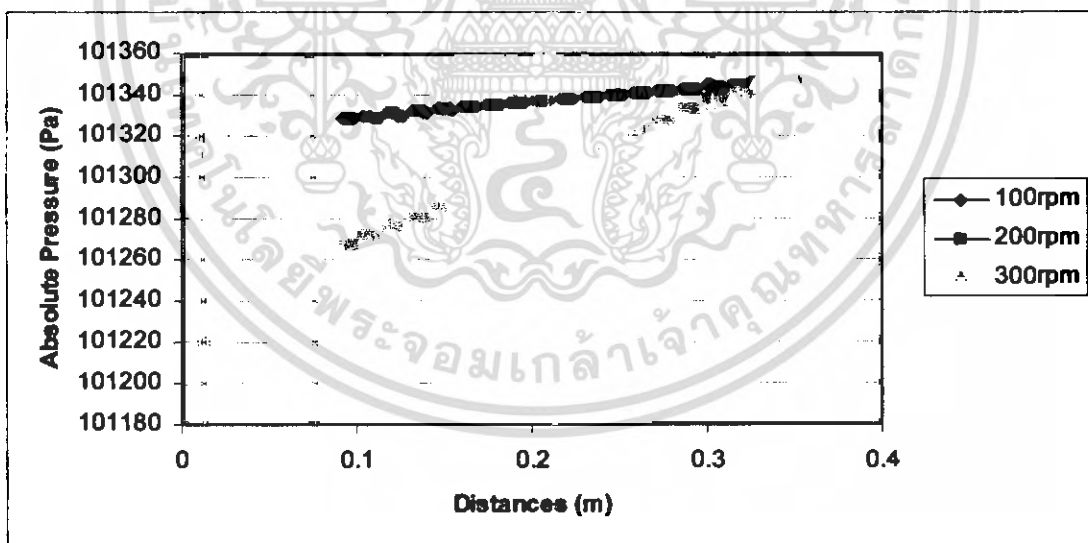
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm

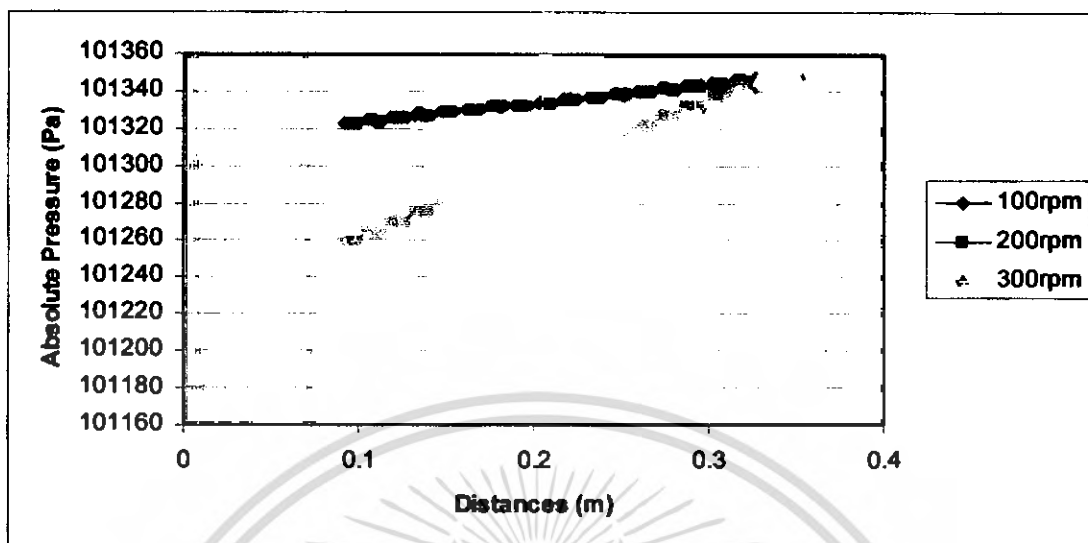


รูปที่ 4.15 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm

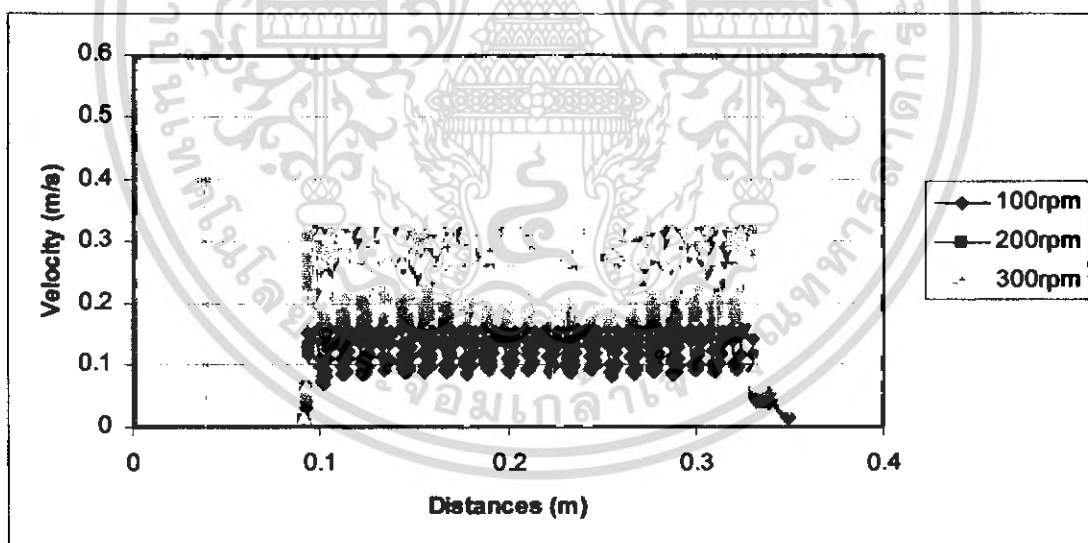


รูปที่ 4.16 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

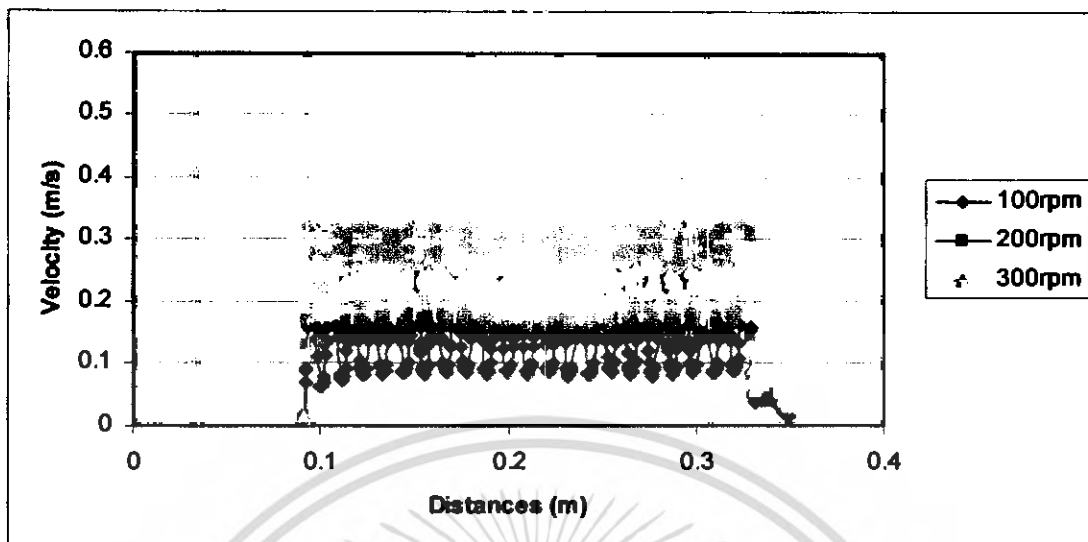


รูปที่ 4.17 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่อความดันสัมบูรณ์ ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm

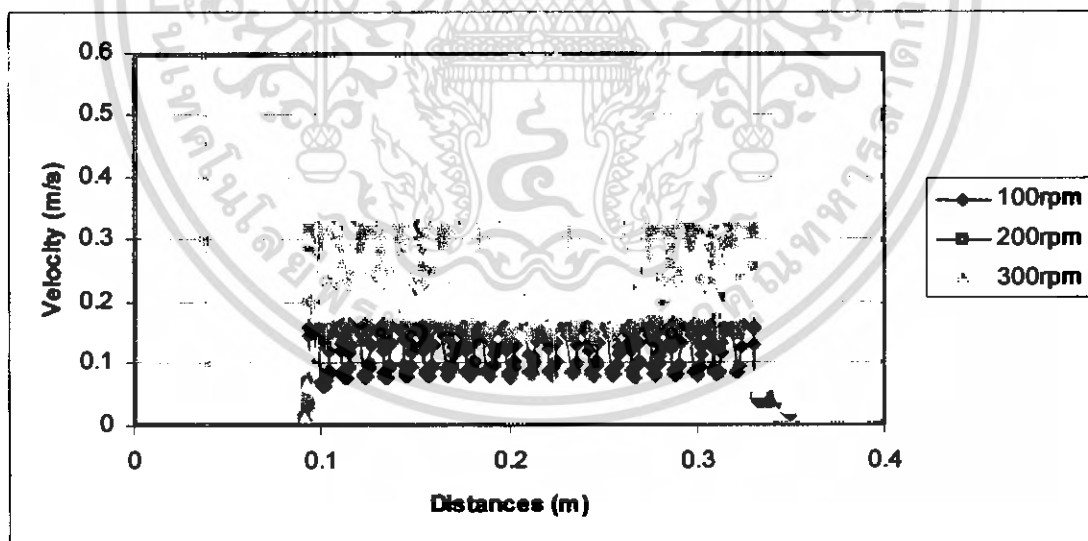


รูปที่ 4.18 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

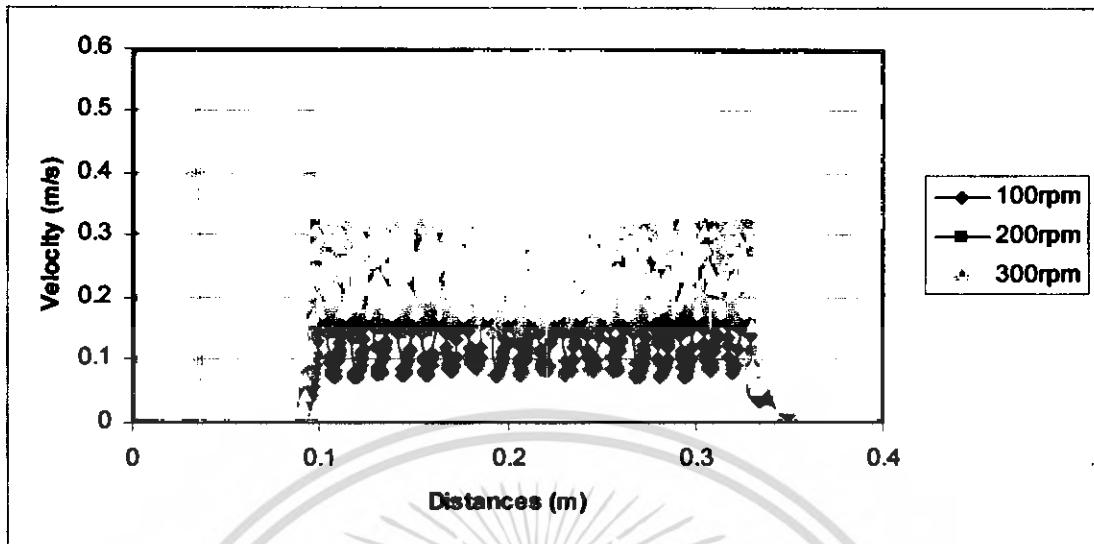


รูปที่ 4.19 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm

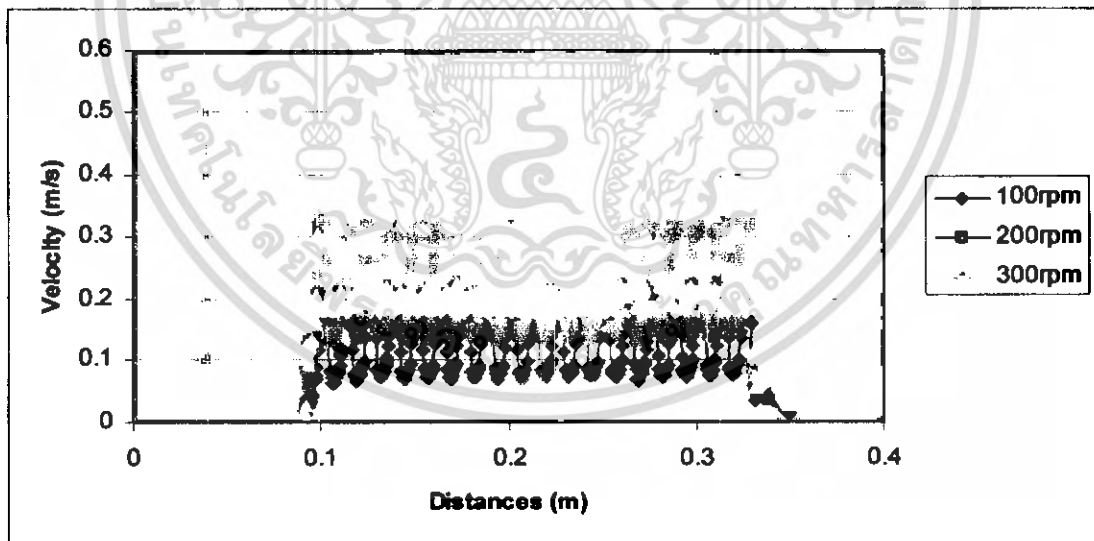


รูปที่ 4.20 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

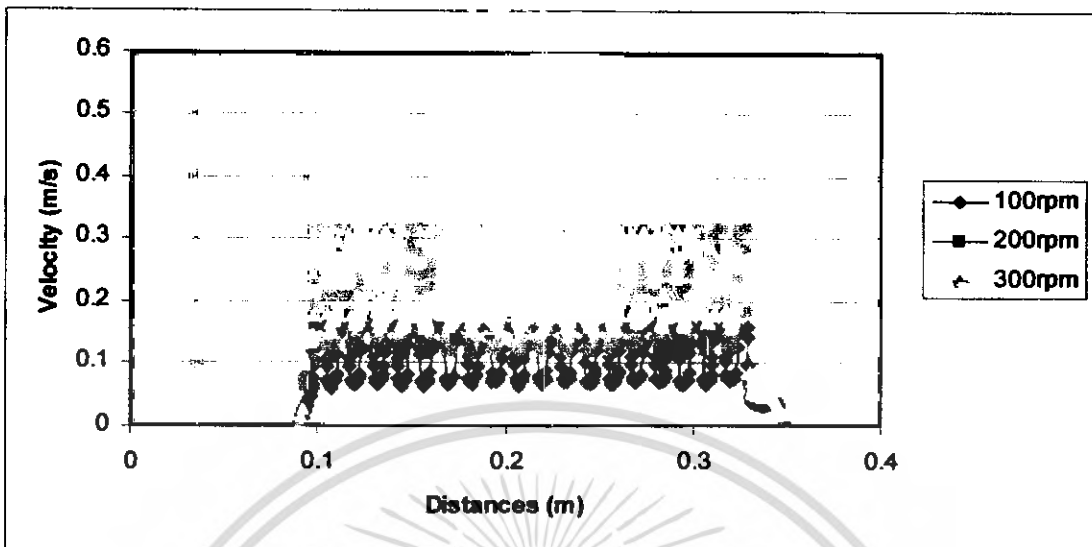


รูปที่ 4.21 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซัน
สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm

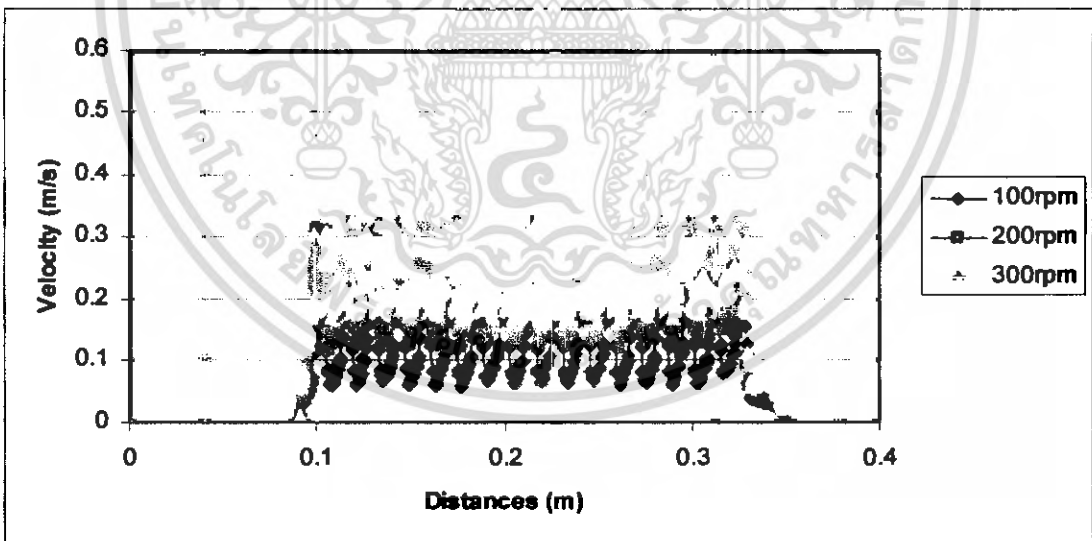


รูปที่ 4.22 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซัน
สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

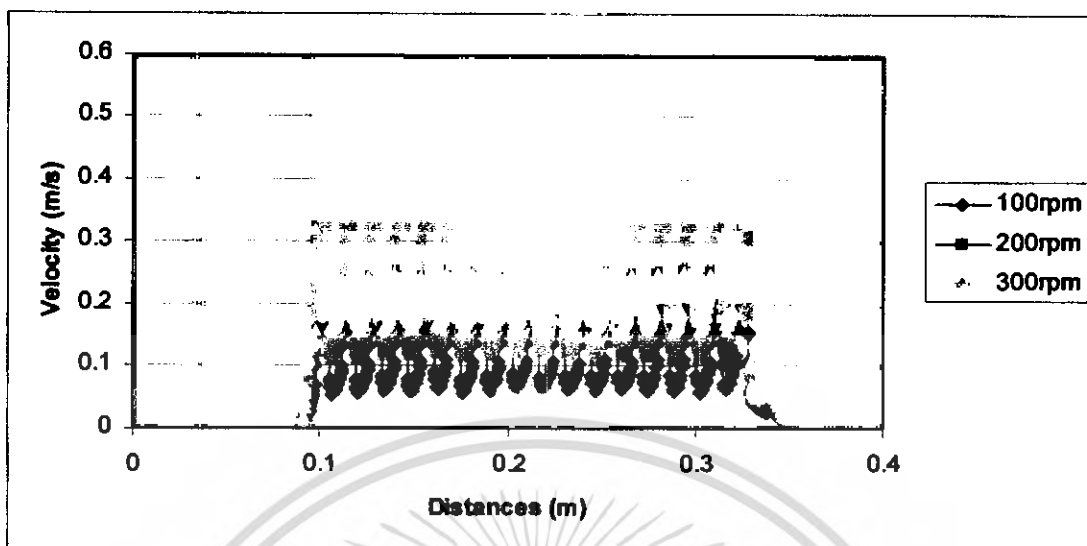


รูปที่ 4.23 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm

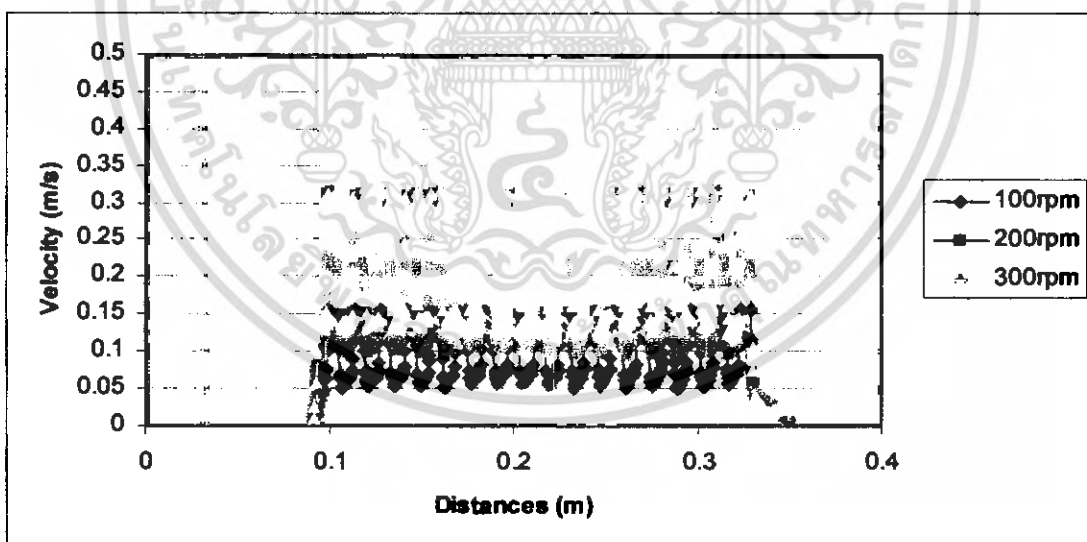


รูปที่ 4.24 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทราซัน สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

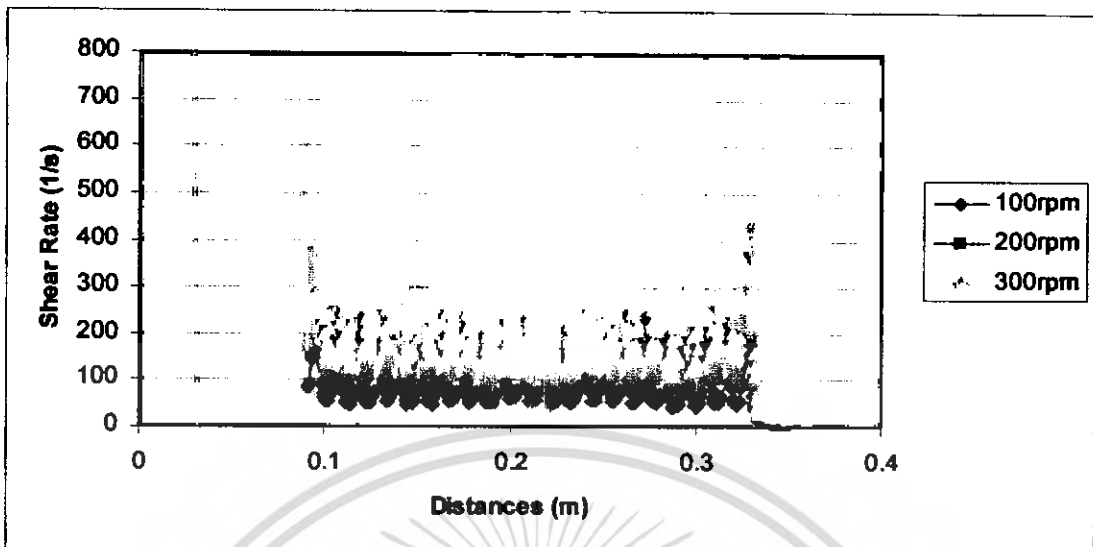


รูปที่ 4.25 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทูรชัน สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm

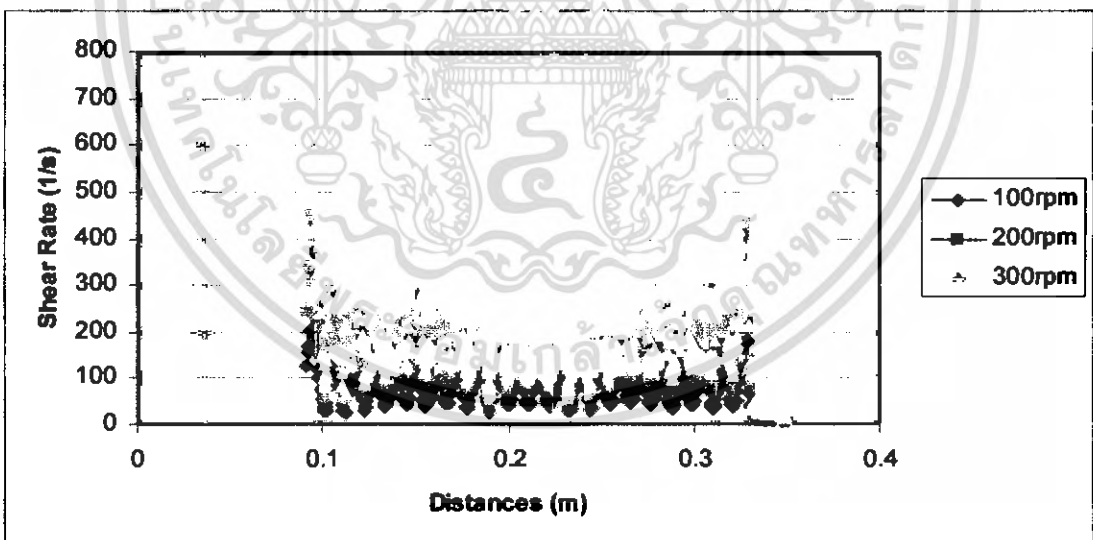


รูปที่ 4.26 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ในการเอ็กซ์ทูรชัน สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

