



การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานในการเจาะแผ่นโลหะผสม
ไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

ธงชัย เฟื่องจันทร์ดี

ดุษฎีนิพนธ์ นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

FRICTION DRILLING PROCESS SIMULATION OF Ti-6Al-4V
TITANIUM ALLOY PLATES WITH FINITE ELEMENT METHOD

BY

THONGCHAI PANGJUNDEE



A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY

DEPARTMENT OF PROGRAM IN ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2021

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

ดัชนีนิพนธ์

ของ

ธงชัย เพ็งจันทร์ดี

เรื่อง

การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานในการเจาะแผ่นโลหะผสมไทเทเนียม
เกรด Ti-6Al-4V ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2565

ประธานกรรมการสอบดัชนีนิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาดัชนีนิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

กรรมการสอบดัชนีนิพนธ์

(ศาสตราจารย์ ดร.ชาวสวน กาญจน์นัย)

กรรมการสอบดัชนีนิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกมาศ สุชาตินันท์)

กรรมการสอบดัชนีนิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ตั้งวัชรธรรมกุล)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานในการ เจาะแผ่นโลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อผู้เขียน	ธงชัย เพ็งจันทร์ดี
ชื่อปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตะตามระ
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานในการเจาะวัสดุแผ่นโลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V โดยใช้อุปกรณ์เจาะที่ทำมาจากวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ ด้วยการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมจำลองแบบสามมิติ ABAQUS โดยการใช้สมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้น และการเลือกใช้สมบัติค่าความแข็งแรงของวัสดุที่อยู่ในช่วงของแข็งกึ่งของเหลวจะทำให้ค่าแรงกดและแรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงเพิ่มขึ้น โดยใช้ปัจจัยอัตราป้อนและความเร็วรอบที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อแรงกด แรงบิด อุณหภูมิและความยาวของปลอกกรูที่เกิดขึ้นในกระบวนการและเปรียบเทียบกับผลการทดลองในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน จากการจำลองพบว่าปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดของแรงบิด แรงกด อุณหภูมิ และความยาวของปลอกกรู มีแนวโน้มในทางเดียวกัน และพบว่าเมื่อความเร็วรอบมีค่าเพิ่มขึ้นแรงบิดและแรงกดจะมีค่าที่ลดลงและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและในส่วนของความยาวปลอกกรูจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ค่าความเร็วรอบที่น้อยลง

คำสำคัญ: กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สแตนคาร์ไบด์ โลหะผสมไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V แรงกด แรงบิด

Dissertation Title	FRICTION DRILLING PROCESS SIMULATION OF Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOY PLATES WITH FINITE ELEMENT METHOD
Author	Thongchai Pangjundee
Degree	Doctor of Philosophy
Major Field/Faculty/University	Engineering Engineering Thammasat University
Dissertation Advisor	Associate Professor Dr.Apiwat Muttara
Academic Years	2021

ABSTRACT

This thesis presents the modeling methodology for friction drilling with the finite element in drilling Titanium material (Ti-6Al-4V). Moreover, friction drill tools are fabricated from tungsten carbide material K20. A three-dimensional modeling program (ABAQUS) is used for finite element analysis. Material property varies depending on a current temperature, while the material properties is set to liquidus temperature. This setup makes thrust and torque force values closer to the experiment. In this research, different feed rates and spindle speeds are used to study the impact of these two parameters on torque force, thrust force, temperature, and a bush length occurring with finite element analysis. Subsequently, results from finite element analysis are compared to results from a friction drilling experiment. A comparison shows that both factors impact a spindle speed and feed rate to torque force, thrust force, temperature, and bush length. Additionally, it is found that when spindle speed is increased, torque and thrust force are decreased while the temperature is higher. On the other hand, bush length increases when spindle speed is decreased.

Keywords: Friction drilling, Finite Element Method., tungsten carbide, titanium alloy plate grade TI-6AL-4V, Force, Torque

กิตติกรรมประกาศ

ดุขฉุฉนัพนั ฌบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีได้รับให้คำปรึกษาและช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวฒัน มุตตามระ ซึ่งได้กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา ให้ความรู้ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงความช่วยเหลือและแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ในการทำดุขฉุฉนัพนั ครั่งนี้ ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีตลอดช่วงเวลาในการทำดุขฉุฉนัพนั ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนสนับสนุนโครงการวิจัยเพื่อทำดุขฉุฉนัพนั ระดับบัณฑิตศึกษา

สุดท้ายผู้วิจัยนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อน ๆ ที่ให้กำลังใจตลอดจนการสนับสนุนด้วยดีเสมอมาและกระท้งสำเร็จการศึกษา

ธงชัย เฟ่งจันทร์ดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(10)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.5 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 การเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	7
2.1.1 กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	8
2.1.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	9
2.1.3 การใช้งานรูเจาะที่เกิดจากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	10
2.2 โลหะไทเทเนียม	11

2.2.1 สมบัติทางฟิสิกส์	11
2.2.2 โลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V	12
2.3 ทั้งสเดนคาร์ไบด์	13
2.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเจาะชิ้นงานด้วยเครื่องกัดที่ควบคุมด้วย คอมพิวเตอร์ด้วยค่าเชิงตัวเลข	13
2.4.1 ความเร็วรอบ	14
2.4.2 ความเร็วตัด	14
2.4.3 อัตราป้อน	15
2.5 การสึกหรอของเครื่องมือตัด	16
2.6 การสึกหรอของอุปกรณ์เจาะ	17
2.6.1 การสึกหรอจากการเสียดสี	17
2.6.2 การสึกหรอที่เกิดจากการเชื่อมติดหรือเย็นติดของเศษโลหะ	17
2.6.3 การสึกหรอจากการแพร่	18
2.6.4 การสึกหรอเนื่องจากทำปฏิกิริยากับออกซิเจน	18
2.6.5 การสึกหรอเนื่องจากอุบัติเหตุจากการกำจัดโลหะ	18
2.7 การวัดแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะรูกับกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	18
2.7.1 แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการตัดเฉือนโลหะ	19
2.7.2 การวิเคราะห์แรงในการตัดเฉือนโลหะ	20
2.7.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรง	21
2.7.4 หลักการทำงาน เครื่องวัดแรงตัดเฉือนแบบหลายช่องทาง	22
2.7.5 หลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์	24
2.8 การวัดความแข็งผิวรูเจาะ	25
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	27
2.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ	29
2.10.1 การสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ	30
2.11 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	32
2.11.1 การวิเคราะห์และการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	33
2.11.2 การกำหนดหน่วยปัจจัยในการสร้างแบบจำลองกระบวนการเจาะ โดยใช้แรงเสียดทาน	34

2.11.3 การสร้างแบบจำลองโดยใช้ โปรแกรม ABAQUS ขั้นพื้นฐาน	35
2.11.4 แบบจำลองทางความร้อน	36
2.11.5 Johnson–Cook model	37
2.11.6 เทคนิคช่วยในการจำลอง	38
2.12 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
2.12.1 กระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน	40
2.12.2 การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการเจาะแบบแรงเสียดทาน	50
 บทที่ 3 วิธีการวิจัย	 52
3.1 วัสดุในการทดลอง	52
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	53
3.2.1 เครื่องกัดอัตโนมัติแนวตั้ง	53
3.2.2 อุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	54
3.2.3 เครื่องวัดแรงตัดเฉือนสำหรับวัดแรงตัดเฉือนและแรงบิด	55
3.2.4 เครื่องมือวัดค่าความแข็งของผิวงาน	56
3.3 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	57
3.4 ทดลองเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	58
3.4.1 การติดตั้งระบบจับยึดเพื่อทำการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	59
3.4.2 การเจาะชิ้นงานตามแบบการทดลอง	60
3.4.3 การวัดแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	61
3.5 การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะ	62
3.6 การวัดอุณหภูมิ	63
3.7 การวัดความแข็ง	65
3.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6AL-4V	65
3.9 การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	67

บทที่ 4 การทดลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	77
4.1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง	77
4.2 แรงกดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง	79
4.3 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลอง	81
4.4 การสึกหรอของอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	83
4.5 ผลกระทบของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานที่มีต่อความแข็งแรง รูเจาะ	85
4.5.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงชิ้นงานช่วงระยะ Y	86
4.5.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงชิ้นงานช่วงระยะ X	87
4.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6AL-4V	88
4.7 ความยาวของปลอกกรุเจาะที่เกิดขึ้นจากการทดลองกระบวนการเจาะโดยใช้ แรงเสียดทาน	91
4.8 คุณลักษณะเฉพาะของรูที่ถูกเจาะด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรง เสียดทาน	92
บทที่ 5 การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	95
5.1 การทดสอบขนาด Mesh	96
5.2 การจำลองแรงบิดกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	98
5.3 ผลการจำลองแรงกดในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	104
5.4 การจำลองอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	110
5.5 ความยาวของปลอกกรุเจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้ แรงเสียดทาน	116
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	120
6.1 สรุปผลการทดลองการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานในการ เจาะแผ่นโลหะผสมไทเทเนียม เกรด Ti-6L-4V ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน	5
2.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V	12
2.2 สมบัติทางกลของวัสดุโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V	12
2.3 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์	13
2.4 สมบัติทางกลของวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์	13
2.5 การเปรียบเทียบการกำหนดค่าปัจจัยในแต่ละมาตรฐานหน่วยวัด	34
3.1 ส่วนผสมเคมีของโลหะโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V	52
3.2 ระดับของปัจจัยในเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานเพื่อใช้ในการจำลองและการทดลอง	58
3.3 สมบัติค่าความเหนี่ยวนำความร้อน (Heat Conductivity) ของวัสดุ ไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V	70
3.4 สมบัติความหนาแน่น (Density) ของวัสดุ ไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V(Mg/m ³)	70
3.5 สมบัติมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของวัสดุ ไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V (Mpa)	71
3.6 สมบัติความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของวัสดุ ไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V (J/kg.K)	71
3.7 สมบัติสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Expansion Coeff) ของวัสดุ ไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V (10 ⁻⁶ /K)	72
3.8 พารามิเตอร์ Johnson-Cook ของวัสดุ ไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V	72
4.1 ลักษณะของพูลหลังทำการทดลองเจาะโดยใช้ความเร็วรอบที่แตกต่างกัน	84

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ภาพจำลองลำดับการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน	1
2.1 ขั้นตอนการเจาะรูโดยใช้การเสียดทาน	8
2.2 องค์ประกอบต่างๆของอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	9
2.3 ลักษณะการนำไปใช้งานของรูที่ถูกเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	10
2.4 ลักษณะการเจาะชิ้นงานด้วยอุปกรณ์เจาะแบบปกติ	14
2.5 ความเร็วตัดงานเจาะ	15
2.6 อัตราการเจาะของอุปกรณ์เจาะ	16
2.7 แรงในการตัดเฉือนที่เกิดขึ้น	19
2.8 การวัดแรงตัดเฉือนในงานกลึง	20
2.9 เครื่องวัดแรง แบบ 4 ช่องทาง ยี่ห้อ kistler รุ่น 9272	22
2.10 องค์ประกอบของไดนามิเตอร์ แบบ 4 ช่องทาง	23
2.11 การจัดเรียงของ QUARTZ ดิสก์ที่ตัดให้วัดผลของแรงเฉือนสำหรับใช้วัดแรงบิด QUARTZ	23
2.12 การแปลงสัญญาณของเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์	24
2.13 การกดของหัวกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	26
2.14 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด SEM	27
2.15 หลักการทำงานของเครื่อง SEM	28
2.16 ตัวอย่างพื้นผิวชิ้นงานไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ที่ได้จากเครื่อง SEM	29
2.17 การเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ	29
2.18 วิธีตรวจเช็คเทอร์โมคัปเปิล	30
2.19 อุปกรณ์เครื่องสอบเทียบสัญญาณ	31
2.20 ลักษณะการแบ่งเอเลเมนต์ในการจำลอง	32
2.21 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	33
2.22 องค์ประกอบในการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS	35
2.23 ภาพตัดขวางของการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน ในวัสดุ	41
2.24 ค่าความผิดพลาดของความกลมรูเจาะที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปัจจัย	42

2.25 แรงตัดเฉือนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในการเจาะโดยใช้เทคนิคการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	46
2.26 การเปรียบเทียบการทดลองและรูปแบบของแรงตัดเฉือนและแรงบิดที่ถูกตรวจวัดที่แปรผันกับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เจาะในกระบวนการเจาะ	51
3.1 แผ่นไทเทเนียมอัลลอยเกรด Ti-6Al-4V	53
3.2 เครื่องกัดซีเอ็นซี EUMACH รุ่น LMC1020	54
3.3 อุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทานแบบมีป้า	54
3.4 ขนาดของของอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	55
3.5 เครื่องวัดแรงตัดเฉือน KISTLER Dynamometer	56
3.6 การเชื่อมต่อ ชุดแปลงและขยายสัญญาณ (KISTLER Charge Amplifier รุ่น 5070A) และ DAQ system รุ่น 5697A1 เข้ากับเครื่องวัดแรงตัดเฉือน KISTLER Dynamometer เพื่อทำการวัดแรงตัดและแรงบิด	56
3.7 เครื่องวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์	57
3.8 ความสัมพันธ์ของปัจจัยในการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	57
3.9 เหล็กกล่องหลังการเจาะร่อง Slot	59
3.10 การจับชิ้นงานที่ Dynamometer	60
3.11 มุมมองด้านข้างการใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับชิ้นงาน	60
3.12 ภาพการเจาะชิ้นงาน	61
3.13 ชิ้นงานหลังการเจาะ	61
3.14 การเชื่อมต่อระบบการวัดแรงเข้ากับเครื่องจักร CNC	62
3.15 การจับชิ้นงานที่ Dynamometer เพื่อเตรียมการทดลอง	62
3.16 การกำหนดตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ	63
3.17 เทอร์โมคัปเปิล	64
3.18 อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ	64
3.19 การเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลเพื่อทำการวัดอุณหภูมิ	64
3.20 ภาพของรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Testing) การคำนวณหาค่าความแข็ง	65
3.21 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดหรือเครื่อง SEM	67
3.22 อุปกรณ์เจาะและชิ้นงานที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรมช่วยในการออกแบบ	68
3.23 การปรับตำแหน่งของเครื่องมือเจาะและชิ้นงาน	69

3.24 การกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเจาะและการจับยึดชิ้นงาน	74
3.25 การกำหนดพื้นที่การเชื่อมต่อ	74
3.26 การกำหนด Mesh ให้กับ เครื่องมือเจาะและชิ้นงาน	75
3.27 การสร้างงานและส่งงานเพื่อทำการจำลอง	76
4.1 แรงบิดที่เกิดขึ้นตามการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เจาะขณะทำการทดลอง	78
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ	79
4.3 แรงกดที่เกิดขึ้นตามการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เจาะขณะทำการทดลอง	80
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ	81
4.5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลอง	82
4.6 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งในโครงสร้างระดับมาโครจากภาพตัดขวางของ รูเจาะแรงเสียดทาน	85
4.7 ตำแหน่งในการวัดความแข็งพื้นผิวรูเจาะ	85
4.8 ภาชนะของหน้าตัดของรูเจาะแบบเสียดทานของแผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ Ti-6Al- 4V หลังเจาะ	86
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวรูเจาะกับตำแหน่งในการวัดความแข็ง พื้นผิวรูเจาะในแนวแกน Y	86
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวรูเจาะกับระยะห่างจากผิวรูเจาะใน แนวแกน X	87
4.11 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาควัสดุไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V	88
4.12 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 5	89
4.13 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 1	89
4.14 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 2	89
4.15 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 3	90
4.16 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 4	90
4.17 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของปลอกรูเจาะที่เกิดขึ้นจาก การจำลองกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ	92
4.18 ลักษณะของรูเจาะจากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	92
4.19 การเกิดปลอกรูเจาะและวงแหวนจากการเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้ แรงเสียดทานด้วยปัจจัยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที	93

4.20 การเกิดปฏิกิริยาและวงแหวนจากการเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยปัจจัยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาที	94
5.1 เครื่องมือเจาะและวัสดุในการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	95
5.2 การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน	96
5.3 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ Mesh กับแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลอง	97
5.4 การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้ขนาด Mesh 0.25 มิลลิเมตร	97
5.5 การจำลองการวัดแรงบิดด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาทีที่เวลา 9.562 วินาที	98
5.6 ผลการจำลองการเกิดแรงบิดด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที	99
5.7 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ	100
5.8 การเปรียบเทียบผลแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งและการทดลองจริง	101
5.9 การเปรียบเทียบแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองและการทดลองจริง	102
5.10 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว	103
5.11 การเปรียบเทียบผลแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งและการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว	104
5.12 ภาพจำลองการเจาะด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 7000 รอบ ต่อนาที ที่เวลา 9.562 วินาที	104
5.13 การจำลองการเกิดแรงกดที่เกิดขึ้นจากการใช้ปัจจัยด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที	105
5.14 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็ง	106
5.15 การเปรียบเทียบผลแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลวและการทดลองจริง	107
5.16 การเปรียบเทียบแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองและการทดลองจริง	108

5.17 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว	109
5.18 การเปรียบเทียบผลแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งและการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว	110
5.19 การใช้ โปรแกรม ABAQUS เพื่อทำการจำลองการเกิดอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะแผ่นไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V	111
5.20 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยใช้ปัจจัยการเจาะ อัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที	111
5.21 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลอง โดยใช้ปัจจัยการเจาะอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที	112
5.22 ผลการจำลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นที่แปรผันต่อค่าอัตราป้อนและความเร็วรอบ	113
5.23 การใช้ โปรแกรม ABAQUS เพื่อทำการจำลองการเกิดอุณหภูมิในจุดที่ทำการวัดความแข็งที่เกิดขึ้นจากการการเจาะแผ่นไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V โดยใช้ปัจจัยการเจาะ อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที	114
5.24 ผลการจำลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับระยะห่างจากขอบรูเจาะในแนวแกน Y	114
5.25 ผลการจำลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับระยะห่างจากขอบรูเจาะในแนวแกน X	115
5.26 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของปลอกกูเจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลองกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ	116
5.27 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของปลอกกูเจาะที่เกิดขึ้นจากการทดลองกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ	117
5.28 ภาพจำลองการวัดการเจาะด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาทีความเร็วรอบ 2500 ต่อนาที ที่เวลา 7.8 วินาที	117
5.29 การเปรียบเทียบความยาวของปลอกกูเจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลองและการทดลองจริง	118

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

CNC	Computer Numerical Control
RPM	Revolutions per minute
N/m	Newton meter
N/mm	Newton Millimeter
kN	Kilonewton
mm	Millimeter
SEM	Scanning Electron Microscope
A	Initial yield N/mm ²
B	Hardening modulus
C	Strain rate sensitivity
c	Specific heat, J/(kg·K)
D	Cumulative-damage fracture factor
d1...d5	Damage constants
dFD	Tool diameter, mm
d2	Shrank diameter, mm
F N	Force, N
hCy	Cylindrical height, mm
hCo	Conical height, mm
hT	Tip/center height, mm
k	Heat conductivity, W/(m·K)
l	Length, mm
lt	Drilling depth (simulation), mm
Mt	Torque, Nm
m	Thermal softening effect
n	Rotational speed, 1/min
s	Time, s

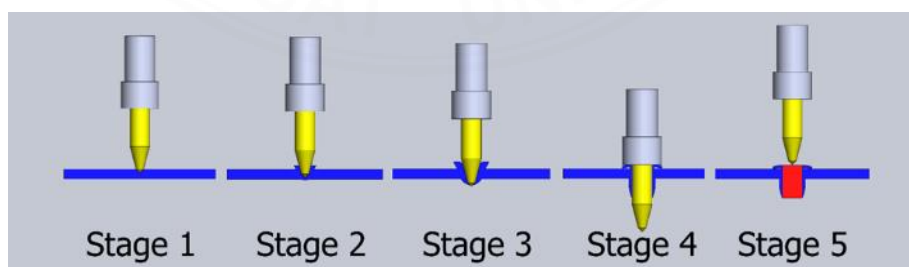
θ	Homogenous temperature, K
$T_{\text{influenced}}$	Influenced temperature, °C
T_{initial}	Initial temperature, °C
θ_{melt}	Melting temperature, K
θ_{tran}	Transition temperature, K
v_c	Peripheral speed
v_f	Feed speed, mm/min
w	Wide, mm
q_f	Heat generation, m/s
α_{FD}	Tip/center angle, degree
ϵ_m	Emission rate
$\bar{\epsilon}_{\text{pl}}$	plastic Plastic strain
β_{FD}	Conical angle, degree
ϵ	Strain rate, 1/s
$\dot{\epsilon}_0$	Reference strain rate, 1/s
ϵ_f	Equivalent strain to fracture, 1/s
η	Hardening exponent
σ	Flow stress, N/mm ²
ρ	Density, N/m ²
ω	Angular velocity, rad*s ⁻¹
Al	Aluminum alloy
FEM	Finite element method
FE	Finite element
Fe	Iron
Ti	Titanium
Wc	Tungsten carbide
C	Carbon
V	Vanadium
x, y, z	Cartesian coordinates

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน (Friction Drilling Process) เป็นกระบวนการเจาะรูกับวัสดุโลหะแผ่นแบบใหม่ (Szwałek 2018) โดยกระบวนการดังกล่าว อาจจะมีชื่อเรียกได้ในอีกหลายชื่อ ดังเช่น กระบวนการเจาะโดยใช้การไหลตัว กระบวนการเจาะโดยใช้ความร้อน กระบวนการเจาะความเสียดทานโดยการหมุนวน โดยในกระบวนการเจาะในลักษณะนี้จะพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือความเร็วตัด อัตราป้อน มุมของอุปกรณ์เจาะแรงเสียดทาน และพื้นผิวสัมผัสของวัสดุ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในเจาะรูในกระบวนการลักษณะนี้โดยทั่วไปจะประกอบด้วยรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ แท่งรูปทรงกระบอกและแท่งทรงกระบอกที่มีปลายแหลม รูปทรงกรวย โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการนี้จะไม่มีคมตัดเพื่อใช้ในการในการตัดเฉือนเนื้อโลหะ แต่จะใช้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่าง ผิวของอุปกรณ์เจาะรูปทรงกรวยกับผิวของชิ้นงาน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัว (Kaya 2014) วัสดุจะถูกทำให้อ่อนจนทำให้ค่าความแข็งแรงวัสดุลดลงจนเกินขีดจำกัดความเค้นครากและจะถูกอุปกรณ์เจาะที่กดลงไป ผลักออกไปทางด้านข้างและถูกผลักลงไปด้วยด้านล่างจนเกิดปลอกูในทิศทางเดียวกันกับแนวการเจาะและเกิดการยึดตัวของเนื้อโลหะส่วนหนึ่งระหว่างผนังของรูและไหลของรูจะดันขึ้นสู่ด้านบนของรูจนมีลักษณะคล้ายแหวนกันคล้าย โดยไม่มีการตัดเฉือนเนื้อโลหะออกไป ดังแสดงในภาพจำลองลำดับการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน ดังแสดงในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ภาพจำลองลำดับการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน

โดยข้อดีของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ที่มีมากกว่าการเจาะรูโดยวิธีปกติ สามารถสรุปได้ดังนี้ การใช้กระบวนการเจาะแบบเดิมนั้นในการปฏิบัติงานนั้นมีความจำเป็นที่จะต้อง ใช้สารในการหล่อเย็น เพื่อใช้ในการลดความร้อนและลดแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์เจาะ ซึ่ง ตรงข้ามกับสิ่งที่ต้องการในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานที่มีความต้องการสารหล่อเย็นหรือ สารหล่อลื่นเพียงเล็กน้อย เพื่อใช้ไม่ให้เกิดการยึดติดกันระหว่างอุปกรณ์เจาะและชิ้นงาน ดังนั้น กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานจึงเป็นกระบวนการที่ความแห้งและมีความสะอาดมากกว่า (El-Bahloul 2013, Szwatek 2018) โดยนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานกับการเจาะรูกับวัสดุประเภท ที่มี ผนังบาง แผ่นโลหะ หรืองานเจาะท่อเพื่อที่จะทำให้รูที่เกิดขึ้นสามารถเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ หรือสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์กับชิ้นงานที่มีผนังบาง ๆ ในกระบวนการทาง อุตสาหกรรมในปัจจุบันเช่นการเชื่อมท่อเพื่อใช้ในการสร้างพื้นที่การเชื่อมต่อ จะถูกแทนที่ได้อย่างมี ประสิทธิภาพโดยใช้ขั้นตอนเพียงหนึ่งขั้นตอนในกระบวนการเจาะด้วยแรงเสียดทาน ดังนั้นจึงเป็น กระบวนการผลิตที่ใช้ในการสร้างจุดเชื่อมต่อวัสดุแผ่นบางโดยตรง ที่สามารถช่วยในการลดต้นทุนและ ขั้นตอนในกระบวนการเจาะชิ้นงานให้น้อยลง เมื่อเทียบกับกระบวนการสร้างเกลียวเพื่อใช้ในการ เชื่อมต่อวัสดุแผ่นบางแบบเก่า ที่มีการใช้เกลียวตัวเมียหรือปลอกเกลียว

ในปัจจุบันมีงานวิจัยหลายงาน ที่ศึกษากระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน เพื่อให้ ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของงานเช่น การเกิดแรงกดตามแนวแกนและแรงบิดในระหว่างการ เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน การศึกษาปัจจัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนและ ความเร็วของอุปกรณ์เจาะ ขนาดความหนาของชิ้นงาน ขนาดของอุปกรณ์เจาะ แต่อย่างไรก็ตาม รูปทรงของรูเจาะที่เกิดขึ้นจากการเจาะด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นเป็นหนึ่งใน ตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุด ของกระบวนการ เนื่องจากรูปทรงที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของเกลียวที่ จะถูกสร้างเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อกันของวัสดุแต่ละชนิดซึ่งเป็น วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการเจาะ โดยใช้แรงเสียดทาน ที่ต้องการความแข็งแรงในการเชื่อมต่อระหว่างกัน นอกจากนี้รูปทรงของรูเจาะ ยังมีผลต่อหลายคุณลักษณะในการเจาะรูในกระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน เช่น แรงเสียด ทานที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะรู การสึกหรอ การส่งผ่านความร้อน (Stan et.al., 2012) และต้นทุนใน การผลิตในเรื่องของการสึกหรอของเครื่องมือตัด และลักษณะรูปทรงของรูเจาะนั้นจะมีความสัมพันธ์ ต่อการสึกหรอของอุปกรณ์เจาะ และได้รับผลโดยตรงจากการสึกหรอของเครื่องมือตัด โดยมีตัวแปร จำนวนมากที่ส่งผลต่อรูปทรงของรูเจาะเช่น วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์เจาะ การเคลือบผิววัสดุและอุปกรณ์ เจาะ ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ และความเร็วตัด โดยการได้มาซึ่งลักษณะรูปทรงของรูเจาะ และการสึกหรอของเครื่องมือเจาะน้อย ๆ การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรมีความสำคัญมาก ๆ ใน การลดการสึกหรอที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่มีการทำซ้ำบ่อยมากอย่างกระบวนการเจาะรู นอกจากนี้

เพื่อการพัฒนากระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานและยังมีการพัฒนาแบบจำลองทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์และการหาค่าที่เหมาะสมของ พารามิเตอร์ในการตัดเฉือนขึ้นรูปชิ้นงาน เช่นวิธีการทาทุชิ ซึ่งวิธีการทาทุชิเป็นเทคนิคพิเศษที่มีประสิทธิภาพในการหาค่าที่เหมาะสม แตกต่างจากวิธีการอื่น ๆ แบบดั้งเดิม

ในการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ที่ใช้อุปกรณ์เจาะที่หมุนด้วยความเร็วรอบที่สูง เคลื่อนที่เข้าหาแผ่นโลหะโดยใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่คงที่ และเกิดการสัมผัสกันระหว่างอุปกรณ์เจาะกับวัสดุ ทำให้เกิดการเสียดสีกันจนเกิดความร้อนสูง จนเกิดการเปลี่ยนรูปร่างรุนแรง บนวัสดุทดสอบ ทำให้เห็นได้ว่ากระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน นั้นมีเกี่ยวข้องที่มีความซับซ้อนสูงที่เกี่ยวข้องกับแรงเสียดทานและปฏิกิริยาที่เกิดการติดต่อกันระหว่างทุลกับวัสดุ โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้น เป็นปัญหา แบบ non-linear จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อน เช่น การเสียรูป ความเค้น และอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงการกระจายของการเกิดความร้อนในส่วนที่มีการสัมผัสกันระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงาน ที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในบริเวณที่บริเวณเครื่องมือกับชิ้นงานและร้อนขึ้นจนเกิดการตัวอ่อนตัวลงและเปลี่ยนรูปทรงจนมีลักษณะเป็นลอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การจำลองยังช่วยป้องกันการสูญเสียวัสดุและเวลาด้วยการเปลี่ยนการทดลองเป็นการจำลอง

วัสดุโลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบาทนทานต่อการสึกหรอและเป็นวัสดุที่ทำการขึ้นรูปโดยวิธีปกติได้ยาก โดยไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V เป็นโลหะผสมไททาเนียมเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดี มีความหนาแน่นสูงกว่าอลูมิเนียมและต่ำกว่าเหล็กทองแดงและนิกเกิล และมีความแข็งแรงที่เหนือกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมถึง 3 เท่าของและมากกว่า 1.3 เท่าเมื่อเทียบกับโลหะผสมอลูมิเนียม แผ่นโลหะไททาเนียม Ti-6Al-4V มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมหลายสาขาเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีและมีความต้านทานความร้อนสูง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เกิดความท้าทายใหม่สำหรับการขึ้นรูป และด้วยความต้องการใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ทำจากวัสดุดังกล่าว หลายประเทศทั่วโลกได้ตระหนักถึงความสำคัญของไททาเนียมอัลลอยด์และได้ทำการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์เหล่านี้เพื่อให้สามารถนำมาใช้ในได้ทางปฏิบัติ โดยใช้เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตคอมเพรสเซอร์เครื่องยนต์เครื่องบิน และส่วนประกอบโครงสร้างเครื่องบินของเครื่องบินความเร็วสูง (Zhang 2008) โดยทั่วไปการกำหนดค่าของปัจจัยในการเจาะที่เหมาะสม สามารถเลือกได้จากตารางคู่มือของเครื่องจักรหรือกำหนดจากความชำนาญของผู้ใช้งาน แต่วัสดุ Ti-6Al-4V เป็นโลหะผสมชนิดพิเศษจึงไม่มีข้อมูลที่สามารถเลือกใช้ค่าตามตารางคู่มือเครื่องจักรได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วัสดุแผ่นโลหะผสม Ti-6Al-4V เพื่อทำการทดลอง เพื่อให้ทราบถึง รูปแบบการเลือกใช้ปัจจัยที่เหมาะสม ที่จะสามารถ

เจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน (Boopathi 2017, Demir 2013, Li 2001) เพื่อให้สามารถนำไปเจาะวัสดุแผ่นโลหะผสม Ti-6Al-4V ไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทอร์โม-กลศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ แรงกดที่เกิดขึ้น แรงบิดที่เกิดขึ้น อุณหภูมิและการเปลี่ยนรูปพลาสติกของวัสดุชิ้นงาน ในการวิจัยนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเทอร์โม-กลศาสตร์ของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบที่มีผลต่อการเกิดแรงบิด แรงกด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับผลการทดลองในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อการเจาะโลหะผสมไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการเจาะโลหะผสมไทเทเนียม เกรด Ti-6al-4v ด้วยอุปกรณ์เจาะกับผลการทดลองที่ได้จากการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 เครื่อง CNC machining center 3 แกน ยี่ห้อ Eumach รุ่น LMC1020

1.3.2 แผ่นโลหะผสม ไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V

1.3.3 ดอก Friction drill ที่ทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ เกรด K20 ขนาด M6 D5.3 มิลลิเมตร

1.3.4 ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเร็วรอบและอัตราป้อน ที่ใช้ในการเจาะ

1.3.5 ผลการศึกษาประเมินจาก

1.3.5.1 ค่าแรงบิดจากการทดลอง

1.3.5.2 ค่าแรงกดจากการทดลอง

1.3.5.3 ค่าอุณหภูมิจากการทดลอง

1.3.5.4 ค่าความแข็งของผิวรูเจาะบริเวณที่เกิดการไหลตัว

- 1.3.5.5 รูปทรงของรูเจาะที่เกิดขึ้น
- 1.3.5.6 ลักษณะการสึกหรอของอุปกรณ์เจาะ
- 1.3.5.7 โครงสร้างทางจุลภาคของพื้นผิวรูเจาะ
- 1.3.5.8 การใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง
- 1.3.5.9 กำหนดให้อุปกรณ์เจาะที่ใช้ในการจำลองมีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง

รูปทรง

- 1.3.5.10 วัสดุสามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเข้าใจถึงกระบวนการเจาะโลหะแผ่นโดยใช้กระบวนการเจาะด้วยแรงเสียดทาน
- 1.4.2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการเจาะด้วยแรงเสียดทาน
- 1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปใช้ในงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป
- 1.4.4 เพื่อเป็นข้อมูลต่อยอดในการศึกษากรณีการเจาะแบบวิธีการแบบแรงเสียดทานกับโลหะชนิดอื่น ๆ อีกต่อไป

1.5 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ลำดับ	แผนงานวิจัย	ระยะเวลา (เดือน)											
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	ศึกษาค้นคว้างานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับงานวิจัยทั้งหมด												
2	ออกแบบการทดลองการเจาะโลหะผสม ไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V ด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานและทดลองเก็บรวบรวมข้อมูล												

ลำดับ	แผนงานวิจัย	ระยะเวลา (เดือน)											
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
3	ทดลองจำลองกระบวนการเจาะ โดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบ วิธีหาไฟไนต์เอเลเมนต์												
4	เปรียบเทียบผลของกาจำลองกับ การทดลองจริง												
8	วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และเสนอแนะข้อปรับปรุง												
9	จัดทำเล่มรายงาน												

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวโดยสรุปเกี่ยวกับการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาคำรา เอกสาร วารสาร และงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งจะประกอบด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับการ เจาะวัสดุโลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ลักษณะของแรงในการตัดเฉือนที่เกิดขึ้น การสึกหรอของเครื่องมือตัด การจำลองกระบวนการ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อจำกัดรวมไปถึงการออกแบบการทดลอง

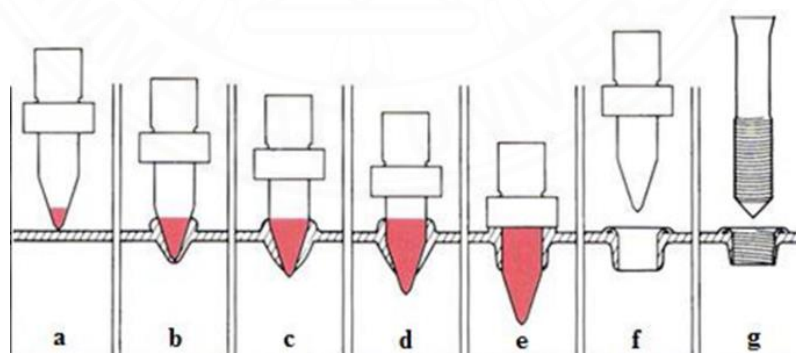
2.1 การเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

จากการเพิ่มขึ้นของความต้องการผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมท่อ การพัฒนาของผลิตภัณฑ์ทางเครื่องจักรกล การออกแบบการเชื่อมต่อในงานวิศวกรรม ที่บีบบังคับให้ผู้ผลิตเร่งผลิตและใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ คิดค้นวิธีการและกระบวนการในการขึ้นรูปโลหะ แบบใหม่ที่มีความซับซ้อนในกระบวนการที่น้อยลง ดังเช่น กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นยังเป็นที่รู้จักกันในนาม การเจาะด้วยความร้อน การเจาะด้วยความร้อนทางกล การเจาะไหล การเจาะขึ้นรูป เป็นวิธีการสร้างรูเจาะแบบไม่ใช้วิธี ปกติ คือ ไม่เกิดการตัดเฉือนทางกลและไม่มีการคายเศษของวัสดุออกมา นั่นก็คือ กระบวนการเจาะ โดยใช้แรงเสียดทานเป็นการเจาะที่มีความสะอาดปราศจากเศษเนื่องจากไม่มีการสูญเสียเนื้อวัสดุที่เกิด จากการตัดเฉือนชิ้นงาน การเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้น อาศัยความร้อนที่เกิดจากการเสียดสี ระหว่างส่วนปลายของอุปกรณ์เจาะรูทรงกรวยกับวัสดุ จนวัสดุเกิดความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งทำให้เนื้อ วัสดุเกิดการอ่อนตัวและยุบตัวลงไปจนทะลุชิ้นงานและก่อตัวเป็นปลอกโลหะรอบบริเวณอุปกรณ์เจาะ รูทรงกรวย (Kaya 2014) โดยปลอกโลหะนี้ยังสามารถที่จะใช้ทำเกลียวใน โดยที่ไม่จำเป็นต้องทำ การเชื่อมแป้นเกลียวเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการยึด และการเจาะแบบใช้แรงเสียดทานยังใช้เวลาในการเจาะ ที่น้อยกว่าการเจาะรูโดยใช้วิธีปกติ นอกจากนี้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นก็ปราศจาก เศษจากการตัดเฉือน ทำให้สามารถลดการเกิดการสูญเสียจากวัสดุ โดยเศษวัสดุที่เกิดจากการเจาะรู จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแหวนรอง ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายจากการทำความสะอาดและการจัดการเศษ เหลือใช้และไม่เกิดการกระจายกระจายจากเศษที่เกิดจากการเจาะรู ดังที่เกิดจากการเจาะรูแบบปกติ (Szwatek 2018) และนอกจากนี้ ยังไม่ต้องการใช้น้ำมันในการตัดเฉือนหรือสารหล่อลื่นในจำนวน มากโดยหรือมีความต้องการเพียงเล็กน้อย ทำให้ การเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นเป็นกระบวนการที่

สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการเจาะรู โดยกระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทานนั้นยังมีข้อจำกัดในการเจาะรูดังต่อไปนี้ คือ วัสดุที่นำมาใช้งานจะต้องมีความสามารถที่จะเพิ่มความร้อนเข้าไปในเนื้อวัสดุได้และกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นไม่เหมาะกับการใช้งานกับวัสดุที่ผ่านการทาสีการเคลือบพลาสติกหรือการชุบกัลวาไนซ์ อีกทั้งกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นยังไม่เหมาะสมในการเจาะในวัสดุหลายหลายชนิดเนื่องจากการสร้างจุดหลอมเหลวของโลหะนั้นเป็นสิ่งจำเป็นที่จะใช้กับกระบวนการดังกล่าว

2.1.1 กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานสามารถลำดับขั้นตอนในการเจาะรูเบื้องต้นได้ 5 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งแสดงลักษณะขั้นตอนการทำงานของ การเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยเริ่มแรก ของกระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทานนั้น อุปกรณ์เจาะรูปทรงกรวยจะถูกบังคับให้หมุนด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสมกับวัสดุที่จะทำการเจาะ โดยจะเริ่มจาก จะทำการกดปลายทูลลงไปสัมผัสกับชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 1 a ทำให้เกิดการเสียดทานในจุดที่อุปกรณ์เจาะสัมผัสกับวัสดุ ที่เกิดจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวแกน และความเร่งเชิงมุมที่เกิดขึ้นระหว่างอุปกรณ์เจาะกับชิ้นงาน ที่จะสร้างความร้อน และทำให้วัสดุชิ้นงานอ่อนลง ทำให้ทูลสามารถกดตัวลง บนวัสดุชิ้นงาน จนทำให้เป็นรูปทรง ดังภาพที่ 1 b โดยทูลจะทำการผลักเนื้อของวัสดุที่เกิดการอ่อนตัว ให้ไหลตัวออกไปด้านล่างและด้านบน จากการที่วัสดุชิ้นงานเกิดความร้อนและอ่อนตัวลง ทำให้อุปกรณ์เจาะสามารถกด ตัวลงผ่านวัสดุชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 1 c (El-Bahloul 2013)

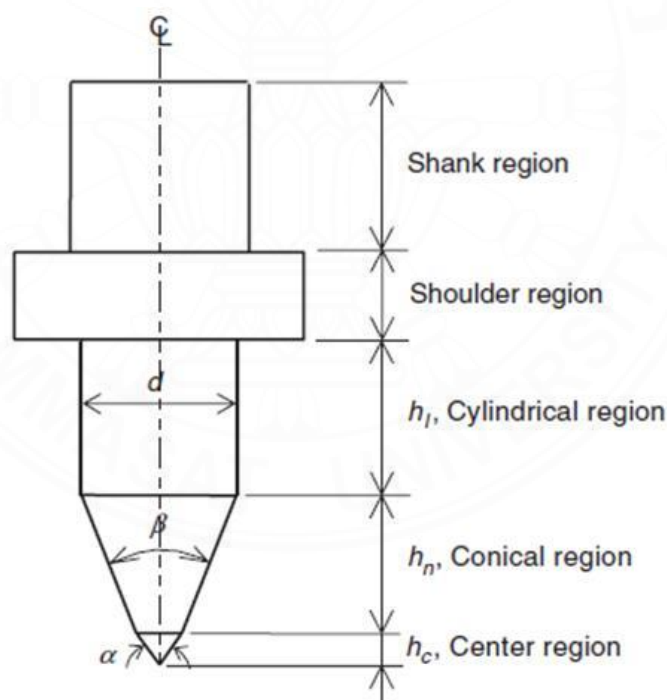


ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการเจาะรูโดยใช้การเสียดทาน a-การเริ่มต้นสัมผัส b-ปลายทูลเจาะลงในเนื้อวัสดุ c-การไหลของเนื้อวัสดุ d - ขอบเขตของการเจาะในส่วนที่ทูล เป็นทรงกระบอก e- การขึ้นภาพปลอก f-การเคลื่อนตัวออกของทูล g- การขึ้นภาพเกลียว (<http://www.flowdrill.com>)

ในขณะที่ทำการเจาะชิ้นงานอุปกรณ์เจาะจะเคลื่อนที่ไปด้านหน้า เพื่อที่จะทำให้วัสดุชิ้นงานไหลไปอีกด้านหนึ่งดังแสดงในภาพที่ 1 d และในการที่จะสร้างแหวนรอนั้นจะใช้ส่วนที่เป็นทรงกระบอกของทูล โดยเมื่อกระบวนการเจาะ ทำการจนเสร็จแล้วนั้น ช่วงบ่าของทูลจะถูกกดติดอยู่กับชิ้นงานในส่วนของรอยเสี้ยนด้านบนที่ถูกดันออกมาจนมีภาพร่างเป็นปลอกกรอง ดังแสดงในภาพที่ 1 e และเมื่อ ทูลถูกยกขึ้น และดึงออก จากรู กับ ปลอกที่ปรากฏขึ้นบนชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 1 f และเมื่อกระบวนการเจาะเสร็จสิ้น เกลียวก็จะถูกสร้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 1 g

2.1.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

อุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยส่วนมากจะทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น วัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ โดยรูปทรงของดอกเจาะแบบเสียดทานที่จะสามารถเจาะแผ่นโลหะให้มีองค์ประกอบครบตามวัตถุประสงค์ได้ถูกพัฒนารูปทรงขึ้นเป็นพิเศษโดยที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตทรงกรวย ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 องค์ประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน
(Scott F.และคณะ 2007)

1. เขตบริเวณจุดศูนย์กลาง (Center region) จะอยู่ที่ปลายสุดของอุปกรณ์เจาะมีลักษณะเป็นมุมแหลม ขนาด α เพื่อใช้กดนำลงบนเนื้อชิ้นงานและความสูง h_c ทำให้เกิดแรงและความร้อนในจุดเริ่มต้นของการเจาะ โดยที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางทำหน้าที่เหมือน Web ในดอกสว่าน โดยช่วยประคองทิศทางขึ้น - ลง ของอุปกรณ์เจาะสำหรับกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

2. ตำแหน่งกรวย (Conical region) ตำแหน่งนี้มีรูปทรงและมุมมากกว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลาง (Center region) โดยในตำแหน่งนี้จะทำหน้าที่เสียดสีกับชิ้นงานให้เกิดการเสียดทานกันระหว่างอุปกรณ์เจาะและวัสดุจนทำให้เกิดความร้อน เพื่อให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวเพื่อให้เกิดการผลักดันเนื้อวัสดุจนที่ถูกเจาะลงไปด้านล่างเป็นภาพปลอกโลหะ โดยมีมุมความยาวของรูปทรงกรวย คือ จุด β และ h_n

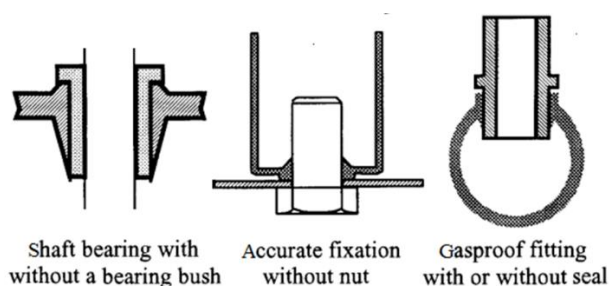
3. ตำแหน่งรูปทรงกระบอก (Cylindrical region) ซึ่งตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่ช่วยสร้างรูปร่างของปลอกโลหะโดยการดันโลหะที่เกิดการอ่อนให้ไหลไปตามความยาวของอุปกรณ์เจาะ และเส้นผ่าศูนย์กลางของตำแหน่งนี้ คือ h_1 และ d

4. ตำแหน่งบ่า (Shoulder region) ในตำแหน่งนี้จะมีหน้ากดเนื้อวัสดุที่เกิดการไหลตัวออกสู่บริเวณปากรู ทำให้เกิดเป็นวงแหวนที่บริเวณปากรูเจาะ

5. ตำแหน่งก้าน (Shank) ใช้จับยึดหัวจับของเครื่อง

2.1.3 การใช้งานรูเจาะที่เกิดจากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน (Friction Drill)

การเจาะโดยใช้แรงเสียดทานจะสามารถสร้างปลอกขึ้นบนแผ่นโลหะ เพื่อให้สามารถใช้ในการเชื่อมต่อกับชิ้นงานอื่น ๆ ได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ โดยปลอกที่ถูกสร้างขึ้นนั้นจะมีความหนาเป็นสองถึงสามเท่าของผนังชิ้นงานปกติ โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถนำไปสร้างเป็นเกลียวได้ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.3 ซึ่งแสดงลักษณะการทำงานที่เกิดขึ้นจากการใช้รูเจาะที่ถูกเจาะด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน



ภาพที่ 2.3 ลักษณะการนำไปใช้งานของรูที่ถูกเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน (Kerkhofs M.และคณะ 1994)

2.2 โลหะไทเทเนียม

ไทเทเนียม (Titanium, Ti) โลหะชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษต่างให้มีความสนใจ เนื่องจาก โลหะชนิดนี้มีค่าสัดส่วน ระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง คือ มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา ทั้งยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อนประเภทต่าง ๆ แต่เนื่องจากไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีราคาสูง ทำให้การใช้งานโลหะชนิดนี้ยังจำกัดอยู่เพียงเฉพาะในบางอุตสาหกรรมเท่านั้น นอกจากนี้ไทเทเนียมยังเป็นธาตุที่มีมากเป็นลำดับที่ 9 ในชั้นเปลือกโลก แต่โลหะชนิดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่น ๆ ได้ง่าย จึงไม่พบ ในรูปแบบโลหะบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ แต่จะพบในรูปสารประกอบในแร่ชนิดต่าง ๆ เช่น แร่รูไทล์ (Rutile) แร่ิลเมนไนต์ (Ilmenite) แร่อะนาเทส (Anatase) แร่บรูไคต์ (Brookite) แร่ไทเทไนต์ (Titanite) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการพบแร่ไทเทเนียมอยู่รวมกับแร่เหล็กด้วย

2.2.1 สมบัติทางฟิสิกส์

ธาตุโลหะไทเทเนียมเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นธาตุที่มีอัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง [6] เป็นโลหะที่แข็งแรงแต่มีความหนาแน่นต่ำสามารถทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีออกซิเจน), [1] มันวาว, และมีสีขาว โลหะมีจุดหลอมเหลวสูง (มากกว่า 1,650 °C หรือ 3,000 °F) จึงมักนำไปใช้เป็นโลหะทนไฟ ไทเทเนียมเป็นพาราแมกเนติกมีสภาพนำไฟฟ้าและสภาพนำความร้อนต่ำ [1] เกรดของไทเทเนียมในเชิงการค้า (บริสุทธิ์ 99.2%) มีความทนแรงเค้นดึงสูงสุดประมาณ 63,000 psi (434 MPa) เท่ากับโลหะผสมเกรดต่ำทั่วไป แต่เบากว่า 45% [5] ไทเทเนียมมีความหนาแน่นมากกว่าอะลูมิเนียม 60% แต่แข็งแรงกว่าสองเท่า [5] ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061-T6 ที่นิยมใช้กันทั่วไป โลหะผสมไทเทเนียมบางชนิด (เช่น บีตาซี, Beta C) ทนแรงเค้นดึงสูงกว่า 200,000 psi (1,400 MPa) [8] อย่างไรก็ตาม ไทเทเนียมจะสูญเสียความแข็งแรงเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 430 °C (806 °F) [9] ไทเทเนียมนั้นแข็งพอใช้ มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก และเป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อนที่อุณหภูมิสูง การใช้งานกับเครื่องจักรต้องทำอย่างระมัดระวังเพราะวัสดุจะอ่อนตัวและถูกครูดเป็นรอยถ้าเครื่องมือมีความแหลมคมและไม่ได้ใช้วิธีการระบายความร้อนที่เหมาะสม เครื่องมือที่ทำจากไทเทเนียมคล้ายกับเครื่องมือที่ทำจากเหล็ก โครงสร้างของไทเทเนียมนั้นมีขีดจำกัดความล้าซึ่งจะกำหนดช่วงชีวิตของการนำไปใช้งานบางประเภท คุณสมบัติความแข็งแรง (Stiffness) ของโลหะผสมไทเทเนียม ปกติแล้วไม่ดีเท่าวัสดุอื่น เช่น โลหะผสมอะลูมิเนียม และคาร์บอนไฟเบอร์ ดังนั้น จึงไม่ค่อยจะมีการนำไทเทเนียมไปใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง

2.2.2 โลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V

โลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นโลหะผสมไทเทเนียมที่มีการนำมาใช้งานมากที่สุดในบรรดาโลหะผสมไทเทเนียมทั้งหมด โดยส่วนมากแล้ว นิยมนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมการบิน อากาศยาน และงานด้านอวกาศ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ในงานด้านการแพทย์และทันตกรรมอีกด้วย โดยคุณสมบัติเด่นของ โลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V คือมีค่าความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกับเหล็กกล้าปลอดสนิม มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีและมีสัดส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ความแข็งแรงสูง และมีคุณสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม

โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V นั้นจะประกอบไปด้วยธาตุอลูมิเนียมร้อยละ 5.5-6.5 ซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างอัลฟา ทำให้อุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสจากเฟสอัลฟาไปเป็นเฟสเบต้าสูงขึ้น และยังประกอบด้วย ธาตุวานาเดียมร้อยละ 3.5-4.5 ซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างเบต้า โดยการลดอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจากเฟสอัลฟาไปเป็นเบต้า โดยส่วนผสมและสมบัติทางกลของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V ได้ แสดงดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V

ส่วนผสมทางเคมี	Ti	Al	V	Fe
Ti-6Al-4V	Base	5.5-6.75	3.5-4.5	< 0.25

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V

สมบัติทางกลของวัสดุโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V	
ความแข็งผิว (HV)	393
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate) (MPa)	950
ความต้านทานแรงดึง(Yield) (MPa)	880
มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น(GPa)	113.8
ความแข็งแรงทางแรงกด(MPa)	950
อัตราส่วนของปัวซอง	0.342

2.3 ทังสเทนคาร์ไบด์

ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide (WC) เป็นธาตุโลหะผสมระหว่างทังสเทน (W) กับคาร์บอน (C) มีคุณสมบัติ ทนความร้อนได้สูง และมีความแข็งมาก ซึ่งถูกนำมาใช้ในการผลิตเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) มีความแข็งเกร็งมากกว่าเหล็กกล้าประมาณ 2 เท่า โดยมีค่ามอดูลัสของยังประมาณ 530–700 GPa (77,000 – 102,000 ksi) โมดูลัสของแรงบีบอัด 630–655 GPa และโมดูลัสของแรงเฉือน 274 GPa ด้วยคุณสมบัติความแข็งและทนความร้อนสูง ทังสเทนคาร์ไบด์จึงใช้ทำเป็นเครื่องมือตัดหรือหัวเจาะ ใช้ทำกระสุนเจาะเกราะ เครื่องมือผ่าตัด อุปกรณ์กีฬา เครื่องประดับและอื่น ๆ โดยส่วนผสมและสมบัติทางกลของโลหะทังสเทนคาร์ไบด์ได้ แสดงดังตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทังสเทนคาร์ไบด์

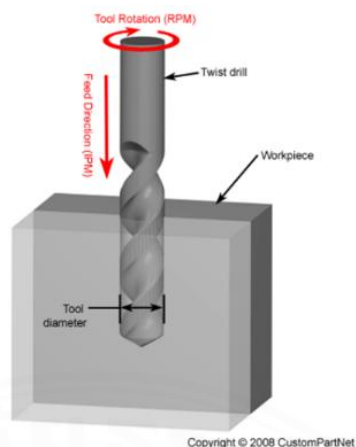
ส่วนผสมทางเคมี	W	C	Fe
Wc	Base	4	0.2

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของวัสดุทังสเทนคาร์ไบด์

สมบัติทางกลของวัสดุทังสเทนคาร์ไบด์	
ความแข็งผิว (HA)	90
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate) (MPa)	344
ความต้านทานแรงดึง (Yield) (MPa)	880
มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (GPa)	669
ความแข็งแรงทางแรงกด(MPa)	2683
อัตราส่วนของปัวซอง	0.2

2.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเจาะชิ้นงานด้วยเครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถใช้เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยเพื่อศึกษาค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเจาะชิ้นงานด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยใช้เครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ให้มีความเหมาะสมกับวัสดุที่นำมาเจาะ ในส่วนนี้จะนำเอาค่าตัวปัจจัยต่าง ๆ ที่ปรากฏในเครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์มาอธิบายพอสังเขปดังนี้



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการเจาะชิ้นงานด้วยอุปกรณ์เจาะแบบปกติ

(<http://www.custompartnet.com/calculator/drilling-speed-and-feed>)

2.4.1 ความเร็วรอบ

ความเร็วรอบหมายถึง ความเร็วรอบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดเฉือนที่หมุนได้ในเวลา 1 นาที โดยมีหน่วยนับเป็นจำนวนต่อนาที โดยการใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสม จะส่งผลให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดเฉือนมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นรวมถึงส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนนั้นมีคุณภาพตามที่กำหนด

2.4.2 ความเร็วตัด

ความเร็วตัด (Cutting Speed) ในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานที่มี การใช้เครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์นั้น หมายถึง ความเร็วของอุปกรณ์เจาะที่หมุนเพื่อตัดเฉือนชิ้นงานได้ความยาวหรือระยะทางของเศษโลหะที่ถูกอุปกรณ์เจาะตัดเฉือนออกมาในขณะที่เจาะว่ามีความยาวกี่เมตรในเวลา 1 นาที ความเร็วตัดจึงมีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที ซึ่งในการคำนวณก็ใช้หลักการ การหาเส้นรอบวงของอุปกรณ์เจาะ คูณด้วยความเร็วรอบของอุปกรณ์เจาะ จึงมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (เมตรต่อนาที)} \quad (1)$$

เมื่อ

V = ความเร็วตัดงานเจาะ (เมตรต่อนาที)

n = ความเร็วรอบอุปกรณ์เจาะ (รอบต่อนาที)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์เจาะ (มิลลิเมตร)

หมายเหตุ กำหนดให้ π มีค่าเท่ากับ 3.1416



ภาพที่ 2.5 ความเร็วตัดงานเจาะ

(ระบบส่งกำลังเครื่องมือกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2556)

2.4.3 อัตราป้อน

อัตราป้อนอุปกรณ์เจาะ (Feed) หมายถึง ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ตัดเฉือนหรือการเคลื่อนที่ของงานต่อการหมุนของชิ้นงานหรือมีดตัด 1 รอบ การเคลื่อนที่ที่มีดตัด โดยจะมีหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ

$$Vf = fr \times n \text{ (มิลลิเมตรต่อนาที)} \quad (2)$$

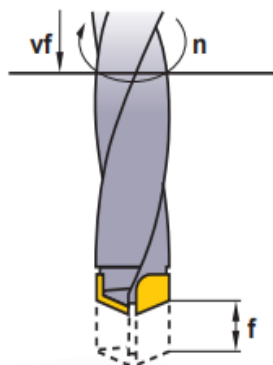
แรงป้อนของแกนหลัก (Vf)

Vf (มม. ต่อนาที) = อัตราป้อนของแกนหลัก (แกน Z)

Fr (มม. ต่อบรอบ) = อัตราป้อนต่อบรอบ

N (รอบต่อนาที) = ความเร็วของแกนหลัก

Z = จำนวนฟันของอุปกรณ์เจาะ



ภาพที่ 2.6 อัตราการเจาะของอุปกรณ์เจาะ
(Catalog Mitsubishi material cutting tool, 2553)

2.5 การสึกหรอของเครื่องมือตัด

การสึกหรอของเครื่องมือตัดหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของภาพร่างของเครื่องมือตัด จากรูปร่างก่อนการใช้งานและหลังการใช้งาน ซึ่งเป็นผลมาจากเครื่องมือตัดเกิดความเสียหายอย่างค่อยเป็นค่อยไป ขณะใช้งานมีสาเหตุหลายอย่างที่ทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัด ซึ่งความเข้าใจโดยทั่วไปการสึกหรอของเครื่องมือตัดเกิดจากการเสียดสี โดยอนุภาคที่มีความแข็งของชิ้นงานที่เกิดการถูไถบนผิวหน้าของเครื่องมือตัด การสึกหรอมักจะเกิดจากการเกิดการกระจายของโลหะผสมระหว่างวัสดุงานกับวัสดุเครื่องมือตัด ในบริเวณที่เกิดสภาวะของการสัมผัสกันของวัสดุงานและวัสดุเครื่องมือตัด โดยจะสังเกตเห็นได้ วัสดุงานจะแสดงปฏิกิริยาโต้ตอบกับวัสดุเครื่องมือที่เป็นสาเหตุให้เกิดการสึกหรอเนื่องจากการเสียดสีกันของวัสดุและเครื่องมือตัด โดยอัตราของการสึกหรอเนื่องจากการเสียดสีนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในบริเวณของการสัมผัส และปฏิกิริยาระหว่างเครื่องมือตัดกับวัสดุงานซึ่งกันและกันที่มีการเกิดการกระจายหรือการเกิดโลหะผสมเกิดขึ้น ที่ซึ่งอนุภาคของวัสดุงานถูกหลอมละลายบนพื้นผิวของเครื่องมือตัด การหลอมละลายเหล่านี้จะทับถมกันจนมองเห็นเป็นลักษณะพอกพูนบนผิวหน้าเครื่องมือตัด เนื่องจากอนุภาคหรือชิ้นของวัสดุงานภายในร่องที่เกิดการสึกหรอของผิวหน้าเครื่องมือตัด การเกิดการกระจายหรือโลหะผสม ระหว่างการทับถมและความอ่อนตัวของเครื่องมือตัดต่ำกว่าการหลอมละลายบ่อยครั้งการทับถมเหล่านี้จะมีการโต้ตอบอีกครั้งจากเศษโดยการหลอมละลายหรือเกิดการแตกหักออกจากแรงของการชนของเศษที่หลุดออกมาปฏิกิริยาเคมีระหว่างองค์ประกอบในการทางานโดยการใช้สารหล่อเย็น ในบางครั้งอาจจะเร่งอัตราของการสึกหรอของเครื่องมือตัดจากการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของโลหะที่มีความร้อนใกล้คมตัด โดยจะมีการกระจายเกิดขึ้น ทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดอีกด้วย โดยเฉพาะการใช้ความเร็วตัดที่สูง