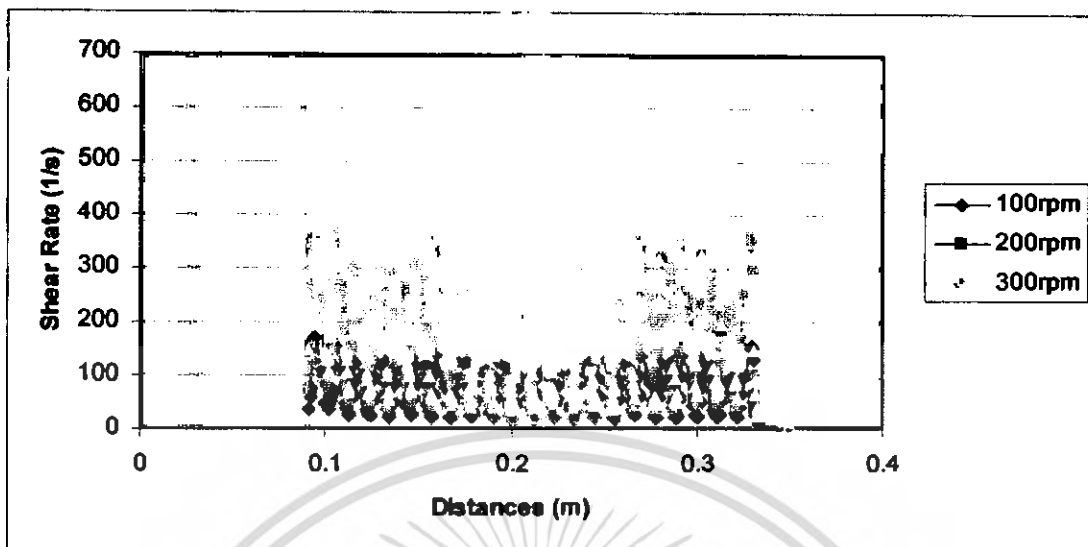


รูปที่ 4.27 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm

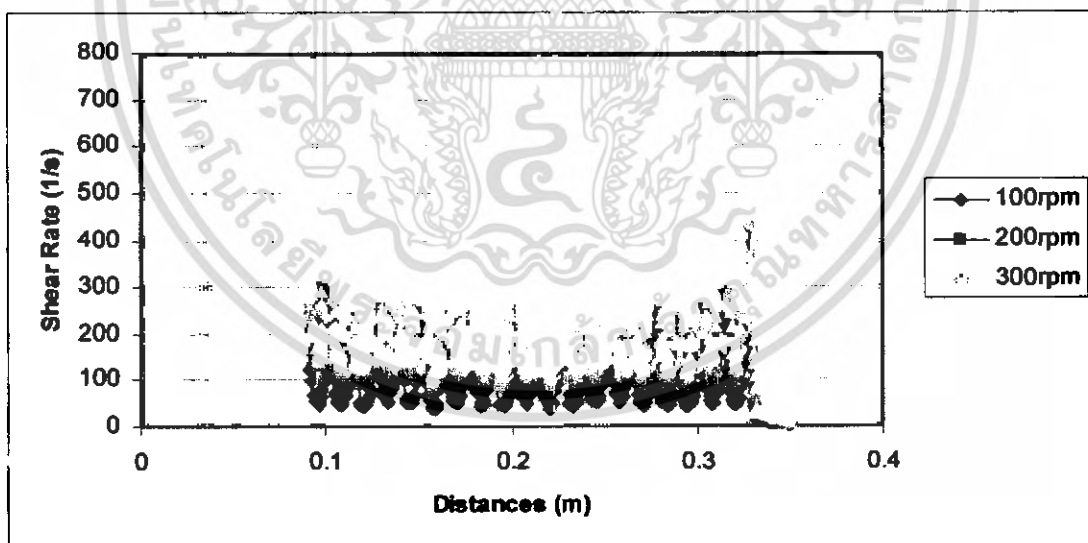


รูปที่ 4.28 อิทธิพลของความเร็วยกที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

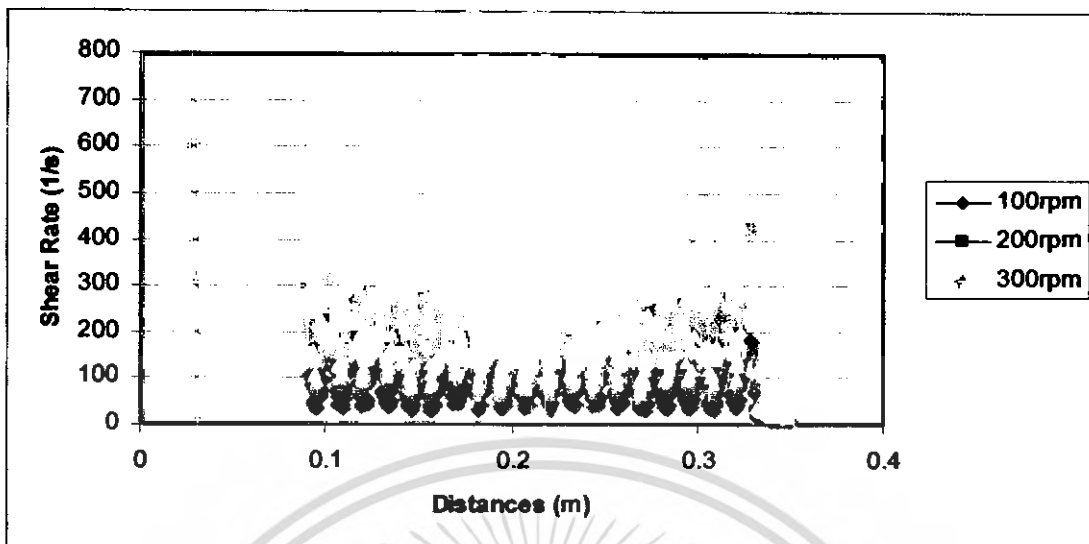


รูปที่ 4.29 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 22 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm

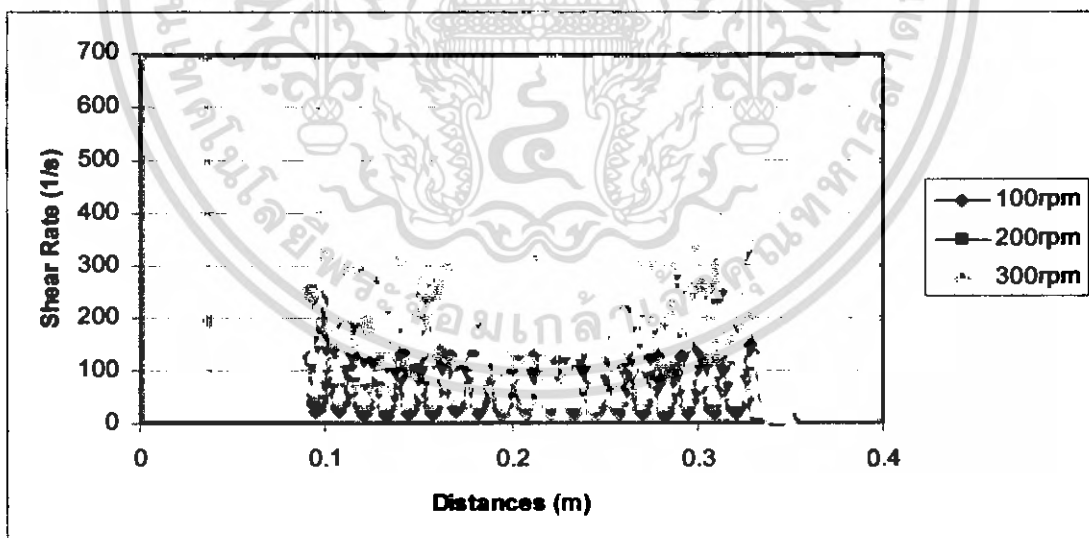


รูปที่ 4.30 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

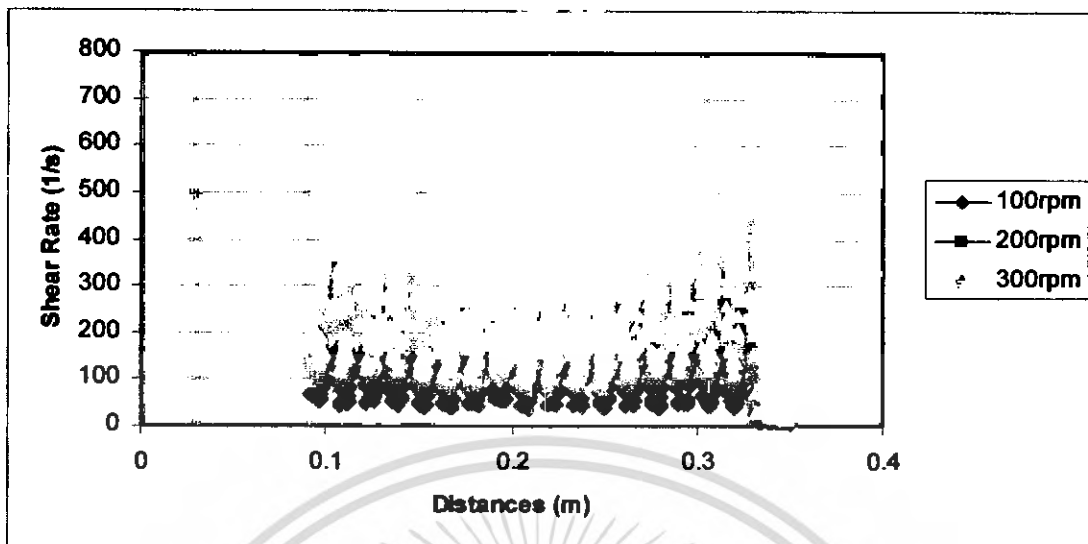


รูปที่ 4.31 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm

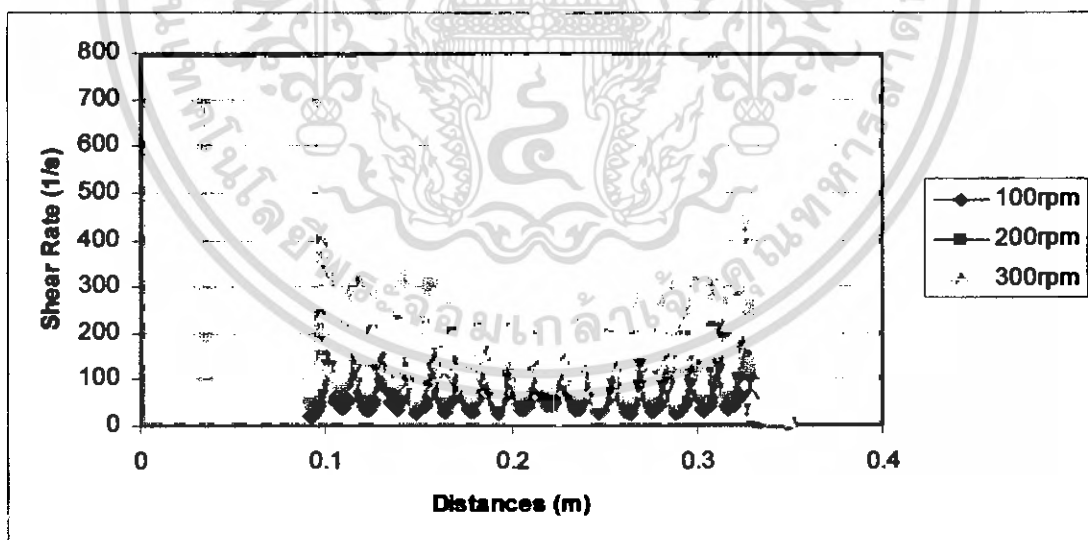


รูปที่ 4.32 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 25 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

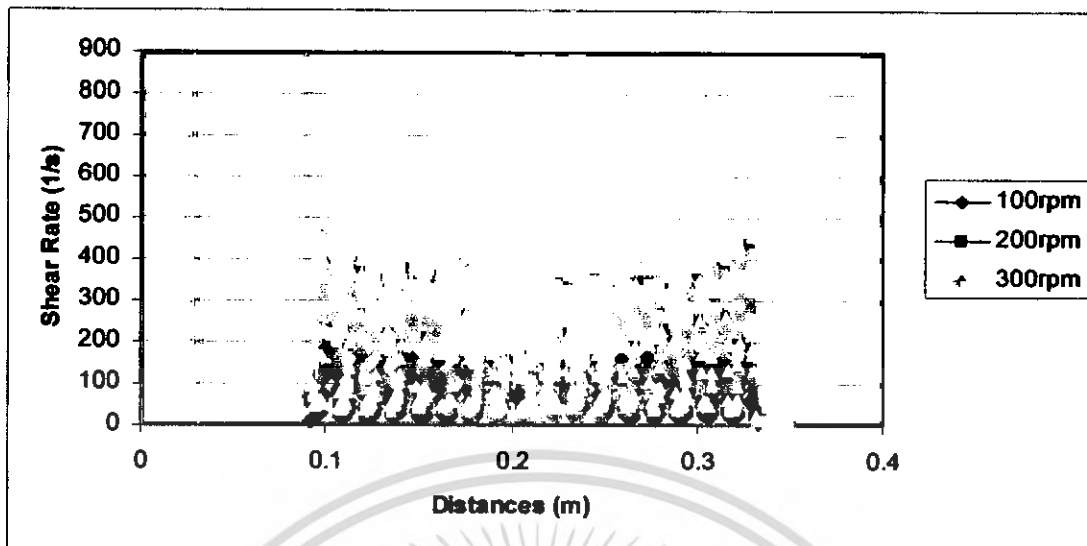


รูปที่ 4.33 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 2.75 mm



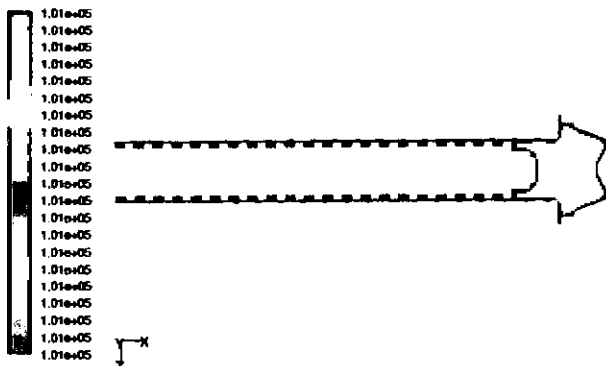
รูปที่ 4.34 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 3.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



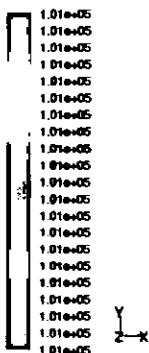
รูปที่ 4.35 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการเฉือน ในการเอ็กซ์ทรูชัน
สำหรับระยะพิทช์ 28 mm และความลึกร่องเกลียว 4.25 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

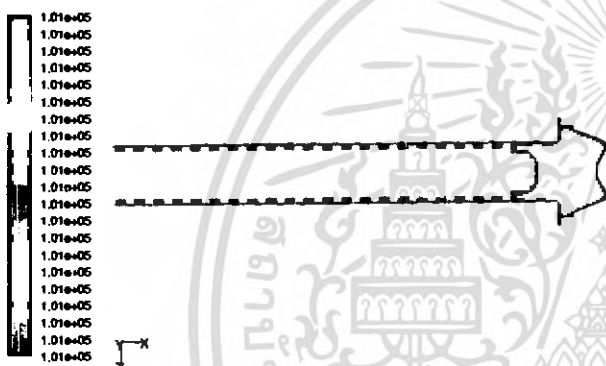
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.37 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.38 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

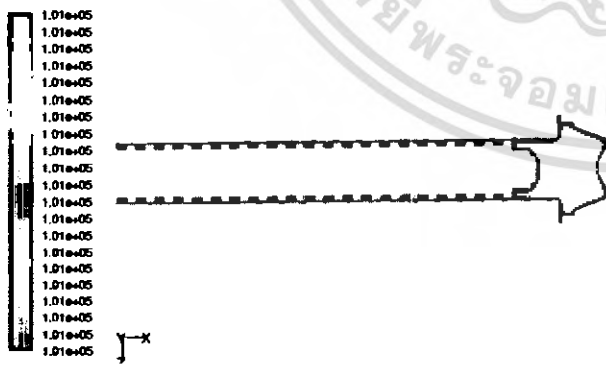
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.39 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

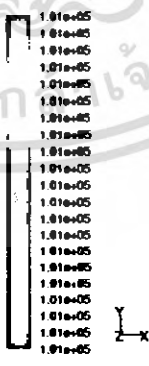
สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.40 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

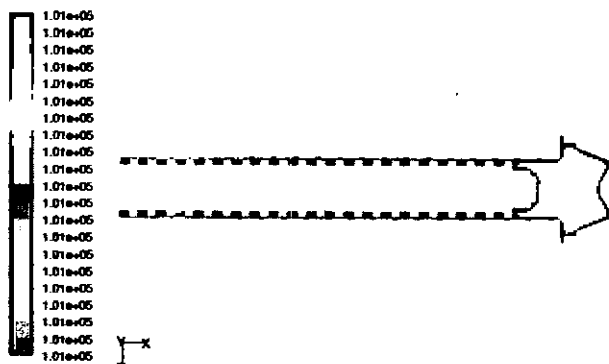


รูปที่ 4.41 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

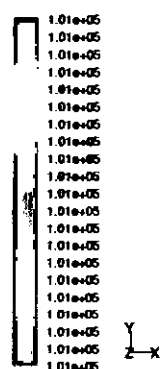
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

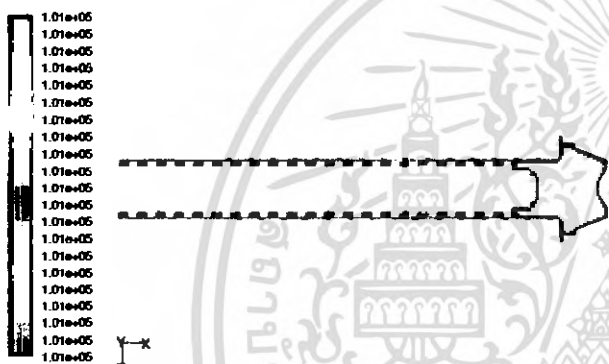
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.43 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

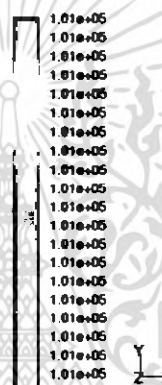
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.44 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

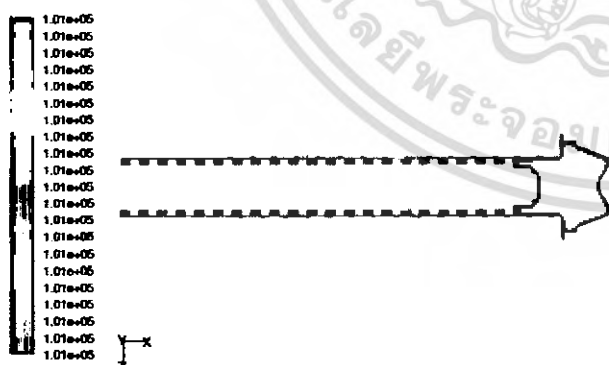
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.45 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.46 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

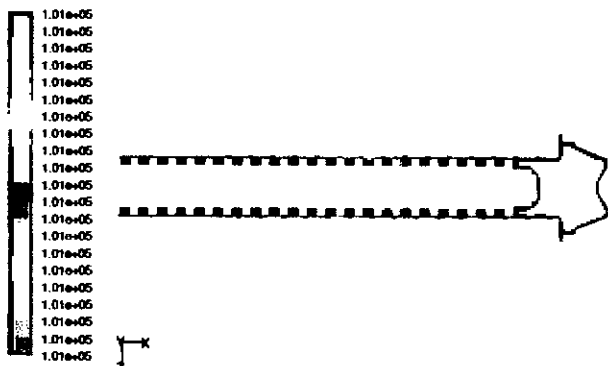
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm



รูปที่ 4.47 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

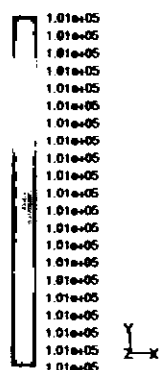
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm



รูปที่ 4.48 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

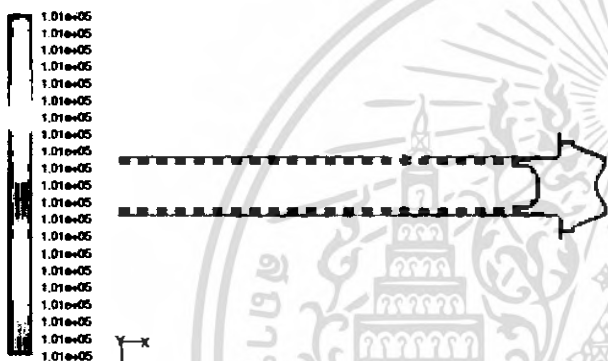
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.49 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.50 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

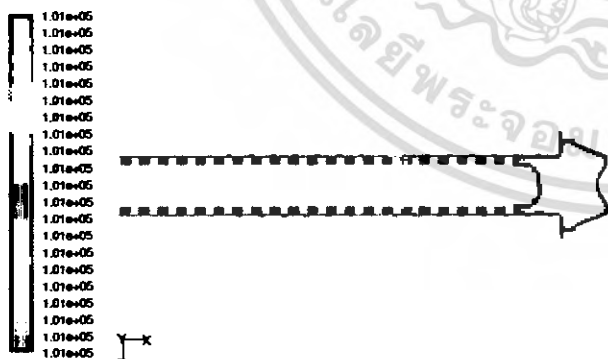
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.51 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

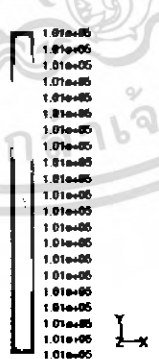
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.52 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

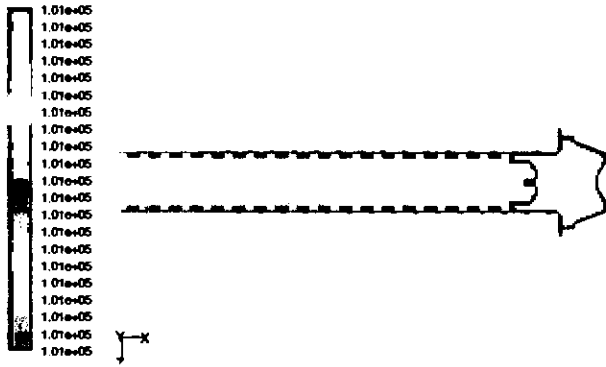


รูปที่ 4.53 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

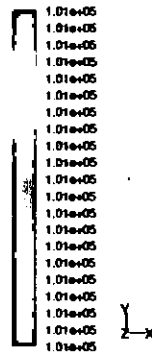
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

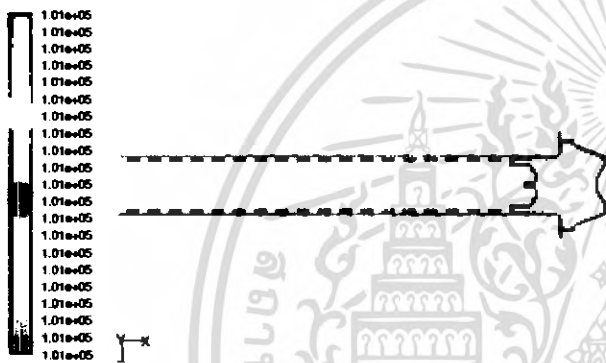
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.55 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

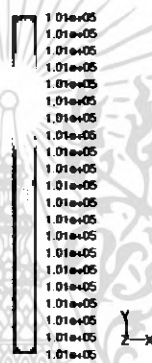
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.56 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

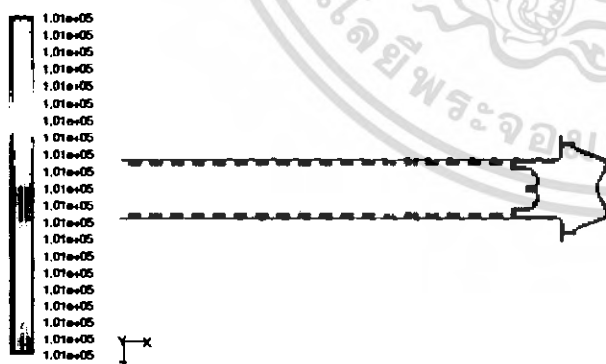
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.57 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.58 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

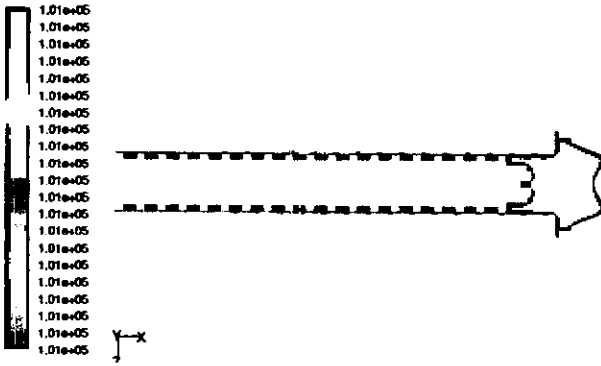


รูปที่ 4.59 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

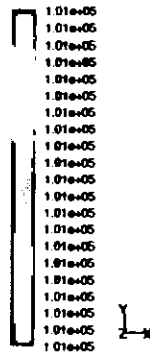
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

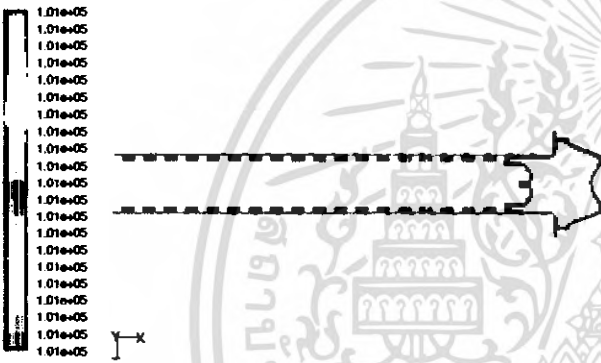
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.61 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

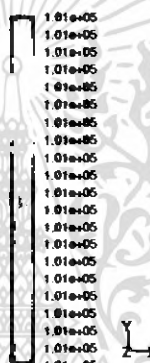
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.62 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

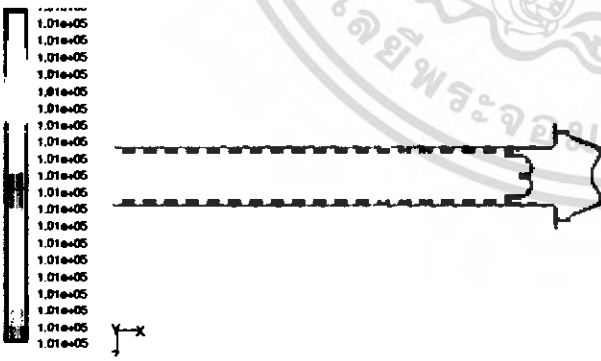
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.63 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.64 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

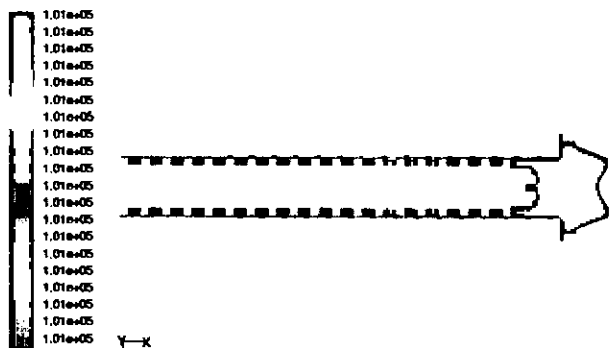
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm



รูปที่ 4.65 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

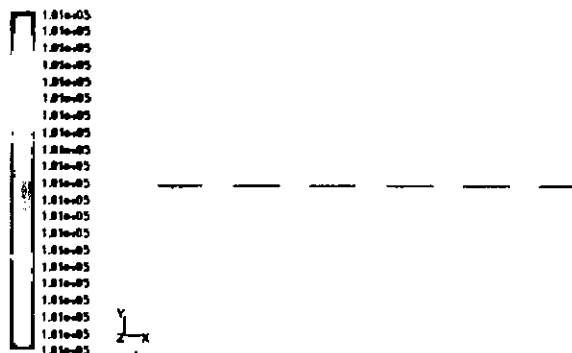
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm



รูปที่ 4.66 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

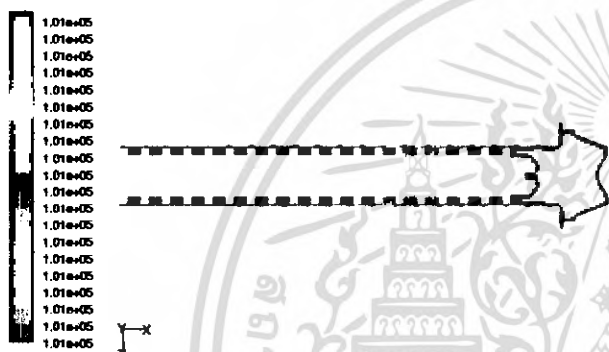
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.67 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

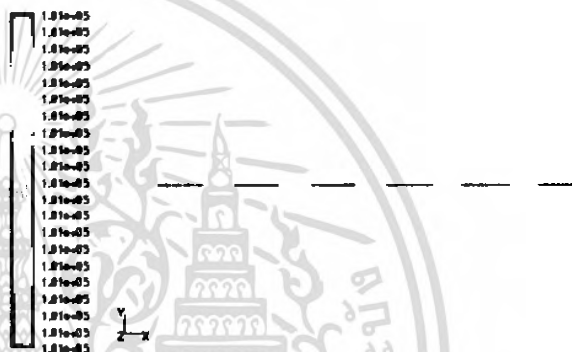
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.68 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

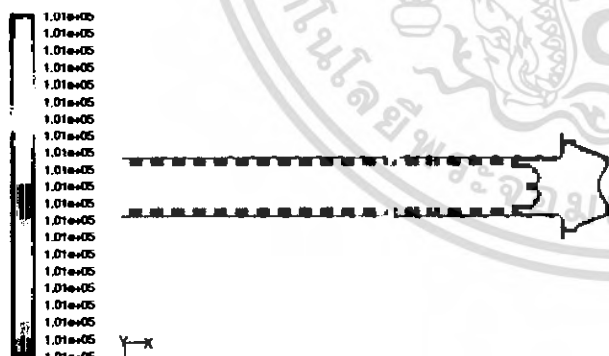
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.69 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.70 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

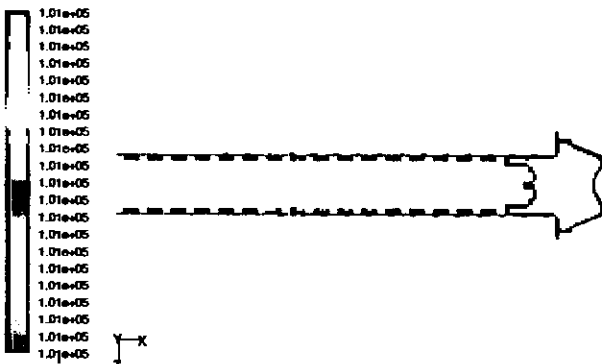


รูปที่ 4.71 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

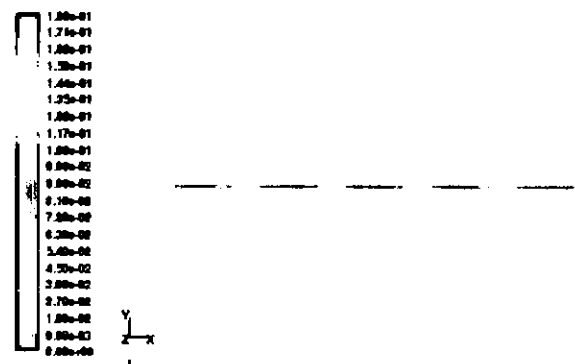
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.72 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

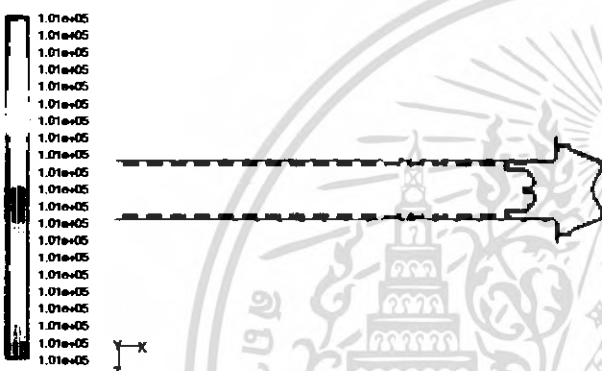
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.73 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.74 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

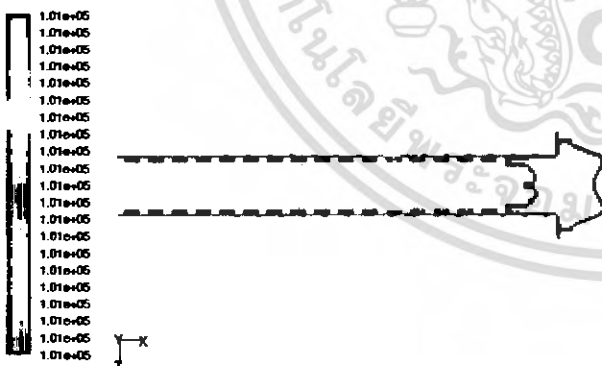
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.75 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

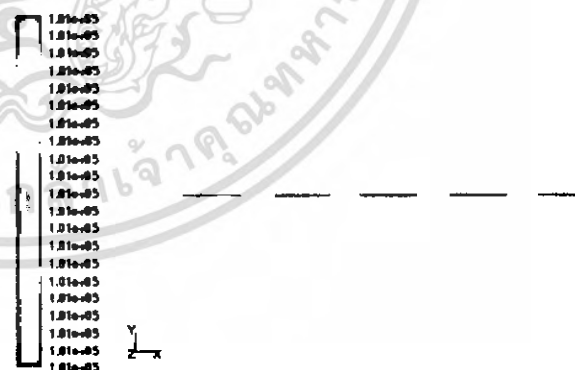
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.76 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

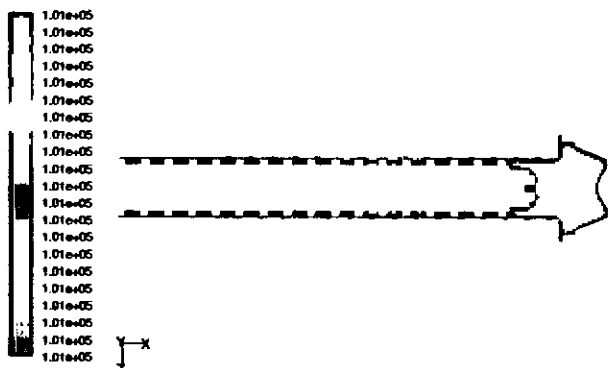


รูปที่ 4.77 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

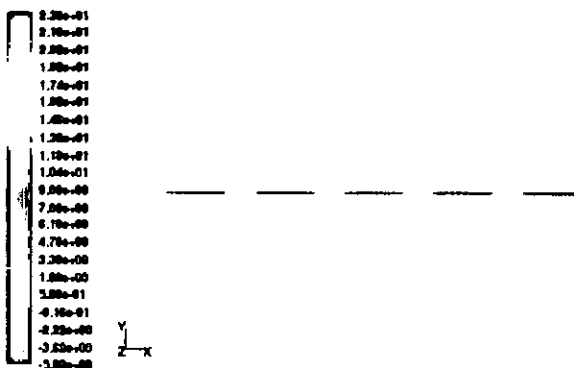
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.78 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

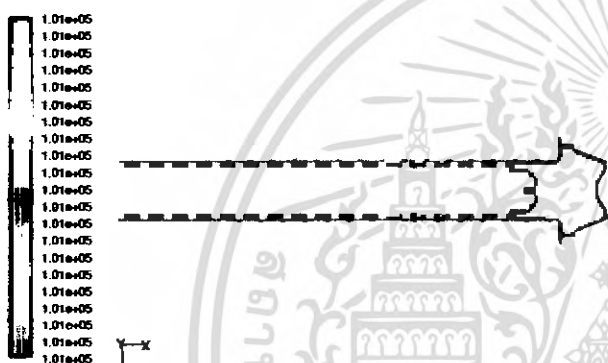
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.79 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

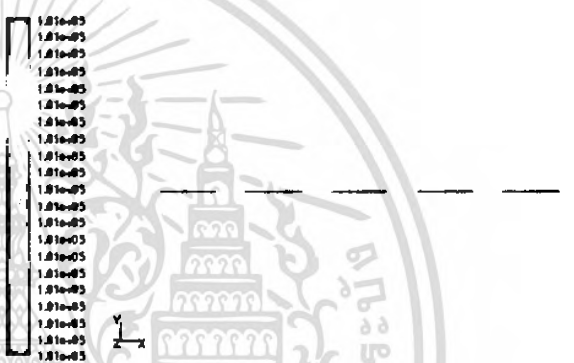
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.80 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

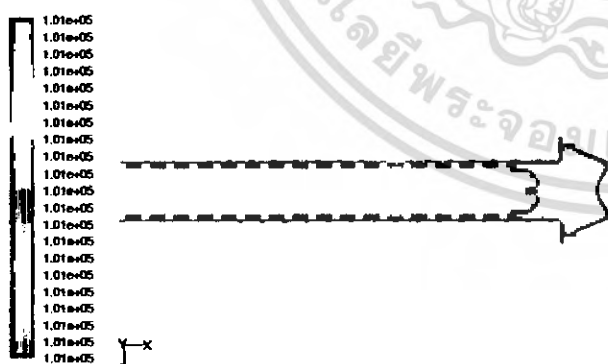
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.81 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

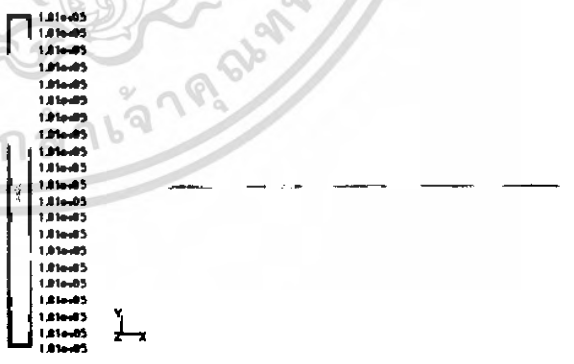
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.82 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

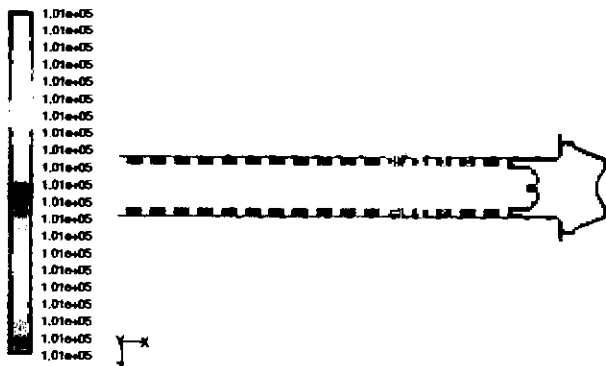
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm



รูปที่ 4.83 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

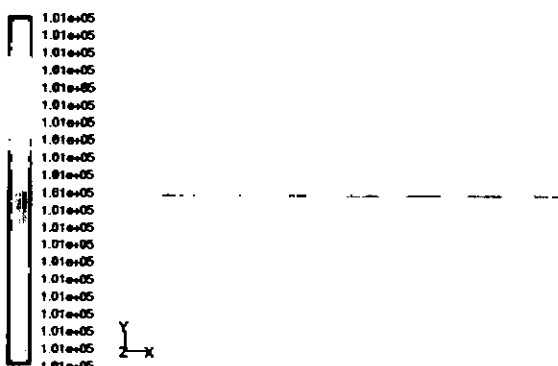
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm



รูปที่ 4.84 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

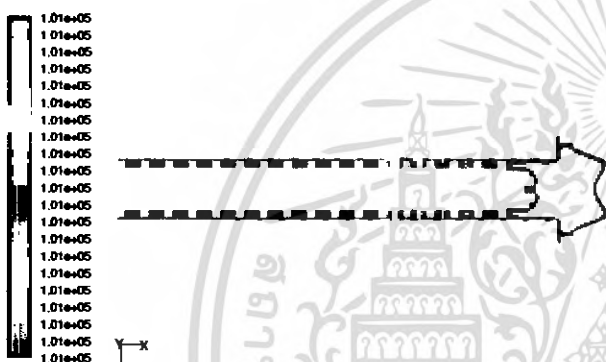
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.85 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

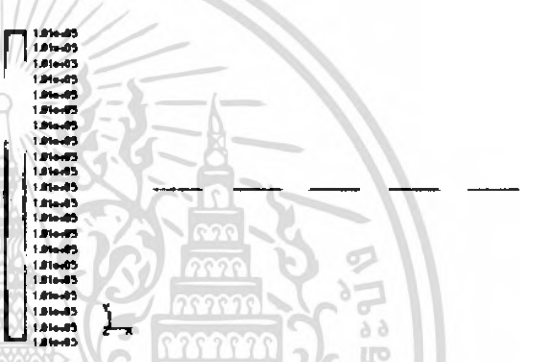
ความลึกร่องเกลียว 4.25mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.86 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

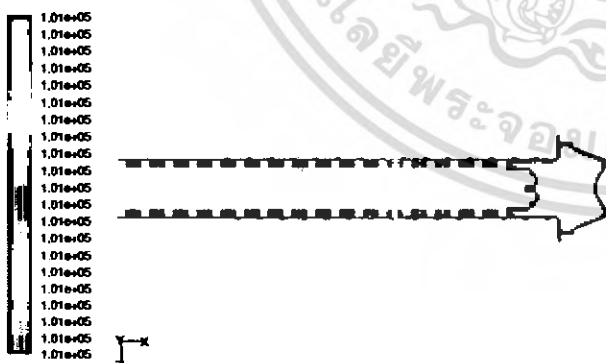
ความลึกร่องเกลียว 4.25mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.87 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28mm

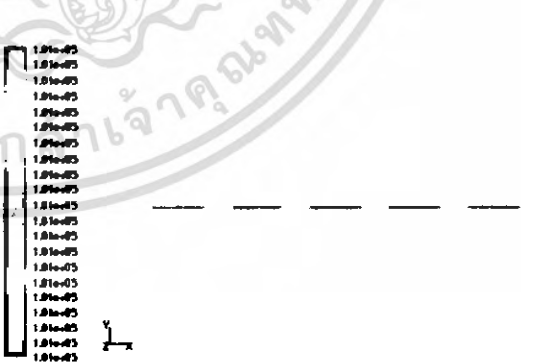
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.88 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

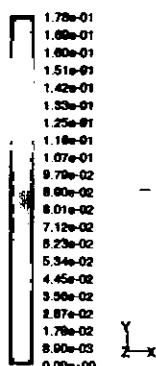
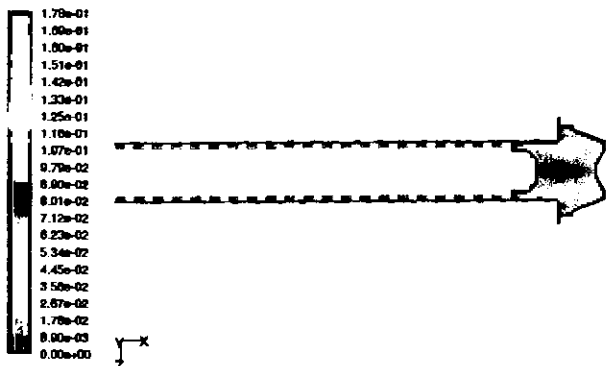


รูปที่ 4.89 แสดงค่าของความดันสัมบูรณ์

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.90 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

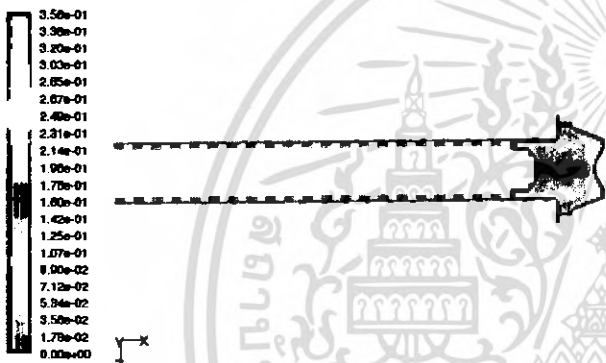
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm

รูปที่ 4.91 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.92 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

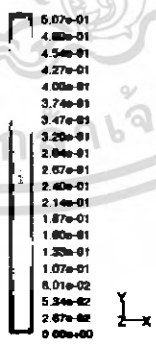
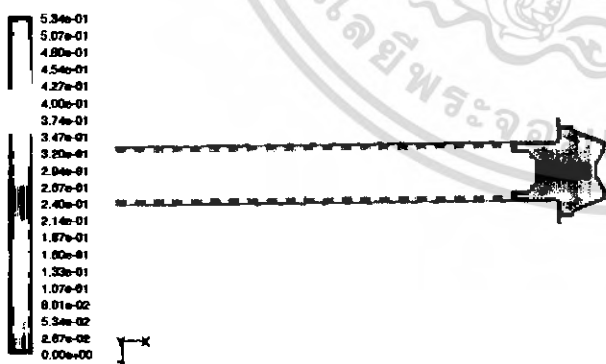
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm

รูปที่ 4.93 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.94 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

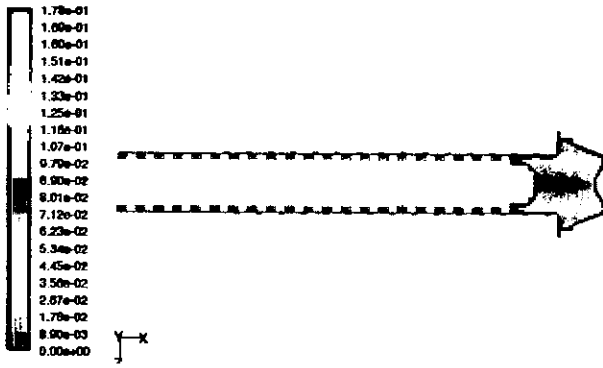
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

รูปที่ 4.95 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.96 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

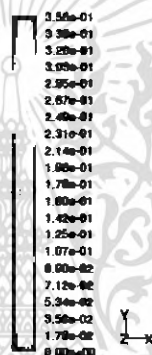
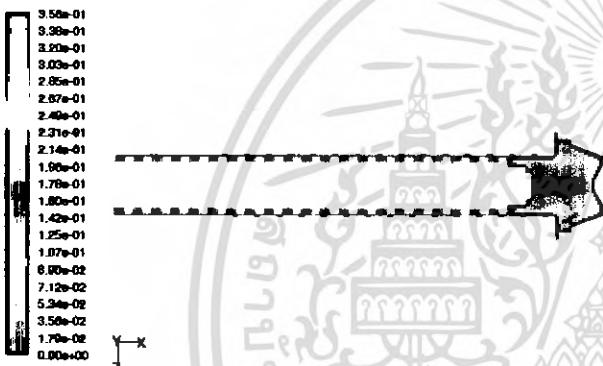
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm

รูปที่ 4.97 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.98 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

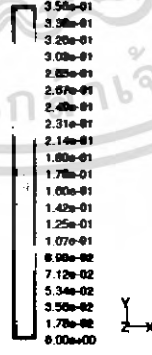
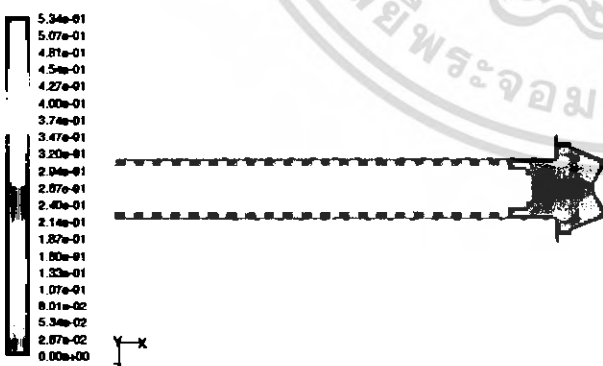
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm

รูปที่ 4.99 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.100 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

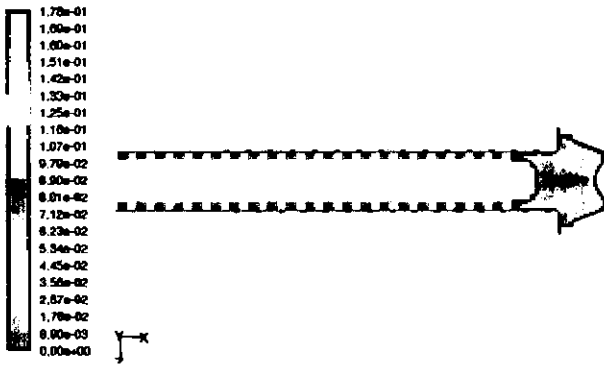
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

รูปที่ 4.101 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

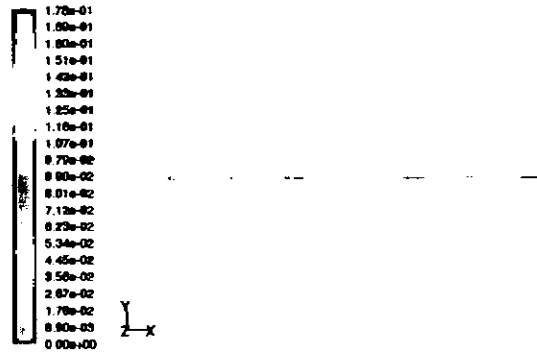
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.102 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

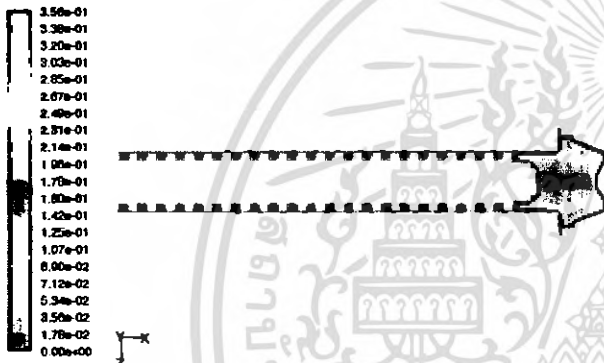
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.103 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

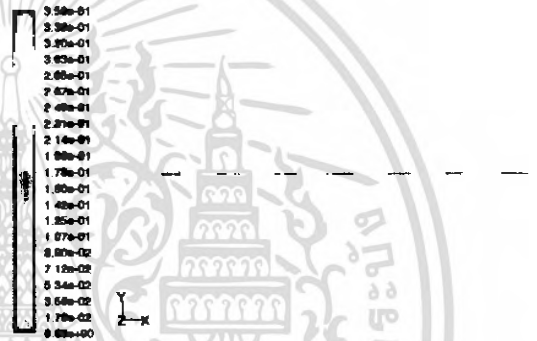
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.104 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

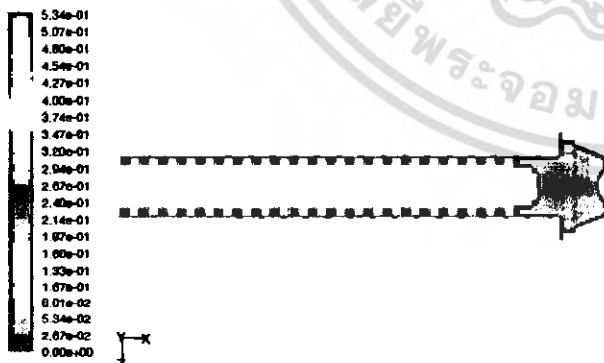
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.105 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

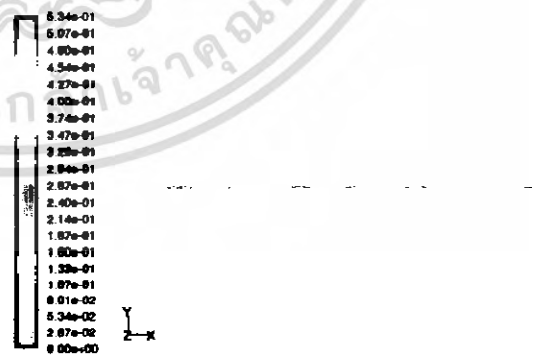
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.106 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