เกินไปร่วมกับอุณหภูมิในการตัดเฉือนที่สูง การแตกหักของคมตัดเป็นสาเหตุให้เกิดการรับภาระในการตัดเฉือนที่มากเกินไป หรือเกิดการกระแทกอย่างกะทันหัน หรือการออกแบบเครื่องมือตัดที่ไม่เหมาะสมตามมาตรฐาน นอกจากนี้ยังมีปรากฏการณ์ในการเกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัด เนื่องจากความเค้นที่สูงที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างผิวคาย (Rake Face) กับเศษของวัสดุงาน เป็นสาเหตุในการเกิดการเสียดสีรุนแรงที่ผิวคาย เนื่องจากความเสียดทานระหว่างผิวหลบด้านข้าง (Flank) กับผิวที่ถูกตัดเฉือน ดังนั้นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดอาจจัดอันดับการสึกหรอของเครื่องมือตัดได้คือบริเวณผิวคาย (Rake Face) และผิวหลบด้านข้าง (Flank Face)

2.6 การสึกหรอของอุปกรณ์เจาะ

ในการใช้งานของเครื่องมือตัด บริเวณที่เกิดการสึกหรอ คือ บริเวณที่เครื่องมือตัดสัมผัสกับเศษโลหะและชิ้นงาน การสึกหรอจะเกิดขึ้นสองตำแหน่ง คือ เกิดบริเวณผิวคายเศษโลหะ และบริเวณผิวด้านข้างของคมตัด การสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้เครื่องมือตัดหมดอายุการใช้งานซึ่งสาเหตุของการสึกหรอมีดังนี้

2.6.1 การสึกหรอจากการเสียดสี

การที่วัสดุสองชนิดเกิดการสึกหรอ วัสดุชิ้นที่แข็งกว่าย่อมมีการสึกหรอน้อยกว่า วัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่า โดยในการตัดเฉือนโลหะทำให้เกิดอุณหภูมิบริเวณคมตัดสูงขึ้นจะเป็นการเร่งการสึกหรอบริเวณคมตัด เศษโลหะที่เคลื่อนผ่านบริเวณคมตัดจะทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวสัมผัส ซึ่งสูงพอที่จะทำให้เกิดความเค้นเฉือนสูง เกินกว่าวัสดุที่ใช้ทำเป็นเครื่องมือตัดจะรับได้ จึงเกิดการสึกหรอที่เนื้อวัสดุของเครื่องมือตัด นอกจากนี้อาจมีอนุภาคของแข็งที่แปลกปลอมเข้ามา ทำให้เกิดการสึกหรอมากยิ่งขึ้น เช่น เศษทรายที่ยังติดอยู่บริเวณผิวของชิ้นงานหล่อหรืออนุภาคของแข็งที่ฝังตัวอยู่ในวัสดุชิ้นงาน เป็นต้น

2.6.2 การสึกหรอที่เกิดจากการเชื่อมติดหรือเยิ้มติดของเศษโลหะ

เศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัดเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในขบวนการตัดเฉือนโลหะที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เศษโลหะอ่อนตัวลงรวมกับผลของความเสียดทานระหว่างเศษโลหะ กับผิวคายเศษโลหะจึงทำให้เศษโลหะบางส่วนเกิดการเชื่อมติด หรือเยิ้มติดกับคมตัดและพอกตัวหนาขึ้น เมื่อถึงขนาดหนึ่งจึงแตกออกมา ซึ่งจะทำให้เนื้อวัสดุของเครื่องมือตัดบางส่วนหลุดตามออกมาด้วย

การเกิดเศษโลหะเชื่อมติดจะเกิดขึ้นแล้วหลุดออกตลอดเวลาของการกำจัดโลหะ ทำให้เกิดการสึกหรอกับเครื่องมือตัด

2.6.3 การสึกหรอจากการแพร่

ผิวสัมผัสที่อุณหภูมิสูงประกอบกับการเสียดสี ผิวสัมผัสที่อุณหภูมิสูงประกอบกับการเสียดสี จะทำให้อะตอมจากวัสดุที่แข็งแกร่งกว่า สามารถแพร่ไปยังวัสดุที่มีความอ่อนกว่าได้ และในทางตรงข้ามอะตอมจากวัสดุที่อ่อนกว่า ก็สามารถแพร่ไปยังวัสดุที่แข็งแกร่งกว่าได้เช่นเดียวกัน จะเห็นว่าในกรณีนี้ทำให้วัสดุที่แข็งแกร่งกว่าเสียคุณสมบัติไป ยิ่งเป็นการเร่งให้เกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้น การแพร่นี้ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเป็นองค์ประกอบสำคัญเช่น ในการตัดเฉือนโลหะด้วยเครื่องมือตัดที่ทำจากเหล็กกล้า รอบสูงอัตราการแพร่ จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทุก ๆ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้น

2.6.4 การสึกหรอเนื่องจากทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

อุณหภูมิที่สูงขึ้นในกระบวนการกำจัดโลหะสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างวัสดุทำเครื่องมือตัดกับออกซิเจนในอากาศทำให้เครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอได้

2.6.5 การสึกหรอเนื่องจากอุบัติเหตุจากการกำจัดโลหะ

เป็นการสึกหรอของเครื่องมือก่อนเวลาอันควร เช่น เกิดการกระแทกกับเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ หรือ เกิดจากการที่ผู้ปฏิบัติงานป้อนเครื่องมือตัดผิดตำแหน่ง

2.7 การวัดแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะรู้กับกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

ปัจจุบันการผลิตชิ้นส่วนจากโลหะและอโลหะ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตในด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จำเป็นจะต้องอาศัยกระบวนการผลิตด้วยกรรมวิธีการตัดเฉือนทั้งสิ้น ไม่ว่าจะเป็นการแปรรูปวัสดุด้วยงานกลึง งานกัด งานไส งานทำเกลียว และงานเจาะ เป็นต้น ความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุเครื่องมือตัดจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะถ้าหากว่าขอบคมตัด (Cutting Edge) เกิดการสึกหรอ จะส่งผลถึงคุณภาพของชิ้นงานจะลดลง ทำให้เกิดผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต สมบัติของเครื่องมือตัดที่ดีนั้นจะต้องประกอบไปด้วย ความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Toughness) ความคม (Sharpness) ทนต่อความร้อน (Thermal Stability) และทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Resistant) ซึ่งในปัจจุบันเกิดการแข่งขันทางการตลาดมากขึ้น การเลือกใช้

เครื่องมือตัดที่เหมาะสม จึงต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานที่นานพอก่อนที่จะเกิดการสึกหรอ วัสดุเครื่องมือตัดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการตัดปาดผิวในปัจจุบันส่วนใหญ่จะอยู่ในภาพของแผ่นมิตตัด (Insert Tools) โดยทั่วไปแล้วมักจะใช้กับงานตัดปาดผิวด้วยเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เช่น CNC-Milling, CNC Lathe เป็นต้น การตรวจสอบการสึกหรอของแผ่นมิตตัด สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ การตรวจสอบโดยตรงด้วยการนำอุปกรณ์ตัดที่ผ่านการตัดเฉือนแล้วไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องไมโครสโคป วิธีที่สอง เป็นการตรวจสอบทางอ้อม โดยใช้ปริมาณทางกายภาพที่วัดได้ เช่น การวัดค่าของแรงในการตัดเฉือน ความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะทำการตัดเฉือน การสั่นสะเทือน และเสียง เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ทราบได้ทันทีว่าแผ่นมิตตัดเกิดการสึกหรอ ทำให้ไม่ต้องสูญเสียชิ้นงานขณะทำการตัดเฉือน ดังนั้น การตรวจสอบการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือตัดจึงมีความสำคัญมาก ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีเครื่องมือวัดที่สามารถวัดอัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดในขณะทำการตัดเฉือนได้

2.7.1 แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการตัดเฉือนโลหะ (Forces in Metal Cutting)

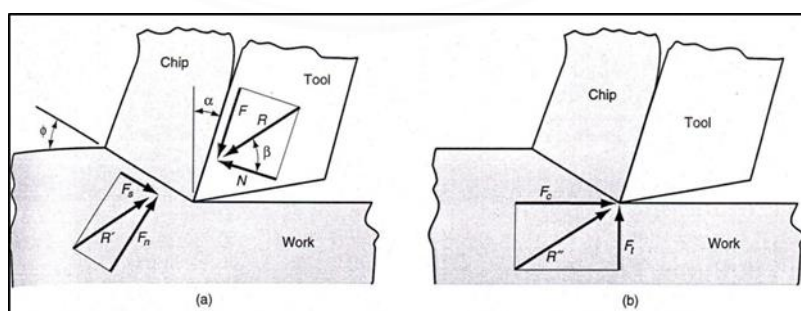
โดยปกติเมื่อพิจารณาแรง (Forces) ที่เกิดขึ้นกับเศษตัดใน Orthogonal cutting ในภาพที่ 2.9 (a) สามารถแยกแรงที่เกิดขึ้นกับเศษตัดอัน เนื่องจากมิตตัดได้ 2 ส่วนในแนวตั้งฉากกันได้แก่

2.7.1.1 แรงเสียดทาน (Friction force, F)

เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างคมตัดกับ เศษ ตัดเพื่อต้าน การไหลของเศษ ตัด (Flow of the chip) ตามแนว rake face ของมิตตัด

2.7.1.2 แรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส (Normal force to friction, N)

เป็นแรงในแนวตั้งฉากกับแรงเสียดทาน



ภาพที่ 2.7 (a) แรงในการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับเศษวัสดุ

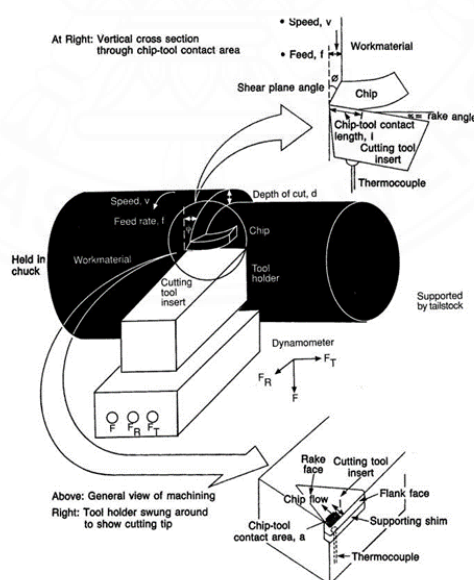
(b) แรงที่เกิดขึ้นกับเครื่องมือตัดและสามารถวัดได้

2.7.2 การวิเคราะห์แรงในการตัดเฉือนโลหะ (Cutting Force Analysis)

แรงที่กระทำต่อเครื่องมือตัดนับได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อกระบวนการตัดเฉือนโลหะ ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตของเครื่องจักรกล แรงที่กระทำต่อเครื่องมือตัดสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่ากำลังงานที่จะใช้ในการตัดเฉือน และออกแบบส่วนประกอบของเครื่องจักรกลที่ใช้สำหรับการตัดเฉือน อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือตัด และการจับยึดชิ้นงานให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการตัดเฉือน และไม่เกิดการสั่นสะเทือนในขณะทำการตัดเฉือน

ในการวิเคราะห์กระบวนการตัดเฉือนโลหะจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงลักษณะของแรงที่กระทำต่อเครื่องมือตัด จำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าของแรงที่กระทำบนเครื่องมือตัด ซึ่งเราเรียกว่า เครื่องวัดแรงตัดเฉือน สามารถทำการวัดค่าของแรงที่กระทำบนเครื่องมือตัดได้อย่างถูกต้อง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดดังกล่าวให้มีขีดความสามารถในการวัดค่าของแรงได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งแสดงผลของแรงที่กระทำบนเครื่องมือตัดผ่านทางเครื่องมือคอมพิวเตอร์ได้

การวัดแรงในการตัดเฉือนในช่วงแรก ๆ นั้น จะอาศัยแผ่นสเตรนเกจ (Strain Gauge) ติดบนเครื่องมือตัด เพื่อวัดค่าการเปลี่ยนรูปในลักษณะของการยืดหยุ่น (Elastic deflection) ที่เกิดจากแรงที่กระทำบนเครื่องมือตัด แต่ในปัจจุบันนี้ได้หันมานิยมใช้ เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ โหลดเซลล์ (piezo-electric load cell) ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.8 การวัดแรงตัดเฉือนในงานกลึง

(<https://wiki.jefferyjjensen.com/engineer-mechanical/machining>)

จะเห็นได้ว่า ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อแรงในการตัดเฉือน จะมีอยู่ด้วยกันหลายตัวแปร ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถแบ่งกลุ่มได้ ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เครื่องมือตัด (Cutting Tools) ประกอบไปด้วย มุมของเครื่องมือตัด วัสดุ เครื่องมือตัด และการสึกหรอของเครื่องมือตัด

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขในการตัดเฉือน (Cutting Condition) ประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกในการป้อนตัด และการหล่อเย็น

กลุ่มที่ 3 วัสดุงานที่ถูกตัดเฉือน (Workpiece material)

โดยตัวแปรที่มีผลกระทบต่อแรงในการตัดเฉือนจะประกอบไปด้วย

- มุมของเครื่องมือตัด (Tool Geometry ; Rake and setting angle)
- ความเร็วตัด (Cutting Speed)
- วัสดุเครื่องมือตัด (Tool material)
- การสึกหรอของเครื่องมือตัด (Tool wear)
- การหล่อเย็น (Coolant)
- ความลึกในการป้อนตัด (Cutting depth)
- อัตราป้อน (Feed rate)
- วัสดุงานที่ถูกตัดเฉือน (Workpiece material)

2.7.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรง

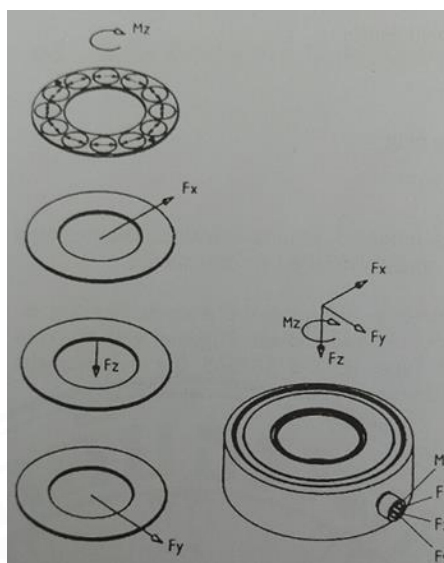
เครื่องวัดแรงตัดเฉือนเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงในการตัดเฉือนโลหะในแนวแกน ระนาบ และแนวตั้ง และมีความสามารถในการวัดแรงบิดได้อีกด้วย ด้วยเทคโนโลยีของเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ (Piezoelectric Sensors) เทคโนโลยีของเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการวัดแรง ในการตัดเฉือนโลหะ ของเครื่องจักรกล



ภาพที่ 2.9 เครื่องวัดแรง แบบ 4 ช่องทาง ยี่ห้อ kistler รุ่น 9272

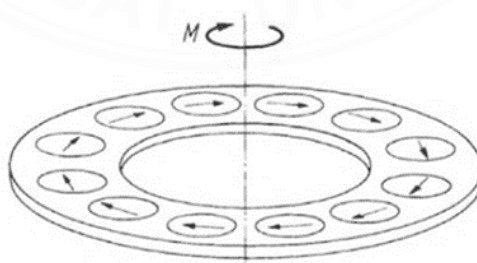
2.7.4 หลักการทำงาน เครื่องวัดแรงตัดเฉือนแบบหลายช่องทาง

เครื่องวัดแรงตัดเฉือนแบบหลายแกนส่วนใหญ่จะถูกประกอบด้วย แผ่น เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ หลาย ๆ แผ่นและ มีรูปแบบเหมือนกันกับเครื่องวัดแรงตัดเฉือนแบบแบบแกนเดียว แต่จะมีจำนวนแผ่น QUARTZ ที่มากกว่า โดยเครื่องวัดแรงตัดเฉือนแบบ 4 ช่องทางจะวางแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ในทิศทางที่ตัดกันเพื่อให้เกิดผล PIEZOELECTRIC ตามแนวยาวไว้สำหรับวัดแรงอัด (แรงตามแนวแกน z, F_z) และ QUARTZ อีกคู่หนึ่งที่ตัดสำหรับแรงเฉือน โดยแต่ละชิ้นจะใช้วัดองค์ประกอบแรงเฉือน (แรงตามแนวแกน x, F_x และแรงตามแนวแกน y, F_y) ของแรงกระทำดังแสดงในภาพที่ 2.10 แรงเฉือนจะถูกถ่ายผ่านแรงเสียดทานซึ่งแปลว่าเครื่องวัดแรงตัดเฉือนต้องถูกติดตั้งโดยมีแรงกดเริ่มต้นค่อนข้างสูง โดยปกติจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน $\mu=0,1$ ในการคำนวณแรงเฉือนที่สามารถรับได้ ในบางกรณีอาจออกแบบโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ $\mu=0,15$ สำหรับวัสดุพิเศษ



ภาพที่ 2.10 องค์ประกอบของไดนามิเตอร์ แบบ 4 ช่องทาง

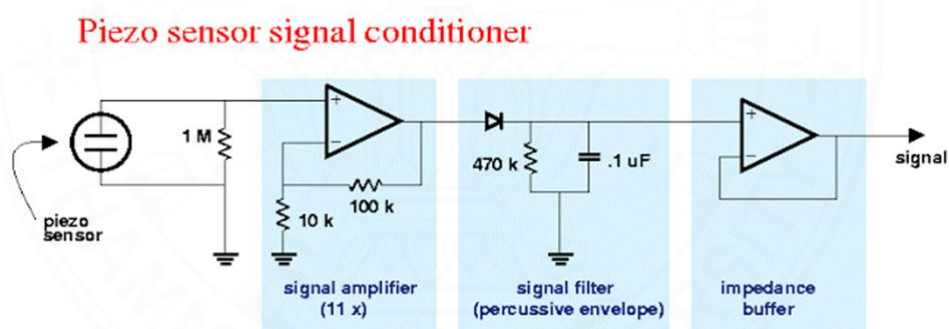
ส่วนในการวัดแรงบิดนั้น ตัวตรวจจับแรงบิด จะมีการการจัดเรียงแผ่น เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ ที่มีความไวต่อแรงเฉือน สามารถใช้วัดแรงบิดได้ ตัว แผ่น เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ จะจัดวางให้แกนที่ไวต่อแรงเฉือนขนานกับเส้นรอบวงของวงกลมแผ่น เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ จะติดตั้งให้มีแรงกดเริ่มต้นทางกลที่กำหนดไว้เนื่องจากแรงเฉือนจะถูกถ่ายผ่านแรงเสียดทาน แผ่นเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ทุกตัวจะถูกต่อขนานกันทางไฟฟ้าทำให้อาต์พุตโดยรวมเป็นสัดส่วนกับแรงบิดที่กระทำกับเครื่องวัดแรงตดเฉือน ที่ติดตั้งพร้อมกับตัวตรวจจับข้างต้น จะสามารถวัดแรงบิดและแรงกระทำในการเจาะและกัดได้



ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงของ QUARTZ ดิสก์ที่ตัดให้วัดผลของแรงเฉือนสำหรับใช้วัดแรงบิด
QUARTZ ดิสก์แต่ละแผ่นจะถูกยึดให้เข้าที่ด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนโดยวิธีการหล่อ (ด้วยวิธีของ Kistler)

2.7.5 หลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์

เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) คือ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงกลต่าง ๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น ความเครียด หรือแรงกระทำอื่น ๆ โดยเปลี่ยนพลังงานกลต่าง ๆ เหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุนั้นก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material) เป็นเซรามิกประเภทหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษ กล่าวคือ เมื่อได้รับแรงกล (Mechanical force) จะให้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ในทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) เกิดแรงกลซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (Inverse piezoelectric effect) การเปลี่ยนไปมา ระหว่างพลังงานกล และพลังงานไฟฟ้า สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ สมบัติเพียโซอิเล็กทริก จะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ เช่น คริสตอล (Gallium phosphate, quartz, tourmaline) เซรามิก โพลีเมอร์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.12 การแปลงสัญญาณของเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์

(<http://devices.sapp.org/circuit/piezo/>)

เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ โดยทั่วไปแล้วจะต้องประกอบอยู่ภายในอุปกรณ์อื่น (Housing) เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน เมื่อมีแรงกระทำต่อเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์จะแปลงสัญญาณ ออกไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยจะเป็นค่าของแรงที่วัดได้ ซึ่งอยู่ในภาพของหน่วย pC (1 Picocoulomb = 10^{-12} Coulomb) ตัวรับสัญญาณดังกล่าวจะทำมาจากซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide ; SiO_2) ซึ่งในการออกแบบเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ จะนำซิลิกอนไดออกไซด์ดังกล่าวมาตัดด้วยเลเซอร์เป็น ภาพโดนัทวางซ้อน ๆ กันภายในอุปกรณ์ของเครื่องมือวัดแรง ซึ่งเราเรียกว่า เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์

การนำเปียร์โซอิเล็กทริกเซนเซอร์มาใช้ในการวัดแรงในการตัดเฉือน จะมีด้วยกันหลาย ๆ ลักษณะ ซึ่งจะมีตั้งแต่การวัดแรงในการตัดเฉือนแบบ 3 แนวแรง จนถึง 6 แนวแรง ซึ่งในการนำไปใช้งานก็จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและลักษณะของการวิเคราะห์แรงแต่ละประเภท ซึ่งตัวแปรที่มีผลกระทบต่อแรงในการตัดเฉือนจะประกอบไปด้วย

- มุมของเครื่องมือตัด (Tool Geometry ; Rake and setting angle)
- ความเร็วตัด (Cutting Speed)
- วัสดุเครื่องมือตัด (Tool material)
- การสึกหรอของเครื่องมือตัด (Tool wear)
- การหล่อเย็น (Coolant)
- ความลึกในการป้อนตัด (Cutting depth)
- อัตราป้อน (Feed rate)
- วัสดุงานที่ถูกตัดเฉือน (Workpiece material)

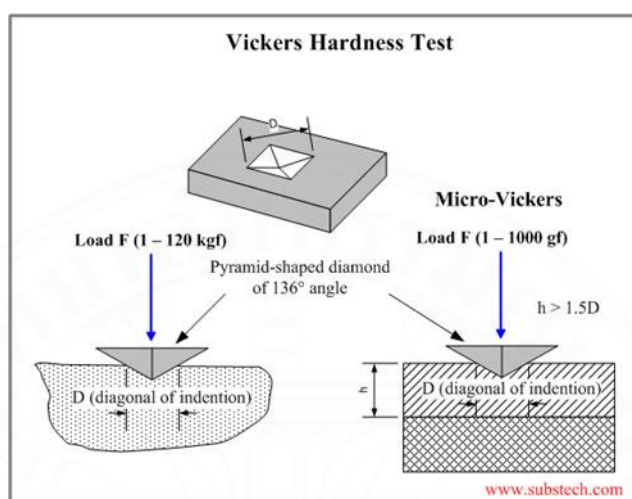
ในส่วนข้อดีของเปียร์โซอิเล็กทริกเซนเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับวัดแรงในการตัดเฉือนชนิดอื่น ๆ คือ

- มีอายุการใช้งานที่นาน
- มีความไวต่อการรับสัญญาณได้สูง
- มีช่วงของการวัดมาก
- มีความสะดวกและเป็นอิสระต่อการปฏิบัติงานอื่น ๆ
- มีความถี่ธรรมชาติสูง
- มีช่วงกว้างของอุณหภูมิในการวัดสูง

2.8 การวัดความแข็งของพื้นผิวรูเจาะ

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส มีลักษณะการวัดที่คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนลล์ แต่เปลี่ยนหัวกดทดสอบจากทรงกลมเป็นหัวกดรูปทรงปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมยอดมีขนาด 136 องศาทำจากเพชร การทดสอบวิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีลักษณะอ่อนไปจนถึงแข็งมาก (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดโดยจะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยการกดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดแรงกดตั้งแต่ 1 – 120 kgf กดลงในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ส่วนการเคลื่อนที่ของหัวกดขณะกดลงบนชิ้นงานโดยจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ เช่นเหล็กกล้าจะคงแรงกดค้างไว้ประมาณ 10 วินาที

ขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดค้างไว้นานกว่า ซึ่งเมื่อหัวกดถูกยกขึ้นจะทำให้เกิดรอยกดที่ผิววัสดุ ซึ่งสามารถวัดขนาดรอยกดได้โดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัดที่ 0.002 มิลลิเมตร ซึ่งดังภาพที่ 2.14 ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าความแข็งดังนี้



ภาพที่ 2.13 การกดของหัวกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์
(<http://www.twiprofessional.com/content/jk74.html>)

ค่าความแข็งจะถูกคำนวณได้จากความยาวรอยกดและแรงกดขนาดต่าง ๆ ในรูปของตาราง หรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งจากการวัดด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบความแข็งโดยตรง ซึ่งหน่วยของความแข็ง คือ HV

ความแข็งวิกเกอร์ส = แรงกดต่อพื้นที่ผิวรอยกด

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} \\
 &= \frac{0.189F}{d^2}
 \end{aligned}$$

2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

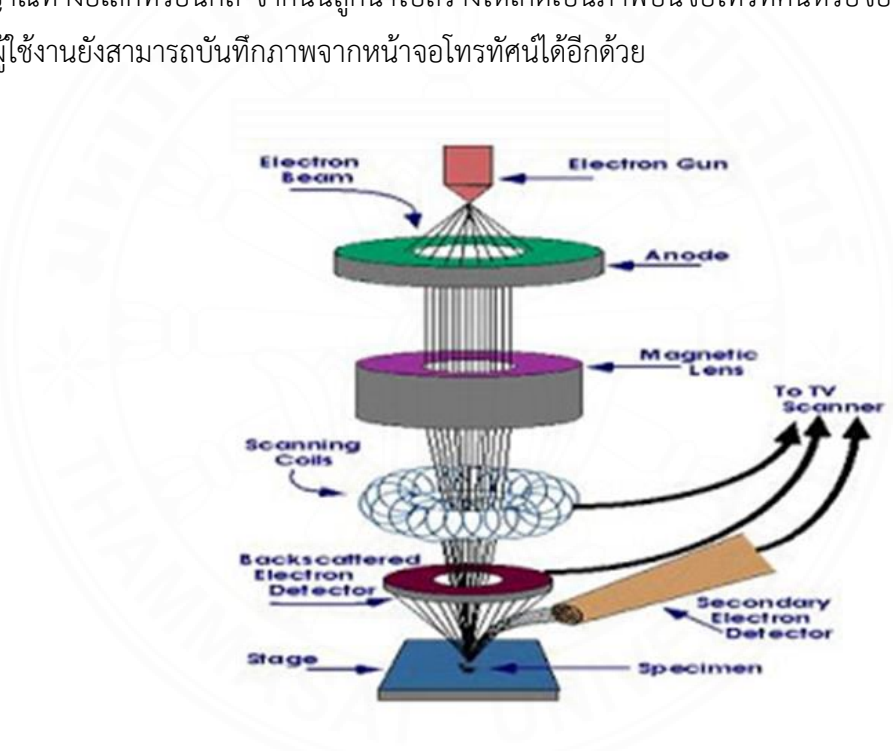
เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัววัสดุโดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ จากกำลังขยาย 20-800,000 เท่า มีเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectrometer: EDS) สามารถศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุหรือสารมลทินบนพื้นผิวของวัสดุที่นำมาศึกษาได้ เครื่องนี้สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ boron (B) ถึง uranium (U) โดยการวิเคราะห์สามารถแสดงผลเป็นชนิดและปริมาณของธาตุ รวมถึงสามารถทำ map และ line scan (เฉพาะที่ติดตั้งกับ SEM เท่านั้น) ได้อีกด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุง และพัฒนา งานวิจัย งานในกระบวนการผลิต งานวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ งานแก้ไขปัญหาอุตสาหกรรม และงานควบคุมคุณภาพของวัสดุได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด SEM
(<http://scicenter.bsru.ac.th/electron.php>)

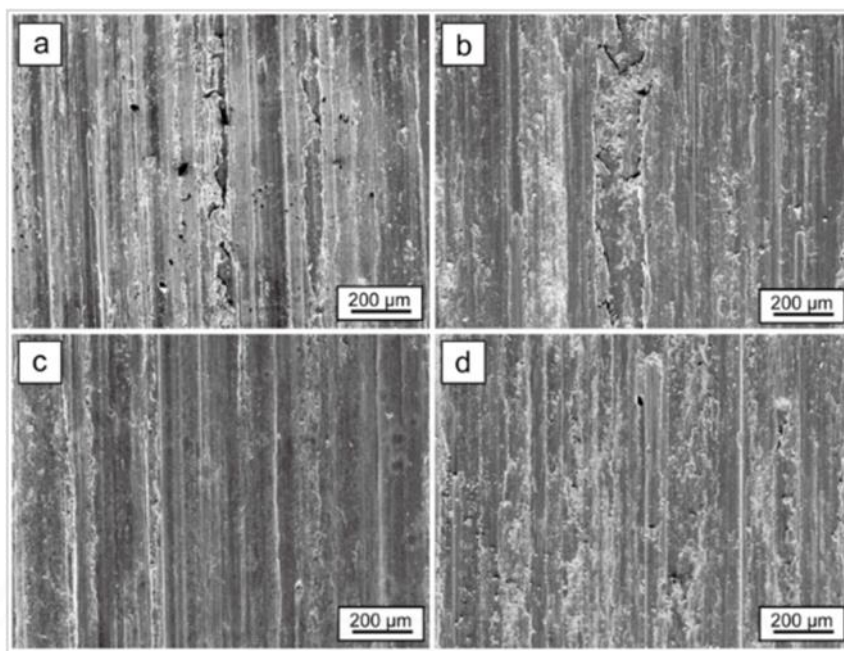
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) หรือ SEM เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะชิ้นงานในหลายสาขาเช่น วัสดุศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์ เนื่องจากสาขาวิชาต่าง ๆ จำเป็นที่ต้องทำงานเกี่ยวกับวัสดุ และ ชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็กมากซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่องมือธรรมดาทั่วไป SEM มีจุดเด่นที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ สามารถให้ภาพที่มีความชัดลึกสูง (High depth of field) สามารถให้กำลัง แยกแยะเชิงระยะสูง (High spatial resolution) และสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry: EDS และ Wavelength Dispersive Spectrometry: WDS

โดยการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอน โดยทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนป้อนให้กับระบบ เมื่ออิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านเลนส์รวบรวมรังสี เพื่อทำให้อิเล็กตรอนกลายดั่งกล่าวกลายเป็นลำแสงอิเล็กตรอน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถปรับให้ขนาดของลำแสงอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ขณะเดียวกันหากต้องการภาพที่มีความคมชัดทำได้โดยปรับให้ลำแสงอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้นลำแสงอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ที่ใกล้วัตถุลงบนผิวชิ้นงานที่ทำการศึกษา หลังจากทีลำแสงของอิเล็กตรอนถูกส่งกราดลงบนชิ้นงานตัวอย่างแล้วจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิดังกล่าวนี้อาจถูกบันทึกค่า และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นถูกนำไปสร้างให้เกิดเป็นภาพบนจอโทรทัศน์หรือจอแสดงผลต่อไป และผู้ใช้งานยังสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.15 หลักการทำงานของเครื่อง SEM

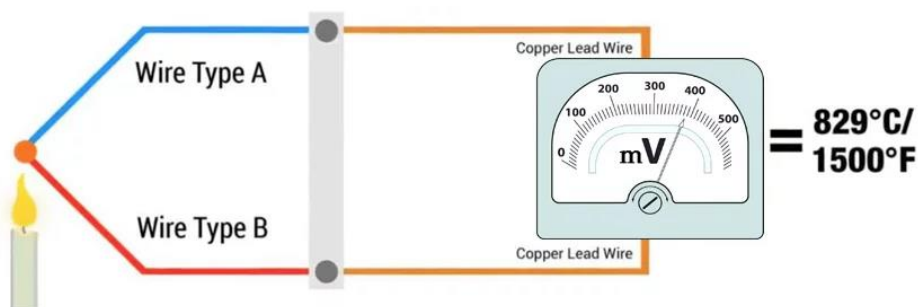
(<http://bananaboat308.blogspot.com/2011/09/blog-post.html>)



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างพื้นผิวชิ้นงานไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ที่ได้จากเครื่อง SEM
(Nuo Li, 2017)

2.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) คือ เซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ เซ็นเซอร์นี้ประกอบด้วยลวดโลหะที่แตกต่างกันสองเส้นต่อเข้าที่ปลายด้านหนึ่งและเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิหรืออุปกรณ์ที่สามารถรองรับการใช้งาน Thermocouple ชนิดต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่าอย่างถูกต้อง ด้วยคุณสมบัติเฉพาะทำให้สามารถวัดระดับความร้อนได้ในช่วงระดับความร้อนที่สูงได้โดยหลักการทำงานดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 การเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
(<https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=186>)

โดยเทอร์โมคัปเปิลประกอบด้วยโลหะที่แตกต่างกันที่ปลายทั้งสองข้างและปลายด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนจะมีกระแสต่อเนื่องซึ่งไหลในวงจรเทอร์โมอิเล็กทริก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ซีเบค (Seebeck effect) ซึ่งหมายความว่าเมื่อจุดเชื่อมต่อของโลหะทั้งสองถูกทำให้ร้อน หรือเย็นลง จะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเชื่อมโยงและรู้ค่าระดับความร้อนได้ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) เป็นปรากฏการณ์ที่ความแตกต่างของระดับความร้อนระหว่างตัวนำไฟฟ้าหรือเซมิคอนดักเตอร์ที่แตกต่างกันสองตัวทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสารทั้งสอง เมื่อความร้อนถูกนำไปใช้กับหนึ่งในสองตัวนำหรือเซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กตรอนที่ให้ความร้อนจะไหลเข้าหาตัวทำความเย็น หากทั้งคู่เชื่อมต่อกันผ่านวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จะไหลผ่านวงจรนั้น แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจาก "ซีเบค" มีขนาดเล็กโดยปกติจะมีเพียงไม่กี่ไมโครโวลต์ (μV) ต่อเคลวินของความแตกต่างของระดับความร้อนที่จุดเชื่อมต่อ

2.10.1 การสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ

ในการใช้งาน คือ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิ จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบ ความแม่นยำของอุปกรณ์เสียก่อน โดยในการตรวจเช็ค เทอร์โมคัปเปิล จะใช้อุปกรณ์มัลติมิเตอร์ เพื่อสอบเทียบค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยขั้นตอนการตรวจสอบมีดังต่อไปนี้

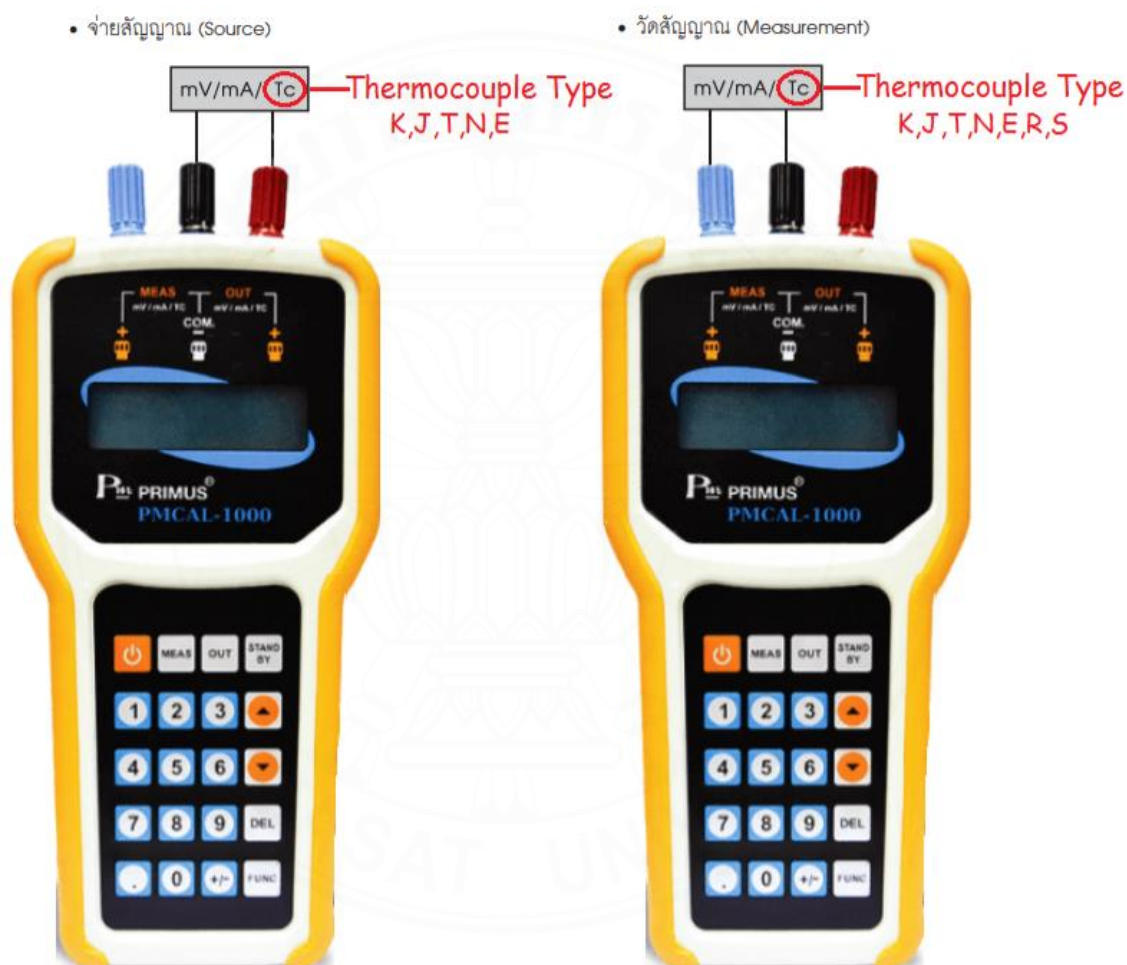
วิธีตรวจเช็คเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ปรับเลือกย่านการวัดค่า mV ที่ตัวมัลติมิเตอร์ (Multimeter) โดยใช้สายวัดข้างหนึ่งจับที่ขั้วบวก (+) และปลายอีกข้างจับที่ขั้วลบ (-) ของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) หรืออีกกรณีเลือกย่านการวัดโอห์ม ถ้าความต้านทานขึ้นแสดงว่าเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สามารถใช้งานได้ตามปกติ (เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง) ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 วิธีตรวจเช็คเทอร์โมคัปเปิล

(<https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=186>)

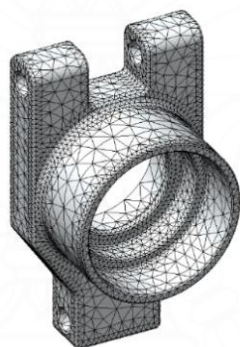
นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งวิธีในการตรวจเช็คสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) โดยใช้อุปกรณ์เครื่องสอบเทียบสัญญาณ (Process Simulator) ที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงเพื่อวัดค่าและจ่ายสัญญาณของ Thermocouple โดยการวัดค่า (Measurement) ได้ทั้ง Type : K, J, T, N, E, R, S และจ่ายสัญญาณของ Thermocouple (Source) ได้ทั้ง Type : K, J, T, N, E เป็นต้น (ดังภาพที่ 2.19)



ภาพที่ 2.19 อุปกรณ์เครื่องสอบเทียบสัญญาณ (Process Simulator)
(<https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=186>)

2.11 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า โดยการแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยที่เรียกว่า เอลิเมนต์ และแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะเชื่อมกันที่จุดต่อเรียกว่า Nodes ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เราต้องการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์และสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้าน กลศาสตร์ของแข็งได้ เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งต่าง ๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำโดยตรงจากสมการอนุพันธ์ได้ ดังนั้นจึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการ แก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการอนุพันธ์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ ในการศึกษาปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ และให้ผลคำตอบที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป



ภาพที่ 2.20 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ในการจำลอง

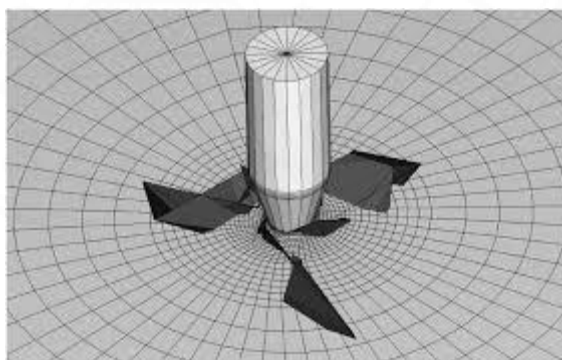
(<https://metrosystems-des.com/mesh-%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A-solidworks-simulation/>)

ขั้นตอนของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งเป็นขั้นตอน 3 ขั้นตอน เริ่มต้นจากขั้นตอนของกระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) คือ การแบ่งรูปทรงหรือโครงสร้างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ โดยจะต้องคำนึงถึงโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด แล้วจึงกำหนดสมบัติวัสดุให้กับเอลิเมนต์โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) จะใช้ฟังก์ชัน การประมาณภายในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความอิสระของ

เอลิเมนต์ และสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับปัญหานั้น แล้วจึงรวมสมการจากแต่ละเอลิเมนต์นี้เข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการรวมขนาดใหญ่ของระบบ ซึ่งอธิบายสถานะโดยรวมของปัญหานั้นจากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่กำหนดให้ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่นี้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณตามจุดต่อต่าง ๆ ทั่วทั้งโดเมนของปัญหาต่อไป ขั้นตอนสุดท้าย คือ ขั้นตอนกระบวนการขั้นท้าย (Post-processor) ผลเฉลยโดยประมาณล้วนอยู่ในรูปแบบของตัวเลข ในแต่ละจุดต่อเพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่าย ซึ่งสามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบ เช่น การแสดง ด้วยชั้นสีต่าง ๆ ผลคำตอบที่ได้สามารถอธิบายถึงปัญหาที่มีภาพร่างที่ซับซ้อนและยากต่อการทดลอง

2.11.1 การวิเคราะห์และการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ความยากในการสร้างแบบจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้น คือ การสร้างแบบจำลองกระบวนการ แบบจำลองเชิงตัวเลขที่แม่นยำสำหรับการเจาะด้วยแรงเสียดทาน ยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน เป็นกระบวนการที่เกิดเสียรูปของวัสดุที่มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการบรรจบกันของการจำลองและความสมบูรณ์ จากการขาดความรู้เกี่ยวกับการกระจายของความเครียด ความเครียด อุณหภูมิ ฯลฯ แต่อย่างไรก็ตามด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม สิ่งเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นได้



ภาพที่ 2.21 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน
(Scott F. Miller Albert J. Shih)

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกสร้างโดยใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS โดยถูกสร้างขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมมากขึ้น โดยใช้การทดลองกับพารามิเตอร์ในกระบวนการที่มีความคล้ายคลึงกัน

เช่นกระบวนการเจาะแบบปกติ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแรงกดและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง การศึกษานี้จะสร้างรากฐานสำหรับการคาดการณ์การเจาะแรงเสียดทานและการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น

2.11.2 การกำหนดหน่วยปัจจัยในการสร้างแบบจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

หน่วยมาตรฐานที่ใช้ใน ABAQUS จะต้องสอดคล้องกันและสม่ำเสมอเพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณทุกพารามิเตอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ หน่วยมาตรฐานที่ใช้ในการจำลองจะเป็นหน่วย SI (mm) เนื่องจากเหมาะสมกับขนาดของงานมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบการกำหนดค่าปัจจัยในแต่ละมาตรฐานหน่วยวัด

Quantity	SI	SI(mm)	SI	US Unit(ft)	US Unit(inch)
Length	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>ft</i>	<i>in</i>
Force	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>kN</i>	<i>lbf</i>	<i>lbf</i>
Mass	<i>kg</i>	<i>tonne (10³kg)</i>	<i>tonne</i>	<i>slug</i>	<i>lbf s²/in</i>
Time	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>
Stress	<i>Pa (N/m²)</i>	<i>MPa (N/mm²)</i>	<i>kPa</i>	<i>lbf / ft²</i>	<i>psi (lbf / in²)</i>
Energy	<i>J</i>	<i>mJ (10⁻³J)</i>	<i>KJ</i>	<i>ftlbf</i>	<i>inlbf</i>
Density	<i>kg/m³</i>	<i>tonne/mm³</i>	<i>tonne/m³</i>	<i>slug/ ft³</i>	<i>lbf s²/in⁴</i>

ที่มา: (https://www.researchgate.net/post/What_are_the_units_used_in_the_ABAQUS_model)

ค่าปัจจัยที่ใช้ในการจำลองการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยในการกำหนดค่าปัจจัยเพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของกระบวนการ จะต้องมีการแปลงค่าให้มีความเหมาะสม

- Speed (RPM) to (rad/s)

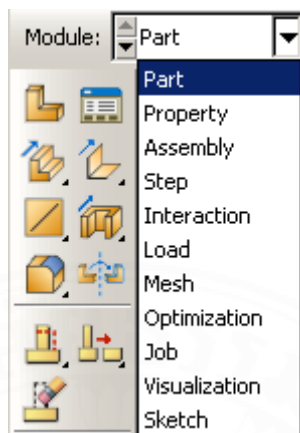
$$\omega(\text{rad/s}) = 2\pi/60 \times N(\text{rpm})$$
- Feed rate (mm/min) to (mm/s)

$$\text{mm/s} = N(\text{mm/min})/60$$
- Density (g/cm³) to (tonne/mm³)

$$\text{tonne/mm}^3 = N(\text{g/cm}^3)/10^{-9}$$
- Young modulus (Gpa) to (N/mm²)

$$N/\text{mm}^2 = N(\text{Gpa}) \times 1000$$
- Heat Conductivity
- Specific Heat (J/kg.K)
- Expansion Coeff (10⁻⁶/K)

2.11.3 การสร้างแบบจำลองโดยใช้ โปรแกรม ABAQUS ขั้นพื้นฐาน



ภาพที่ 2.22 องค์ประกอบในการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS

โปรแกรม ABAQUS จะประกอบด้วย 10 โมดูลหลัก แต่ละโมดูลมีบทบาทเฉพาะที่จะกำหนด

1. Part: ใช้สำหรับสร้างชิ้นส่วนที่ใช้ในโปรแกรม ส่วนใหญ่จะเป็นชิ้นส่วนเพียงชิ้นเดียว สามารถข้ามได้หากนำเข้าชิ้นส่วนจากโปรแกรมภายนอก
2. Property: ใช้ในการกำหนดสมบัติของวัสดุของชิ้นส่วน
3. Assembly: ใช้ในการรวมชิ้นส่วนหลายส่วนเข้าด้วยกันในหน้าจอเดียวกัน และยังใช้วางแต่ละส่วนในตำแหน่งที่ต้องการการประกอบ:
4. Step: กำหนดค่าขั้นตอนการวิเคราะห์และค่าขอเอาท์พุต.
5. Interaction: เพื่อกำหนดวิธีการและพื้นที่ของส่วนต่าง ๆ ที่มีการส่งผลกระทบเกี่ยวเนื่องกัน
6. Load: ใช้ในการกำหนดแรงกระทำในรูปแบบต่าง ๆ และกำหนดเงื่อนไขขอบเขต
7. Mesh: Mesh the parts การแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ
8. Optimization: การเพิ่มประสิทธิภาพ: การปรับสร้างงานให้เหมาะสม (ไม่ได้กล่าวถึงที่นี่)
9. Job: งาน: การสร้างงานเพื่อการวิเคราะห์
10. Visualization: การดูผลการวิเคราะห์

2.11.4 แบบจำลองทางความร้อน

กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานจะสร้างความร้อน และทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นงานอ่อนตัวลง จนสามารถที่จะสร้างรูเจาะและปลดรูเจาะได้ โดยสมการที่ใช้สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ใน แบบจำลองทางความร้อน มีดังนี้

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + G$$

โดยกำหนดให้ p คือ ความหนาแน่น, c คือ ความร้อนจำเพาะ k คือ ค่าการนำความร้อน T คือ อุณหภูมิ t คือ เวลา G คือ อัตราการสร้างความร้อน และ x, y, z คือ ค่าพิกัด โดยตัวแปร p, c, k เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งมีความสำคัญสำหรับที่กำหนดความเที่ยงตรงของแบบจำลองทางความร้อน โดยที่ทั้ง T, G ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ x, y, z และ t โดยอัตราการสร้างความร้อน (G) ในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน จะประกอบด้วย ความร้อนจากแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงาน (q_f) และความร้อนจาก Irreversible plastic deformation ภายในชิ้นงาน (q_p)

$$G = \dot{q}_f + \dot{q}_p$$

โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้ตั้งสมมุติฐานว่า แรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงานนั้นเป็นไปตามกฎ Coulomb's friction law โดยค่าแรงเสียดทาน (F_f) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า normal force (F_n) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ เป็นตัวบ่งบอกถึงระดับของความสัมพันธ์ดังกล่าว ดังที่สมการที่ระบุเอาไว้ โดยอัตราการสร้างความร้อนจากแรงเสียดทาน (q_f) มีค่าเท่ากับ F_f คูณกับค่า surface velocity ของอุปกรณ์ (V) ทั้งนี้ $V = 2\pi RN$ โดย N คือ ค่า the tool rotational speed ดังนั้น อัตราการสร้างความร้อนจากแรงเสียดทาน (q_f) สามารถที่จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{q}_f = 2\pi RN \mu f_n$$

โดยอัตราการสร้างความร้อนเนื่องจาก plastic deformation (q_p) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{q}_p = \eta \sigma \dot{\epsilon}^{pl}$$

โดย n คือ Inelastic heat fraction ϕ คือ ค่า Effective stress และ ϵ คือ อัตรา Plastic straining ทั้งนี้สัดส่วนที่เป็น Elastic portion ของพลังงานในการเกิด plastic deformation ของชิ้นงาน ในการเจาะแบบใช้แรงเสียดทานจะมีค่าน้อยมาก และค่า n จะตั้งไว้ที่ 0.9

2.11.5 Johnson–Cook model

ในการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลอง ABAQUS จะมีการต้องกำหนดแบบจำลองวัสดุ เพื่อระบุค่าความเหนียวในสถานะพลาสติกและความสามารถในการทนต่อแรงก่อนเกิดฉีกขาด โดยในการจำลองกระบวนการเจาะโดยแรงเสียดทานนี้ โมเดล Johnson-Cook ถูกเลือกเป็นแบบจำลองวัสดุ โดยข้อดีของแบบจำลองวัสดุของ Johnson-Cook เหนือแบบจำลองวัสดุอื่น ๆ คือเป็นแบบจำลอง ที่พิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุหลัก 3 ประการ ดังแสดงในสมการด้านล่าง ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของโลหะสามารถอธิบายได้ด้วย The Johnson cook model ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนรูปทรงอย่างมาก มี Strain rate ที่สูง และอุณหภูมิที่เพิ่มสูง ตัวค่าคงที่ของวัสดุ จาก the Johnson cook model ได้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางเพื่อพยากรณ์พฤติกรรมการไหลของวัสดุ the Flow stress model สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\bar{\sigma} = \left(A + B(\bar{\epsilon}_{pl})^n \right) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left(1 + \left(\frac{\theta - \theta_{tran}}{\theta_{melt} - \theta_{tran}} \right)^m \right)$$

โดยในแต่ละวงเล็บในสมการจะแสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน โดยวงเล็บแรกแสดงถึง Hardening law/power law วงเล็บที่สองจะแสดงอัตราความเครียด และวงเล็บสุดท้ายแสดงถึงผลกระทบของอุณหภูมิ โดยค่าพารามิเตอร์

- A คือ ค่า initial yield strength ของวัสดุที่อุณหภูมิห้อง
- B คือ hardening modulus
- C คือ พารามิเตอร์ที่แสดงถึงความไวของ strain rate
- $\bar{\epsilon}_{pl}$ คือ อัตราความเครียดคงภาพ (Effective plastic strain)
- $\dot{\epsilon}_{pl}$ คือ อัตราความเครียดพลาสติกที่มีประสิทธิภาพ
- $\dot{\epsilon}_0$ คือ อัตราความเครียดอ้างอิง
- n คือ เลขชี้กำลังการแข็งตัวของความเครียด
- m คือ พารามิเตอร์ที่ประเมินผลการทำให้อ่อนตัวจากความร้อน
- θ คือ อุณหภูมิ

θ_{melt} คือ อุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุ

θ_{tran} คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ

นอกจากนี้ เกณฑ์ความล้าเหลวเป็นสิ่งจำเป็นในการจำแนกลักษณะการเสื่อมสภาพของคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากการแทรกซึมของเครื่องมือเข้าไปในวัสดุ การศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลองความล้าเหลวของ Johnson–Cook ที่อิงตาม plastic strain ในโมเดลนี้ โดยความล้าเหลวเกิดขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ D ถึงค่า 1

$$D = \int \frac{1}{\epsilon_f} d\bar{\epsilon}_{\text{pl}} .$$

ความเครียดที่เทียบเท่ากับการแตกหัก ϵ_f ถูกกำหนดโดย

$$\epsilon_f = \left(d_1 + d_2 e^{-d_3 \frac{p}{\bar{\sigma}}} \right) \left[1 + d_4 \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_{\text{pl}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right] (1 + d_5 \theta)$$

โดยที่ d_1 ถึง d_5 เป็นค่าคงที่ของวัสดุซึ่งสามารถกำหนดได้จากการทดลอง p คือแรงดันอุทกสถิต นั่นคือ ร่องรอยที่สามของเทนเซอร์ความเครียด Cauchy

2.11.6 เทคนิคช่วยในการจำลอง

กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน จะมีการจำลองที่ค่อนข้างซับซ้อนเมื่อจำลองในโปรแกรม Finite Element Method (ในกรณีนี้ คือ ABAQUS) โดยในการจำลองจะมีการใช้เทคนิคหลัก 3 เทคนิค ในการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยทำการใช้เทคนิค Adaptive meshing, mass scaling and element deletion ช่วยในการจำลอง โดยสามารถคาดว่าจะเกิดการเสียรูปอย่างรุนแรงและมีการบิดตัวขององค์ประกอบที่มาก จะเกิดขึ้นในการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน และอาจทำให้กระบวนการล้าเหลวได้ ก่อนที่จะสามารถทำงานให้เสร็จได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับรูปแบบของ Mesh และมีการใช้ เทคนิค element deletion ในการแก้ปัญหา การปรับ Mesh ทำให้สามารถรักษ Mesh ให้มีคุณภาพสูงได้ และอนุญาตให้ Mesh เปลี่ยนรูปทรงแทนที่การถูกลบเนื่องจาก Mesh ที่ล้าเหลวหลังจากได้รับปริมาณแรง ความถี่จากกระบวนการ

1. Adaptive meshing ที่ดำเนินการในการวิเคราะห์นี้ คือ ทุก ๆ การเพิ่มขึ้นและในแต่ละกระบวนการ Adaptive meshing จะมีการสร้าง mesh ใหม่ เพื่อปรับตำแหน่ง mesh และปรับปรุงอัตราส่วนกว้างยาวขององค์ประกอบที่บิดเบี้ยว

2. Element deletion เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบที่บิดเบี้ยวมากเกินไปจะถูกปิดใช้งานและไม่ได้นำมาพิจารณา การลบองค์ประกอบช่วยให้สามารถเจาะชิ้นงานได้โดยเครื่องมือ การไม่เปิดใช้งานเทคนิค Element deletion จะส่งผลให้เครื่องมือเจาะติดค้างก่อนที่จะสามารถเจาะทะลุชิ้นงานได้

3. Mass scaling. เป้าหมายของการใช้เทคนิคนี้คือการปรับปรุงเวลาในการคำนวณในขณะที่ยังคงความถูกต้องของการจำลองไว้ โดยปรับขนาดมวลที่จุดเริ่มต้นของขั้นตอนและ/หรือตลอดขั้นตอนปรับความหนาแน่นของชิ้นงาน การปรากฏตัวขององค์ประกอบขนาดเล็กและความยาวลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบที่ลดลงจากการเสียรูปที่ส่งผลให้มีการใช้เวลาเพิ่มขึ้นที่น้อยลงของการเดินทางของเครื่องมือเจาะที่จำเป็นสำหรับการจำลอง การปรับขนาดมวลขององค์ประกอบขนาดเล็กตลอดการจำลอง จะทำให้สามารถลดเวลาในการคำนวณได้อย่างมาก

2.12 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน เป็นกระบวนการในการสร้างรูเจาะที่มีความแตกต่างจากการเจาะรูโลหะแบบดั้งเดิม โดยเป็นเจาะรูโดยใช้ อุปกรณ์เจาะที่มีรูปทรงปลายเรียวทำการหมุนด้วยความเร็วที่เหมาะสม การเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นถูกประยุกต์ใช้เพื่อเจาะรูโดยไม่ก่อให้เกิดการตึงเครียดกับวัสดุที่ถูกทำการเจาะ และมีความสามารถในการสร้างปลอกกรูและสร้างแหวนรองรับในขั้นตอนเดียว เพื่อให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อกับชิ้นส่วน อื่น ๆ ได้อย่างแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้วิธีเชื่อมต่อในลักษณะเดิมโดยไม่มีการสร้างเศษจากการตัดเฉือนจากการสร้างเกลียวจากลักษณะของรูที่เกิดขึ้นจากการเจาะโลหะแบบเดิม และจากลักษณะการใช้งานที่เกิดจากการเจาะโดยใช้ความร้อนจากแรงเสียดทานได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาอุตสาหกรรมการผลิตที่แตกต่างกันออกไป นั้นจะนำไปสู่ยุคใหม่ของกระบวนการเชื่อมต่อสำหรับการใช้งานกับวัสดุที่แตกต่างกันไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการประยุกต์ใช้ในงานโลหะแผ่น

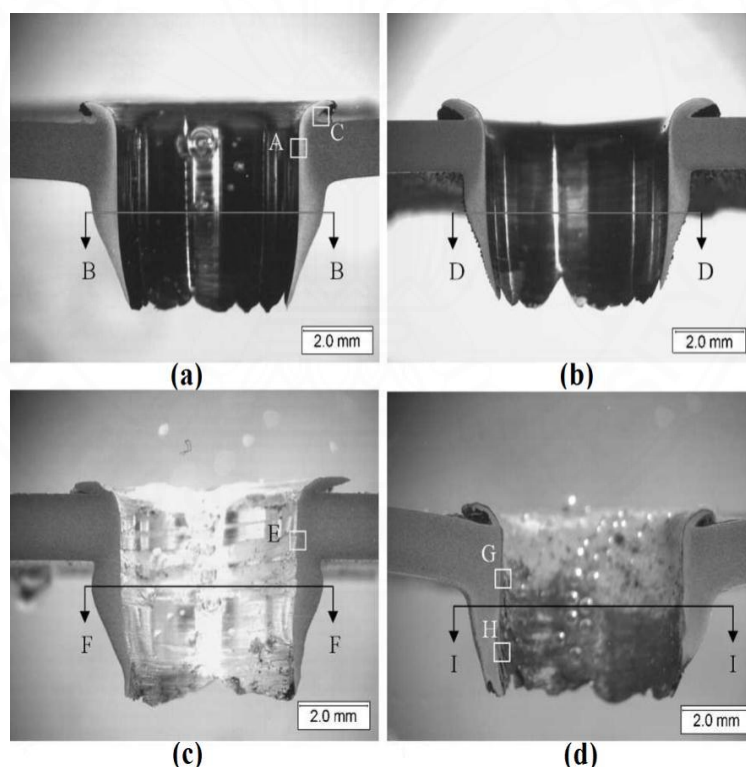
ในปี 1923 นักวิจัยชาวฝรั่งเศสชื่อ Jean Claude de Valière ได้พยายาม ที่จะสร้างอุปกรณ์เพื่อที่สร้างรูเจาะในงานโลหะ โดยใช้ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน แทนการใช้กระบวนการในการตัดเฉือนแบบดั้งเดิม โดยเป็นที่รู้จักกัน ถ้าสามารถสร้างความร้อนได้มากพอนั้นจะสามารถที่จะละลายพื้นผิวโลหะจนสามารถสร้างรูผ่านเนื้อโลหะได้ ดังนั้นจากความรู้เบื้องต้น