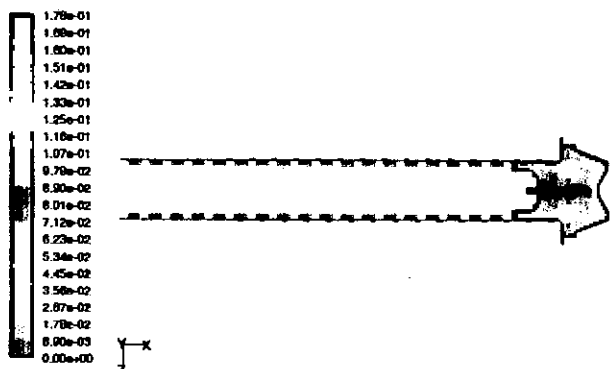


รูปที่ 4.107 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

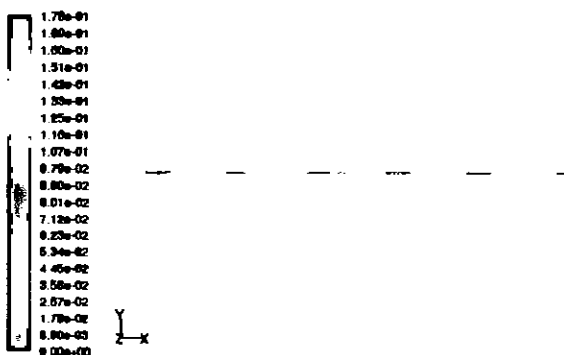
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.108 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

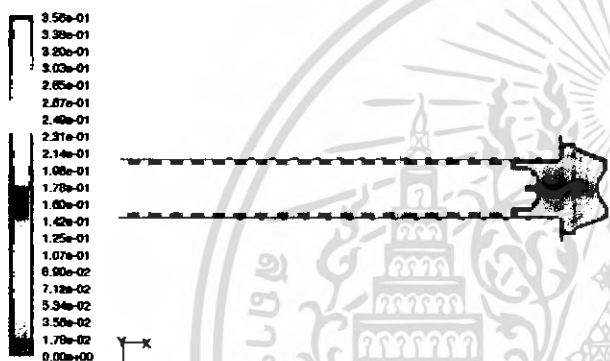
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.109 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

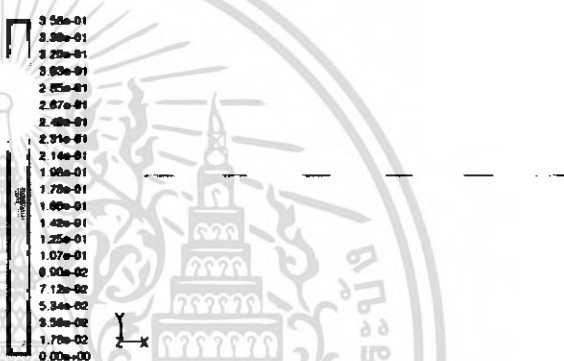
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.110 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

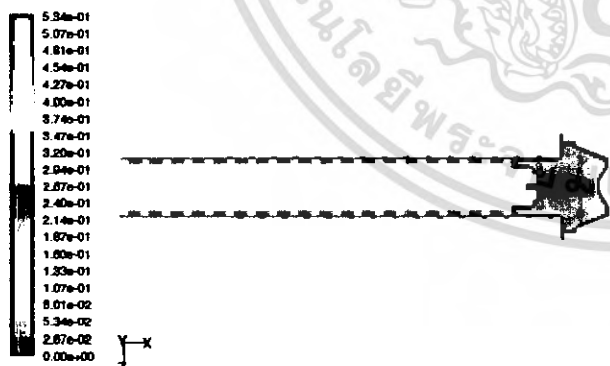
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.111 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

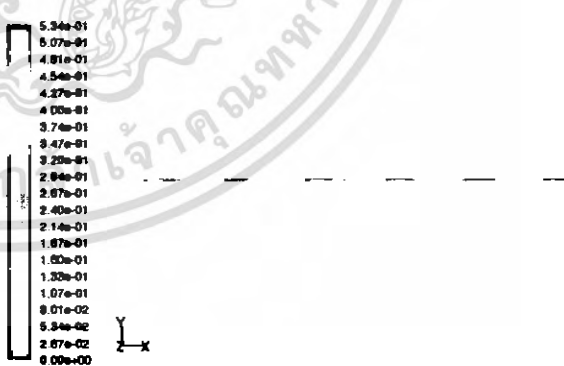
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.112 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

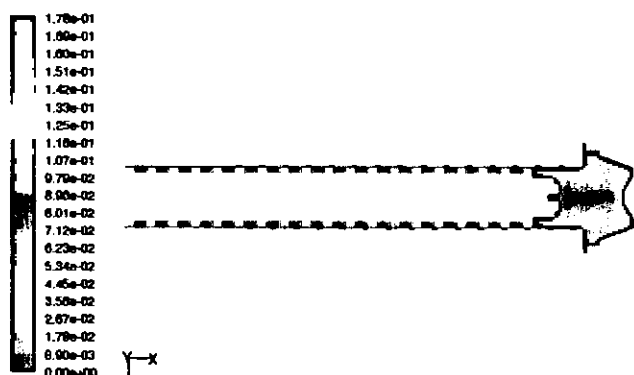


รูปที่ 4.113 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

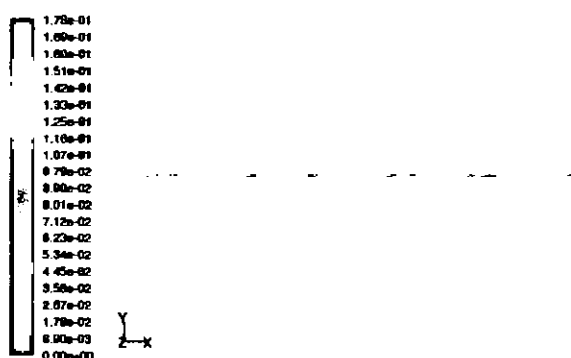
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.114 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

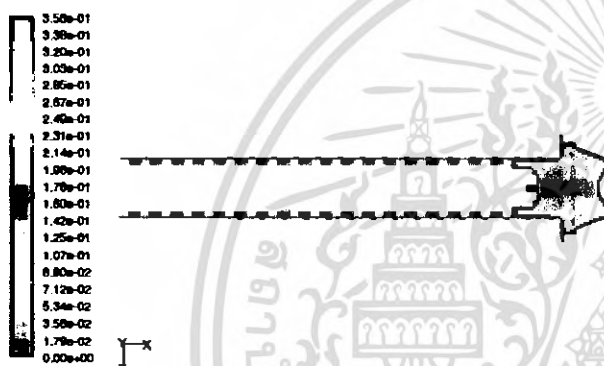
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.115 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.116 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

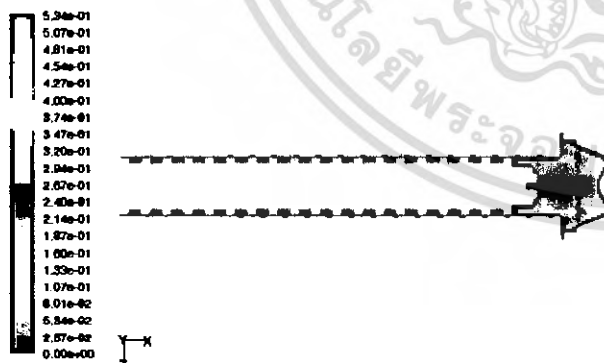
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm

รูปที่ 4.117 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

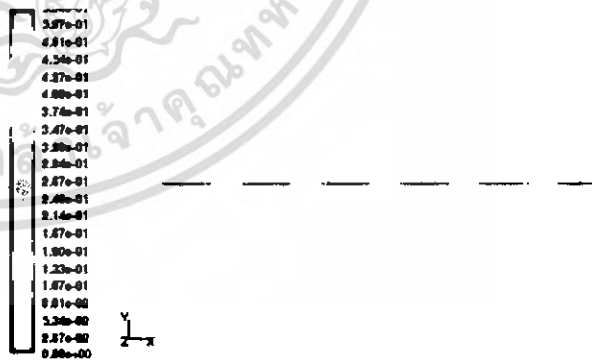
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.118 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

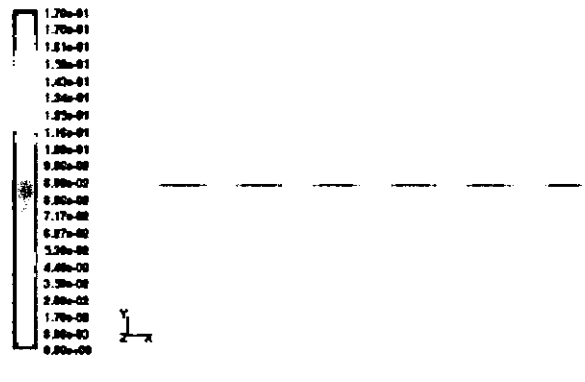
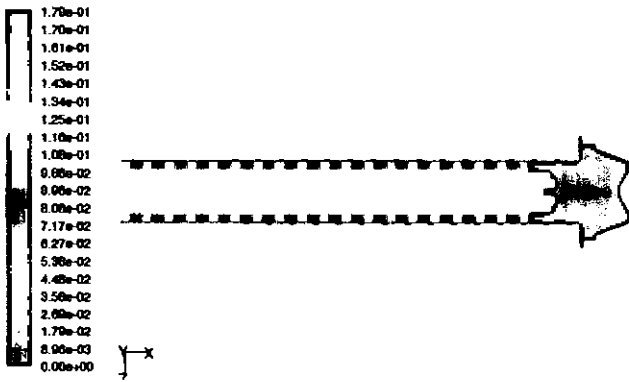


รูปที่ 4.119 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

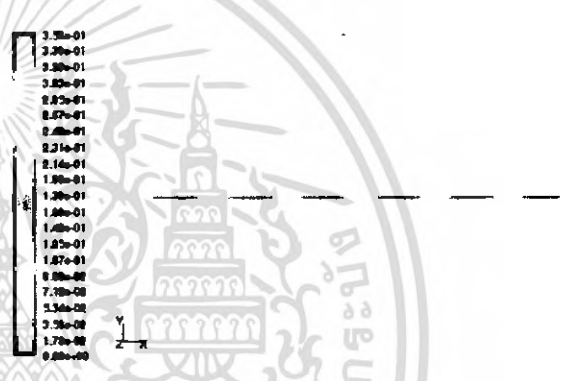
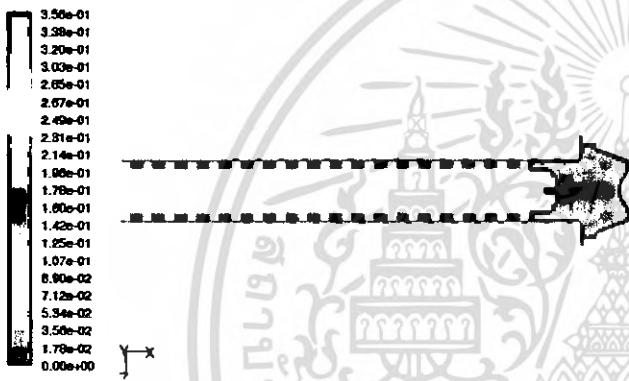
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



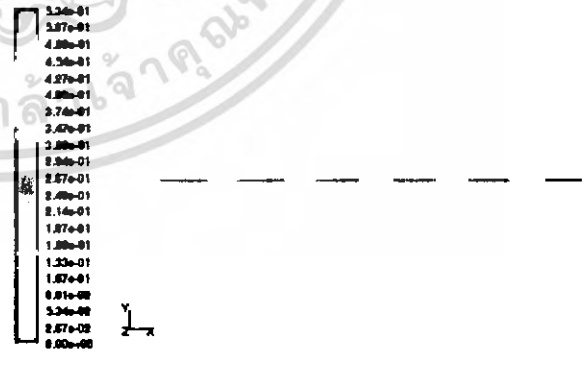
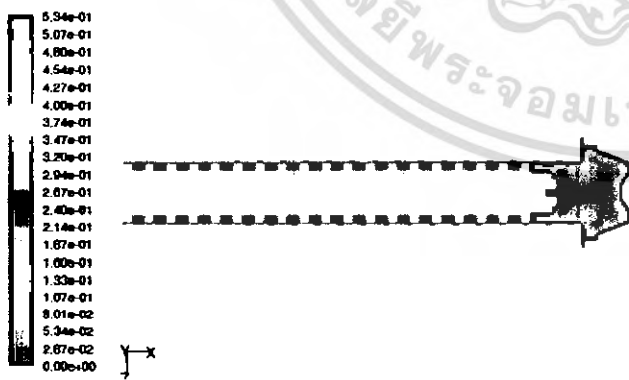
รูปที่ 4.120 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm

รูปที่ 4.121 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.122 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm

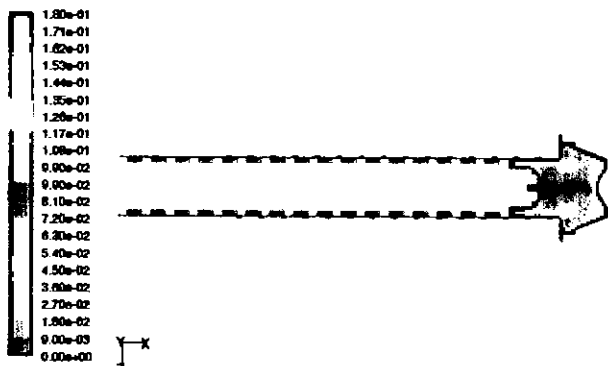
รูปที่ 4.123 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.124 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

รูปที่ 4.125 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

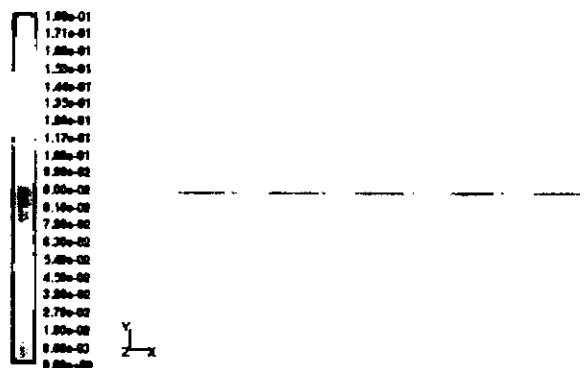
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.126 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

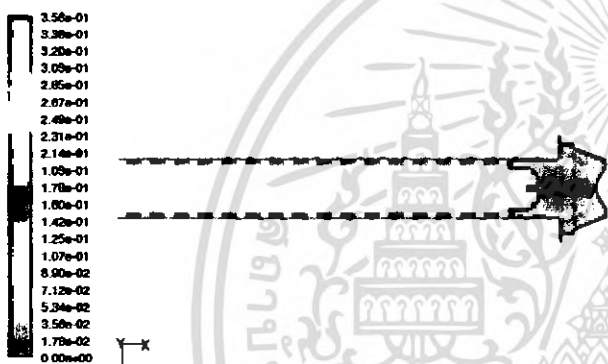
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.127 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

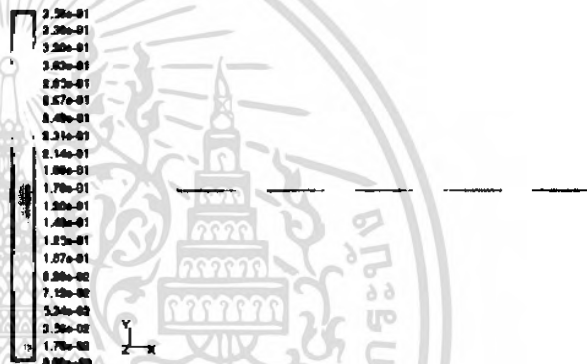
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.128 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

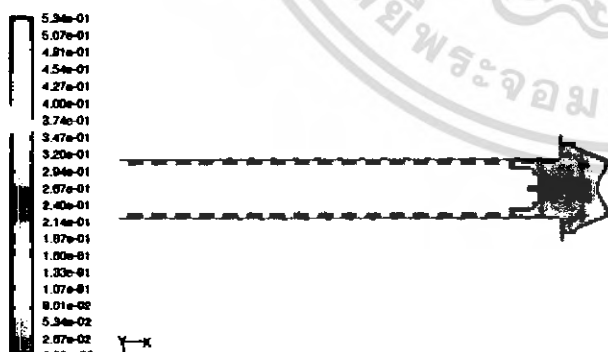
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.129 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.130 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

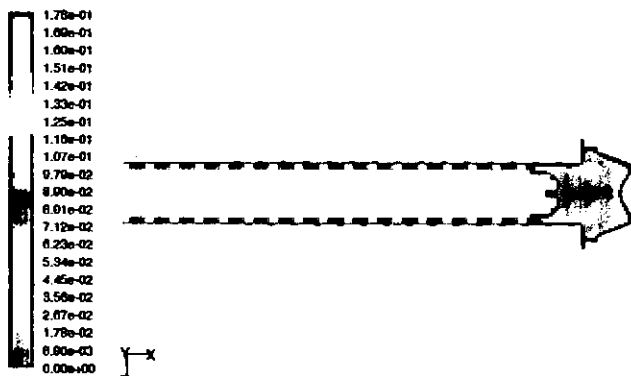


รูปที่ 4.131 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

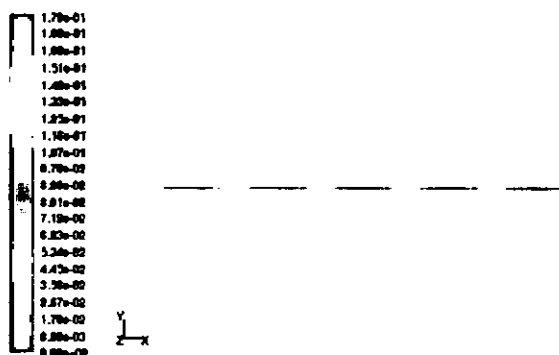
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.132 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

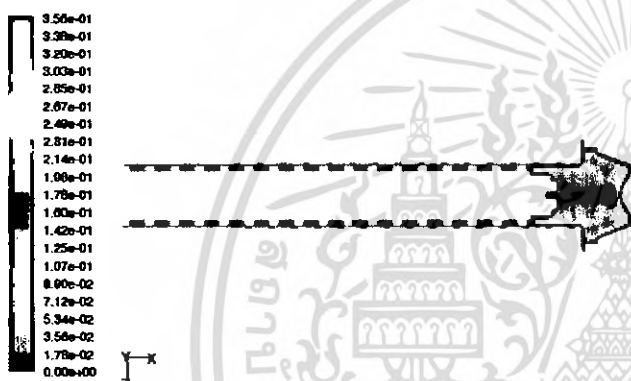
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.133 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

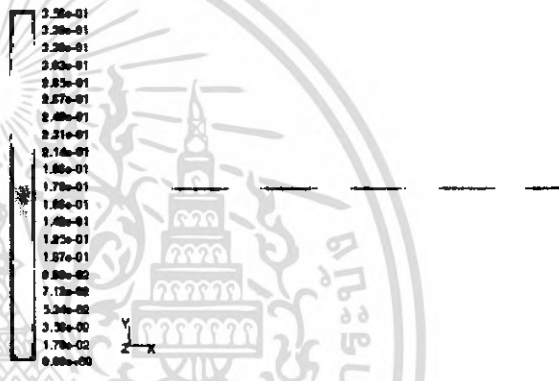
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.134 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

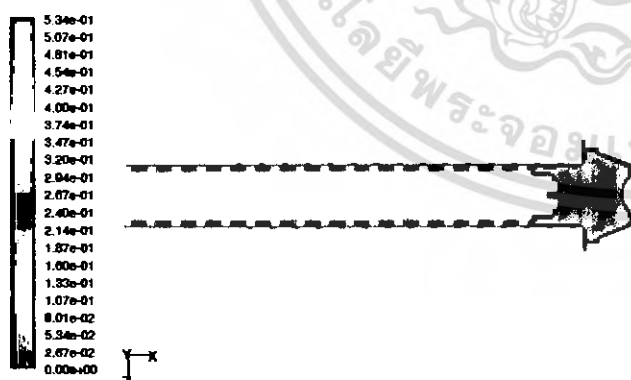
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.135 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

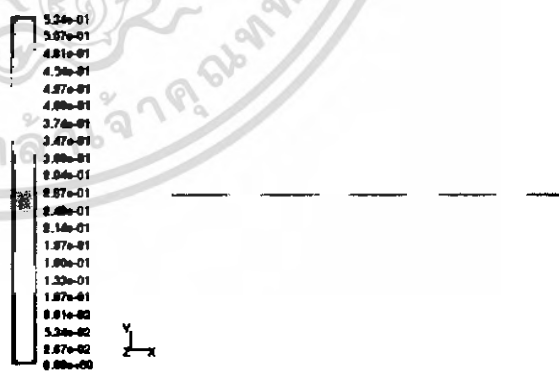
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.136 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

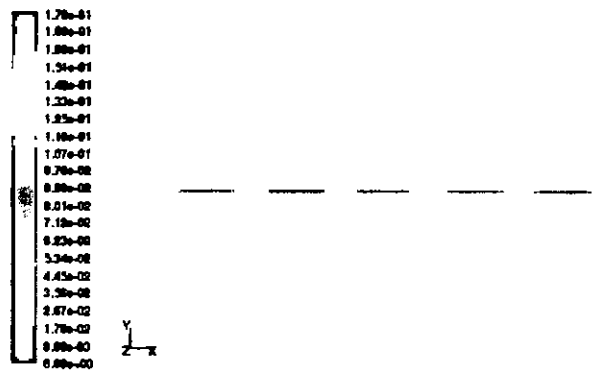
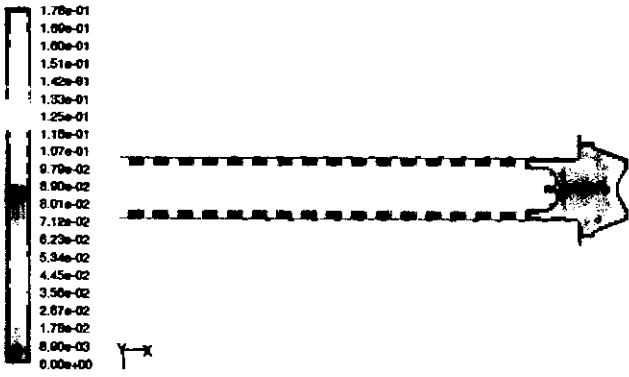


รูปที่ 4.137 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



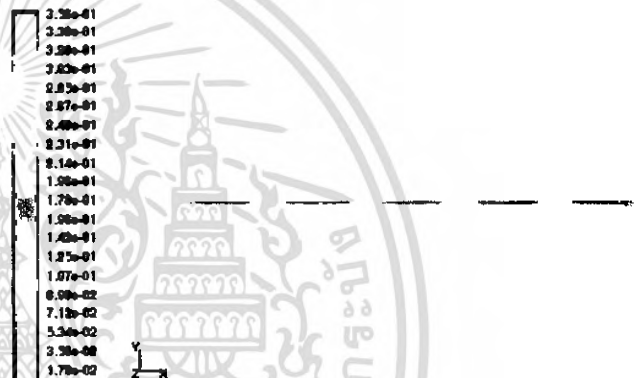
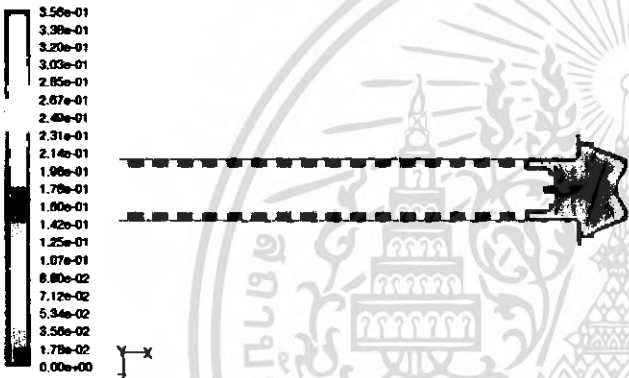
รูปที่ 4.138 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm

รูปที่ 4.139 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25mm ความเร็วรอบ 100 rpm



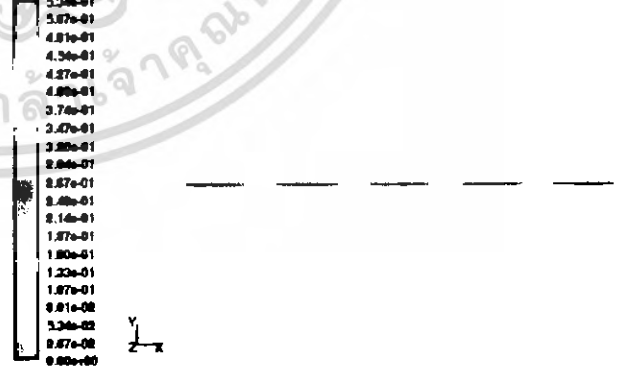
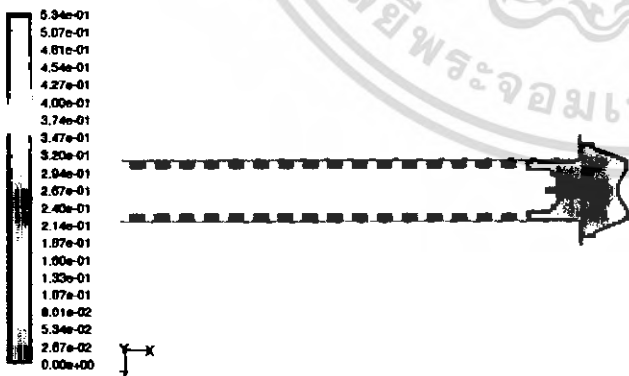
รูปที่ 4.140 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25mm ความเร็วรอบ 200 rpm

รูปที่ 4.141 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.142 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค
สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

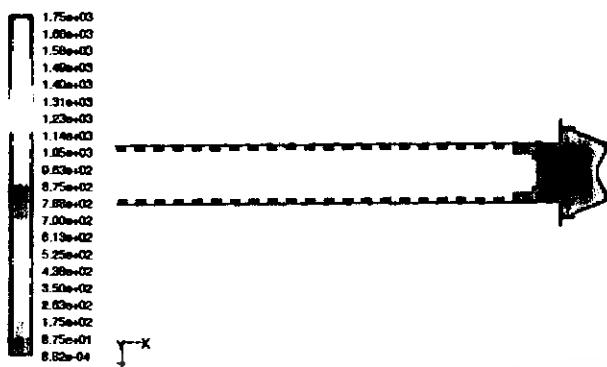
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

รูปที่ 4.143 แสดงค่าของความเร็วของอนุภาค

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

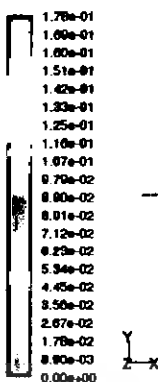
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.144 แสดงค่าของอัตราการเจียน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

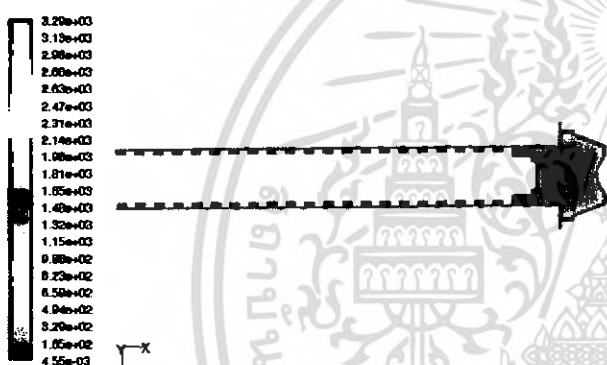
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.145 แสดงค่าของอัตราการเจียน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

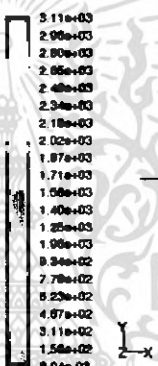
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.146 แสดงค่าของอัตราการเจียน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

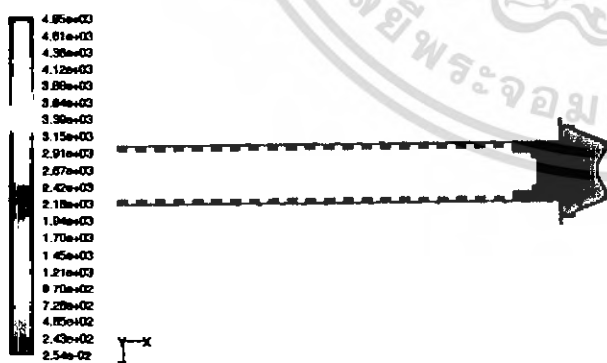
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.147 แสดงค่าของอัตราการเจียน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

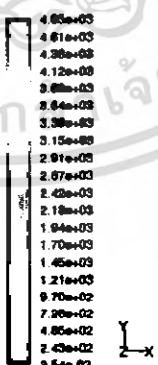
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.148 แสดงค่าของอัตราการเจียน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

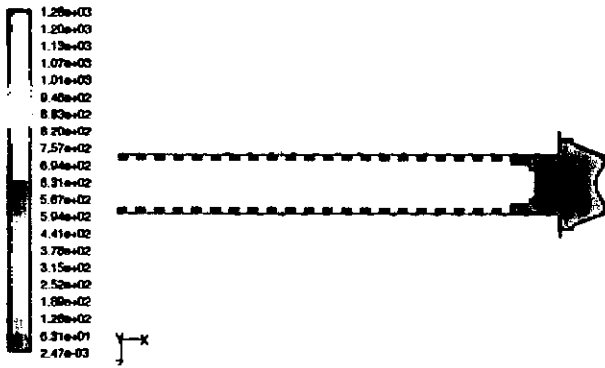


รูปที่ 4.149 แสดงค่าของอัตราการเจียน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

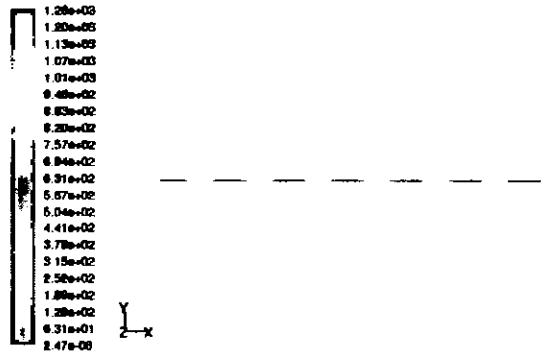
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.150 แสดงค่าของอัตราความเค้น
สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

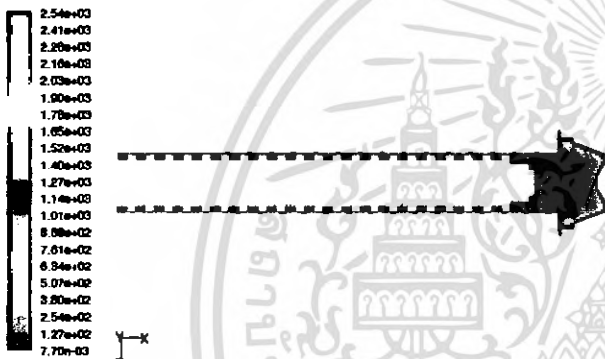
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.151 แสดงค่าของอัตราความเค้น

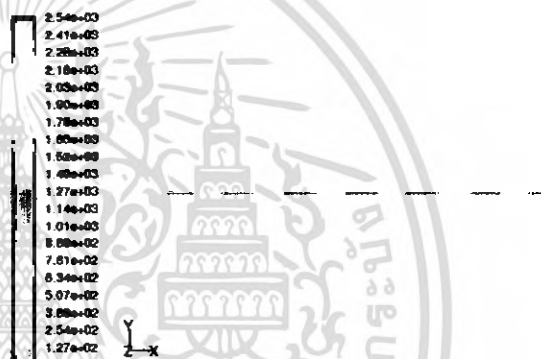
สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.152 แสดงค่าของอัตราความเค้น
สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

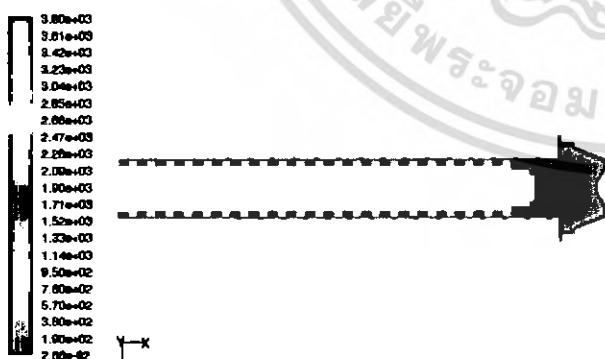
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.153 แสดงค่าของอัตราความเค้น

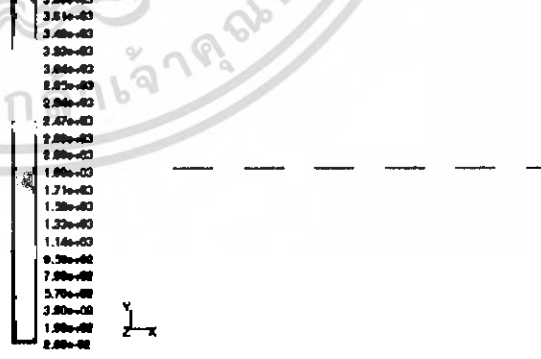
สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.154 แสดงค่าของอัตราความเค้น
สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

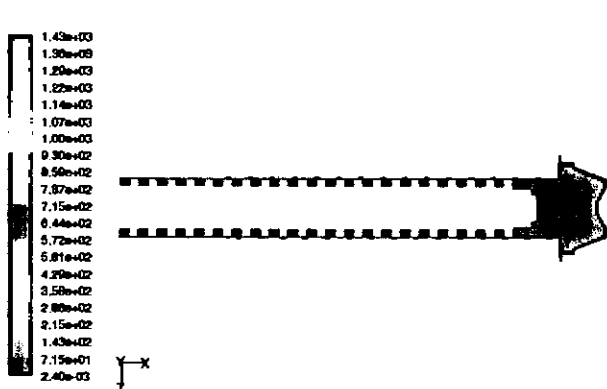


รูปที่ 4.155 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

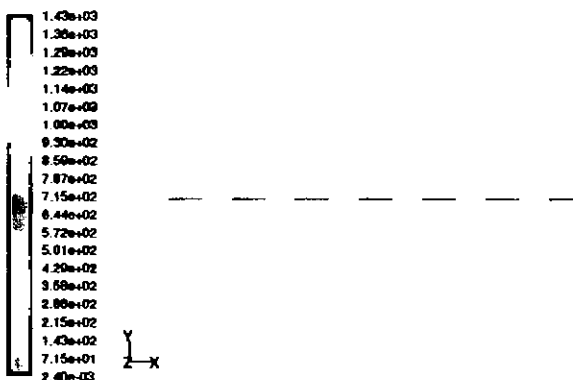
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.156 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

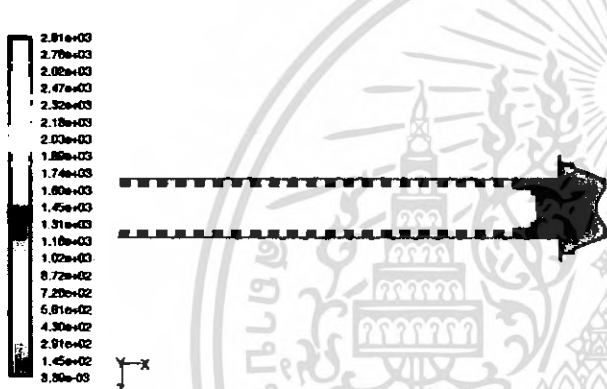
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.157 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

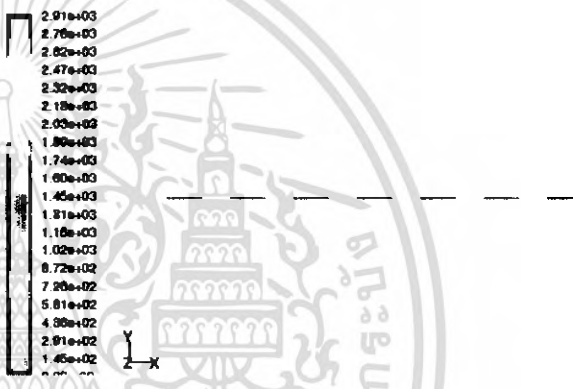
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.158 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

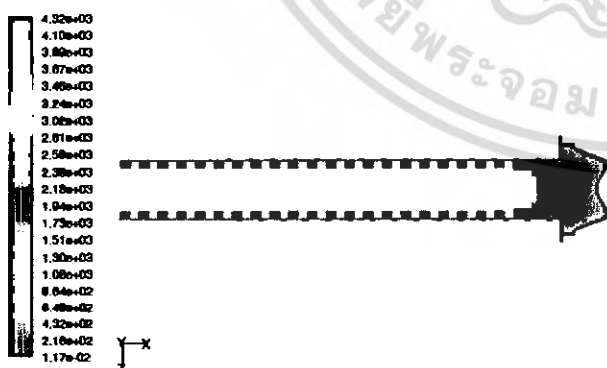
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.159 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

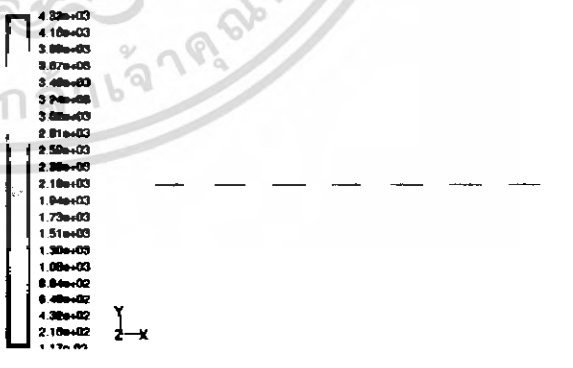
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.160 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

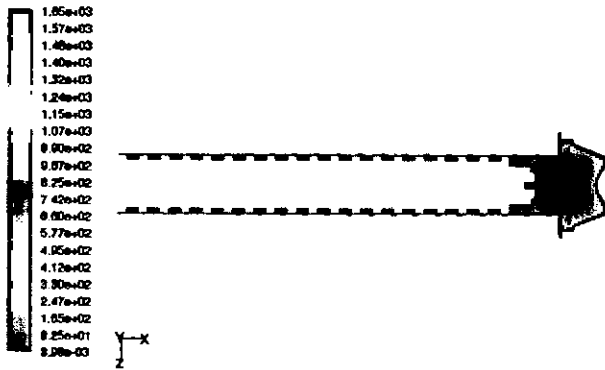


รูปที่ 4.161 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 22 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

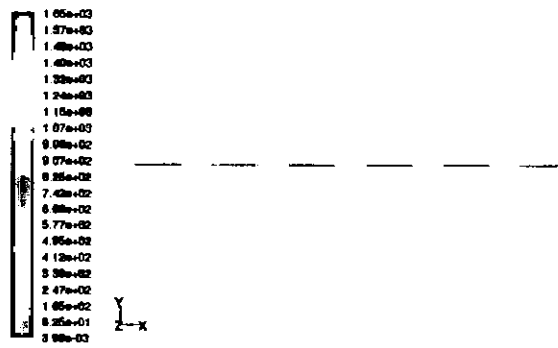
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.162 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

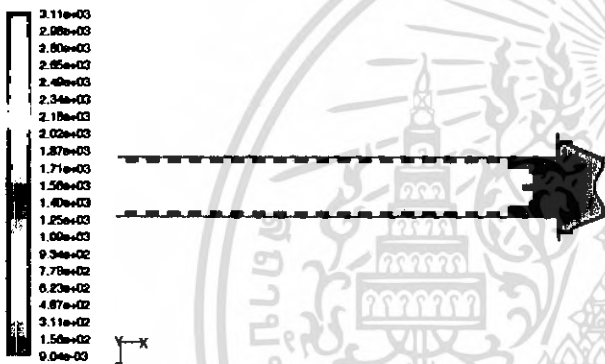
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.163 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

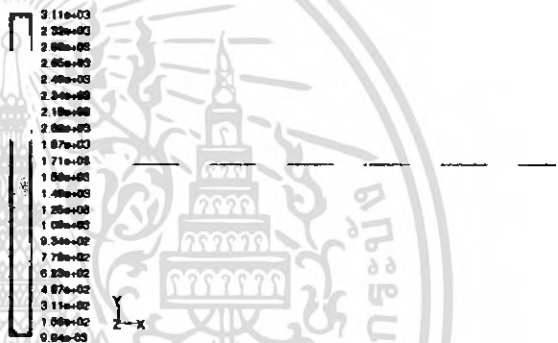
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.164 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

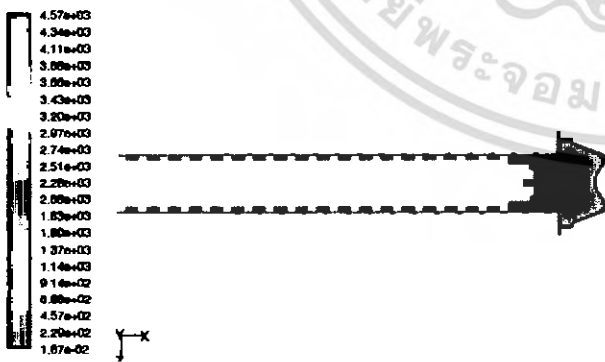
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.165 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

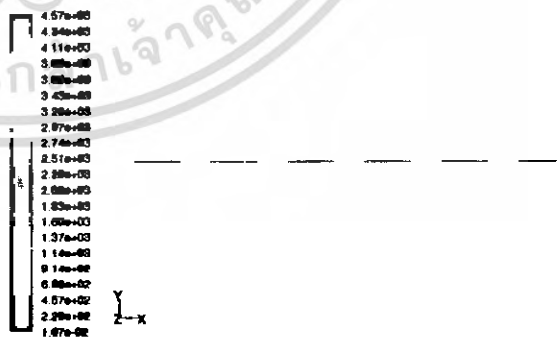
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.166 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

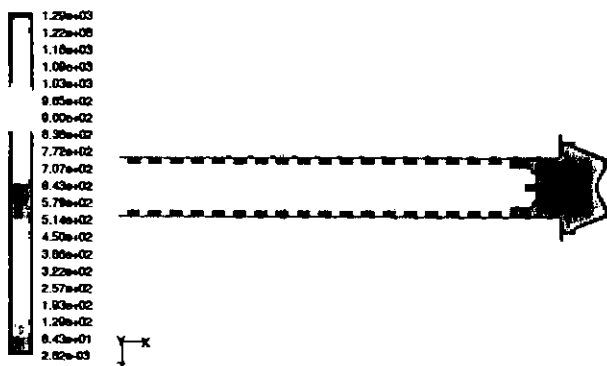


รูปที่ 4.167 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

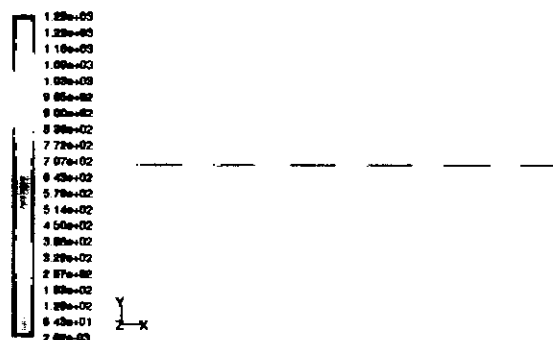
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.168 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

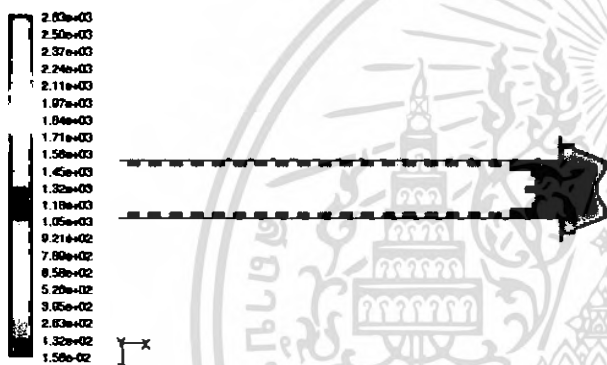
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.169 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.170 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

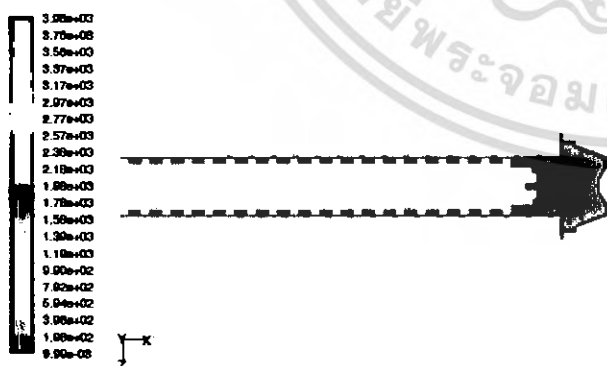
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.171 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

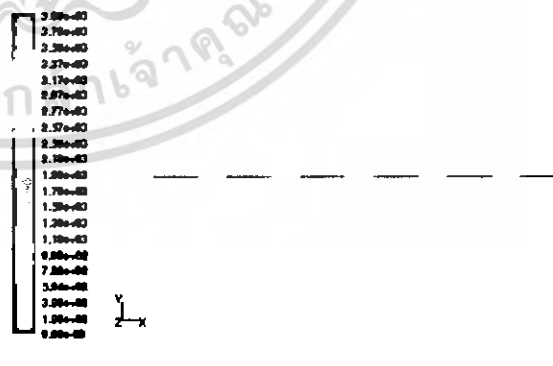
ความลึกร่องเกลียว 3.5mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.172 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

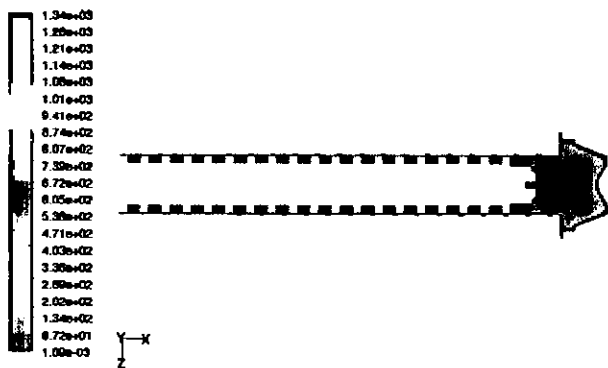


รูปที่ 4.173 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

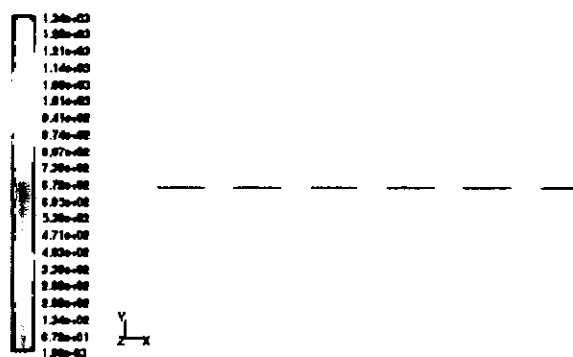
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.174 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลักู ระยะพิทต์ 25 mm

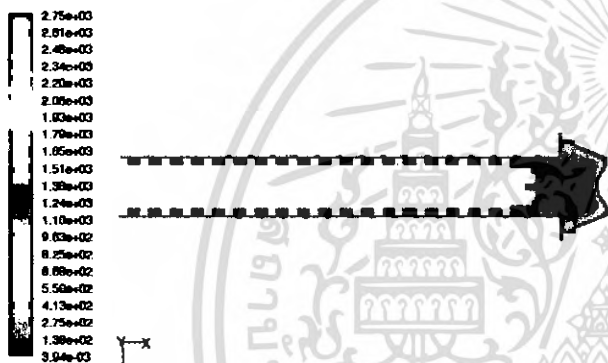
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.175 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลักู ระยะพิทต์ 25 mm

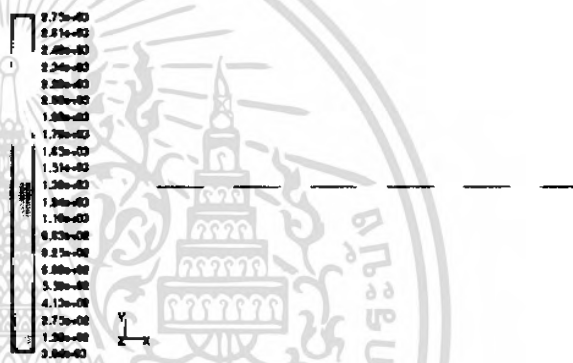
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.176 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลักู ระยะพิทต์ 25 mm

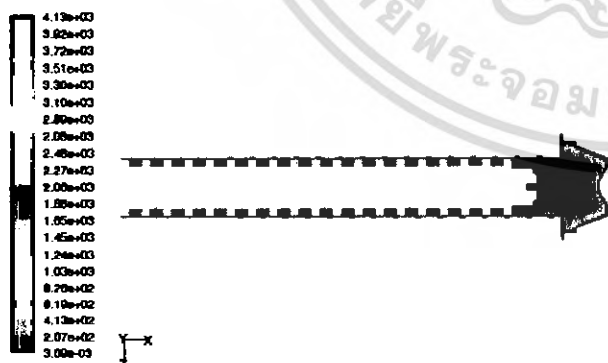
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.177 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลักู ระยะพิทต์ 25 mm

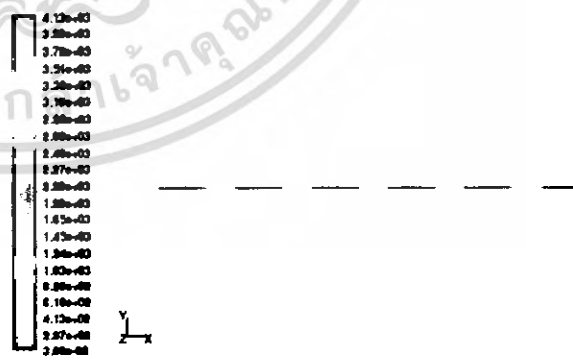
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.178 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลักู ระยะพิทต์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

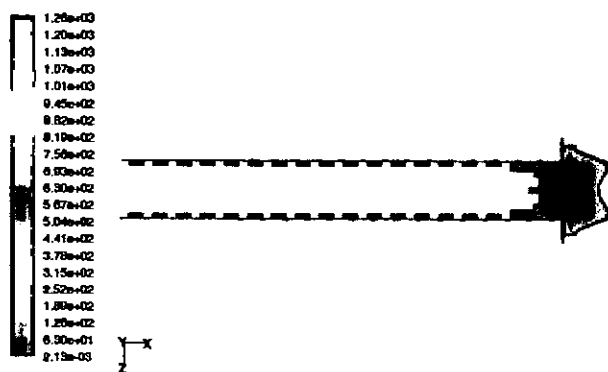


รูปที่ 4.179 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลักู ระยะพิทต์ 25 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

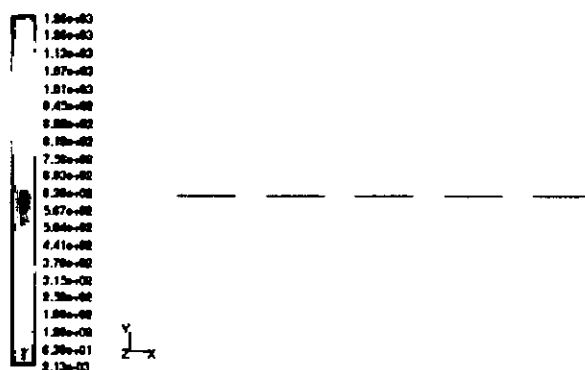
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.180 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลักู ระยะพิทต์ 28 mm