ดังกล่าวนั้นเขาจึงได้พัฒนาเครื่องมือพิเศษเพื่อเพิ่มแรงเสียดทาน แต่อย่างไรก็ตามมันเป็นเพียงความสำเร็จในระดับหนึ่ง เพราะว่าในเวลาดังกล่าวนั้น ยังไม่มีวัสดุที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เจาะในกระบวนการดังกล่าว และนอกจากนี้รูปร่างที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการประเภทนี้ ยังไม่ได้ถูกค้นพบจนถึงปี 1980

2.12.1 กระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน

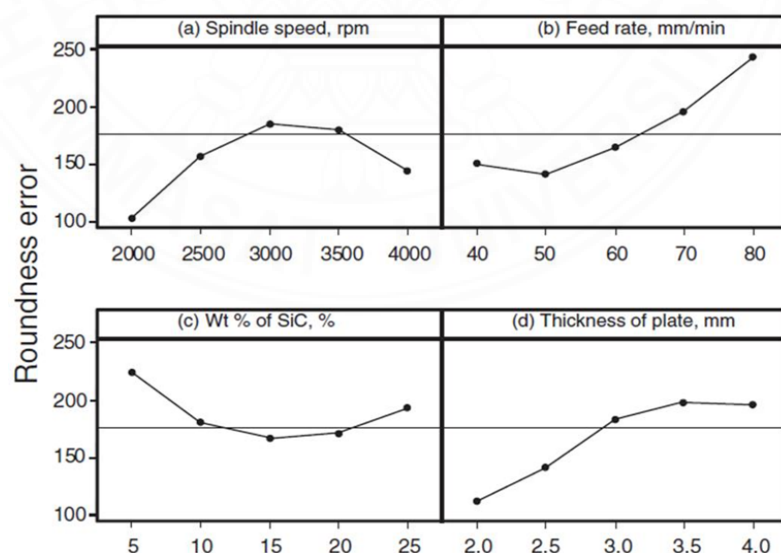
จากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมท่อ การพัฒนาของผลิตภัณฑ์ทางเครื่องจักรกลและการออกแบบการเชื่อมต่อในงานวิศวกรรมที่บีบบังคับให้ผู้ผลิตเร่งผลิตและใช้เทคโนโลยีใหม่ที่มีความสามารถในการเจาะรูแผ่นโลหะเพิ่มขึ้น การเจาะโดยใช้แรงเสียดทานเป็นที่รู้จักกันในนาม การเจาะด้วยความร้อน การเจาะโดยใช้ความร้อนทางกล การเจาะไหล การเจาะขึ้นรูป และเป็นวิธีการสร้างรูเจาะ แบบไม่ใช้วิธีแบบดั้งเดิมคือ ไม่เกิดการตัดเฉือนทางกล และไม่มีการคายเศษของวัสดุออกมา โดยในการสร้างรูเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทานนั้น ได้มีงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเจาะดังกล่าวอย่างหลากหลาย เพื่อให้สามารถนำกระบวนการไปใช้ในกระบวนการผลิตได้อย่างเหมาะสม ทั้งในส่วนการประยุกต์ใช้กับวัสดุที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน รูปแบบการนำไปใช้งาน หรือแม้กระทั่งการพัฒนากระบวนการที่มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น โดยจากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้พบว่า มีการวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน ออกมาอย่างต่อเนื่อง ดังเช่น ในงานวิจัยของ ที่ Kerkhofs M., และคณะที่ได้ทำการศึกษาในส่วนจากรูปแบบการเจาะรูโลหะด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยได้ทำการเปรียบเทียบการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทานกับวัสดุเหล็กสแตนเลส เกรด AISI 304 โดยใช้อุปกรณ์เจาะที่ทำจากวัสดุ Cemented carbide ที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เจาะที่ได้รับการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธี PVD โดยใช้สาร TiAlN เพื่อที่จะแสดงถึงผลกระทบของสารเคลือบที่แปรผันกับจำนวนของรูที่ถูกเจาะ จากงานวิจัยดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์เจาะที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวนั้นจะมีอายุการใช้งานประมาณ 5000 ถึง 15,000 รู และเมื่อทำการทดลองเจาะโดยใช้อุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทานที่ถูกเคลือบโดยสาร TiAlN นั้นอายุการใช้งานของทูลที่ใช้ในการเจาะจะอยู่ที่ประมาณ 100,000 ถึง 160,000 รู โดยสิ่งนี้เป็นผลกระทบจากรูปแบบการขึ้นรูปของ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะเกิดสภาวะออกซิไดซ์ที่มีความเสถียรภาพและจะเกิดชั้นแผ่นฟิล์ม Al_2O_3 ที่ช่วยปกป้องพื้นผิว ที่บริเวณพื้นผิวภายนอกนั้นทำให้เกิดการยับยั้งการเกิดการทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนและอาจทำให้เกิดการลดการสึกหรอในระหว่างการใช้เจาะโลหะที่ก่อให้เกิดอุณหภูมิสูงและนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Miller S.F และคณะที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทานในหลายรูปแบบ

ตัวอย่างเช่น การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคและการระบุความแข็ง ที่เปลี่ยนแปลงในบริเวณใต้พื้นผิว จากการทดลองเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ที่ทำการเจาะวัสดุ แผ่น โลหะเกรด AISI 1020 steel, AISI 4130 steel, Al 5052 และวัสดุ Ti บริสุทธิ์ ที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์ โดยใช้ อุปกรณ์เจาะที่ทำจากวัสดุ Co-bonded WC โดยในภาพที่ 2.23 ที่ได้แสดงให้เห็นภาคตัดขวาง ของรูที่ถูกเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยในการเจาะเหล็กจะเห็นได้ว่า ลักษณะของรูที่ได้จะมีพื้นผิว ที่เรียบเนียนกว่า ดังแสดงในภาพที่ 2.23a และ 2.3b อย่างไรก็ตาม รูที่ได้จากการเจาะวัสดุอะลูมิเนียม ที่แสดงในภาพที่ 2.23c และไทเทเนียม ภาพที่ 2.23d แสดงให้เห็น ร่องรอยการฉีกขาดและรอยขีด ข่วนบนพื้นผิวของรู ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทานกับวัสดุไทเทเนียมนั้น มีความ ยากที่สุดในวัสดุทั้งสี่ชนิด โดยภาพร่างของปลอก ที่แสดงในภาพที่ 2.23 d มีความสั้นและบางกว่า เมื่อเทียบกับปลอกที่เกิดการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทานกับวัสดุอื่น ๆ และยังพบร่องรอยการตกค้าง จากการระเหยของน้ำมันหล่อลื่นในรูที่ถูกเจาะกับวัสดุไทเทเนียมด้วย



ภาพที่ 2.23 ภาพตัดขวางของการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน ในวัสดุ AISI 1020 steel, (b) AISI 4130 steel, (c) Al 5052, และ (d) commercially pure Ti [6]
(Miller S.F. 2006)

นอกเหนือจากงานวิจัยดังกล่าวไปแล้วนั้น ในการเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ความกลมของรูเจาะที่เกิดขึ้นยังเป็นเรื่องสำคัญที่ควรนำมาเป็นมาตรฐานในการเจาะรูด้วยกระบวนการดังกล่าว G.Somasundaram และคณะจึงได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของโลหะผสม Al/SiCp ที่ถูกเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ซึ่งกล่าวถึงความผิดพลาดเกี่ยวกับค่าความถูกต้องของเส้นผ่าศูนย์กลางรู รวมถึงการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานในสภาวะปราศจากสารหล่อเย็น โดยมีปัจจัยที่ใช้สำหรับการทดสอบ คือ ความหนาของชิ้นงาน, ความเร็วในการเจาะ และอัตราป้อน ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความผิดพลาดของค่าความกลมรูเจาะ ทำการวิเคราะห์โดยใช้เมทริกซ์การออกแบบทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของกระบวนการกับค่าความผิดพลาดของความกลมรู โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง การวิเคราะห์ความแปรปรวน รวมถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดเกี่ยวกับความกลมของรู แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ เพื่อพิจารณาความกลมของรูเจาะจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบค่าตัวแปรที่สำคัญในการเจาะแบบแรงเสียดทานกับชิ้นงานโลหะ Al/SiCp MMC ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ CCD สำหรับงานวิจัยนี้ได้พิจารณาหาตัวแปรที่สำคัญ 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วเจาะ อัตราการป้อน ความหนาของชิ้นงานและเปอร์เซ็นต์ของ SiCp ซึ่งอิทธิพลของพารามิเตอร์ของเครื่องเจาะทั้งหมดที่มีผลต่อค่าความกลมของรู ได้ถูกวิเคราะห์และแสดงข้อมูลดังนี้



ภาพที่ 2.24 ค่าความผิดพลาดของความกลมรูเจาะที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปัจจัย (a) ความเร็วการเจาะ (b) อัตราการป้อน (สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ Wt% กับ SiC%) (d) ความหนาของชิ้นงาน

(G. Somasundaram และคณะ 2011)

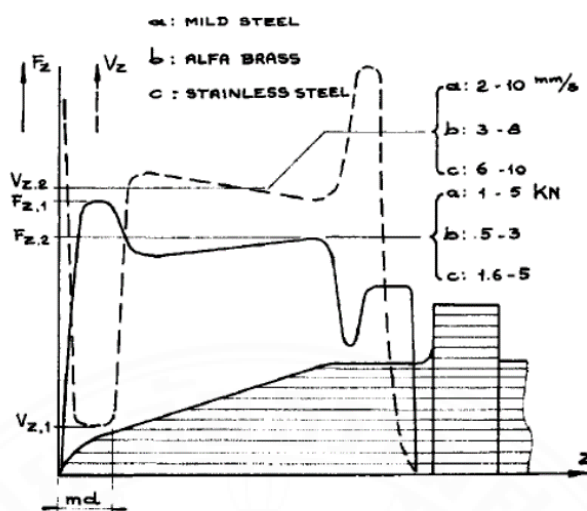
โดยในส่วนของความพยายามที่ค้นหาถึงรูปทรงที่มีความเหมาะสมของอุปกรณ์เจาะที่ใช้ในการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้น Han-Ming Chowa และคณะ ก็ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด AISI 304 โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การพัฒนาอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ชนิดใหม่ด้วยการใช้ดอกทั้งสแตนคาร์ไบด์ เพื่อให้สามารถลึกรูปทรงตามต้องการได้ นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลงเพื่อเจาะ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (AISI 304) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบวิธีการ Taguchi ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของปัจจัยที่กำหนดขึ้น เช่น รูปทรงอุปกรณ์เจาะ มุมเสียดทาน อัตราพื้นที่ผิวสัมผัสแรงเสียดทาน อัตราป้อนและความเร็วการเจาะ ซึ่งมีผลกระทบต่อดัชนีประสิทธิภาพ พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของการเจาะ คือ A1 (มุมความเสียดทาน = 30 องศา) B1 (อัตราส่วนพื้นที่สัมผัสแรงเสียดทาน = 50 %) A2 (อัตราเร็ว = 100 มิลลิเมตรต่อนาที) D3 (ความเร็วการเจาะ = 90 มิลลิเมตรต่อนาที) ดังนั้น จึงทำการทดสอบเจาะรู 4 ครั้ง และได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย = 0.96 ไมโครเมตร ค่า Ra นี้เป็นค่าที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่า Ra ทั้งหมดจากอาร์เรย์ L18 ในเมทริกการทดลอง

แต่อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานในการเจาะรูให้ มีประสิทธิภาพได้นั้นจำเป็นจะต้องศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปฏิบัติงาน จึงได้มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาปัจจัยและระเบียบวิธีในการทดลองที่เหมาะสมกับการเจาะวัสดุหลาย ๆ ชนิดดังในงานวิจัยของ Wei-Liang Ku และคณะ ได้ทำการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเจาะรูด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวได้ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของ Taguchi โดยใช้อุปกรณ์เจาะที่มีผิวสัมผัสโดยแบ่งเป็น 3 ระดับได้แก่ 50%, 75%, 100% ทำการเจาะเหล็ก SUS 304 Stainless steel ที่มีขนาด ความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร, สูง 2 มิลลิเมตร เป็นวัสดุในการทดลอง โดยกำหนดให้มีปัจจัยในการทดลองได้แก่ มุมเสียดทานอุปกรณ์เจาะ อัตราพื้นที่ผิวสัมผัสแรงเสียดทานอุปกรณ์เจาะ อัตราป้อนและความเร็วรอบการเจาะ สำหรับเป็นตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ในส่วนของความหยาบผิวตลอดจนความยาวของรูซูลได้ถูกนำมาเป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์ของการทดลองนี้เช่นกัน จากการทดลอง พบว่ามี 2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อดัชนีประสิทธิภาพได้แก่ มุมเสียดทานอุปกรณ์เจาะและความเร็วการเจาะ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยพบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเจาะแบบเสียดทานนี้ คือ มุมเสียดทานที่ 30 องศา อัตราพื้นที่ผิวสัมผัสแรงเสียดทานที่ 50% และความเร็วรอบ คือ 3,600 รอบต่อนาที และในงานวิจัยของ Mehmet Tuncay Kaya และคณะที่ได้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน เช่น มุมจิก อัตราส่วนแรงเสียดทานของผิวสัมผัส อัตราป้อนและความเร็วเจาะรวมถึงอุณหภูมิพื้นผิวชิ้นงานรวมทั้งแรงเสียด

ทานจากการเจาะและแรงบิดในระหว่างที่ทำการเจาะวัสดุ ST12 โดยใช้เครื่องมือที่ทำจากวัสดุชนิด ทังสเทนคาร์ไบด์ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธี การเคลือบผิวแบบ PVD โดยใช้ดีบุก จากผลการ ทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงในการเจาะและแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการเจาะในความเร็ว รอบที่ต่ำ ในทางกลับกันแรงเจาะและแรงบิดจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการเจาะ และยังพบว่า ความเร็วของการเจาะมีผลต่ออุณหภูมิผิวชิ้นงาน และเมื่อความเร็วในการเจาะเพิ่มขึ้นอุณหภูมิ ผิวชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตาม ขณะที่การเพิ่มหรือลดมุมเสียดสี ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของชิ้น งานนอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กับการเลือกใช้ สารเคลือบเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน อายุใช้งานสารเคลือบใน อุปกรณ์ตัดเฉือน ประเภทอื่น ๆ ดังเช่น ในงานวิจัยของวารุณีและคณะ ที่ได้ทำการวิจัยโดยมี จุดประสงค์เพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัดด้วยเทคโนโลยีการเคลือบผิวและการปรับ สภาพผิว โดยทำการศึกษาความเสียหายและการสึกหรอโดยวิธีหมุนบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) ด้วยเครื่องไตรบอมิเตอร์ร่วมกับการทำงานป้อนตัดโลหะโดยใช้แม่พิมพ์ตัดในการยืนยันถึง ประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์และการปรับสภาพผิวเพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางช่วยใน การตัดสินใจในการเลือกใช้ชนิดของฟิล์มแข็งเคลือบผิว โดยวัสดุที่ใช้ทำพันธะและบอลเป็นหลัก เครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS ทำการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 HRC.จากนั้นจึง นำไปเคลือบผิวและปรับสภาพผิวได้แก่ TiC-CVD (Chemical Vapour Deposition) TiCN-CVD, TiCN-PVD (Physical Vapour Deposition) VC-TD (Thermal Diffusion) และไม่เคลือบผิวชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดลองการตัดและแผ่นจาน เป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ตามมาตรฐาน JISหนา 2 มิลลิเมตร จากการทดลอง พบว่า การเคลือบผิวหรือปรับสภาพผิวช่วยลดการสึกหรอและค่า สัมประสิทธิ์ ความเสียหายได้ ทั้งจากการทดลองโดยวิธีหมุนบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) ด้วย เครื่องไตรบอมิเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการป้อนตัดแม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วย TiCN-CVD มีแนวโน้มการ ลดอัตราการสึกหรอได้มากกว่าผิวเคลือบตัวอื่น ๆ ซึ่งพบว่า เกิดจากความแข็งแรงในการเกาะยึดของ ฟิล์ม TiCN บนวัสดุทำแม่พิมพ์มีค่าสูงกว่าตัวอื่น

และยังมีงานวิจัยของ P.V.Gopal Krishna และคณะ ที่ได้ทำการศึกษา โดยทำ การทดลองการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยใช้เหล็กกรอบสูงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะทำการการ เจาะอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6315 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบวิธีการ Taguchi เพื่อจะนำไปใช้ ประเมินหาประสิทธิภาพของความเร็วในการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน กับวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6315 ที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่ามุมกรวยของดอกเจาะเป็นตัวแปรสำคัญและมี อิทธิพลต่อแรงบิดอย่างมีนัยสำคัญ จากทฤษฎีข้างต้นที่กล่าวมานี้ไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการวิจัยเกี่ยวข้อง กับวัสดุไทเทเนียมเกรด Ti6Al4V และนอกจากนี้ก็ยังไม่ได้กล่าวถึงการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ วัสดุไทเทเนียมเกรด Ti6Al4V ซึ่งโดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการใช้วัสดุไทเทเนียมเกรด Ti6Al4V ในการ

ทดลองเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยดอกเจาะทั้งสแตนคาร์ไบด์และยังมีการวิจัยที่มีจุดมุ่งหมาย ที่จะเพิ่มความสามารถเจาะรู โดยใช้กระบวนการดังกล่าวดังเช่นในงานวิจัยของ Pantawane P.D และคณะ ได้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน กับวัสดุ AISI 1015 ซึ่งพบว่า การเจาะรูด้วยความเร็วรอบจาก 2,500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที ส่งผลทำให้ค่าความเรียบผิวลดลงจาก 0.536 ไมโครเมตร เป็น 0.341 ไมโครเมตร ในส่วนของค่าความ ผิดพลาดของขนาดรูจากการเจาะนั้นพบว่าเพิ่มขึ้นจาก 452 ไมโครเมตร เป็น 495 ไมโครเมตร ซึ่ง พบว่าเมื่ออัตราป้อนเปลี่ยนแปลงจาก 71.36 เป็น 198.64 มิลลิเมตรต่อนาที ส่งผลทำให้ความเรียบ ผิวเพิ่มขึ้นจาก 0.342 ไมโครเมตร เป็น 0.446 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนจาก 71.36 เป็น 198.64 มิลลิเมตรต่อนาที และขนาดของดอกเจาะมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดรู ขณะเดียวกันยังส่งผลทำให้ความเรียบผิวลดลง ส่วนผลกระทบร่วมกันเกิดขึ้นจากขนาดดอกเจาะและ อัตราป้อนพบว่าส่งผลกระทบต่อขนาดความคลาดเคลื่อนของรู แต่ไม่มีผลกับความเรียบผิวรู ดังนั้น เจื่อนไขค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานกับเหล็ก AISI 1015 หน้า 1 มิลลิเมตร ที่ดีที่สุด คือ ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที อัตราป้อน 71.36 มิลลิเมตรต่อนาที และขนาดของอุปกรณ์เจาะ 7.3 มิลลิเมตร แต่อย่างไรก็ตาม นอกจากการใช้ปัจจัยในการทำงานที่ เหมาะสม การทราบถึงผลกระทบทางกลที่เกิดขึ้นจากการใช้ปัจจัยต่าง ๆ ในการเจาะชิ้นงาน ก็เป็นสิ่ง ที่จำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการเกิดแรงกระทำทางกายภาพที่กระทำต่ออุปกรณ์เจาะและชิ้นงานนั้น ย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เจาะและชิ้นงานด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การสึกหรอและการ เสียหายของอุปกรณ์เจาะหรือการเกิด ความไม่เที่ยงตรงของรูเจาะ จึงได้มีนักวิจัยหลายคน ได้ศึกษา วิธีการในการวัดและรูปแบบของแรงกระทำในลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจาะโดยใช้แรง เสียดทาน ดังเช่นในงานวิจัยของ Streppel และ Kal ที่ได้นำเสนองานวิจัย โดยทำการวิเคราะห์ผล เบื้องต้น ของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานในแง่ของ ลักษณะทางฟิสิกส์ และลักษณะทางกล ซึ่งเป็นงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึง ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน เป็นครั้งแรก โดยแสดงให้เห็นลักษณะของแรงตัดเฉือนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือที่ ถูกเขียนขึ้นในรูปแบบของ เส้นเติมทึบและเส้นประ ตามลำดับ โดยเทียบกับระยะการเดินทางของ เครื่องมือในแนวแกน Z



ภาพที่ 2.25 แรงตัดเฉือนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในการเจาะรูโดยใช้เทคนิคการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน (Streppel A.H. 1983)

ในการศึกษาปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของกระบวนการตัดเฉือนอื่น ๆ เพื่อใช้ในการอ้างอิงลักษณะของผลกระทบที่อาจจะเกิดจากลักษณะทางกลหรือลักษณะทางเคมีที่มีความใกล้เคียงกันในรูปแบบต่าง ๆ เช่น อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการตัดเฉือนโลหะดังเช่นในงานวิจัยของ Mauri Routi และคณะที่ได้ทำการศึกษาลักษณะการเจาะชิ้นงาน โดยการเจาะด้วย อุปกรณ์เจาะ ที่ทำจาก เหล็กกล้ารอบสูง ขนาด 10 มม. โดยวัสดุงานที่นำมาทดสอบในการเจาะอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อศึกษาถึงในเรื่องอิทธิพลของประเภทของสารหล่อเย็น สารเคลือบผิวอุปกรณ์เจาะ และแรงที่ใช้ในการตัดเฉือน ที่มีผลกระทบต่อวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบผิวด้วย TiN-coating และวัสดุเครื่องมือตัด ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยความเร็วตัด 18-28 เมตรต่อนาที ถึง 28-36 เมตรต่อนาที ระยะป้อนลึก 30 มม. และใช้เครื่องวัดแรงตัดเฉือนทำการวัดแรงในการตัดเฉือน จากผลการทดลองพบว่า อุปกรณ์เจาะที่มีการเคลือบผิวด้วย TiN-coating จะมีอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดที่นานกว่า อุปกรณ์เจาะที่ไม่มีการเคลือบผิว และในส่วนของการใช้ประเภทสารหล่อเย็นที่มีความแตกต่างกันนั้น การใช้สารหล่อเย็นที่ทำจากน้ำมันพืชจะช่วยให้เพิ่มอายุการใช้งานของ อุปกรณ์เจาะได้อย่างชัดเจน ส่วนประเภทของอุปกรณ์เจาะที่เกิดแรงในการตัดเฉือนสูงสุดได้แก่ อุปกรณ์เจาะประเภทที่ไม่มีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความแข็งผิว และแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นและในส่วนของคุณค่าของแรงในการตัดเฉือนตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์เจาะทุกประเภทพบว่า ค่าของแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดขณะทำการเจาะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดอายุการใช้งาน จนกระทั่ง

อุปกรณ์ตัดมีการแตกหัก จากผลของการศึกษาวิจัยสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการเลือกให้เครื่องมือตัดให้เหมาะสมกับงานได้

R.Heinemann และคณะที่ได้ทำการศึกษาเรื่อง “Effect of MQL on the tool life of small twist drill in deep-hole drilling” ซึ่งเป็นการศึกษาการเจาะของอุปกรณ์เจาะขนาดเล็กโดยดูจากความลึกของรูเจาะ ที่มีขนาดเล็ก โดยในการพิจารณาถึงวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการเจาะที่หลากหลาย ลักษณะการเจาะจะทำการโดยมีการใช้น้ำมันหล่อลื่นเป็นตัวหล่อลื่นระหว่างการเจาะ ในการวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะน้ำมันหล่อลื่นและรูปแบบไหนที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นในการเจาะน้อยที่สุด ซึ่งจะดูจากอายุการใช้งานของอุปกรณ์เจาะในการทดลองใช้อุปกรณ์เจาะ HSS ขนาด 15 มิลลิเมตร ในการเจาะเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีความลึก 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของอุปกรณ์เจาะโดยใช้ MQL ในการบันทึกการสังเกต จากการผลการวิจัยพบว่าปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ลดลงจะทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์เจาะลดลง นอกจากนี้ยังเกิดความร้อนสูงในอุปกรณ์เจาะ และสารหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อยจะทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์เจาะมีอายุการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นและในการเจาะของอุปกรณ์เจาะที่ปราศจากสารหล่อลื่นจะมีผลต่ออายุของอุปกรณ์เจาะโดยจะส่งผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์เจาะลดลง

และเพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดแรงในการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกน ผู้วิจัยจึงได้ทำการทบทวนงานวิจัยของ Wen-Chon และคณะที่ได้ทำการศึกษาเรื่อง “Cutting performance of different coated twist drills” ซึ่งเป็นการศึกษาการเจาะด้วยอุปกรณ์เจาะรูที่ทำจากเหล็กกล้ารอบสูงที่ผ่านการชุบแข็งผิว โดยเป็นการทดลองเพื่อหาเหตุผลและเปรียบเทียบแรง ในการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นและอายุการใช้งานของอุปกรณ์เจาะซึ่งในการทดลองจะทำการทดลองเจาะเหล็กกล้าคาร์บอนมาตรฐาน JIS SS 400 ผลของการทดลอง พบว่า แรงที่เกิดขึ้นในการเจาะและแรงบิดในการเจาะจะมีการแปรผันเล็กน้อย ระหว่างแรงบิดและแรงในการเจาะของอุปกรณ์เจาะ ภายใต้เงื่อนไขของการเจาะ แม้ว่าค่าเฉลี่ยของแรงจะน่าเชื่อถือและแรงบิดจะเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนสำหรับอุปกรณ์เจาะที่ผ่านการชุบแข็งผิว ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของแรงในการเจาะและแรงบิดที่ลดลงที่อยู่ภายในช่วงแคบของอุปกรณ์เจาะที่มีการใช้ความเร็วรอบ 725 รอบ/นาทีของการทดลอง ซึ่งจากการทดลองดังกล่าว โดยได้มีทดลองการพัฒนาความกว้างของผิวด้านข้างของอุปกรณ์เจาะด้วยและจากการชุบผิวของอุปกรณ์เจาะพบว่าอุปกรณ์เจาะที่ผ่านการชุบผิวด้วยสารเคลือบผิวแบบ TiCN จะมีการสึกหรอที่ผิวด้านข้างน้อยกว่าการชุบผิวแบบอื่นของการเจาะ และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวัดแรงตัดเฉือนในแนวแกนที่มีความคล้ายคลึงกันนั้นก็คืองานวิจัยของ S.C.Lin และคณะที่ได้ทำการศึกษาเรื่อง “Drilling carbon fiber reinforced composite material at high speed” เป็นการศึกษาการเจาะโลหะผสมคาร์บอนไฟเบอร์โดยใช้การเจาะที่

ความเร็วรอบสูงซึ่งเป็นการหาผลลัพธ์ที่เกิดจากการเจาะที่เพิ่มขึ้นของความเร็วตัดที่ใช้ในการทดลอง โดยมีการใช้ความเร็วรอบสูงตั้งแต่ 9,550-38,650 รอบ/นาที เพื่อหาค่าอิทธิพลที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของแรงในการเจาะ การสึกหรอของเครื่องมือตัด คุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการเจาะ โดยใช้อุปกรณ์เจาะที่เจาะได้หลากหลาย (Multifacet drill) และอุปกรณ์เจาะชนิดเกลียวบิด (Twist drill) ซึ่งรูปแบบของการทดลองจะเพิ่มแรงในการเจาะมีเพียงอัตราการป้อนที่ค่าและคงที่จาก จากการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยของแรงในการเจาะ เพิ่มขึ้นขณะที่ความเร็วตัดเพิ่มขึ้นของ อุปกรณ์เจาะทั้งสองชนิดพบว่า อุปกรณ์เจาะที่เจาะได้หลากหลายมีค่าเฉลี่ยของแรงบิดเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วตัดเพิ่มขึ้นแต่ในขณะที่อุปกรณ์เจาะชนิดเกลียวบิดมีค่าเฉลี่ยของแรงบิดจะลดลงในขณะที่ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น และในส่วนของสภาพการสึกหรอของเครื่องมือ โดยส่วนใหญ่มีผลกระทบมาจาก ความเร็วตัด ความยาวของ อุปกรณ์เจาะนอกจากนี้การสึกหรอของเครื่องมือจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น และอุปกรณ์เจาะที่ผ่านการใช้งานมานาน แรงในการเจาะจะต้องเพิ่มขึ้นอย่างมากแต่ก็จะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรูที่ผ่านการเจาะเนื่องจากการใช้อัตราการป้อนที่ต่างกัน และนอกจากนี้ ในการศึกษากระบวนการเจาะ โดยใช้แรงเสียดทานนอกจากการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวไปแล้วนั้น เรายังสามารถศึกษาจาก กระบวนการแปรสภาพโลหะ ที่มีความคล้ายคลึงกันได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น งานวิจัยใน กระบวนการเชื่อมโลหะโดยใช้การเสียดทานแบบกวน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้การเสียดทานกับ วัสดุจนโลหะเกิดการเปลี่ยนภาพ เช่นกัน ดังในงานวิจัยของ AH Plaine (2016) ที่ได้ทำการทดสอบ เชื่อมต่อ แผ่น Titanium alloy Ti6Al4V และ Aluminum alloy 6061 ซึ่งเป็นวัสดุที่แตกต่างกันทำ การเชื่อมต่อโดยใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานโดยการกวน ผลกระทบจากการใช้ปัจจัยในการเชื่อม รวมถึงตำแหน่งของแท่งกวน อัตราความเร็วในการหมุน และอัตราป้อนของทูล บนพื้นที่ที่ทำการ สัมผัส และคุณสมบัติของจุดที่ทำการเชื่อมต่อจะถูกตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคและรูปแบบการ ฉีกขาดจากการทดสอบแรงดึง จะถูกตรวจสอบโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และที่ ชั้นผิวที่เกิดการสัมผัสของโลหะทั้งสองชนิดจะถูกตรวจสอบโดยใช้ TEM. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ คุณสมบัติทางกลที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อจะถูกนำมาวิเคราะห์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความ ต้านทานแรงดึงของข้อต่อและตำแหน่งของการฉีกขาดมีผลกระทบหลักจากอัตราการหมุนของทูลและ และในส่วนของ การเชื่อมต่อกันและ ชั้นของสารประกอบโลหะ นั้นเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอก โดยเกิด TiAl₃ IMC ที่มีความหนา 100 นาโนเมตรเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง เกิดขึ้นในจุดที่พื้นผิวโลหะได้มีการ สัมผัสกันเมื่อใช้อัตราการหมุนที่ 750 รอบต่อนาที โดยเมื่อมีการใช้ปัจจัยในการเชื่อมที่มีความ เหมาะสม โดยจะเกิดจุดที่เกิดการฉีกขาดในจุดที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกลและในจุดที่ได้รับ ผลกระทบทางความร้อน ของอลูมิเนียมอัลลอยและจุดที่ทำการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้นถึง 215 เมกะปาสคาล ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 68 เปอร์เซ็นต์ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมอัลลอยปกติเช่นเดียวกับข้อต่อที่สามารถ