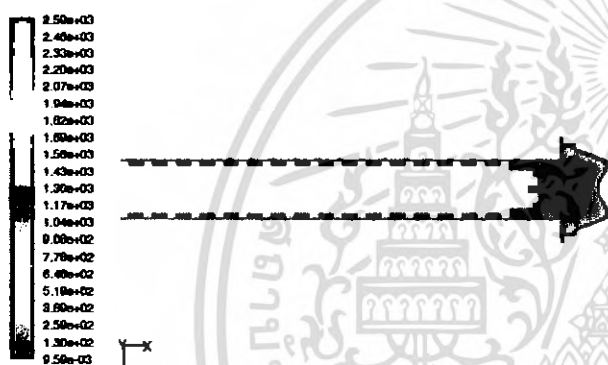
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.181 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลักู ระยะพิทต์ 28 mm

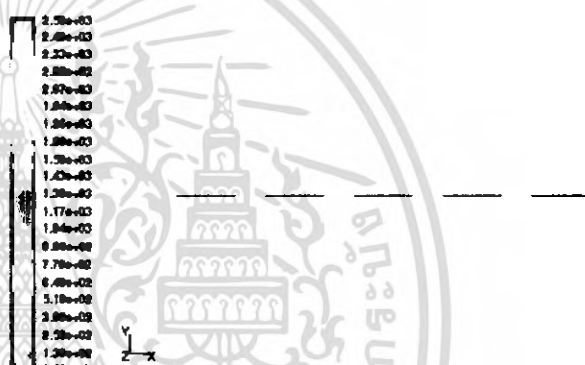
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.182 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลักู ระยะพิทต์ 28 mm

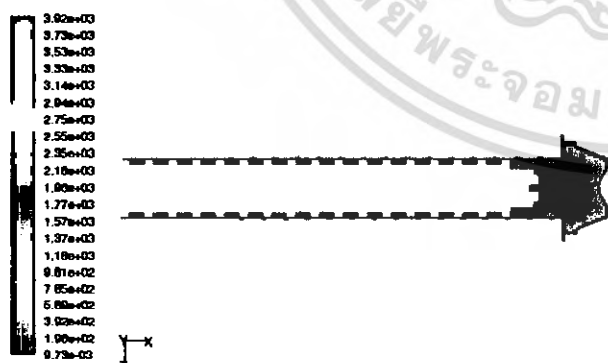
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.183 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลักู ระยะพิทต์ 28 mm

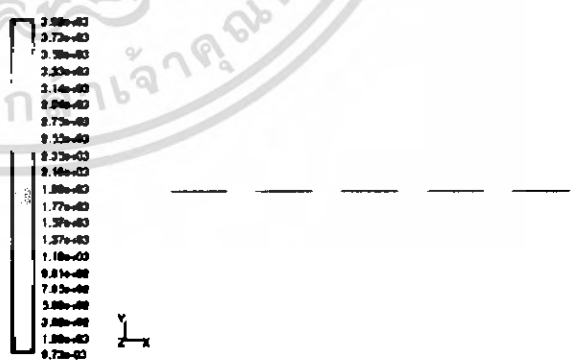
ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.184 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสลักู ระยะพิทต์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

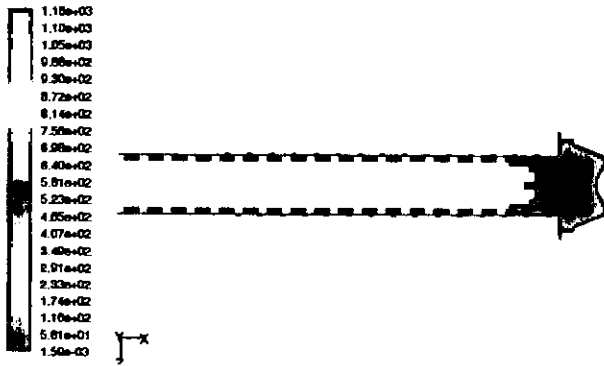


รูปที่ 4.185 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสลักู ระยะพิทต์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

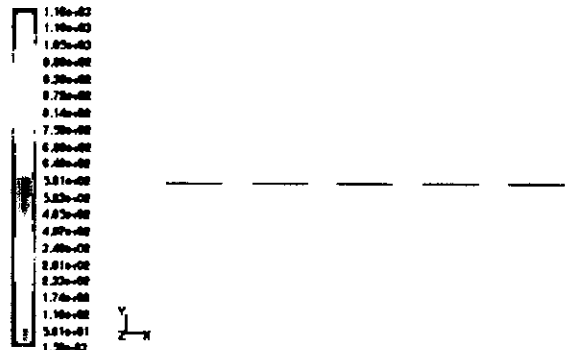
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.186 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

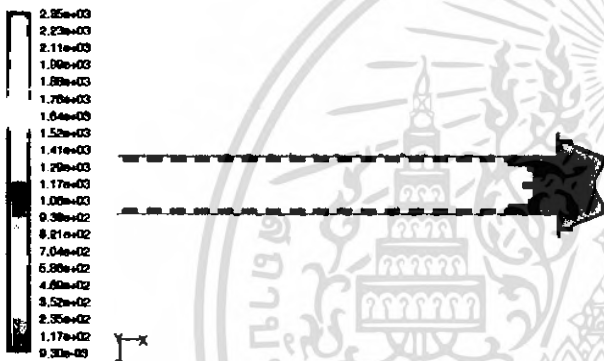
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.187 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

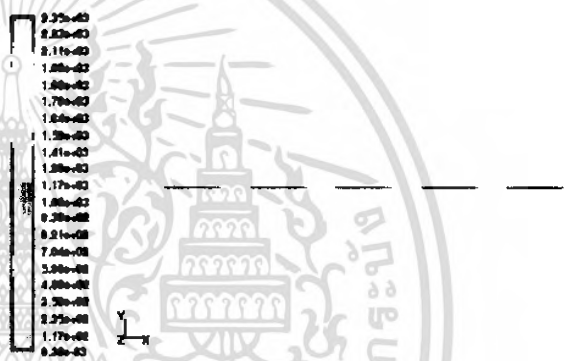
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.188 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

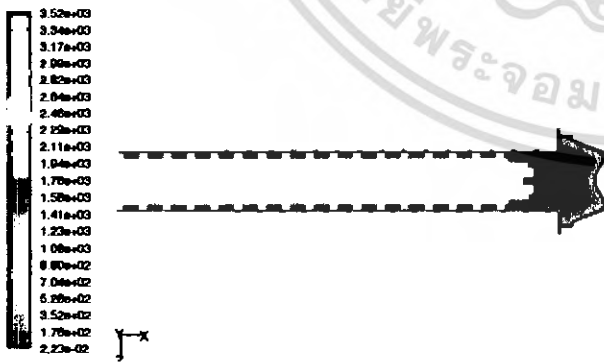
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.189 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

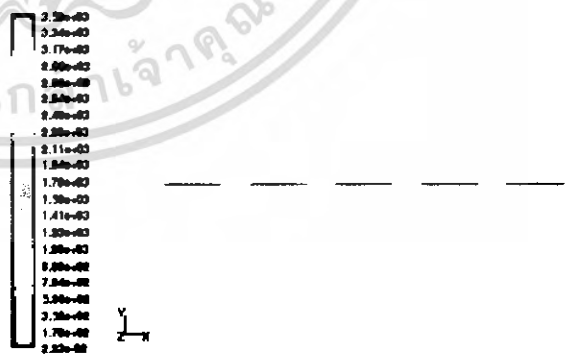
ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.190 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

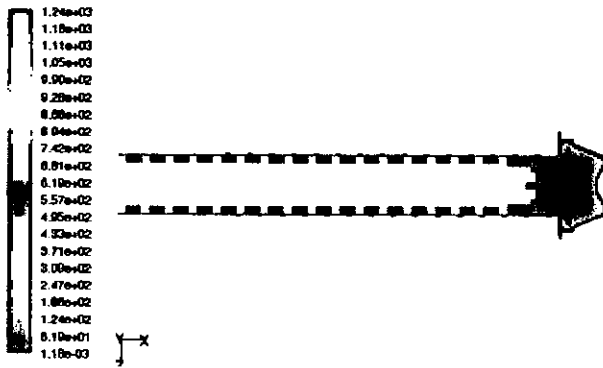


รูปที่ 4.191 แสดงค่าของอัตราการเฉือน

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

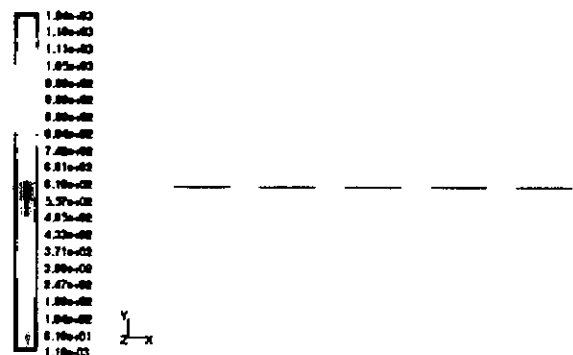
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.192 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

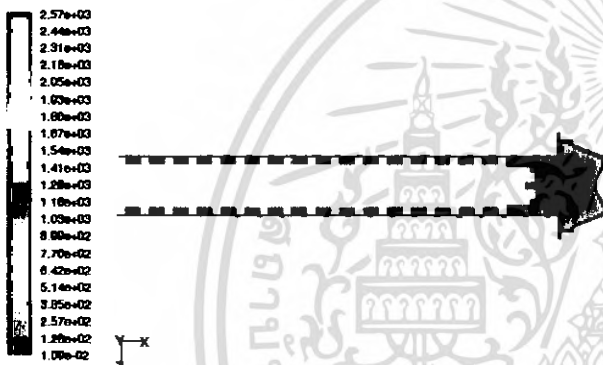
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.193 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

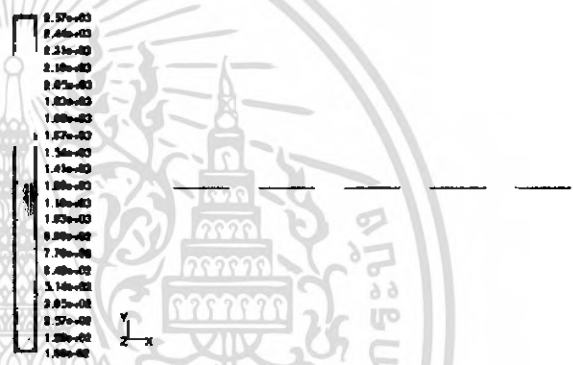
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 100 rpm



รูปที่ 4.194 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

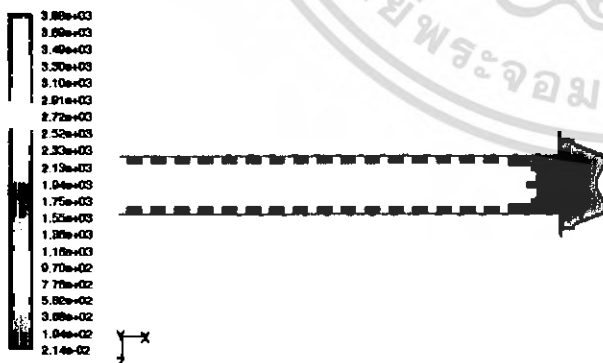
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.195 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

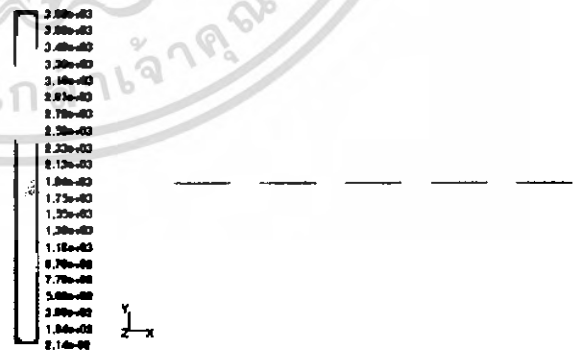
ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 200 rpm



รูปที่ 4.196 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm



รูปที่ 4.197 แสดงค่าของอัตราความเค้น

สำหรับเส้นที่เป็นตัวแทนของสกรู ระยะเวลาพิทช์ 28 mm

ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm ความเร็วรอบ 300 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการวิจัยในการวิเคราะห์หาแรงบิดในกระบวนการเอ็กทริงชันของสกรู โดยตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง พบว่าผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์โวลูม (Finite Volume) มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์โวลูมไม่พิจารณาอิทธิพลของแรงเสียดทานและความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการแต่แรงบิดที่ได้จากการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันจึงสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการหาแนวโน้มของตัวแปร ได้แก่ ระยะพิตช์ (pitch) ความลึกร่องเกลียว (channel depth) และความเร็วรอบของสกรู ว่าส่งผลต่อความดัน ความเร็วของอนุภาค และอัตราการเจือปนได้

5.2 สรุปผล

ในการวิจัยหาอิทธิพลของตัวแปรต่อกระบวนการเอ็กทริงชัน ซึ่งตัวแปรที่ต้องการศึกษาประกอบด้วย ระยะพิตช์ (pitch) ความลึกร่องเกลียว (channel depth) และความเร็วรอบของสกรู หาผลลัพธ์เชิงตัวเลขนำข้อมูลผลลัพธ์เชิงตัวเลขมาสร้างฟังก์ชันหาความเร็วของอนุภาค อัตราการเจือปน และแรงบิด ที่มีอิทธิพลกับ ความเร็วรอบสกรู ระยะพิตช์และความลึกร่องเกลียว โดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้นได้สมการที่ (15) ถึง (17) โดยแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค.

ความเร็วของอนุภาค

$$V = -0.00225P - 0.00188d + 0.000331N \quad (15)$$

อัตราการเจือปน

$$\dot{\gamma} = -1.0131661P - 3.0841444d + 0.000793N \quad (16)$$

แรงบิด

$$\Gamma = -0.00519P - 0.01038d + 0.00793N \quad (17)$$

โดย P (ระยะพิตช์) = 22, 25, 28 mm

d (ความลึกร่องเกลียว) = 2.75, 3.5, 4.25 mm

N (ความเร็วรอบสกรู) = 100, 200, 300 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ V = ความเร็วของอนุภาค (m/s)

$\dot{\gamma}$ = อัตราการเฉือน (1/s)

Γ = แรงบิด (Nm)

สรุปได้ว่า

5.1.1 ความเร็วของอนุภาค อัตราการเฉือนและแรงบิด แปรผันเชิงเส้นกับความเร็วรอบของสกรู แต่แปรผกผันกับระยะพิทช์ และความลึกร่องเกลียว

5.1.2 ความดันไม่ได้รับอิทธิพลจาก ระยะพิทช์ (pitch) ความลึกร่องเกลียว (channel depth) และความเร็วรอบของสกรู

5.3 ข้อเสนอนณะ

5.3.1 เนื่องจากความดันมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของอาหารในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นอย่างมากแต่จากการศึกษาผลของตัวแปร ได้แก่ ระยะพิทช์ (pitch) ความลึกร่องเกลียว (channel depth) และความเร็วรอบของสกรู พบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเหล่านี้ไม่ส่งผลต่อความดัน เนื่องจากเพราะน้ำมีคุณสมบัติเป็นของไหลประเภทนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) คือ ความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้น หากต้องการศึกษาผลของตัวแปรว่ามีผลต่อความดันในกระบวนการอย่างไร จะต้องเลือกศึกษาของไหลประเภทที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

5.3.2 ควรมีการพิจารณาผลของความร้อนและแรงเสียดทานในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการเฉือนและความดัน โดยส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหารมากที่สุด

5.3.3 ควรมีการศึกษาการเปลี่ยนสถานะของวัสดุดิบจากของแข็งไปเป็นของไหล เพื่อนำมาสร้างสมการอธิบายแบบจำลองกระบวนการ

บรรณานุกรม

- เดช พุทธเจริญทอง . 2541 . การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ . กรุงเทพฯ : พิมพ์ดี
เท็ดส์กดี คุปติมิตร , ปัทมา ฌิวบาง และวิภา เจริญจร . "การหาสภาวะที่เหมาะสม
ในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารจากปลายข้าวด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่" .
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร , สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- ประเสริฐ สิทธิประสิทธิ์ , ลลดา ปรีดา และ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต . 2543 . เคมี
และจุลชีวของอาหาร . พิมพ์ครั้งที่ 3 . นนทบุรี : มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช .
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ . 2545 . ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์
ของไหล . พิมพ์ครั้งที่ 1 . กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ .
- สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ . 2547 . Food
Extrusion : A technical Guide for Extruder Operators . กรุงเทพฯ :
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ .
- สมชาย แยมใส , 2548 . "การศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุเชิงประกอบที่มีเนื้อโลหะ
เป็นเนื้อหลักซึ่งถูกเสริมความแข็งแรงแบบอนุภาคภายใต้การอัดขึ้นรูปร้อน" .
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- อาทิตย์ เลื่อนฤทธิ์ และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว . 2545 . "การวิเคราะห์การไหลของ
อากาศรอบรถยนต์นั่ง" . วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
เหนือ .
- Antonio Ficarella , Marco Milanese and Domenico Laforgia . 2004 . "Numerical
study of the extrusion process incereal production : Part I . Fluid
dynamics analysis of the extrusion system " . Journal of Food
Engineering : 103-111 .
- Antonio Ficarella , Marco Milanese and Domenico Laforgia . 2004 . "Numerical
study of the extrusion process incereal production : Part II . Analysis of
Variance " . Journal of Food Engineering : 178-188 .

- Bruce R. Munson, Donald F. Young and Theodore H. Okiishi . 2002.
Fundamentals of Fluid Mechanics . 4th edition . New York : John Wiley & sons.
- C. Mercier , P. Linko and J.M. Harper. n.d. Extrusion Cooking . Minnesota :
American Association of Cereal Chemists .
- F. Edi – Soetaredjo , G. Nashed , R.P.G. Rutgers and P.J. Torley . 2003
"Numerical Analysis of the effect of extrusion condition on floe in slit die rheometer ". 3rd International Conference on CFD in the Mineral and Process Industries : 521- 526
- Hamed Faridi and Jon M. Faubion . 1990 . Dough Rheology And Baked Product Texture . New York : Van Nostrand Reinhold.
- K.M. Dhanasekharan and J.L. Kokini . 2003. " Design and scaling of wheat dough extrusion by numerical simulation of flow and heat transfer " .
Journal of Food Engineering : 421-430
- M. Anandha Rao . 1999 . Rheology of Fluid and Semisolid : Principles and Applications .Maryland : Aspen Publisher .
- Micha Peleg .1983 . Physical Properties of Food . Chicago : The Publishing.
- Raman V. Chiruvella , Y. Jaluria and Mukund V. Karwe .1996 ." Numerical Simulation of the Extrusion Process for Food Materials in Single- screw Extruder ". Journal of Food Engineering.
- Shafiur Rahman . n.d. Food Properties Handbook . Boca Raton: CRP press.
- Steve W. Cui . 2005 . Food Carbohydrates Chemistry , Physical Properties and Applications . Boca Raton : CRC press
- X. Weert ,C.J. Lawrence , M.J. Adams and B.J. Briscoe . 2000 . "Screw extrusion of food powder : Prediction and performance " . Chemical Engineering Science Journal : 1933-1949 .



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CFD

การจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันในโครงการนี้ได้ใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูชันที่มีขนาดของสกรู ดังนี้

ระยะพิตช์ = 25 mm

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน(d)= 28 mm

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก(D)= 35mm

ความยาวเกลียว (L)= 317.5mm

ความลึกของร่องเกลียว (H)= 3.5mm

Clearance=1mm

มีลักษณะเป็นเกลียว 2 ปาก

ขั้นตอนการจำลองเป็นดังนี้

ก.1. สร้างแบบจำลองในโปรแกรม CAD

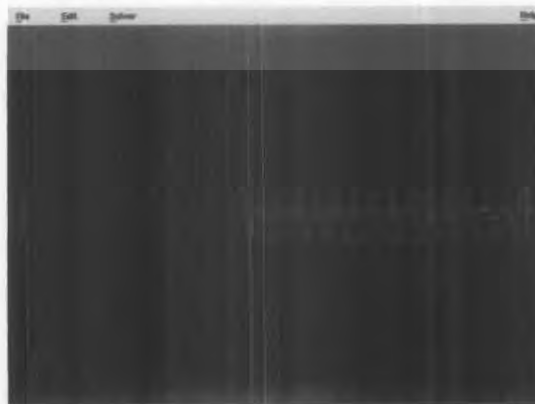
สร้างแบบจำลองของสกรู บาร์เรล และหน้าแปลนโดยโปรแกรม CAD บันทึกเป็นไฟล์สกุล .STEP

ก.2. สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD

ก.2.1 การสร้างเนื้อของไหล (Fluid) ที่อยู่ในทอทรงบาร์เรล

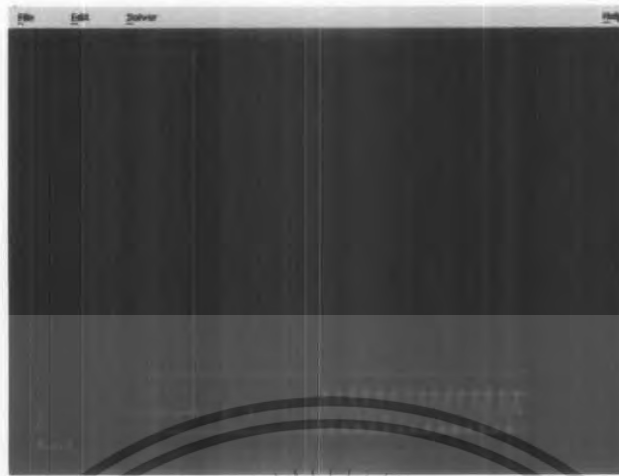
การนำเข้าไฟล์สกุล .STEP ซึ่งเป็นแบบจำลองของบาร์เรลที่เป็นเนื้อโลหะ โดยการคลิก File > Import > STEP.... ดังรูป ก.1 จากนั้นสร้างชิ้นงานใหม่ในโปรแกรม CFD เป็นรูปทรงกระบอก เพื่อสมมติให้เป็นเนื้อของไหล จัดให้อยู่ในระนาบเดียวกัน ทำการนำปริมาตรของชิ้นงานทั้งสองมาลบกัน (Subtracts) โดยให้ชิ้นงานใหม่เป็นตัวตั้ง ลบด้วยชิ้นงานที่เป็นโลหะเป็น เพื่อให้ได้เนื้อของของไหลทั้งหมด

คลิก Geometry Command Button > Volume Command Button > Subtract

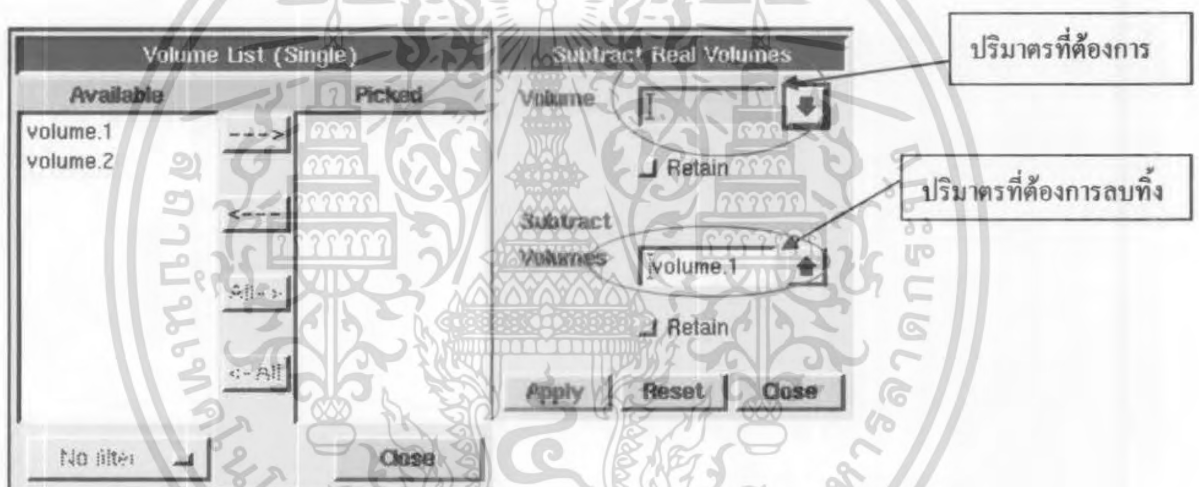


รูปที่ ก.1 แสดงการนำเข้าแบบจำลองที่เป็นไฟล์สกุล .STEP เข้ามาในโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 แสดงการสร้างชิ้นงานทรงกระบอกเพื่อใช้เป็นเนื้อวัสดุในกระบวนการ

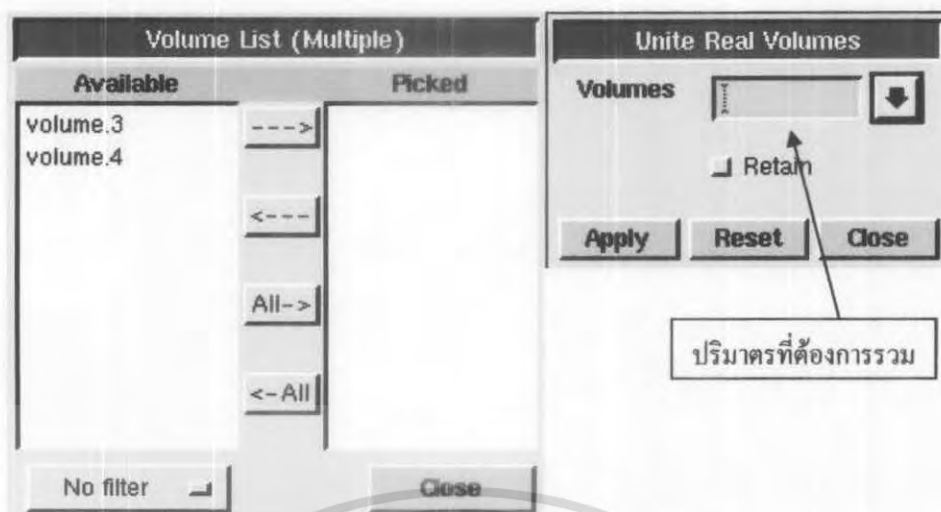


รูปที่ ก.3 แสดงหน้าต่างการกำหนด Subtract Real Volume

ทำเช่นเดียวกันกับหน้าแปลน (Die) แล้วนำเนื้อวัสดุที่ได้จากบาร์เรลและหน้าแปลนมาต่อกันแล้วรวมให้เป็นชิ้นงานเดียวกัน (Unite) จะได้ชิ้นงานที่เป็นเนื้อวัสดุที่ถูกบรรจุจนเต็มทรงกระบอก ดังรูป ก.5

คลิก Geometry Command Button > Volume Command Button > Unite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



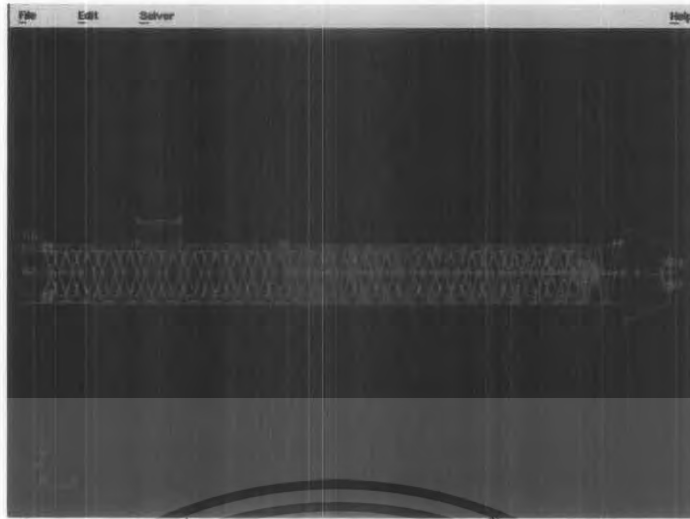
รูปที่ ก.4 แสดงวิธีการ Unite ชิ้นงาน



รูปที่ ก. 5 แสดงชิ้นงานที่เป็นเนื้อของเหล็กทั้งหมดเมื่อไม่มีสกรู

จากนั้นทำการนำสกรูที่เป็นไฟล์สกรู STEP เข้ามาลบออกจากเนื้อวัสดุที่สร้างไว้ข้างต้น จะได้ชิ้นงานจำลองที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ดังรูป ก.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



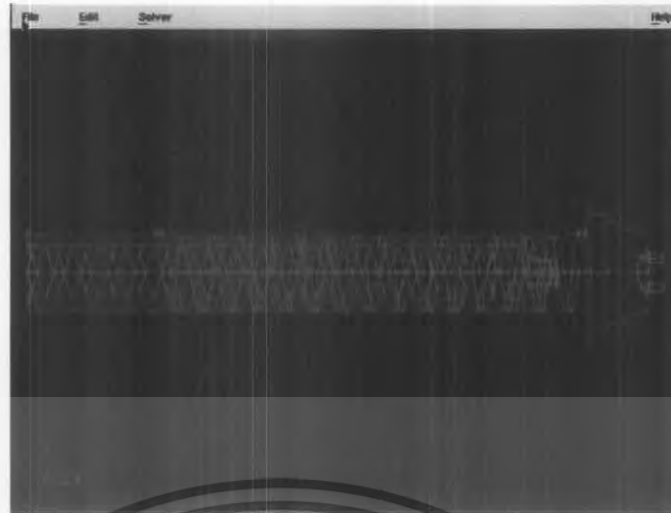
รูปที่ ก. 6 แสดงการ subtract ชิงงาน



รูปที่ ก.7 แสดงชิ้นงานที่เป็นเนื้อวัสดุทั้งหมดที่อยู่ในเครื่องอิเล็กทรอนิกส์

จากนั้นทำการตัดส่วนที่ไม่มีความสำคัญหรือสำคัญน้อยมากในกระบวนการออก เพื่อเป็นการประหยัดหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ (Memory Computer) จะได้ชิ้นงานที่ใช้เป็นแบบจำลองในการจำลองกระบวนการ ดังรูป ก. 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก. 8 แสดงชิ้นงานที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

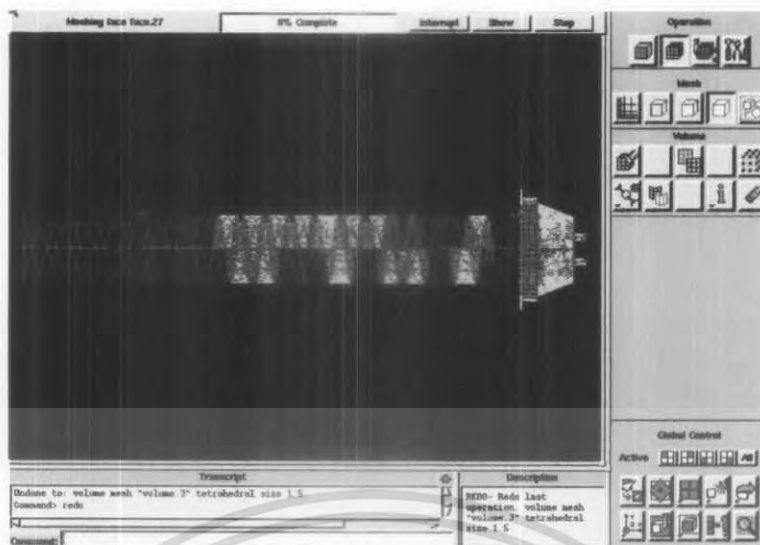
ก.2.2 การสร้าง Mesh

คลิก Mesh Command Button > Volume Command Button > Mesh Volume

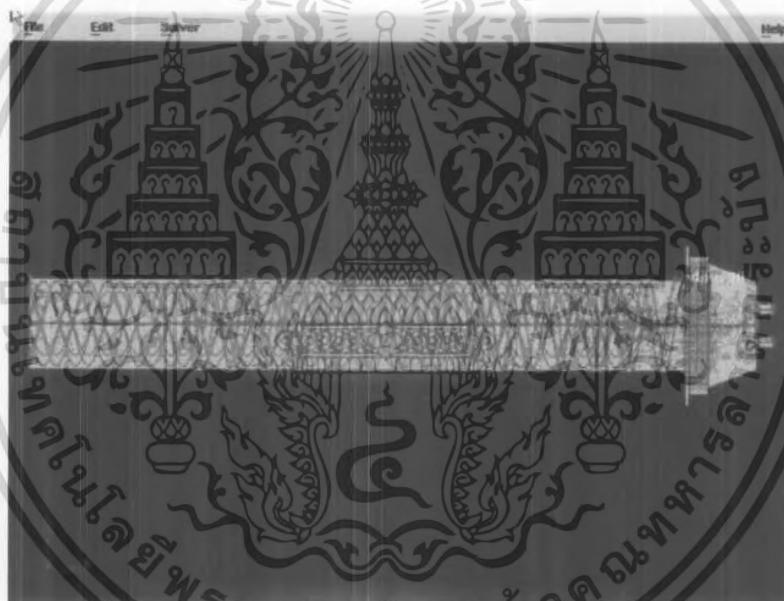


รูปที่ ก. 9 แสดงวิธีการสร้างกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.10 แสดงการสร้างกริด

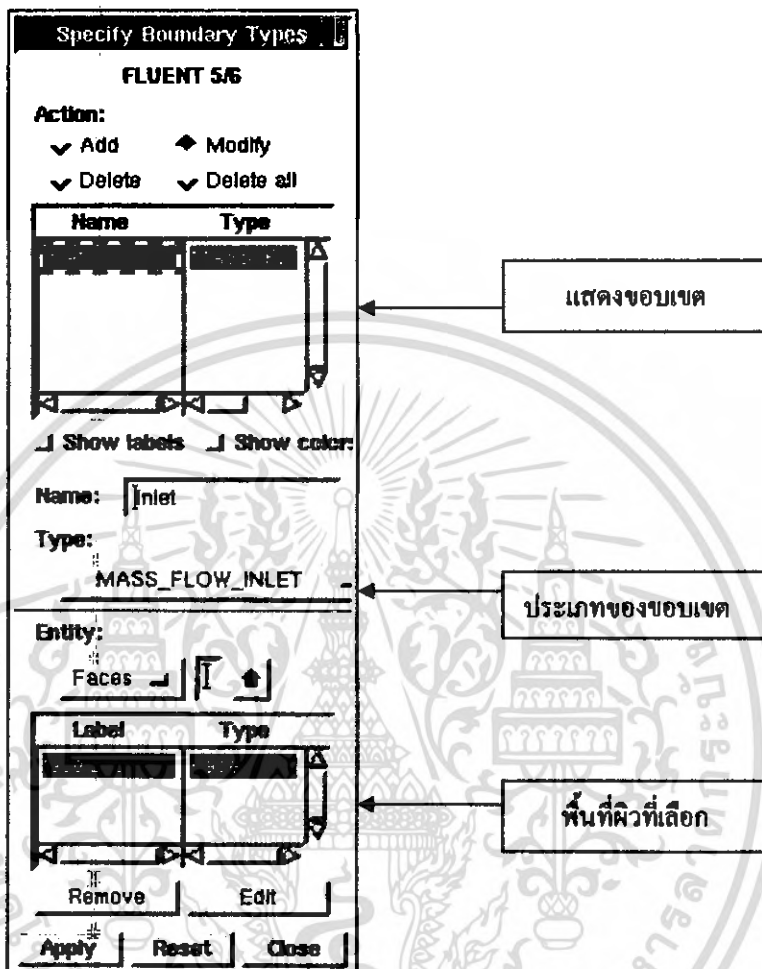


รูปที่ ก.11 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

เมื่อได้ชิ้นงานที่สร้างกริดแล้วต้องทำการกำหนดเงื่อนไขขอบลงบนชิ้นงาน โดยการคลิก Zones Command Button > Specify Boundary Type Button จะปรากฏหน้าต่าง ดังรูปที่ ก. 12



รูปที่ ก. 12 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบ

โดยในโครงงานนี้ได้กำหนดเงื่อนไขขอบ 4 เงื่อนไขคือ

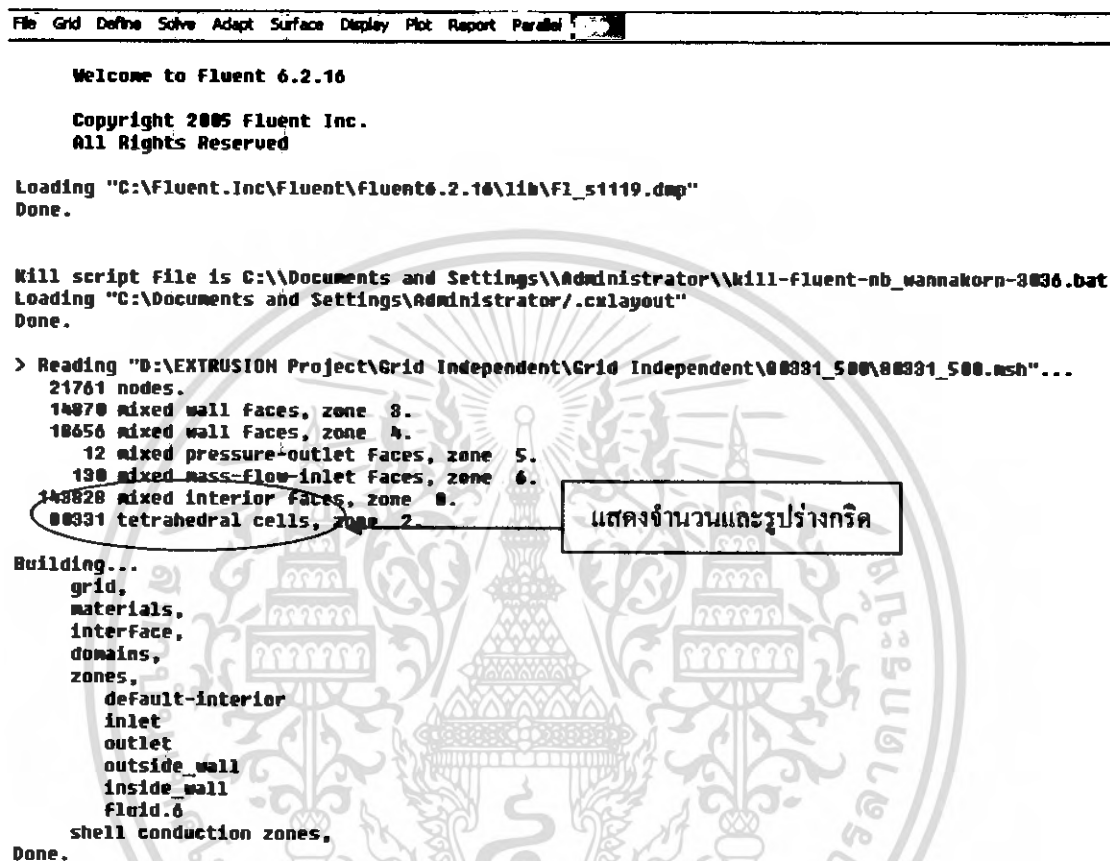
- อัตราการไหลเชิงมวลตำแหน่งทางเข้า (Inlet_Mass flow rate)
- ความดันตำแหน่งทางออก (Outlet_Pressure)
- ผนังด้านนอก(Outside_Wall)
- ผนังด้านใน (Inside_Wall)

เมื่อเมื่อสร้างเงื่อนไขขอบแล้ว ทำการส่งชิ้นงานสู่ส่วนการประมวลผล โดยคลิก File > Export > Mesh..... จะได้ไฟล์สกุล .msh ซึ่งใช้ในการประมวลผล

ก.3. การประมวลผล

ก.3.1 การนำชิ้นงานเข้าสู่ส่วนประมวลผล

คลิก File > Read case > เลือกไฟล์สกุล .msh จะปรากฏข้อมูลของไฟล์ .msh ดังแสดง
ในรูป ก.13



```

Welcome to Fluent 6.2.16

Copyright 2005 Fluent Inc.
All Rights Reserved

Loading "C:\Fluent.Inc\Fluent\Fluent6.2.16\lib\FI_s1119.dmp"
Done.

Mill script File is C:\Documents and Settings\Administrator\Mill-fluent-nb_wannakorn-3036.bat
Loading "C:\Documents and Settings\Administrator/.cmlayout"
Done.

> Reading "D:\EXTRUSION Project\Grid Independent\Grid Independent\00331_500\00331_500.msh"...
21761 nodes.
14970 mixed wall faces, zone 3.
18656 mixed wall faces, zone 4.
12 mixed pressure-outlet faces, zone 5.
190 mixed mass-flow-inlet faces, zone 6.
148828 mixed interior faces, zone 0.
00331 tetrahedral cells, zone 2.

Building...
grid,
materials,
interface,
domains,
zones,
default-interior
inlet
outlet
outside_wall
inside_wall
fluid.6
shell conduction zones,
Done.
  
```

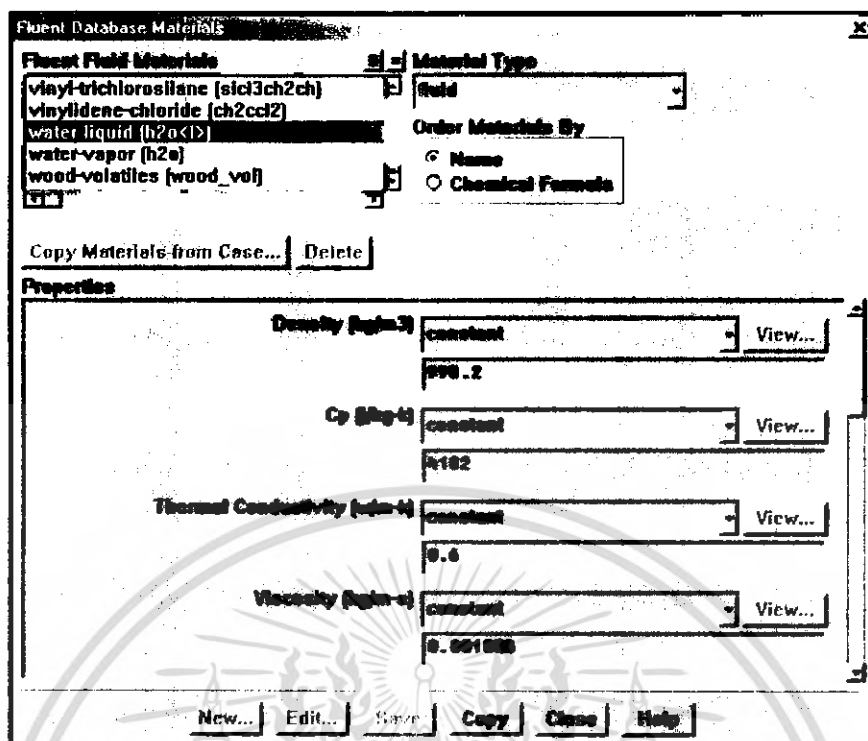
รูปที่ ก.13 แสดงข้อมูลของชิ้นงานที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ

ก.3.2 การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

คลิก Define > Model > เลือก สมการทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการหรือที่เกี่ยวข้องกับ
ปัญหาที่ต้องการศึกษา

ก.3.3 การกำหนดวัสดุ

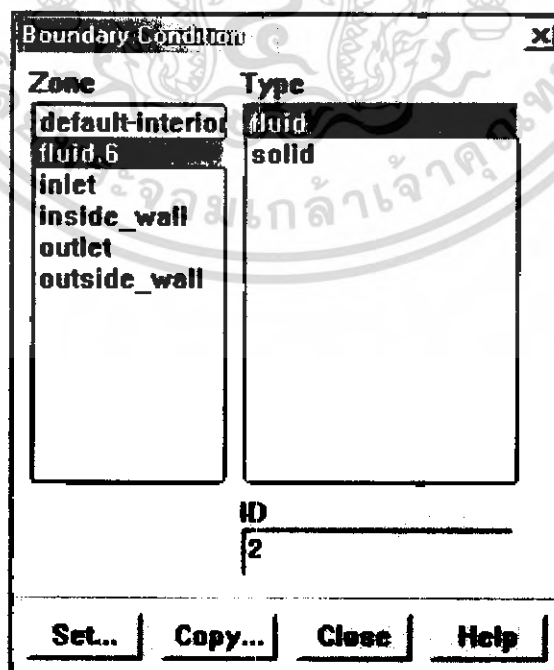
คลิก Define > Material จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก.14 เลือกวัสดุที่ต้องการ ในกรณีที่
ไม่มีวัสดุดังกล่าว สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ โดยการเปลี่ยนชื่อและคุณสมบัติของวัสดุที่มีชื่ออยู่ใน
รายการแล้ว



รูปที่ ก.14 แสดงหน้าต่างการเลือกวัสดุ

ก.3.4 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ

คลิก Define > Boundary condition จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 15 เลือกเงื่อนไขที่ต้องการกำหนดค่า



รูปที่ ก. 15 แสดงรายชื่อของเงื่อนไขขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3.5 การเลือกวิธีการแก้ปัญหา (Solver)

คลิก Solve > Controls > Solution เพื่อเลือกแบบแผนวิธีที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาที่ทำการศึกษา

ก.3.6 การกำหนดค่าอ้างอิง (Reference Value)

คลิก Report > Reference Values เพื่อทำการกำหนดค่าเริ่มต้นเพื่อใช้ในการคำนวณค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยจะปรากฏหน้าต่างเพื่อใส่ค่า ดังรูปที่ ก.16

Property	Value
Area (m ²)	0.00589299
Density (kg/m ³)	998.2
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	0.018
Pressure (pascal)	0
Temperature (K)	298
Velocity (m/s)	0.01175
Viscosity (kg/m-s)	0.001003
Ratio Of Specific Heats	1.4
Reference Zone	fluid.6

รูปที่ ก.16 แสดงการกำหนดค่าเริ่มต้นให้แก่โปรแกรม

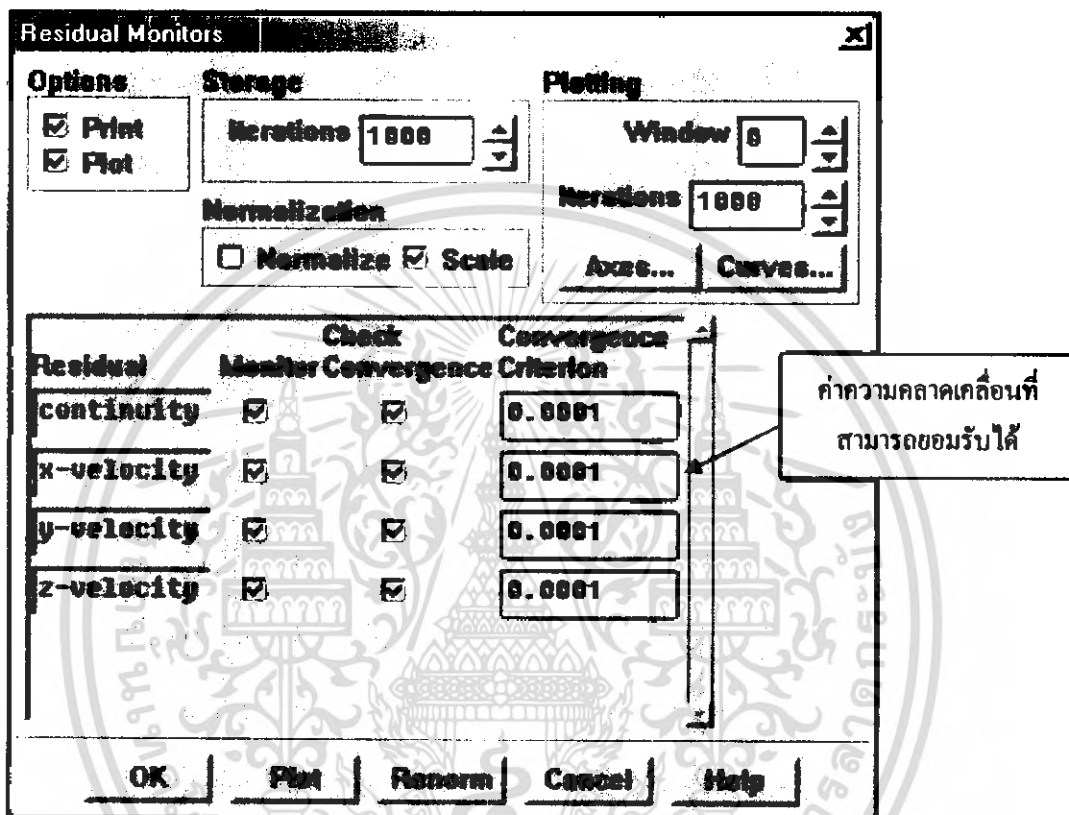
ก.3.7 การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ

คลิก Solve > Initialize > Initialize กำหนดค่าที่ทราบแล้วคลิก Init โปรแกรมจะเก็บค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้ในการเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3.8 การกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้

คลิก Solve > Monitors > Residuals..... จะปรากฏ หน้าต่างดังรูปที่ ก.17 เพื่อ กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ และสามารถสั่งให้แสดงกราฟค่าความคลาดเคลื่อนจนกว่าผลลัพธ์จะเข้าสู่คำตอบ (Convergence)



รูปที่ ก.17 แสดงหน้าต่างการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้

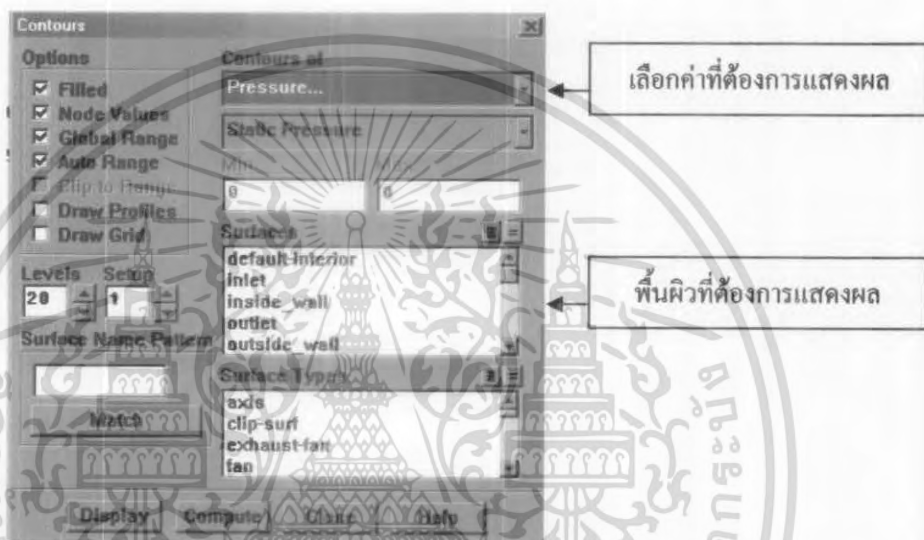
เมื่อกำหนดค่าต่างๆ เรียบร้อยแล้ว ทำการสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณ โดยคลิกที่ Solve > Iterate.... กำหนดจำนวนรอบในการคำนวณ ทำการคำนวณจนกว่าคำตอบจะเข้าสู่ (Convergence)

ก.4. การแสดงผล

เมื่อการคำนวณสิ้นสุด ต้องทำการแสดงผลเพื่ออ่านค่าคำตอบของการจำลอง โดยสามารถแสดงผลลัพธ์ของแบบจำลองได้หลายรูปแบบ