ทนต่อการเสียหายพลาสติกได้มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำแนวคิดในงานวิจัยในกระบวนการเชื่อมโดยใช้การเสียดทานแบบกวนมาประยุกต์เพื่อใช้ในการทดลอง เพื่อเพิ่มความสามารถของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานได้อีกด้วยดังเช่น ในงานวิจัยของ Jaffarullah 2015 ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาเทคนิคการควบคุมของแรงในกระบวนการเชื่อมแบบกวนกับวัสดุ อลูมิเนียมอัลลอย โดยในบริบทของกระบวนการเชื่อมโดยการไหลกวน นั้น การควบคุมแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ การควบคุมแรงในแนวแกน และการควบคุมแรงบิดจะถูกศึกษาเพื่อให้สามารถใช้เทคนิคต่าง ๆ ได้อย่างมีความสอดคล้อง โดยปัจจัยรูปทรงของทูล และปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการ ความเร็วในการหมุนของทูล และมุมเอียงของทูล นั้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยยะสำคัญต่อกระบวนการเชื่อม ดังนั้น ส่วนสำคัญของการศึกษานี้ นั้น จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ และข้อบกพร่อง ของระเบียบวิธีดังกล่าวซึ่งจะนำไปสู่การปฏิบัติงานในกระบวนการที่ดีขึ้น สามารถเชื่อมต่อชิ้นงานโดยใช้กระบวนการ fsw ได้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับวิธีการที่จะเพิ่มคุณภาพของการเชื่อม ในแง่ของโครงสร้างทางจุลภาค และความสม่ำเสมอของการก่อตัวของรอยเชื่อมเช่นเดียวกับการขจัด การเกิดรูพรุนในรอยเชื่อม

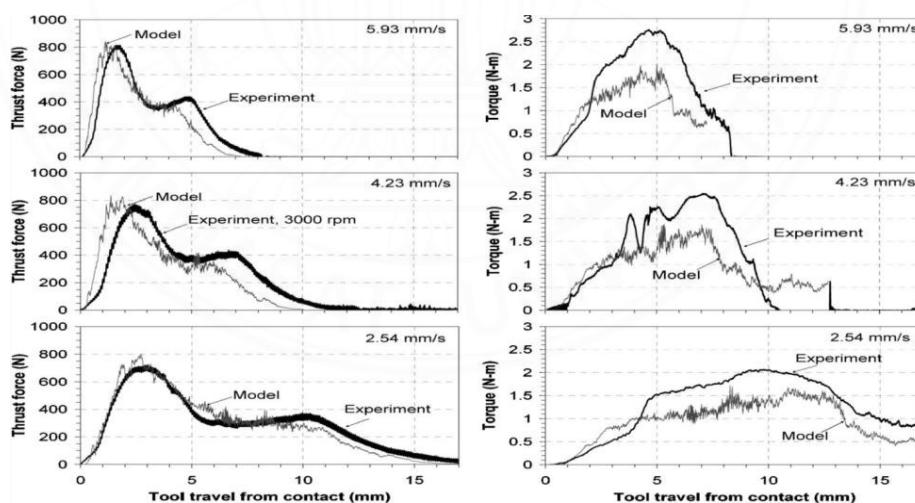
นอกจากนี้ เพื่อให้เกิดแนวทางในการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษางานวิจัย Ishida และคณะ 2012 ซึ่งทำการศึกษาลงถึงปัจจัย ในกระบวนการเจาะวัสดุ แผ่น Carbon Fiber Reinforced Polymer ด้วยเทคนิคการกัดแบบควสวานโดยใช้การสั่นจากคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการกัดและใช้สารไนโตรเจนเหลวในการระบายความร้อน โดยใช้ คือ ดอกกกัดแบบหัวบอล ทำการเจาะรู วัสดุ Carbon Fiber Reinforced Polymer โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงอิทธิพลของลักษณะการตัดเฉือนด้วย เทคนิคการกัดแบบควสวาน และการใช้สารหล่อเย็น แบบไนโตรเจนเหลว ที่มีต่อความสามารถในการตัดเฉือนโดยอ้างอิงจากค่าแรงที่เกิดขึ้น ค่าความเที่ยงตรงจากการเจาะ และค่าความสึกหรอของอุปกรณ์ โดยวัสดุและวิธีการที่ใช้ คือ เครื่องมือตัดประเภทดอกกกัด แบบหัวบอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ทำการกัดโดยใช้เงื่อนไขการตัดเฉือน คือ ความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 1 มิลลิเมตรต่อรอบ และใช้ความเร็วในการเดินกัด 270 มิลลิเมตรต่อนาที เจาะ วัสดุ Carbon Fiber Reinforced Polymer หนา 3.5 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 40 รู ต่อ 1 ชุดปัจจัยการทดลอง โดยใช้การวัดผลค่า การสึกหรอของเครื่องมือตัดด้วยเครื่อง SEM เพื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัด ก่อน-หลัง การตัดเฉือน และใช้เปรียบเทียบ ค่าความเที่ยงตรงจากการเจาะ และใช้เครื่องวัดแรงตัดเฉือนทำการวัดแรงในการตัดเฉือน จากผลการวิจัยพบว่า การเจาะโดยใช้เทคนิคการควสวานดอกกกัดเพื่อเจาะวัสดุ Carbon Fiber Reinforced Polymer โดยไม่มีการใช้สารหล่อเย็น เป็นเทคนิคที่ก่อให้เกิดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะน้อยที่สุดเนื่องจากส่วนผสมของ Carbon Fiber Reinforced Polymer นั้นมีส่วนผสมของพลาสติกอยู่ด้วย

ซึ่งเมื่อเกิดความร้อนขึ้นพลาสติกก็จะเกิดการละลายและมีความอ่อนตัวทำให้เกิดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำ เจาะน้อยลง แต่ในส่วนของการสึกหรอของอุปกรณ์เจาะ กลับพบว่าทั้งการใช้เทคนิคการควงสว่าน ดอกกัดเพื่อเจาะวัสดุ การใช้การสั่นช่วยในการกัด หรือการใช้สารหล่อเย็นชนิด ไนโตรเจน เหลว ไม่มี ผลต่อค่าการสึกหรอของ อุปกรณ์เจาะ เนื่องจากพบว่ามีค่าการสึกหรอใกล้เคียงกันในทุกชุดปัจจัยการ ทดลอง และในส่วนความเที่ยงตรงของรูเจาะ พบว่าการใช้เทคนิคควงสว่านโดยใช้สารหล่อเย็น ประเภท ไนโตรเจนเหลว นั้นส่งผลให้รูเจาะที่ได้ มีความเที่ยงตรงสูงที่สุดอีกด้วย

2.12.2 การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการเจาะแบบแรงเสียดทาน

Miller S. และคณะจึงได้ทำการพัฒนาการวิเคราะห์เชิงทดลองและรูปแบบของ กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยทำการทดลองวัดแรงกดและแรงบิดภายใต้การใช้ความเร็ว ในการเดินของทูลที่คงที่ โดยค่าที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ และจะถูกนำเสนอในรูปแบบของสมการทาง คณิตศาสตร์ โดยมีพื้นฐานจากพื้นที่สัมผัสกันระหว่างชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น AISI 1020 ที่ ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปและ Rigid unworn WC in a Co matrix tool มาประยุกต์ใช้งานโดยการใช้ แพคเกจซอฟต์แวร์ Finite element ANSYS 7.0 โดยแบบจำลองได้คาดการณ์ แรงกดและแรงบิดที่ เกิดขึ้นมีความสอดคล้องที่ดีกับการทดลองตามที่แสดงในภาพที่ 2.26 แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่าง บางอย่างยังคงมีอยู่และแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัด ของการใช้แบบจำลองแรงเสียดทานแบบง่ายที่ใช้ใน การศึกษานี้ อีกทั้งยังได้ทำการค้นคว้า การใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบ 3 มิติ โดยใช้ กระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน กับวัสดุ เกรด AL6061-T6 ทำการเจาะโดย ทูลที่ ผ่านการชุบ แข็งและทำการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ โปรแกรม ABAQUS/EXPLICIT โดยมีรูปแบบการตรวจสอบ เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดแรงกดและแรงบิด โดยรูปแบบของแรงกด ที่ถูกวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแรงที่ถูกผลักเลื่อนไปทางด้านซ้ายของรูปแบบการ ทดลอง เนื่องมาจากการสัมผัสกันของชิ้นงานแผ่น AL กับทูลที่ใช้ในการกดในระยะที่เริ่มต้นการสัมผัส และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นอย่างสูงของแรงกดที่เกิดขึ้น แต่สำหรับแรงบิดนั้น แบบจำลองที่ได้แสดงให้เห็น นั้น มีลักษณะที่แตกต่างออกไป จากการทดลอง จะพบว่าแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะจะมีการ เพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ ของ ทูลที่ต่ำลง และจากแบบจำลองนั้นจะเห็นได้ว่าการ เกิดแรงบิดที่มากเกินไป พักัด ในช่วงระยะเริ่มต้นของการสัมผัส แต่อย่างไรก็ตาม แรงบิดที่เกิดขึ้นจน เกือบสูงสุด ก็ยังดูน้อยกว่าที่คาดไว้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อ จำกัด ของรูปแบบการเสียดสีและความ ต้องการที่จะใช้แบบจำลองแรงเสียดทานใหม่เพื่อให้เกิดการคาดการณ์ที่ถูกต้องมากขึ้นของแรงบิดใน การจำลองแบบการเสียดสีของแรงเสียดทานและยังมีการการศึกษาเบื้องต้นที่มีความเกี่ยวข้องกับแรง ตัดเฉือนและแรงบิดที่ถูกศึกษาโดย Miller และคณะอีกเช่นกันที่ได้ใช้วัสดุอลูมิเนียมหล่อและโลหะ

ผสมแมกนีเซียม เป็นชิ้นงานในการทดลอง โดยเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยแตกที่เกิดขึ้นรอบๆผิวรูเจาะ จึงได้ทำการการอุ่นชิ้นงานให้ร้อนก่อนการเจาะรูและมีการใช้ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์เจาะที่มีความเร็วสูงได้ถูกนำมาใช้ในการทดลอง โดยเมื่อ อุณหภูมิของของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นนั้นจะเห็นได้ว่า แรงตัดเฉือนและแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะชิ้นทดสอบจะมีค่าลดลง อีกทั้งรูปทรงของชิ้นทดสอบก็จะมีรูปทรงที่ดีขึ้น เพื่อตรวจสอบผลที่เกิดขึ้น การใช้พลังงาน กำลังงานสูงสุดที่เกิดขึ้นและการใช้กำลังงานเฉลี่ยในการเจาะ จะถูกมาวิเคราะห์ และทำการสังเกตความแตกต่างทำของ ค่าแรงบิดที่ถูกบันทึก อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ รูปทรงกรวยที่ใช้ในการเจาะวัสดุโลหะ AISI 1015 โดยทำการตรวจวัดผลกระทบของ แรงกดในแนวตั้งและแรงบิดระหว่างทำการเจาะ ที่มีผลต่อการสึกหรอของทุล และจากการวัดด้วยเครื่องมือที่มีความแม่นยำทำให้สามารถระบุได้ว่า เกิดการสึกหรอเกิดขึ้นที่บริเวณศูนย์ของเครื่องมือและที่จุดตัดระหว่างบริเวณภาพกรวยและทรงกระบอกดัง ทำให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะนั้นสามารถเกิดการแหลมคมขึ้นได้เองในขณะที่ทำการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดของแรงในการตัดเฉือนที่เกิดขึ้น ในขณะที่ทุลเกิดการสึกหรอ แต่ในส่วนของแรงบิดนั้นไม่แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญในแต่ละช่วงที่เกิดการสึกหรอของอุปกรณ์ และเพื่อพัฒนาให้สามารถจำลองรูปแบบการใช้ปัจจัยในการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.26 การเปรียบเทียบการทดลองและรูปแบบของแรงตัดเฉือนและแรงบิดที่ถูกตรวจวัดที่แปรผันกับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เจาะในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.7 และใช้ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที (Miller S.F.2007)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 นำมาสู่วิธีการดำเนินงาน เพื่อศึกษาการจำลองกระบวนการเจาะ โดยใช้แรงเสียดทานในการเจาะแผ่นโลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุในการทดลอง
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง
- 3.3 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง
- 3.4 ทดลองเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน
- 3.5 การวัดแรงกดและแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะ
- 3.6 การวัดอุณหภูมิ
- 3.7 การวัดความแข็ง
- 3.9 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V
- 3.10 การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 วัสดุในการทดลอง

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย คือแผ่นโลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V โดยเป็นโลหะที่มีความต้านทานความร้อน ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความเหนียวและทนทานต่อการเสียรูป มีความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนและความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตาราง ที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V (%)

Ti	Al	V	Other
87.725 – 91	5.5-6.75	3.5-4.5	0.3

ในการทดลองนี้จะใช้วัสดุไทเทเนียม Ti6-Al-4V ที่ผ่านการตัดให้มีขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรหนา 2.5 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นชิ้นงานในการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผ่นไทเทเนียมอัลลอยเกรด Ti-6Al-4V

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องกัตอัตโนมัติแนวตั้ง

เครื่องกัตซีเอ็นซีแนวตั้งยี่ห้อ EUMACH รุ่น LMC1020 ดังแสดงในภาพที่ 3.2 เป็นเครื่องจักรอัตโนมัติสำหรับการขึ้นรูปวัสดุ โดยใช้เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเจาะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด เพื่อทำการเจาะลงบนเนื้อวัสดุเพื่อให้เกิดการเสียดสีกับเนื้อวัสดุจนเกิดการเปลี่ยนรูป เป็นรูตามที่ต้องการ การเคลื่อนที่ของเครื่องกัตซีเอ็นซีจะใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมและใช้การป้อนคำสั่ง G Code เพื่อ กำหนดขั้นตอนการทำงาน เพื่อควบคุม อัตราการป้อน และความเร็วรอบซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมระดับของปัจจัยในการทดลอง



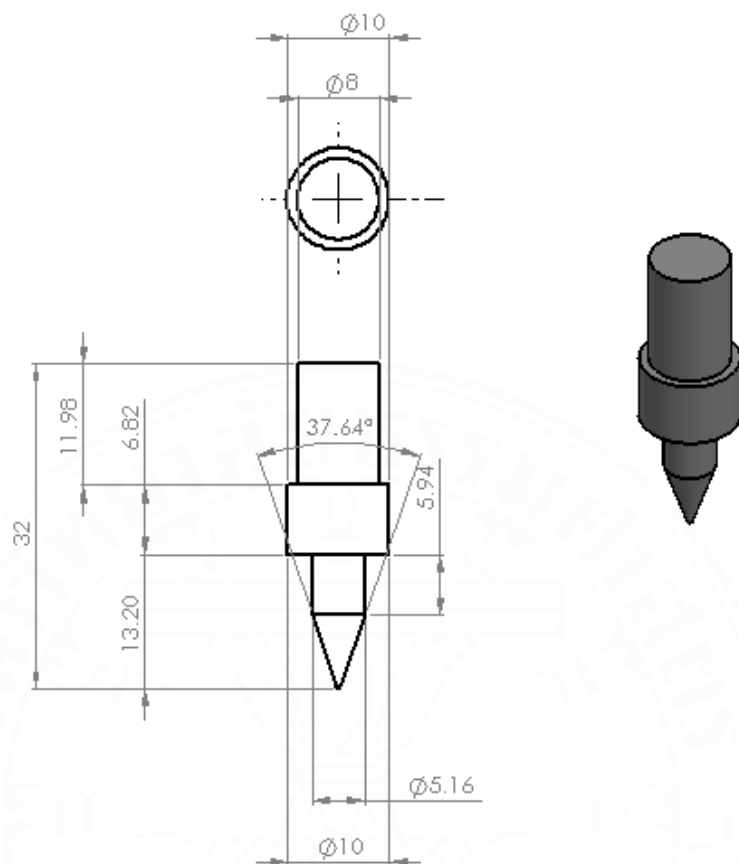
ภาพที่ 3.2 เครื่องกัดซีเอ็นซี EUMACH รุ่น LMC1020

3.2.2 อุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

เครื่องมือเจาะโดยใช้แรงเสียดทานที่ทำมาจากวัสดุทังสเตน คาร์ไบด์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ที่ 5.16 มิลลิเมตร ความยาวของเครื่องมือเจาะมี ขนาดยาวทั้งหมด 32 มิลลิเมตร มีส่วนที่มีหน้าที่สัมผัสกับชิ้นงานเพื่อทำการเสียดสีชิ้นงานยาว 13.2 มิลลิเมตร มีขนาดของมุมเรียวที่ปลายที่มีขนาด 37.64 องศา ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทานแบบมีป่า



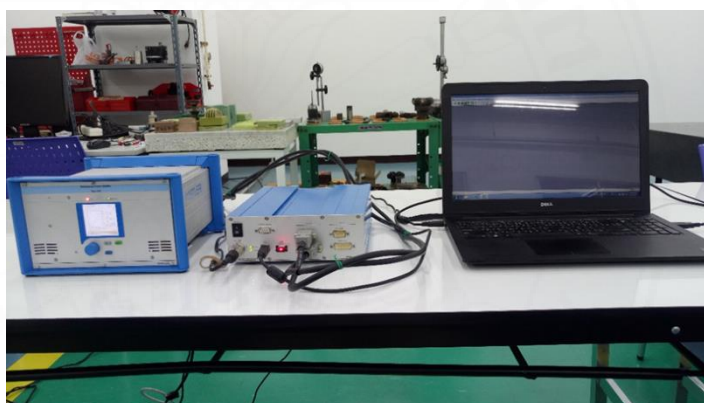
ภาพที่ 3.4 ขนาดของอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

3.2.3 เครื่องวัดแรงตัดเฉือนสำหรับวัดแรงตัดเฉือนและแรงบิด

เครื่องวัดแรงตัดเฉือน KISTLER รุ่น 9272 ดังแสดงในภาพที่ 3.5 เป็นอุปกรณ์วัดแรงเชิงกลแบบเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ที่สามารถวัดแรงได้ใน 4 แนวแกน โดยมีแกน X แกน Y แกน Z และโมเมนตัมรอบแกน Z รับ แรงสูงสุดที่ -5 กิโลนิวตันจนถึง +5 กิโลนิวตัน หลักการทำงานของอุปกรณ์เมื่อเกิดแรงกระทำต่อ เพียโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปยังชุดแปลงและขยายสัญญาณ (KISTLER Charge Amplifier รุ่น 5070A) และ DAQ system รุ่น 5697A1 หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่านไปให้ชุดประมวลผลที่เครื่องคอมพิวเตอร์ด้วย ซอฟต์แวร์ Dyno Ware เพื่อแสดงข้อมูลเข้าพุตเป็นค่าแรงตัดเฉือนที่วัดได้ ในการแสดงเข้าพุตของข้อมูลที่มีความละเอียดหรือมีความถี่สูง ซอฟต์แวร์ Dyno Ware สามารถกำหนดอัตราการสุ่มข้อมูล ได้สูงถึง 50000 ข้อมูลต่อวินาที เครื่องวัดแรงตัดเฉือนและชุดขยายสัญญาณแสดงในภาพที่ 3.5 และภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดแรงตัดเฉือน KISTLER (Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER



ภาพที่ 3.6 การเชื่อมต่อ ชุดแปลงและขยายสัญญาณ (KISTLER Charge Amplifier รุ่น 5070A) และ DAQ system รุ่น 5697A1 เข้ากับเครื่องวัดแรงตัดเฉือน KISTLER Dynamometer เพื่อทำการวัดแรงตัดและแรงบิด

3.2.4 เครื่องมือวัดค่าความแข็งของผิวงาน

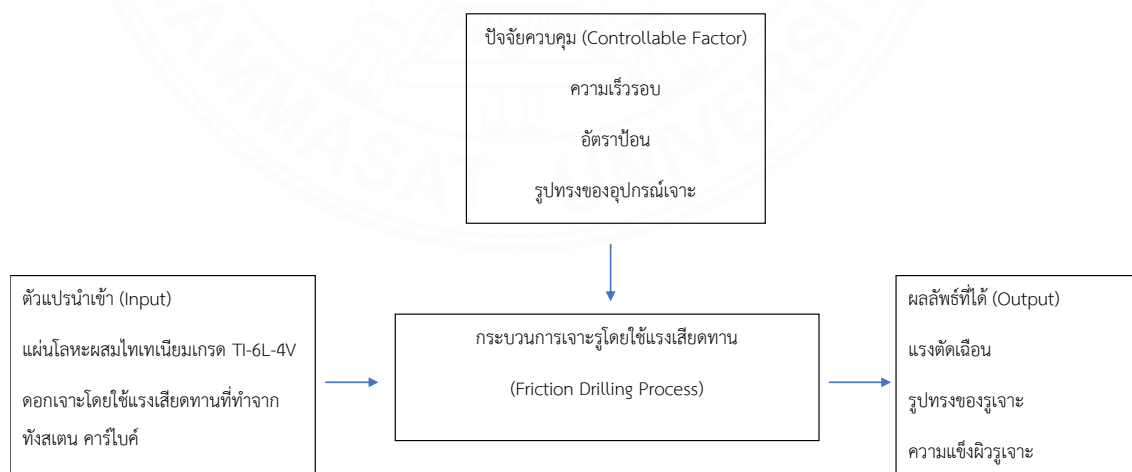
เครื่องวัดความแข็ง (Micro Vickers) รุ่น FM-800 เป็นเครื่องวัดค่าความแข็งของวัสดุ โดยมีหลักการทดสอบคือใช้หัวกดเพชรรูปทรง ปริมาตรฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก กดลงไปผิววัสดุด้วยการ ควบคุมน้ำหนักกดและเวลา ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นจะวัดได้จากการคำนวณขนาดของรอยกดที่ส่งผลจากน้ำหนัก ของแรงกดที่กระทำต่อพื้นที่และการเปลี่ยนรูปของวัสดุชิ้นงาน การวัดขนาดของรอยกดจะใช้ไมโครสโคปของเครื่องทำหน้าที่ระบุขนาดรอยกดที่วัดได้และประมวลผลออกมาที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ของ เครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

3.3 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการจำลอง

จากการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน โดยพิจารณาจากการรวบรวมการค้นคว้าวิจัยในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปัจจัยที่อิทธิพลต่อการขึ้นรูปด้วยการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ คือ การใช้ปัจจัย ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ชนิดของเครื่องมือตัด ชนิดของวัสดุ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการเกิดรูจากการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

ในการทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัย จึงได้ กำหนดปัจจัยควบคุมในการทดลอง 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบและอัตราป้อนโดยปัจจัยที่ 1 ความเร็วรอบมี 5 ระดับ คือ 2500-3500 4500 6000 และ 7000 รอบต่อนาที และปัจจัยที่ 2 อัตราป้อนมี 3 ระดับ คือ 80 100 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ระดับของปัจจัยในการเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานเพื่อใช้ในการจำลองและการทดลอง

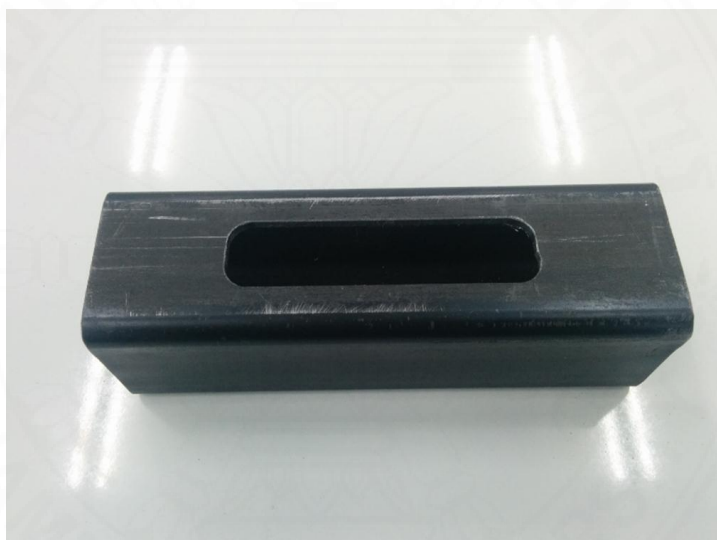
ลำดับ การทดลอง	อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
1	80	2500
2	80	3500
3	80	4500
4	80	6000
5	80	7000
6	100	2500
7	100	3500
8	100	4500
9	100	6000
10	100	7000
11	120	2500
12	120	3500
13	120	4500
14	120	6000
15	120	7000

3.4 ทดลองเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

ทำการทดลองเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยปัจจัยที่ถูกออกแบบเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองกระบวนการและค่าที่เกิดขึ้นจากการทดลองเจาะด้วยอุปกรณ์เจาะที่ถูกสร้างขึ้น

3.4.1 การติดตั้งระบบจับยึดเพื่อทำการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

ในการเจาะชิ้นงานแผ่นโลหะที่ทำจากวัสดุโลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ทำการทดลองโดยออกแบบระบบจับยึด ให้สามารถเจาะแผ่นโลหะ โดยใช้อุปกรณ์สำหรับเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ให้สามารถเจาะทะลุผ่านแผ่นโลหะ จนสามารถก่อให้เกิดรู ที่ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้กระบวนการเจาะโดยใช้เสียดทานและเพื่อป้องกันการเกิดแรงกดที่มากเกินไปจนทำให้เครื่องวัดแรงเกิดความเสียหาย โดยทำการขึ้นรูปเหล็กกล่องให้เกิดร่องที่บริเวณกึ่งกลางดังภาพที่ 3.9 เพื่อให้เมื่อนำแผ่นโลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V จับยึดเข้ากับกล่องโลหะ โดยให้อุปกรณ์เจาะสามารถเจาะลงสู่แผ่นโลหะในแนวแกนตั้งจนทะลุผ่านแผ่นโลหะโดยไม่ให้เกิดการเสียดสีกับส่วนประกอบอื่น ๆ ของอุปกรณ์จับยึด



ภาพที่ 3.9 เหล็กกล่องหลังการเจาะร่อง Slot

1. จับยึดชิ้นงานที่จะใช้ในการทดลองเข้ากับฟิกเจอร์ (Fixture)

จากภาพได้นำอุปกรณ์ฟิกเจอร์ ทำการประกอบเข้ากับชุดโหลดเซลล์ ของอุปกรณ์วัดแรงกดและแรงตดเฉือนแนวดิ่งเพื่อใช้วัดค่าดังกล่าวขณะทำการเจาะทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.10 การจับชิ้นงานที่ Dynamometer

2. ลักษณะชิ้นงานเมื่อนำไปยึดเข้ากับ Fixture

การจับยึดชิ้นงานเข้ากับอุปกรณ์ช่วยจับยึด จากภาพจะเห็นว่าต้องใช้เหล็กกล่องเป็นที่ยึดรับชิ้นงานอีกชั้นเพื่อช่วยการจับยึดและการเจาะดังแสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 มุมมองด้านข้างการใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดจับชิ้นงาน

3.4.2 การเจาะชิ้นงานตามแบบการทดลอง

ทำการทดลองเจาะโดยใช้ค่าปัจจัยตามที่กำหนดโดยใช้เครื่องจักร CNC ดังแสดงในภาพที่ 3.12 และได้รูเจาะตามที่แสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.12 ภาพการเจาะชิ้นงาน