ก.4.1 Contour Display

คลิก Display>Contour แล้วเลือกลักษณะการแสดงผลที่ต้องการ ดังรูป ก.18 โปรแกรมจะแสดงผลในลักษณะต่าง ๆ ดังเช่น รูป ก. 19



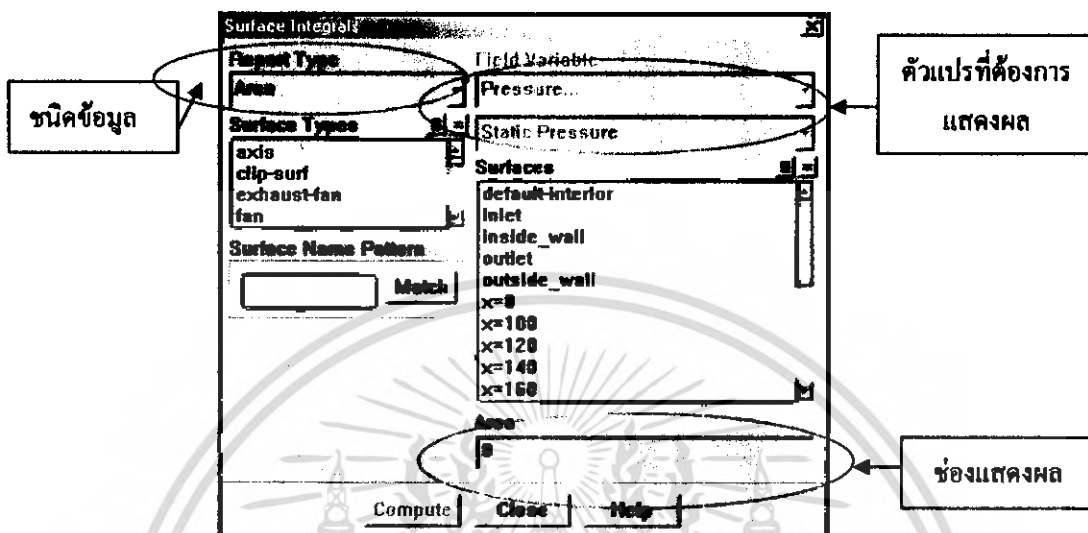
รูปที่ ก.18 แสดงการเลือกแสดงผลเป็นตัวแปรตามต้องการ



รูป ก. 19 การแสดงผลในลักษณะต่าง ๆ

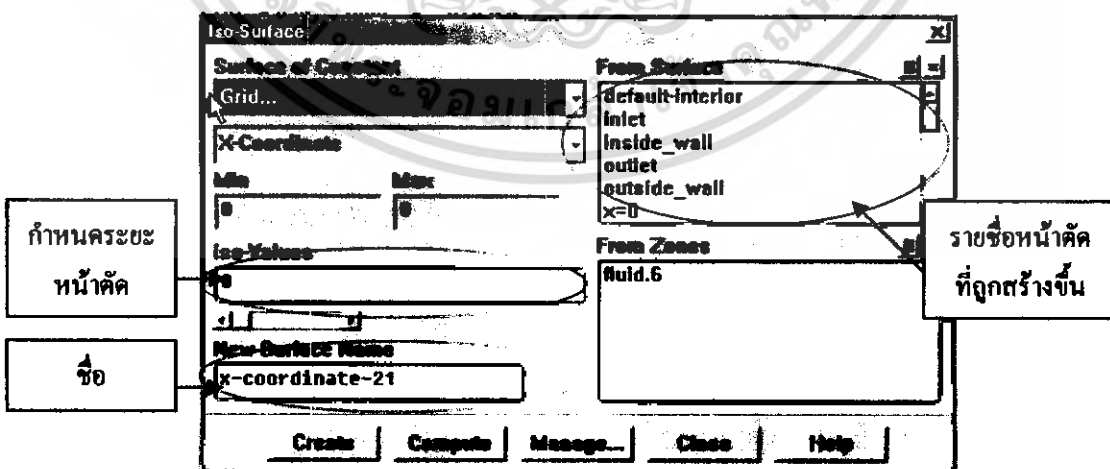
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ต้องการอ่านค่าโดยการเลือกพื้นผิว หรือพื้นที่หน้าตัด สามารถทำได้โดยคลิก Report > Surface Integrals โดยสามารถเลือกอ่านค่าของข้อมูลที่ต้องการได้จาก Report Type Combo Box ค่าที่อ่านได้จะแสดงผลในช่องของการแสดงผล ดังรูปที่ ก.20



รูปที่ ก.20 แสดงการแสดงผลลัพท์ที่ต้องการทราบจากส่วนต่างๆของชิ้นงาน

ในบางครั้งเราต้องการอ่านค่าผลลัพธ์ที่ต้องการที่หน้าตัดต่างๆที่ต้องการสามารถทำได้โดยคลิก Surface > Iso-Surface เลือก Grid ใน Surface of Constant Combo Box เลือกแกนที่ต้องการสร้าง Surface กำหนดค่าระยะหน้าตัดที่ต้องการแสดงผล และทำการตั้งชื่อ Surface ที่สร้างขึ้นใหม่ จากนั้นชื่อของ Surface ที่สร้างใหม่จะปรากฏใน From Surface List Box ดังรูปที่ ก.21

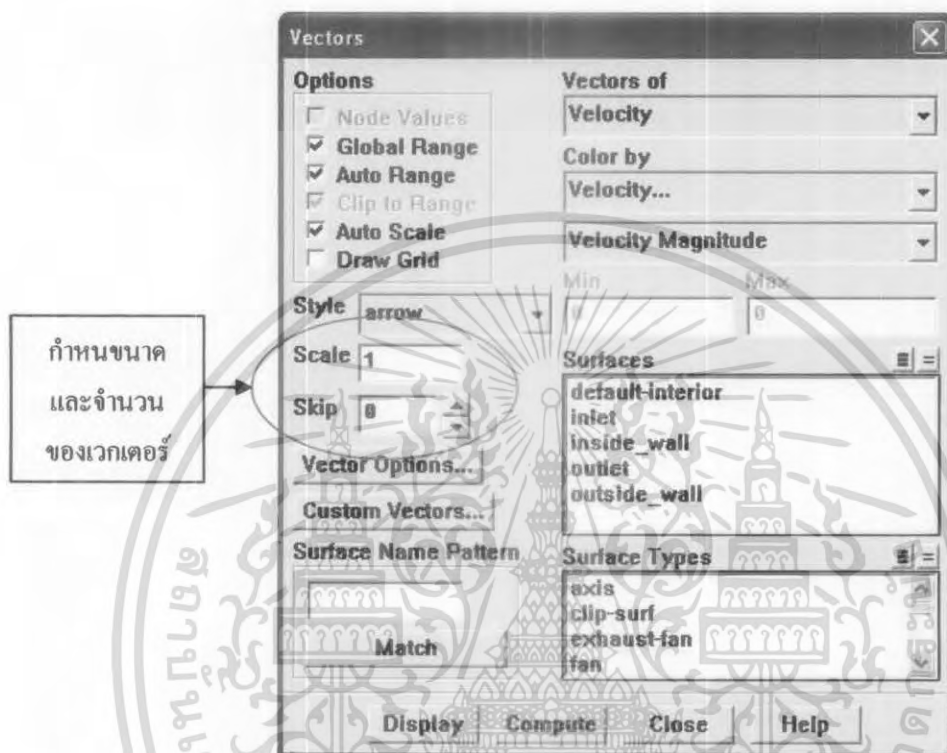


รูปที่ ก.21 แสดงหน้าต่างการสร้างหน้าตัดเพื่อใช้ในการอ่านค่าผลลัพธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4.2 Vector Display

การแสดงผลแบบเวกเตอร์สามารถทำได้โดยคลิก Display > Vector เลือกค่าที่ต้องการแสดงผล และกำหนดขนาดและจำนวนของเวกเตอร์ที่ใช้ในการแสดงข้อมูล เลือก Surface ที่ต้องการแสดงผล ดังรูปที่ ก.22



รูปที่ ก.22 แสดงการแสดงผลลัพท์แบบเวกเตอร์

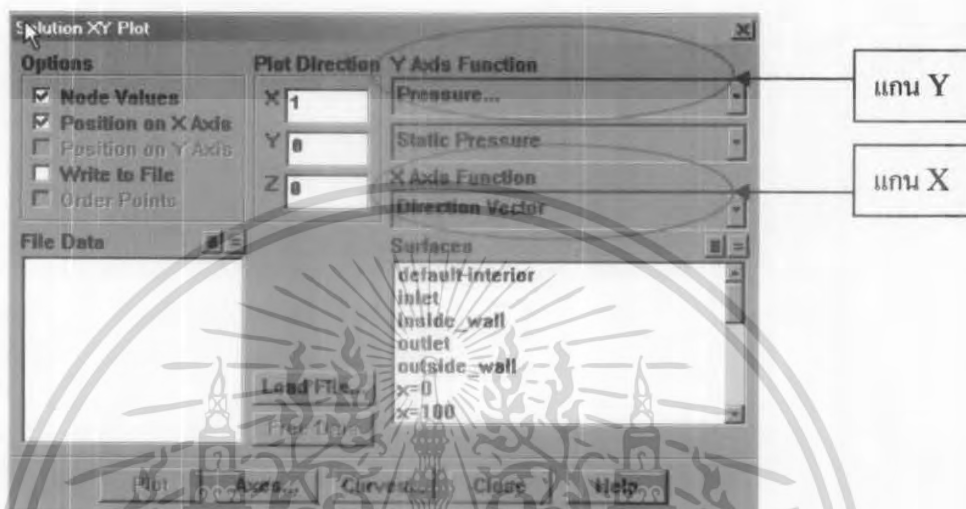


รูปที่ ก.23 แสดงการแสดงผลแบบเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4.3 การแสดงผลลัพธ์ด้วยวิธีการพล็อตกราฟ

นอกจากการอ่านค่าในลักษณะที่เป็น Contour และแบบเวกเตอร์แล้ว ยังสามารถแสดงผลในลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ของผลลัพธ์แต่ละตัวได้ โดยการคลิก Plot > XY Plot จะปรากฏหน้าต่างดังแสดงในรูปที่ ก.24 ซึ่งการเลือกแสดงผลนั้นสามารถกำหนดได้ว่าจะแสดงค่าใดบนแกนไหน



รูปที่ ก.24 แสดงการแสดงผลในรูปแบบของกราฟ

ก.4.4 การแสดงค่าแรงบิด

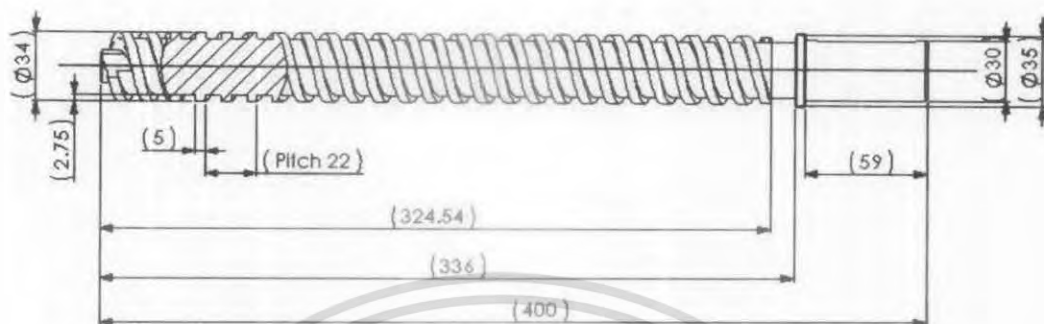
ในกรณีที่จะทำการแสดงค่าแรงบิด (Torque) และค่าแรง (Force) สามารถทำได้โดยการคลิก Report > Force จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ก.25 เลือก Wall Zone ที่ต้องการอ่านค่าแล้วคลิก Print



รูปที่ ก.25 แสดงการเลือกอ่านค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

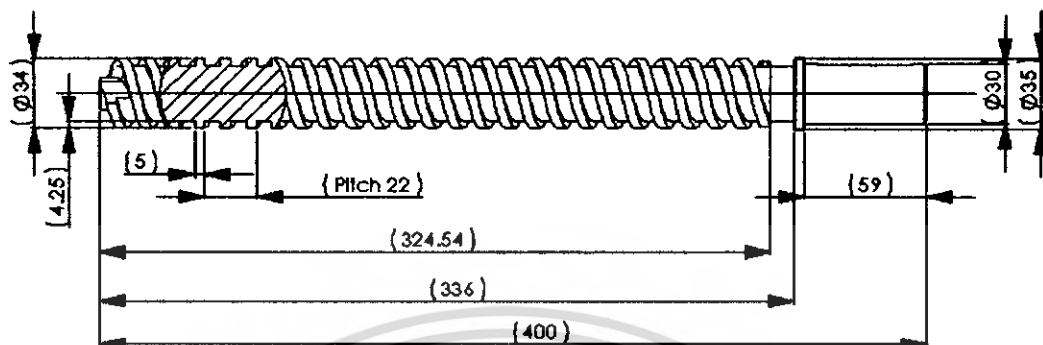


รูปที่ ข.1 แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 22 mm. ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm.

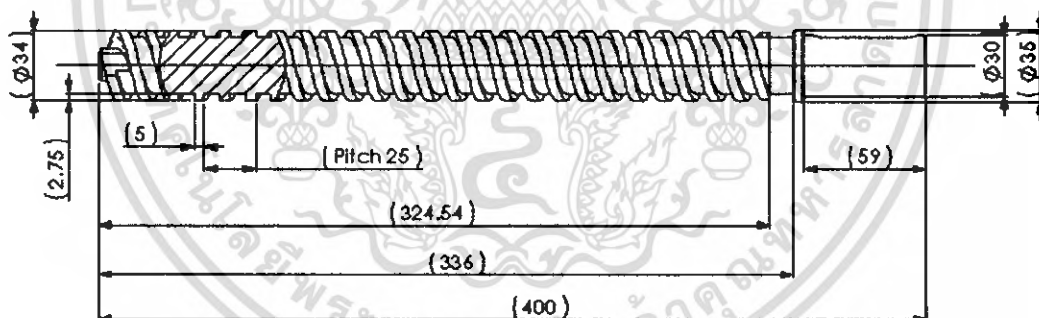


รูปที่ ข.2 แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 22 mm. ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

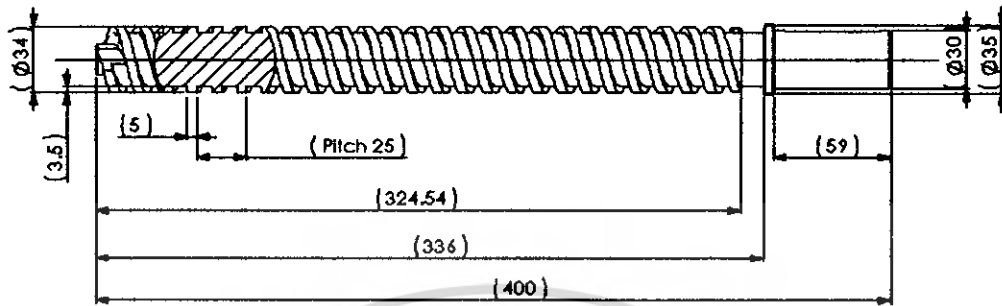


รูปที่ ข.3 แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 22 mm. ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm.

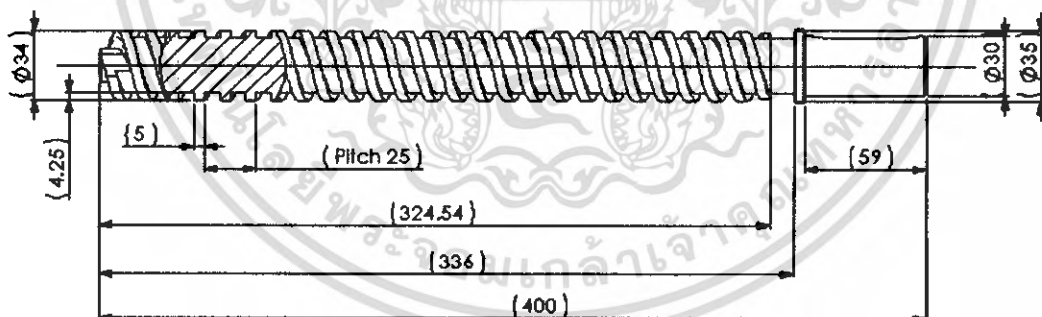


รูปที่ ข.4 แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 25 mm. ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm.

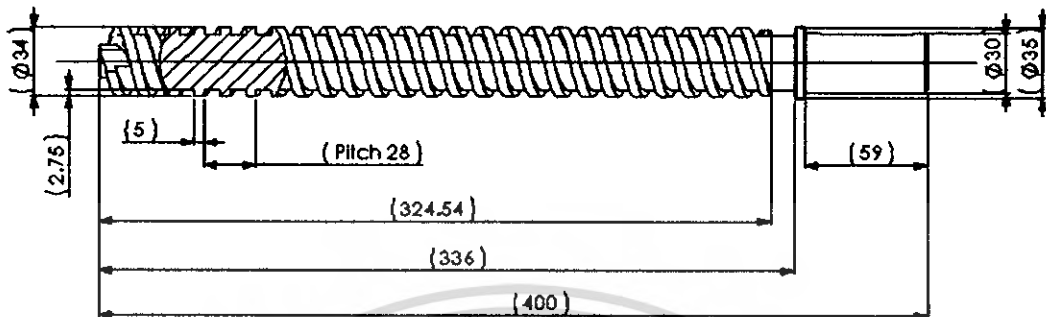
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



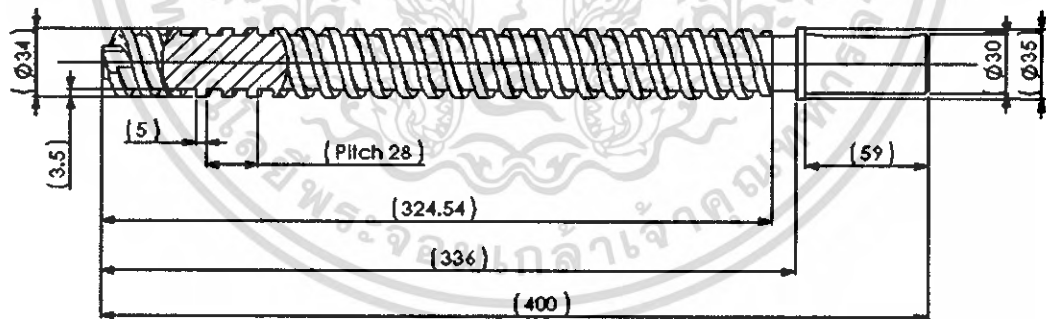
รูปที่ ข.5 แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 25 mm. ความลึกร่องเกลียว 3.5 mm.



รูปที่ ข.6 แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 25 mm. ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm.

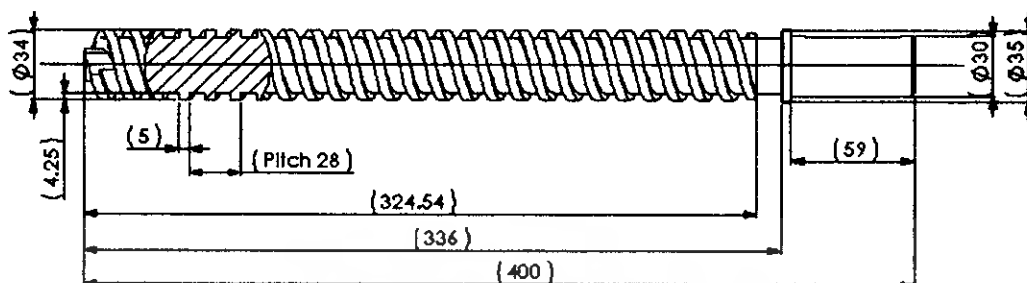


รูปที่ ข.7 แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 28 mm. ความลึกร่องเกลียว 2.75 mm.



รูปที่ ข.8 แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 28 mm. ความลึกร่องเกลียว 3.5mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.๙ แสดงแบบสกรู ระยะพิทช์ 28 mm. ความลึกร่องเกลียว 4.25 mm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ตาราง ค.1 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระได้แก่ ระยะพิตช์ ความลึกร่องเกลียว และความเร็วรอบ
สกรูตัวแปรตาม ได้แก่ อัตราการฉีก ความดัน ความเร็ว และแรงบิด

Pitch (mm)	Depth (mm)	Screw Rotation (rpm)	shear rate (1/s)	Pressure (Pa)	Velocity (m/s)	Torque (Nm)
22	2.75	100	46.37241	101347.3	0.048409	0.090493
22	2.75	200	91.99981	1013343	0.088172	0.183784
22	2.75	300	138.4901	101318.1	0.123459	0.280098
22	3.5	100	45.01227	101345.9	0.049469	0.088202
22	3.5	200	90.05439	101331.3	0.089583	0.177803
22	3.5	300	135.9221	101314.4	0.125093	0.269228
22	4.25	100	43.38288	101342.7	0.050934	0.085456
22	4.25	200	88.04835	101324.6	0.088537	0.170613
22	4.25	300	133.0269	101302.7	0.121318	0.253732
25	2.75	100	44.37328	101345.6	0.045564	0.084003
25	2.75	200	88.01683	101331.6	0.08159	0.164745
25	2.75	300	132.1533	101314.5	0.11269	0.246419
25	3.5	100	43.47139	101344.7	0.046717	0.081544
25	3.5	200	87.08829	101339.2	0.082903	0.160883
25	3.5	300	131.0656	101310.5	0.114256	0.240001
25	4.25	100	41.4219	101342	0.046315	0.077144
25	4.25	200	83.65472	101324	0.078824	0.149784
25	4.25	300	125.8374	101302.8	0.106724	0.218857
28	2.75	100	43.58645	101343.6	0.04362	0.078133
28	2.75	200	86.90222	101329.1	0.078213	0.154002
28	2.75	300	130.6659	101311.5	0.108087	0.230534
28	3.5	100	41.84256	101341.9	0.043258	0.075251
28	3.5	200	83.62407	101325.7	0.075488	0.147393
28	3.5	300	125.427	101306.3	0.102854	0.217491
28	4.25	100	40.77586	101340.1	0.042558	0.072682
28	4.25	200	81.79944	101322	0.07162	0.140078
28	4.25	300	122.9769	101300.5	0.097536	0.203678

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค. 2 แสดงการใช้สมการแบบถดถอยเชิงเส้น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว กับ ระยะพิทช์ ความลึกของเกลียว และ ความเร็วรอบทกฐ

Regression Statistics	
Multiple R	0.993225921
R Square	0.986497731
Adjusted R Square	0.984736565
Standard Error	0.003496063
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	0.020538832	0.006846277	560.1391306	1.24031E-21
Residual	23	0.000281117	1.22225E-05		
Total	26	0.020819948			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0.07696686	0.008069139	9.538423388	1.85045E-09	0.060274575	0.093659145	0.060274575	0.093659145
X Variable 1	-0.002254467	0.000274677	-8.207711405	2.75528E-08	-0.002822679	-0.001686255	-0.002822679	-0.001686255
X Variable 2	-0.001884308	0.001098707	-1.715023828	0.099785207	-0.004157156	0.00038864	-0.004157156	0.00038864
X Variable 3	0.000330652	8.2403E-06	40.12617049	8.4993E-23	0.000313605	0.000347698	0.000313605	0.000347698

	Pitch
X Variable 1	Channel Depth
X Variable 2	Screw Rotation
X Variable 3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก. 2 แสดงการใช้สมการแบบถดถอยเชิงเส้น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเขื่อน กับ ระยะพิศพิที่ ความลึกช่องเกลียวและความเร็วรอบตกรู

Regression Statistics									
Multiple R	0.999194906								
R Square	0.99839046								
Adjusted R Square	0.99818052								
Standard Error	1.555637812								
Observations	27								

ANOVA									
	df	SS	MS	F	Significance F				
Regression	3	34525.76926	11508.58975	4755.59791	2.97384E-32				
Residual	23	55.66020704	2.420009002						
Total	26	34581.42946							

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	35.78983315	3.59051199	9.967891278	8.12259E-10	28.36229324	43.21737306	28.36229324	43.21737306
X Variable 1	-1.013126111	0.12222245	-8.289198219	2.31975E-08	-1.26596251	-0.760289712	-1.26596251	-0.760289712
X Variable 2	-3.084144444	0.488889798	-6.30846554	1.94733E-06	-4.09549004	-2.072798849	-4.09549004	-2.072798849
X Variable 3	0.436292333	0.003666673	118.9885989	1.35463E-33	0.428707241	0.4443877425	0.428707241	0.4443877425

X Variable 1 Pitch
 X Variable 2 Channel Depth
 X Variable 3 Screw Rotation

ตาราง ค. 2 แสดงการใช้สมการแบบถดถอยเชิงเส้น สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิด กับ ระยะพิชท์ ความลึกช่องเกลียวและความเร็วรอบตกรู

Regression Statistics									
Multiple R	0.993310796								
R Square	0.986666337								
Adjusted R Square	0.984927163								
Standard Error	0.008347818								
Observations	27								

ANOVA									
	df	SS	MS	F	Significance F				
Regression	3	0.118602716	0.039534239	567.3191111	1.07351E-21				
Residual	23	0.00160278	6.96961E-05						
Total	26	0.120205495							

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0.168298103	0.019267301	8.734908268	9.19377E-09	0.128440656	0.208155551	0.128440656	0.208155551
X Variable 1	-0.005188302	0.000655867	-7.910606551	5.19838E-08	-0.006545065	-0.003831539	-0.006545065	-0.003831539
X Variable 2	-0.010384204	0.002623466	-3.95820015	0.000624042	-0.015811257	-0.004957151	-0.015811257	-0.004957151
X Variable 3	0.00079285	1.9676E-05	40.29531348	7.72559E-23	0.000752148	0.000833553	0.000752148	0.000833553

X Variable 1 Pitch
 X Variable 2 Channel Depth
 X Variable 3 Screw Rotation