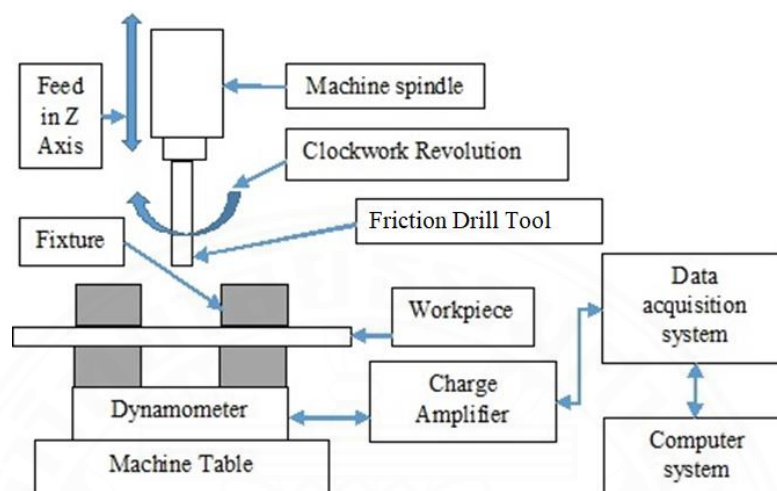


ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานหลังการเจาะ

3.4.3 การวัดแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

ทำการเจาะชิ้นงานโดยอ้างอิง พารามิเตอร์การทดลองจากตารางแบบทดลอง การควบคุม ระดับของปัจจัยในการทดลองและการเจาะชิ้นงานทดลองโดยใช้คำสั่ง G Code ในระหว่างการทดลองต้องทำการเปิด ซอฟต์แวร์ Dyno ware และเครื่องขยายสัญญาณ KISTLER charge amplifier เพื่อทำการวัดและบันทึกข้อมูลของ แรงตัดเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะ โดยทำการตั้งค่าการบันทึกที่มีอัตราการสุ่มเก็บข้อมูลที่ 400 ข้อมูลต่อวินาที บันทึกแรงตัดเฉือนในแนวแกน X และแกน Y และแกน Z และแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะ โดยการเชื่อมต่อของระบบการวัดแรงจะมีลำดับการเชื่อมต่อดังแสดงในภาพที่ 3.14 โดยกระบวนการเจาะจะทำการเจาะตามลักษณะการเจาะรู

โดยการใช้อุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน เจาะกับชิ้นทดสอบที่มีขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรหนา 2.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.14 การเชื่อมต่อระบบการวัดแรงเข้ากับเครื่องจักร CNC



ภาพที่ 3.15 การจับชิ้นงานที่ Dynamometer เพื่อเตรียมการทดลอง

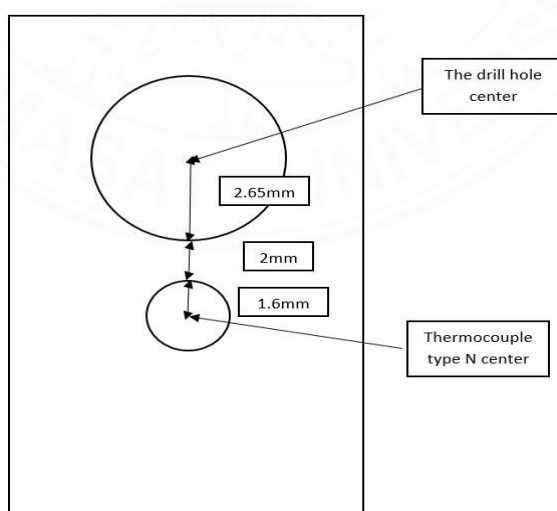
3.5 การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะ

การตรวจสอบแรงกดและแรงบิดที่เกิดขึ้นตามปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาทำการวัดและเพื่อแสดงให้เห็นถึงของแรงตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกนและแรงบิด จากการใช้ปัจจัยในการเจาะที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใน การทดลองจะดำเนินการโดยใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC) โดยข้อมูลของแรงตัดเฉือนตามแนวแกนและแรงบิดจะถูกบันทึกไว้ในระหว่างกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยระบบจะทำ

การเก็บข้อมูล จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์การใช้ปัจจัยในการเจาะที่แตกต่างกัน เช่น ความเร็วรอบ และอัตราป้อนของอุปกรณ์เจาะ จะทำให้สามารถอธิบายลักษณะและคำอธิบายของเส้นกราฟแรงที่เกิดขึ้นเพื่อให้สามารถตรวจสอบแรงตัดเฉือนได้

3.6 การวัดอุณหภูมิ

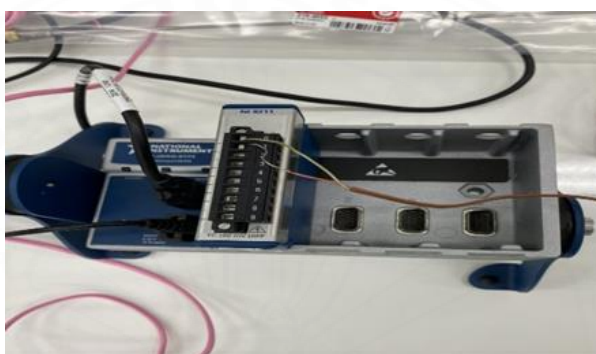
อุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะรูอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปของรู โดยปัจจัยที่ใช้ในการเจาะจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการใช้ความเร็วรอบและอัตรา การป้อน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะ โดยใช้ กระบวนการเจาะ โดยใช้แรงเสียดทานนั้นในทางปฏิบัติเรายังไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ เกิดการเสียดสีกันระหว่างอุปกรณ์เจาะและวัสดุที่ทำการเจาะได้โดยตรง แต่สามารถวัดในจุดที่ ใกล้เคียงกับรูเจาะได้ โดยจะถูกติดตั้งไว้ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะและจุดศูนย์กลาง ของรูเทอร์โมคัปเปิลด้วยระยะ 5.25 มม. เพื่อทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในจุดที่กำหนดดังแสดงใน ภาพที่ 3.16 โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3.17 โดยทำ การบันทึกข้อมูลโดยใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 3.18 และมีการเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิล เพื่อทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3.19



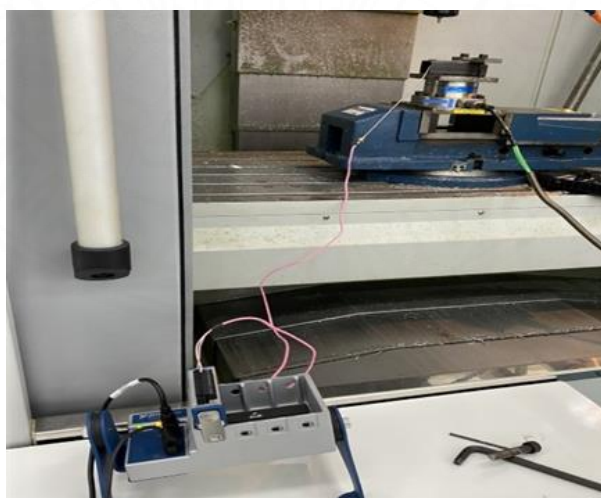
ภาพที่ 3.16 การกำหนดตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ



ภาพที่ 3.17 เทอร์โมคัปเปิล



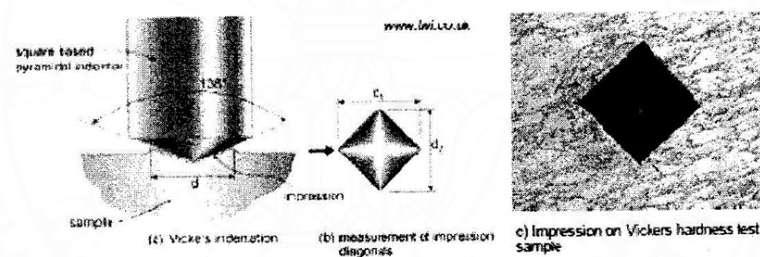
ภาพที่ 3.18 อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ



ภาพที่ 3.19 การเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลเพื่อทำการวัดอุณหภูมิ

3.7 การวัดความแข็ง

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส มีลักษณะการวัดที่คล้ายกับการทดสอบแบบบรินเนลล์แต่เปลี่ยนหัวกดทดสอบจากทรงกลมเป็นหัวกดภาพปริมาตรฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมยอดมีขนาด 136 องศาทำจากเพชร การทดสอบวิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีลักษณะอ่อนไปจนถึงแข็งมาก (VHNประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยการกดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดแรงกดตั้งแต่ 1 – 120 kgf โดยที่กดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ส่วนการเคลื่อนที่ของหัวกดขณะกดลงบนชิ้นงานโดยจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ นั้น ๆ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดค้างไว้ประมาณ 10 วินาที ขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดค้างไว้นานกว่า ซึ่งเมื่อหัวกดถูกยกขึ้นจะทำให้เกิดรอยกดที่ผิววัสดุ ซึ่งสามารถวัดขนาดรอยกดได้โดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัดที่ 0.002 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.20 ที่ ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าความแข็งดังนี้



ภาพที่ 3.20 ภาพของรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Testing)
การคำนวณหาค่าความแข็ง

3.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V

ในกระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทานนั้น จะมีการเกิดอุณหภูมิที่สูงมากและการเปลี่ยนรูปทรงอย่างรุนแรง ดังนั้น จึงจำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติทั้งทางเคมี ทางกลของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังเช่น งานวิจัยของ Miller และคณะ ที่ได้ทำการศึกษา โครงสร้างทางจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป และทำการระบุ ความแข็งที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ที่บริเวณใต้พื้นผิวของ วัสดุเหล็ก อลูมิเนียม และไทเทเนียม ที่ถูกเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะรูโดยใช้แรงเสียดทาน ที่ได้แสดงให้เห็น ความเสียหาย ที่เกิดจากการเจาะรู โดยใช้

กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุ อลูมิเนียม เกรด 5052 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ขึ้นทั่วบริเวณพื้นผิว และเกิดรอยขีดรอยจุดขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ในงานวิจัย ของ Chow และคณะ ที่ได้ระบุถึง ขนาดของเกรนโดยละเอียด และรูปแบบโครงสร้างและสังเกตพบว่าการเกิดจุดแข็งขึ้นเป็นจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวที่เจาะ ซึ่งตรงกันข้ามกับบริเวณที่ของวัสดุที่ห่างจากรูเจาะ จะมีขนาดเกรนที่หยาบและมีความแข็งแรงต่ำเป็นพิเศษ

โครงสร้างจุลภาคของโลหะ จะเป็นลักษณะของโครงสร้างผลึกและลักษณะโครงสร้างเกรนของวัสดุ ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคสามารถทำได้ด้วยการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษ ตั้งแต่เบอร์ 100 – 800 หลังจากนั้นจึงนำไปขัดผิวหน้าด้วยผ้าสักหลาด และใช้กรดกัดผิวหน้าชิ้นงาน แล้วจึงทำการส่องดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 100 – 1000 เท่า ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของโลหะโดยทั่วไปจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เช่นเดียวกับสมบัติทางกลของวัสดุ แต่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุบางชนิดที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุ เช่น โครงสร้างจุลภาคของโลหะก่อนและหลังการขึ้นภาพซึ่งทำให้เกิดความร้อนสูง มีผลต่อกรรมวิธีในการตัดเฉือนวัสดุ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะหลังการขึ้นรูป อาจจะมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งมีความแข็งแรงสูง ซึ่งทำให้ผิวนำของรูที่ผ่านการเจาะขึ้นรูปด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหรือลดลงแปรผันกับการใช้ปัจจัยที่ใช้ในการเจาะที่แตกต่างกัน

กระบวนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคนั้นจะกระทำโดย นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดไปทำการกัดกรดขึ้นรอยด้วยน้ำยาไฮโดรฟลูออริกแอซิด 50% ผสมเข้ากับน้ำยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50% จากนั้นให้จุ่มชิ้นงานบริเวณจุดที่ต้องการขัดผิวลงในน้ำยาแช่ไว้เป็นเวลา 8 วินาที แล้วจึงล้างน้ำยาเคมีออกจากชิ้นงานด้วยน้ำสะอาด หลังจากนั้นจึงล้างด้วยแอลกอฮอล์ 95% แล้วรีบนำชิ้นงานไปทำการเป่าให้ชิ้นงานแห้ง จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดขึ้นรอยเรียบร้อยแล้วไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดหรือ SEM ดังภาพที่ 3.21 ที่มีระดับกำลังขยายตั้งแต่ 500 เท่า (X500) ไปจนถึงกำลังขยายสูง 3000 เท่า (X3000) เพื่อที่จะทำให้สามารถเห็นโครงสร้างได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดหรือเครื่อง SEM

3.9 การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

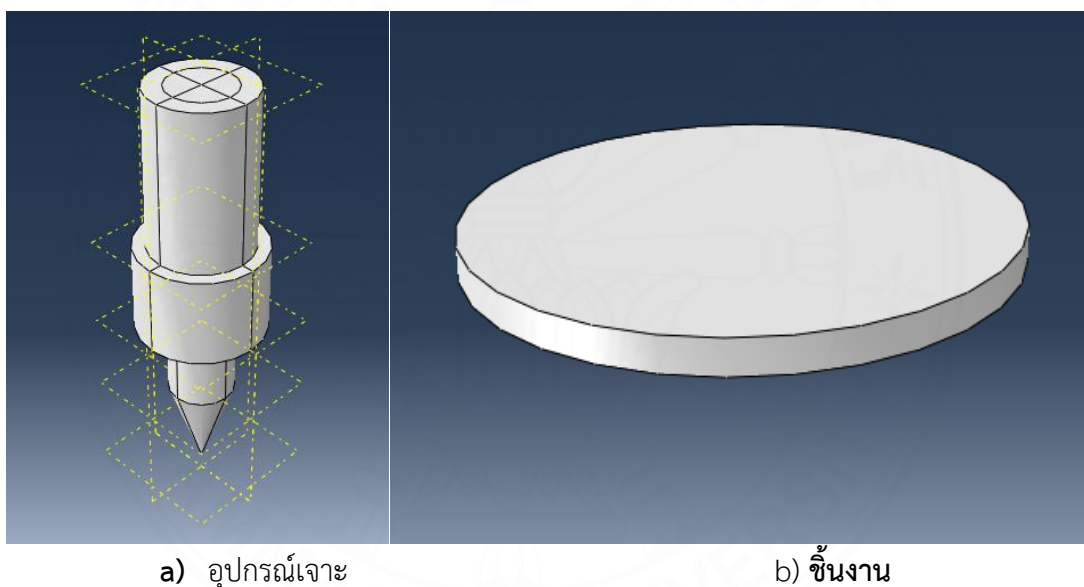
การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีความคล้ายคลึงกันกับกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้น คือ กระบวนการเชื่อมโดยการที่ใช้แรงเสียดทานจากการหมุนกวน ที่มีวัตถุประสงค์ที่จะเชื่อมต่อแผ่นโลหะ ที่ได้ทำการจำลองกระบวนการ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS/Explicit โดยทั้งสองกระบวนการนั้น เป็นกระบวนการที่มีการสร้างความร้อนจากการเสียดทาน โดยใช้การหมุนของอุปกรณ์เช่นเดียวกัน แต่สิ่งที่แตกต่างกันนั้นก็คือ การเจาะโดยใช้แรงเสียดทานมีวัตถุประสงค์ที่ใช้กระบวนการสร้างความร้อนดังกล่าวเพื่อ เปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุให้เกิดรู แต่กระบวนการ การเชื่อมโดยการที่ใช้แรงเสียดทานจากการหมุนกวนนั้นใช้เพื่อเชื่อมต่องานให้ยึดติดกัน ถึงจะมีวัตถุประสงค์ในการทำงานที่ต่างกัน แต่เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน จึงสามารถนำมาใช้สำหรับการเทียบเคียงเพื่อใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดีในการการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้สามารถเข้าใจ การเกิดความเครียด ความเค้น อุณหภูมิที่เกิดขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกน แรงบิด รวมถึงลักษณะการไหลตัวของวัสดุที่ถูกเจาะอีกด้วย (Miller et al)

ในการวิจัยนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS ซึ่งใช้ระบบการคำนวณ แบบ DYNAMIC /EXPLICIT เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเทอร์โม-กลศาสตร์ของกระบวนการเจาะโดยแรง

เสียดทาน เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัย ความเร็วรอบและปัจจัยอัตราป้อนที่มีผลต่อการเกิดแรงบิด แรงกด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยแบบจำลอง ไฟไนต์อีลิเมนต์ ของกระบวนการเจาะแบบโดยใช้เสียดทานได้รับการพัฒนาและประกอบด้วยชิ้นงานและเครื่องมือเจาะได้ตามลำดับดังต่อไปนี้

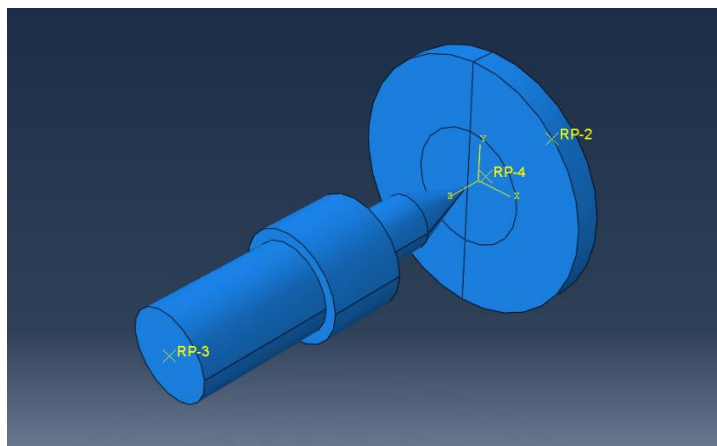
ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ชิ้นงานและเครื่องมือเจาะ ดังแสดงในภาพที่ 3.22
2. ทำการ Import เครื่องมือเจาะและชิ้นงานที่ถูกสร้างจาก โปรแกรม CAD เข้าสู่โปรแกรม



ภาพที่ 3.22 ภาพอุปกรณ์เจาะและชิ้นงานที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรมช่วยในการออกแบบ

3. ทำการปรับตำแหน่งของเครื่องมือเจาะและชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับการทดลองจริงดังแสดงในภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 การปรับตำแหน่งของเครื่องมือเจาะและชิ้นงาน

4. กำหนดค่าคุณสมบัติทั้งของวัสดุเครื่องมือเจาะและชิ้นงาน

ชิ้นงาน แผ่นวัสดุไทเทเนียม Ti-6Al-4V จะถูกกำหนดให้เป็นวัสดุที่เปลี่ยนรูปได้ และเป็นวัสดุที่มีการกระจัดและระดับอุณหภูมิอิสระ ชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นแบบจำลองวัสดุที่มีคุณสมบัติพลาสติก Johnson-Cook elastic-plastic ซึ่งความเสียหายของวัสดุจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราความเครียด โดยชิ้นงานและเครื่องมือเจาะจะถูกกำหนดให้เป็นการสัมผัสกันแบบ Frictional sliding โดยชิ้นงานถือว่าเปลี่ยนรูปได้ และเครื่องมือเจาะจะถูกกำหนดให้มีสถานะไม่เกิดการเปลี่ยนรูป

โดยในการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของจากกระบวนการเป็นการเปลี่ยนรูปที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุ Ti-6Al-4 V ที่ใช้ในการจำลองบางส่วน จะต้องแปรผันไปตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ได้แก่ คุณสมบัติด้านค่า Conductivity ค่า Young's Modulus ค่า Expansion Coeff และค่า Density ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ถึง ตารางที่ 3.6 (H S Park 2018) และค่าพารามิเตอร์ของ Johnson-Cook ของวัสดุ Ti-6Al-4 V ที่ใช้สำหรับการจำลองกระบวนการเจาะจะแสดงในตารางที่ 3.7 (Dehghan 2020)

ตารางที่ 3.3 สมบัติค่าความเหนี่ยวนำความร้อน (Heat Conductivity) ของวัสดุ ไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V

ค่าความเหนี่ยวนำความร้อน	อุณหภูมิ
7	298.15
7.45	373.15
8.75	573.15
20.2	1173.15
21	1373.15
25.8	1773.15
27	1873.15
83.5	1973.15
83.5	2073.15

ตารางที่ 3.4 สมบัติความหนาแน่น (Density) ของวัสดุ ไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V(Mg/m³)

ความหนาแน่น	อุณหภูมิ
4.42E-09	298.15
4.41E-09	373.15
4.38E-09	573.15
4.29E-09	1173.15
4.27E-09	1373.15
4.21E-09	1773.15
4.20E-09	1873.15
3.89E-09	1973.15
3.82E-09	2073.15

ตารางที่ 3.5 สมบัติมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของวัสดุไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V (Mpa)

มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น	อัตราส่วนปัวซอง	อุณหภูมิ
114700	0.32	298.15
105300	0.33	473.15
89000	0.34	773.15
75000	0.35	1073.15
72300	0.38	1268.15
64600	0.39	1473.15
56800	0.4	1673.15
45000	0.41	1923.15

ตารางที่ 3.6 สมบัติความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของวัสดุไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V (J/kg.K)

ความร้อนจำเพาะ	อุณหภูมิ
546000000	298.15
562000000	373.15
584000000	573.15
734000000	1173.15
660000000	1373.15
732000000	1773.15
750000000	1873.15
831000000	1973.15
831000000	2073.15

ตารางที่ 3.7 สมบัติสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Expantion Coeff) ของวัสดุไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V (10-6/K)

สัมประสิทธิ์การขยายตัว	อุณหภูมิ
2.90E-06	298.15
3.40E-06	473.15
4.40E-06	773.15
5.70E-06	1073.15
6.90E-06	1268.15
7.65E-06	1473.15
7.90E-06	1673.15
8.60E-06	1923.15
9.00E-06	2173.15

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ Johnson-Cook ของวัสดุ ไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V

Parameter	Units used in ABAQUS	Value
Melting temperature, θ_{melt}	K	1843.15
Transition temperature, θ_{tran}	K	298.15
Specific heat capacity	J/kg.K	570
Thermal expansion, α_L	10-6/K	9.1
Initial yield strength, A	MPa	600,1000
Hardening modulus, B	MPa	780
Strain hardening exponent, n	-	0.47
Thermal softening exponent, m	-	1.02
Strain rate constant, C	-	0.033
Reference strain rate, $\dot{\epsilon}_0$	1/s	1

การกำหนดค่า ปัจจัย Johnson-Cook material damage ที่ใช้ในการจำลองมีค่าดังต่อไปนี้

$$: d_1 = 2.22, d_2 = .0, d_3 = -0.0, d_4 = 0, d_5 = 0$$

ในส่วน of เครื่องมือ จะถือว่ามีความคงรูป ไม่มีการสูญเสียหรือได้รับความร้อน ดังนั้น พารามิเตอร์คุณสมบัติของวัสดุจึงไม่จำเป็นเนื่องจากไม่มีตัวเลือกในการป้อนข้อมูล

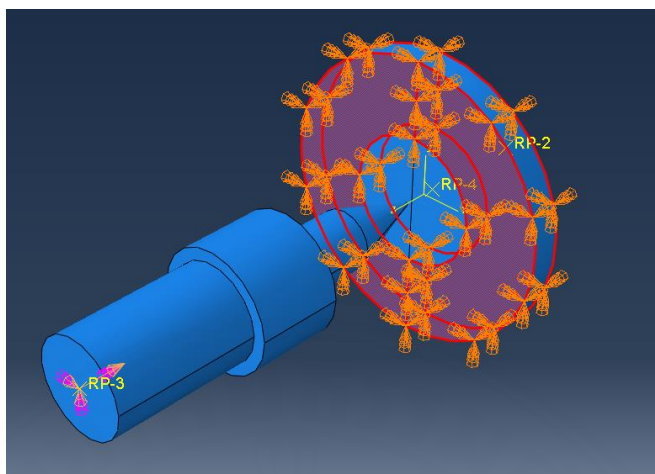
5. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของทั้งเครื่องมือและชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 3.24

ในงานวิจัยนี้ จะกำหนดให้อุปกรณ์เจาะมีเงื่อนไขในการจำลองเป็นแบบไม่มีการเปลี่ยนรูป เพื่อให้ทุลักซาคความสามารถของวัตถุที่ถูกจำลองได้โดยไม่มีการลดประสิทธิภาพและวัสดุสามารถเกิดการเปลี่ยนรูปทรงได้ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบทางกลและทางความร้อนที่มีผลต่อแรงกระทำและรูปทรงทางกายภาพที่เกิดขึ้น และมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เจาะ และตำแหน่งการยึดของชิ้นงานที่เหมาะสม และใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยในที่นี้จะกำหนดให้ ชิ้นงานมีการจับยึดที่พื้นผิวด้านนอกทั้งด้านบนและด้านล่างโดยมีอุณหภูมิแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส โดยชิ้นงานจะถูกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้จากในทุกทิศทาง และอุปกรณ์เจาะจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนที่ได้ในสองลักษณะ คือ การหมุนรอบแนวแกน(RPM) และการเคลื่อนที่ในแนวแกน (Feed) เพื่อจำลองการเจาะโดยใช้ ชุดปัจจัยการจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยทั้งอุปกรณ์เจาะและชิ้นงานจะมีอุณหภูมิตั้งต้นเท่ากับ 25 องศาเซลเซียสด้วยเช่นกัน

โดยเงื่อนไขขอบเขตจะถูกกำหนดดังนี้:

- โดยพื้นผิวด้านนอกของชิ้นงานจะถูกกำหนดให้อยู่กับที่ในทุกองค์ประกอบ
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงานตั้งไว้ที่ 298 K (25°C)
- ในการจำลองของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน อุปกรณ์เจาะจะถูก

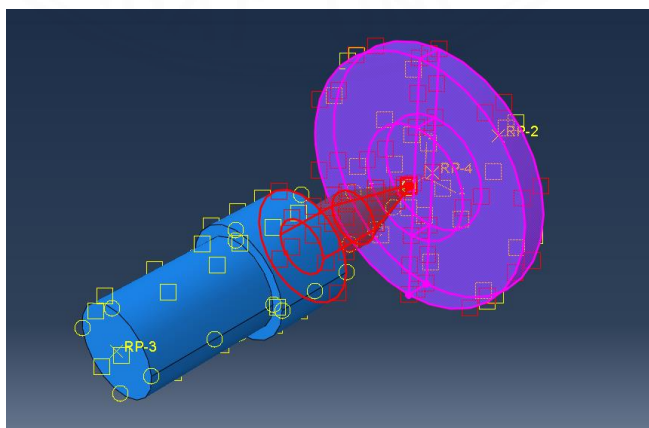
ควบคุมให้เคลื่อนที่ด้วยปัจจัยที่กำหนดคือ ความเร็วรอบและอัตราป้อน



ภาพที่ 3.24 การกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเจาะและการจับยึดชิ้นงาน

6. กำหนดตำแหน่งการเชื่อมต่อของเครื่องมือเจาะและชิ้นงาน.

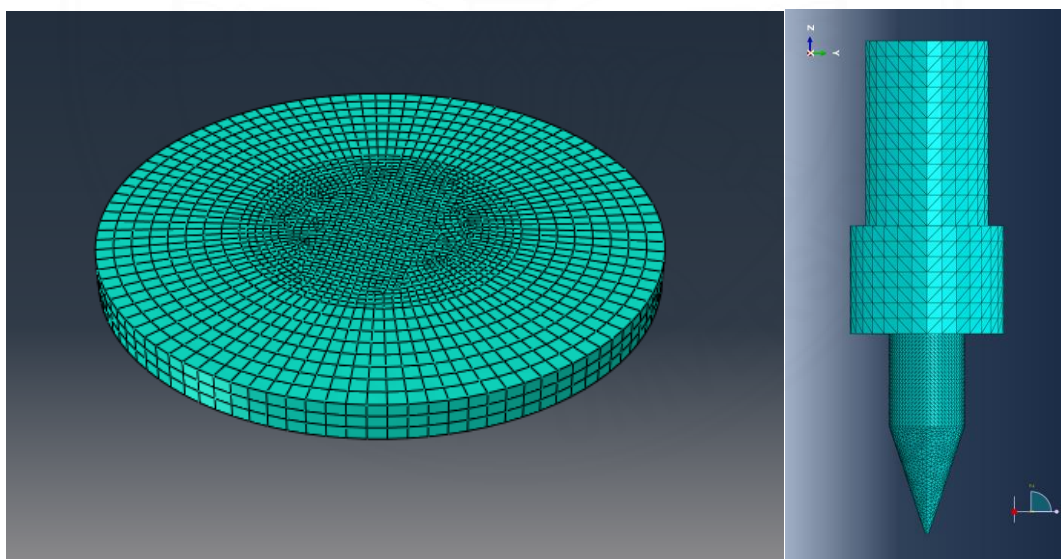
การจำลองของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นค่อนข้างมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงมีการตั้งสมมติฐานที่ทำให้ง่ายขึ้นหลายประการกับอุณหภูมิพื้นผิว ในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อุณหภูมิเริ่มต้นสำหรับชิ้นงานและเครื่องมือเจาะจะถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ที่ 25 °C และสันนิษฐานว่า 100% ของพลังงานที่เกิดจากแรงเสียดทานจะเปลี่ยนเป็นความร้อน และ 90% ของความร้อนจะถูกส่งไปยังชิ้นงาน โดยความร้อนจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในส่วนที่การสัมผัสกันกับชิ้นงานทั้งในด้านบนและด้านล่าง และเนื่องจากเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ดังนั้นจึงกำหนด ให้ 90% ของพลังงานจะถูกแปลงเป็นความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 การกำหนดพื้นที่การเชื่อมต่อ

7. การสร้าง mesh ให้กับ เครื่องมือเจาะและชิ้นงาน

ในการสร้างแบบจำลองนี้ จะมีการสร้าง Mesh สองประเภท โดยอุปกรณ์เจาะในบริเวณทรงกระบอก ทรงกรวย และศูนย์กลาง จะใช้ Mesh แบบ Coupled temperature-displacement elements C3 D4 T (4-node thermally coupled tetrahedron, linear displacement and temperature) โดยขนาดของ Mesh ของอุปกรณ์เจาะจะมีขนาดดังต่อไปนี้ คือ ชิ้นส่วนบนส่วนด้ามและปากจะมีขนาด Mesh 2 มม. และบนพื้นที่ทรงกระบอก ทรงกรวย และตรงกลางจะมีขนาดคือ 0.75 มม. และเลือก element type แบบ C3D4T และชิ้นงานจะมีรูปทรงเป็นแผ่นทรงกลมรัศมี 25 มม. และความหนา 2.5 มม. จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบ mesh แบบ C3D8RT (8-node thermally coupled brick, trilinear displacement and temperature, reduced integration, hourglass control) โดยจะกำหนดให้ชิ้นงาน มีขนาดของ Mesh ที่หนาแน่นที่จุดศูนย์กลาง ของชิ้นงาน และองค์ประกอบ Mesh ภายในชิ้นงานทั้งหมดจะมีรูปทรงเป็นรูปวงกลม โดยใช้ Mesh ที่มีขนาดชิ้นส่วน 0.25 มม. บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานในบริเวณที่เครื่องมือเจาะทะลุผ่านวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 การกำหนด Mesh ให้กับ เครื่องมือเจาะและชิ้นงาน

8. ทำการสร้างงานและส่งงานเพื่อทำการจำลอง และรอผลการจำลองดังแสดงในภาพที่ 3.27

temp_testF80S7000_2mesh0_25 Monitor

Job: temp_testF80S7000_2mesh0_25 Status: Completed

Step	Increment	Total Time	CPU Time	Step Time	Stable Time Inc	Kinetic Energy	Total Energy
1	95332	9.50601	3932.6	9.50601	0.000100037	11691.6	155835
1	95817	9.55458	3952.5	9.55458	0.000100037	11690.4	155835
1	96301	9.60304	3971.3	9.60304	0.000100002	11689.6	155835
1	96785	9.65151	3991.3	9.65151	0.000100037	11689.4	155835
1	97270	9.7	4011.1	9.7	0.000100036	11689	155835

Log Errors **Warnings** Output Data File Message File Status File

Completed: Abaqus/explicit

Completed: Fri Feb 04 13:47:38 2022

Search Text

Text to find: ☐ Match case ⌵ Next ⌴ Previous

Kill Dismiss

ภาพที่ 3.27 การสร้างงานและส่งงานเพื่อทำการจำลอง

บทที่ 4

ความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

การทดลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้อุปกรณ์เจาะที่ทำจากวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบด์กับวัสดุแผ่นไทเทเนียมอัลลอย Ti-6Al-4V เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อ แรงกด แรงบิด และอุณหภูมิ ที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะ ทำการทดลองเจาะโดยใช้เครื่องกัด CNC โดยทำการปรับค่าปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน และทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้รับผลกระทบ อันได้แก่ ลักษณะความสมบูรณ์ของรูเจาะ ค่าความแข็งผิวรูเจาะ ลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาของพื้นผิวรูเจาะชิ้นงาน โดยผลจากการทดลองดังกล่าวแบ่งเป็นขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

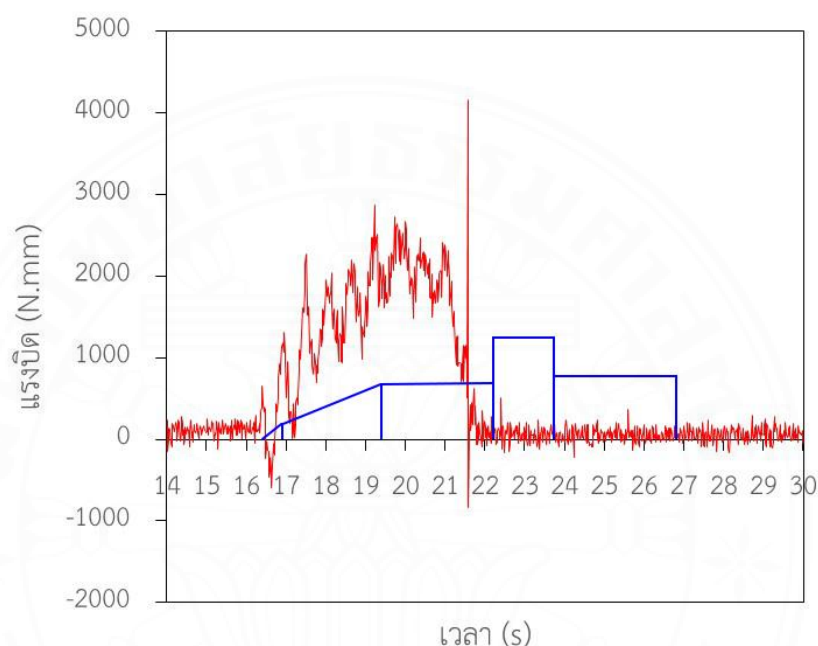
- 4.1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
- 4.2 แรงกดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
- 4.3 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
- 4.4 ความแข็งผิวรูเจาะ
- 4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V
- 4.6 ความยาวของปลอกรูเจาะที่เกิดขึ้นจากการทดลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน
- 4.7 คุณลักษณะเฉพาะของรูที่ถูกเจาะด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

การทดลองถูกดำเนินการภายใต้ปัจจัยควบคุมที่กำหนด โดยใช้เครื่องกัด CNC โดยทำการปรับตั้งค่า ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที) โดยการทดลองนี้ได้กำหนดตัวแปรต้น ได้แก่ 1. ความเร็วรอบของอุปกรณ์เจาะที่ 5 ระดับ ได้แก่ 2,500 3,500 4,500 6,000 และ 7,000 รอบต่อนาที และ 2. อัตราป้อนที่ 3 ระดับ ได้แก่ 80 100 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที

4.1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลแรงบิดที่ได้จากการทดลองจะพบว่าในหนึ่งรอบการตัดเฉือนของเครื่องมือเจาะจะเกิดแรงบิดในลักษณะคลื่นไซน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่และหมุนตัวของอุปกรณ์เจาะ โดยหนึ่งรอบการหมุนของเครื่องมือเจาะ ลักษณะแรงบิดที่เกิดขึ้นจะพบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุปกรณ์เจาะหมุนตัวตกลงไปบนเนื้อวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มแรงบิดที่เพิ่มขึ้นนั้นก็มิลักษณะของแรงที่เพิ่มขึ้นและลดลงเป็นคาบ จนกระทั่ง อุปกรณ์เจาะกุดลงในเนื้อวัสดุจนทะลุ แรงบิดที่เกิดขึ้นจึง

ค่อยๆ ลดลง และแรงบิดก็จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งจากการเมื่อำของอุปกรณ์เจาะเข้าสู่ช่วงการกดเนื้อวัสดุที่ถูกดันขึ้นสู่ด้านบน โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงบิดที่เกิดขึ้น นั้นเกิดจากการหลอมละลายของตัวขึ้นทดสอบไปยึดเกาะยังอุปกรณ์เจาะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวตามแนวเส้นรอบวงจนทำให้แรงบิดมีลักษณะตามภาพที่ 4.1

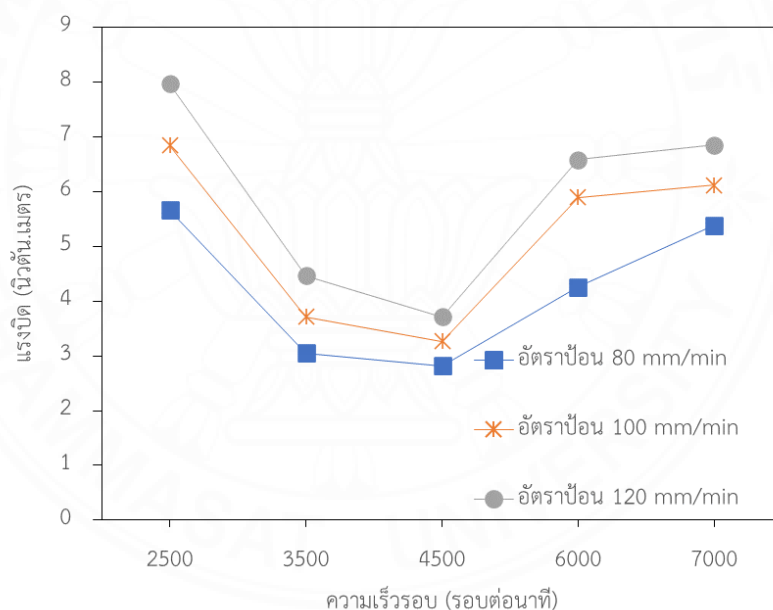


ภาพที่ 4.1 แรงบิดที่เกิดขึ้นตามการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เจาะขณะทำการทดลอง

จากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 4.2 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบตามอัตราป้อนที่กำหนด คือ 80 100 120 มิลลิเมตรต่อนาที สามารถสังเกตได้ว่าค่าแรงบิดมีค่าที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ เพิ่มขึ้นจาก 2,500 เป็น 4,500 รอบต่อนาที และแรงบิดจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 4,500 เป็น 7,500 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที จะมีค่าที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจาก เกิดความร้อนขึ้นจากการเสียดสีกันระหว่างเครื่องมือเจาะและวัสดุ โดยความร้อนนี้จะทำให้พื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียมเกิดการอ่อนตัว ทำให้อุปกรณ์เจาะสามารถหมุนตัวผ่านวัสดุได้โดยมีแรงต้านที่น้อยลง ส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าที่ต่ำ (Miller 2006) อย่างไรก็ตามการเจาะโดยใช้ปัจจัยการเจาะด้วยความเร็วรอบ 4,500 - 7,000 รอบต่อนาที ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างสองพื้นผิวจะไม่เพียงทำให้แผ่นไทเทเนียมอ่อนลง แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นยังทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งกึ่ง

ของเหลวจนทำให้เกิดการยึดติดกันระหว่างวัสดุกับเครื่องมือเจาะทำให้เครื่องมือเจาะเกิดความเสียหายในส่วนปลาย และส่งผลให้แรงบิดเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้เมื่อใช้อัตราป้อนที่สูงขึ้นจะส่งผลให้แรงบิดมีค่าที่สูงขึ้นโดยมีสาเหตุจากเมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นเครื่องมือเจาะก็จะเคลื่อนที่เพื่อเจาะชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมเร็วขึ้น ทำให้เวลาที่เครื่องมือเจาะและวัสดุเกิดการเสียดสีกันมีเวลาจำกัด ในการสร้างความร้อน ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้อัตราป้อนต่ำ เครื่องมือเจาะจะใช้เวลาานกว่าในการทำให้กระบวนการให้เสร็จสมบูรณ์ ดังนั้น จึงเนื่องจากมีเวลาเพิ่มขึ้นทำให้เครื่องมือเจาะและวัสดุเกิดการเสียดสีกันได้ในเวลานานขึ้น ทำให้สามารถสร้างความร้อนได้มากขึ้น (Kuan-Yu 2018) ดังนั้น เมื่ออัตราป้อนงานลดลง จะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีเพิ่มขึ้นนี้ และช่วยลดความเครียดในการไหลของชิ้นงาน โดยแรงบิดต่ำสุดที่ได้เกิดขึ้นจากการทดลองเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อน คือ 4500 รอบต่อนาทีและ 80 มิลลิเมตรต่อนาที

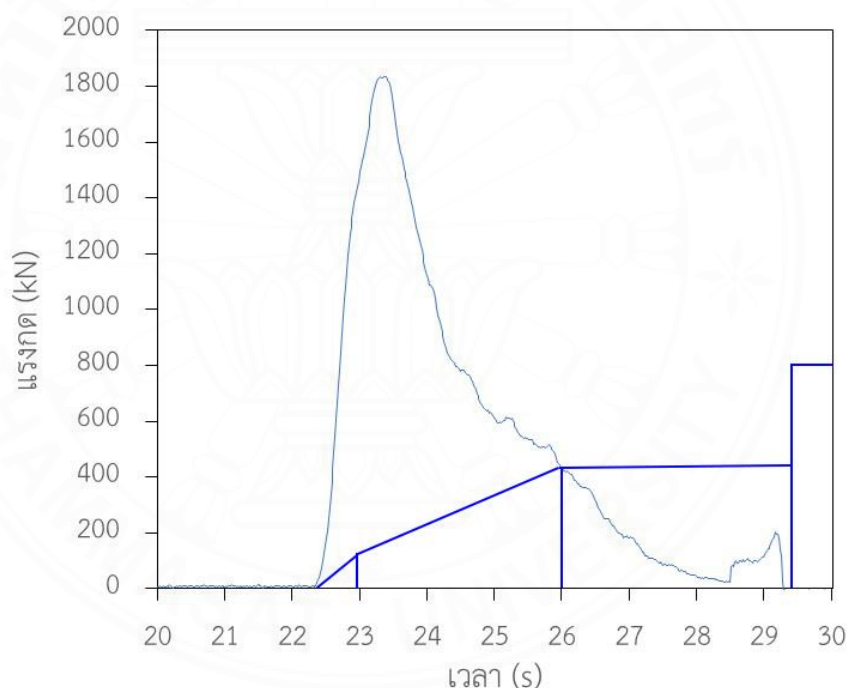


ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ

4.2 แรงกดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

จากการทดลองเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน พบว่าลักษณะของแรงกด จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุปกรณ์เจาะที่ถูกกำหนดให้หมุนด้วยความเร็วที่กำหนด เคลื่อนที่ตกลงสู่เนื้อวัสดุในแนวตั้ง ทำให้แรงกดที่เกิดขึ้น ในช่วงแรกจะมีลักษณะที่สูง เนื่องจากระยะเวลาในการเสียดสีกัน

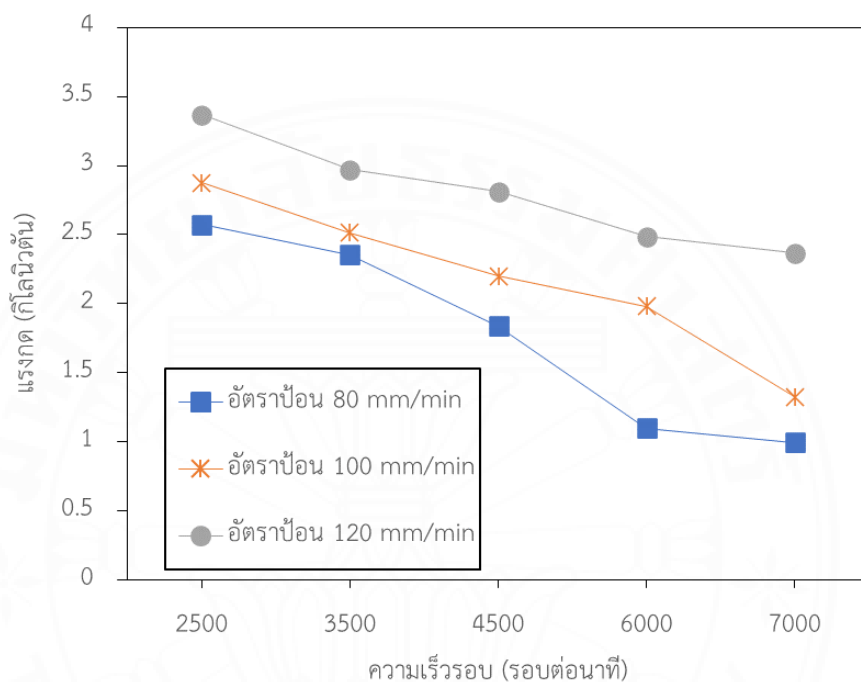
ระหว่างอุปกรณ์เจาะและวัสดุยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดความร้อนที่จะทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัว แต่หลังจากเกิดการเสียดสีกันระหว่างอุปกรณ์เจาะกับวัสดุ เป็นระยะเวลาที่เพียงพอ จนทำให้วัสดุเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นจนทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัว แรงที่เกิดขึ้นจะเริ่มมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเมื่ออุปกรณ์เจาะสามารถดันตัวเองเข้าสู่เนื้อวัสดุและทำให้เนื้อของวัสดุเกิดการไหลตัวขึ้นสู่ด้านบนจนเกิดปฏิกิริยาลักษณะคล้ายวงแหวนบริเวณปากกูและดันตัวลงสู่ด้านล่างจนเกิดปลอกกูและบ่าของทูลจะทำให้การกดเนื้อวัสดุที่เกิดการไหลตัวขึ้นสู่ด้านบน ให้มีลักษณะแบนราบกับเนื้อวัสดุบริเวณปากกูเจาะตามความสูงที่กำหนด ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นผลทำให้เกิดแรงกดเพิ่มขึ้นสูงอีกครั้ง และเมื่ออุปกรณ์เจาะกดวงแหวนให้มีการยุบตัวจนได้ความสูงตามที่กำหนดแล้วนั้น อุปกรณ์เจาะก็จะถูกยกขึ้น จนแรงที่เกิดขึ้นหมดไป ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แรงกดที่เกิดขึ้นตามการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เจาะขณะทำการทดลอง

จากผลการทดลองการเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานเพื่อหาแรงกดที่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ที่แสดงให้เห็นว่าปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ มีผลกระทบต่อแรงกดที่เกิดขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าแรงกดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้น และจะมีค่าที่ลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น (Krasauskas 2011) ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้พื้นผิวของทูลและวัสดุเกิดการเสียดสีกันในจำนวนรอบที่มากขึ้น จนเกิดอุณหภูมิสูงขึ้น (Dehghan 2018, Demir 2012, Miller 2005) ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้

วัสดุเกิดการอ่อนตัวจนทำให้เครื่องมือเจาะสามารถเจาะผ่านชิ้นงาน โดยเกิดแรงกดที่มีค่าน้อยลงและนอกจากนี้แสดงให้เห็นด้วยว่า เมื่ออัตราป้อนที่ลดลงจะช่วยลดแรงกด ด้วยเนื่องจากอัตราป้อนที่ลดลงจะทำให้การอัดตัวกันระหว่างเครื่องมือเจาะและวัสดุมีค่าที่น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kuan-Yu 2018)



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ

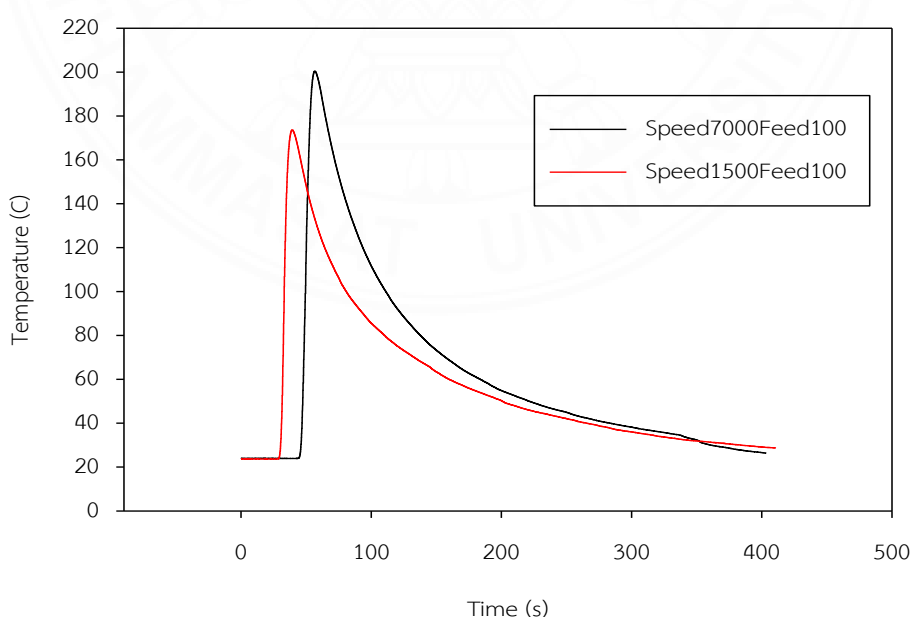
4.3 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

จากการทดลองวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยบริเวณขอบรูเจาะดังแสดงในรูปที่ 3.13 พบว่า ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในจุดที่กำหนด จากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ในการเจาะวัสดุไทเทเนียมอัลลอย Ti-6Al-4V พบว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลองตามปัจจัยการทดลองที่กำหนดพบว่า มีค่าที่น้อยกว่าอุณหภูมิที่ทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งถึงของเหลวจนเกิดการไหลตัวเปลี่ยนรูปร่างนั้น เนื่องจากจุดที่ทำการวัดนั้นเป็นจุดที่ไม่ได้สัมผัสการเสียดสีที่เกิดขึ้นจริงระหว่างอุปกรณ์เจาะและวัสดุ อุณหภูมิที่วัดได้เป็นอุณหภูมิที่ถูกถ่ายเทจากจุดที่เกิดการเสียดสีจริงจึงทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าที่น้อยกว่าความเป็นจริง แต่อย่างไรก็ตามจากผลการ

ทดลองก็ทำให้พบว่า การเพิ่มความเร็วรอบในการทดลองส่งผลต่ออุณหภูมิของวัสดุที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะด้วย

โดยเมื่ออุปกรณ์เจาะที่ถูกกำหนดให้หมุนด้วยความเร็วรอบตามที่กำหนด เคลื่อนที่ตกลงสู่เนื้อวัสดุในแนวตั้ง จนทำให้เกิดการเสียดสีกันจนเกิดความร้อน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัว และเมื่ออุปกรณ์เจาะ เจาะทะลุความหนาของวัสดุทำให้อุปกรณ์เจาะไม่เกิดการอัดตัวกับวัสดุทำให้เกิดการเสียดสีกันที่น้อยลงจนทำให้อุณหภูมิในจุดที่ทำการวัดค่อยๆ ลดลงตัวลงจนมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิปกติ

จากภาพที่ 4.5 ที่แสดงลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในจุดที่กำหนด ที่ถูกเจาะโดยใช้ปัจจัย อัตราป้อนที่ 100 มม./นาที และใช้ความเร็วรอบ ที่ 1500 และ 7000 รอบต่อนาที โดยใช้พบว่าเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบที่แตกต่างกัน ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าที่แตกต่างกันโดยเมื่อทำการเจาะโดยใช้ปัจจัยความเร็วรอบที่สูง ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่สูงกว่าการใช้ปัจจัยความเร็วรอบที่ต่ำกว่า โดยการใช้ปัจจัยในการเจาะ ความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที จะได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที จะได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดจากการใช้ ค่าความเร็วรอบที่สูงขึ้นนั้น เนื่องจากการใช้ความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้จำนวนรอบที่อุปกรณ์เจาะและวัสดุเกิดการเสียดสีกันในจำนวนรอบที่มากขึ้น ในเวลาที่เท่ากัน ทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดสีได้สูงขึ้น



ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

4.4 การสึกหรอของอุปกรณ์เจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

จากการทดลองเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานกับวัสดุโลหะผสม Ti-6Al-4V โดยใช้ปัจจัย อัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยความเร็วรอบที่แตกต่างกันคือ 2500 3500 4500 6000 และ 7000 รอบต่อนาที เมื่อทำการพิจารณาสภาพของอุปกรณ์เจาะหลังจากการเจาะด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที อุปกรณ์เจาะยังมีสภาพสมบูรณ์ไม่พบการแตกบิ่นแต่อย่างใดเกิดเพียงรอยไหม้ที่เกิดจากการเสียดทานกับชิ้นงาน และเมื่อทำการเจาะซ้ำด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที สภาพอุปกรณ์เจาะยังสมบูรณ์ไม่พบการแตกบิ่นแต่อย่างใดเกิดเพียงรอยไหม้ที่เกิดจากการเสียดทานกับชิ้นงานและมีเนื้อไทเทเนียมติดบริเวณปลายอุปกรณ์เจาะเล็กน้อยและ เมื่อทำการเจาะด้วยความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาที พบว่าอุปกรณ์เจาะมีเนื้อโลหะเชื่อมติดที่ปลายเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการเจาะด้วยเจาะด้วยความเร็วรอบ 6000 รอบต่อนาที พบว่าอุปกรณ์เจาะเริ่มมีเนื้อวัสดุยึดติดกับอุปกรณ์เจาะเพิ่มขึ้นและเกิดการเสีรูปทรงโดยส่วนที่ส่วนปลายของอุปกรณ์เจาะมีการหลุดของเนื้อวัสดุของทูลและเมื่อทำการเจาะด้วยความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที พบว่าอุปกรณ์เจาะเกิดการเสียหายอย่างรุนแรงคือ เกิดการสูญเสียเนื้อของทูลจนเสีรูปทรงจนไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีก ดังแสดงในตารางที่ 4.1

จากลักษณะของการเกิดการสึกหรอ ดังที่กล่าวไปแล้วนั้น เมื่อพิจารณาถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแล้วนั้นทำให้พบว่ามึลักษณะการเกิดความสึกหรอกับอุปกรณ์เจาะที่ใช้ในการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานใน 2 ลักษณะ นั่นก็คือ การสึกหรอที่เกิดจากการเชื่อมติดหรือยึดติดกับเนื้อโลหะและการสึกหรอจากการเสียดสี โดยสามารถอธิบายลักษณะการสึกหรอในแต่ละลักษณะได้ดังนี้

การสึกหรอจากการเสียดสีในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานจะเกิดขึ้นที่บริเวณลำตัวของอุปกรณ์เจาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเกิดความเสียหายเป็นรอยที่เกิดจากการหมุนเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เจาะ นี่คือการรูปแบบการสึกหรอที่เกิดขึ้นเนื่องจาก การเสียดสีกันของอุปกรณ์เจาะกับวัสดุที่เปลี่ยนรูปทรงเป็นรูเจาะในขณะที่วัสดุยังลักษณะที่อ่อนตัวเนื่องจากความร้อน ทำให้วัสดุที่อ่อนตัวจนมีชิ้นส่วนของแข็งขนาดเล็กหลุดเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัสของอุปกรณ์เจาะทำให้เมื่อใช้งานเพิ่มขึ้นหรือใช้งานซ้ำก็จะทำให้บริเวณดังกล่าวมีการเกิดเป็นรอยและเนื้อวัสดุหลุดออก

การสึกหรอที่เกิดจากการเชื่อมติดหรือยึดติดกับเนื้อโลหะ ที่เกิดขึ้นในการเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานนั้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนปลายของอุปกรณ์เจาะที่มีลักษณะทรงกรวย โดยเกิดจากการที่ เนื้อวัสดุเกิดการยึดติดกับอุปกรณ์เจาะในระหว่างทำการเจาะซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยปกติกับกระบวนการดังกล่าวเป็นผลมาจากการเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดอุณหภูมิที่สูงซึ่งเป็นองค์ประกอบรวมที่ทำให้วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์เจาะนั้นเกิดการอ่อนตัวจนเกิดการ

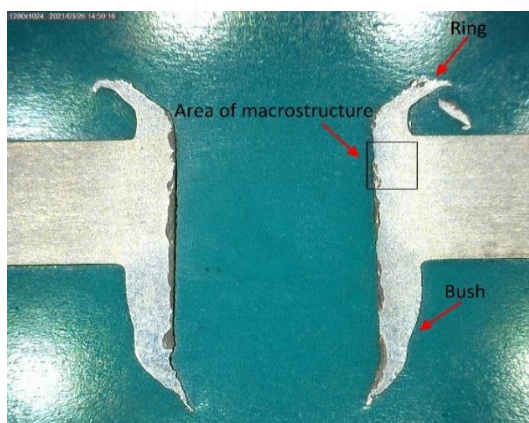
แยกตัวออกจากอุปกรณ์เจาะและเกิดการสูญเสียอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ในส่วนประกอบ โดยการสึกหรอที่เกิดจากการเชื่อมต่อนั้นจะเกิดขึ้นจากการเกิดแรงยึดติดที่สูงหรือเมื่อใดก็ตามอนุภาคของอะตอมเกิดการชิดตัวกัน เมื่อเกิดปรากฏการณ์ดังนี้ แรงที่เกิดจากการเชื่อมติด จะมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงทางแนวเฉือนในวัสดุ จนทำให้เกิดการสึกหรอของอุปกรณ์ในลักษณะดังกล่าว

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของทุลหลังทำการทดลองเจาะโดยใช้ความเร็วรอบที่แตกต่างกัน

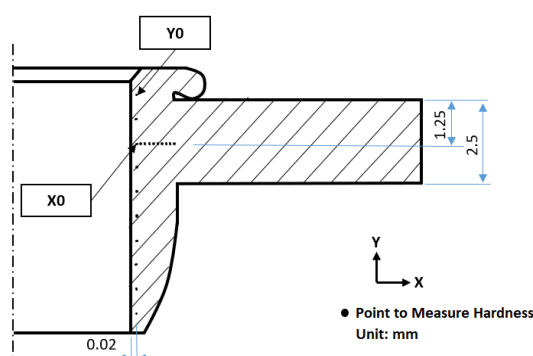
การเจาะด้วยความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ลักษณะของทุลหลังการเจาะ
2500	
3500	
4500	
6000	
7000	

4.5 ผลกระทบของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานที่มีต่อความแข็งผิวรูเจาะ

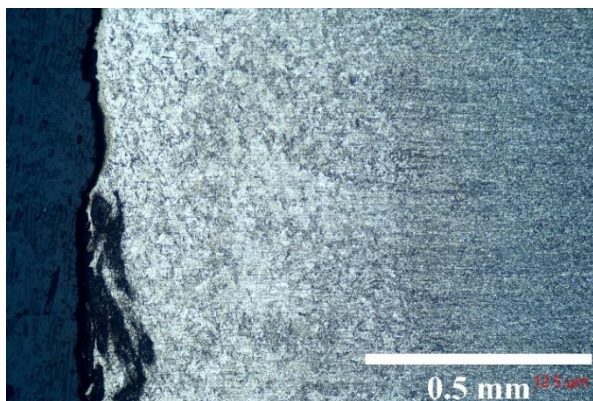
ผู้วิจัยได้ ได้นำชิ้นงานไปทำการตัดครึ่ง จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานให้เรียบเพื่อง่ายต่อการมองเห็นจุดที่วัดค่าความแข็งดังภาพที่ 4.6 และภาพที่ 4.8 ส่วนภาพที่ 4.7 เป็นการแสดงระยะห่างของจุดที่ทำการวัดค่าความแข็ง ซึ่งจุดที่วัดค่านั้นได้แบ่งตำแหน่งพื้นที่การวัดเป็น 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ คือ แนวแกน X และแนวแกน Y โดยที่ทำการวัดค่าความแข็งในแต่ละแนวแกนเป็นจำนวน 10 จุด โดยในแนวแกน Y ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ชิดขอบของรู จะระยะห่างจากขอบรูที่ 0.5 มิลลิเมตรและมีระยะห่างในแต่ละจุด ที่ 0.5 มิลลิเมตร ในส่วนบริเวณ แนวแกน X เป็นการวัดในพื้นที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4.8 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัด 0.1 มิลลิเมตร การทดลองจะ ใช้การทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) ซึ่งมีหน่วยในการวัดค่า คือ HV โดยใช้แรงในการกดหัววัดที่ 100 กรัม และเวลาในการกดหัววัดค่าที่ 5 วินาที



ภาพที่ 4.6 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งในโครงสร้างระดับมาโครจากภาพตัดขวางของรูเจาะแรงเสียดทาน



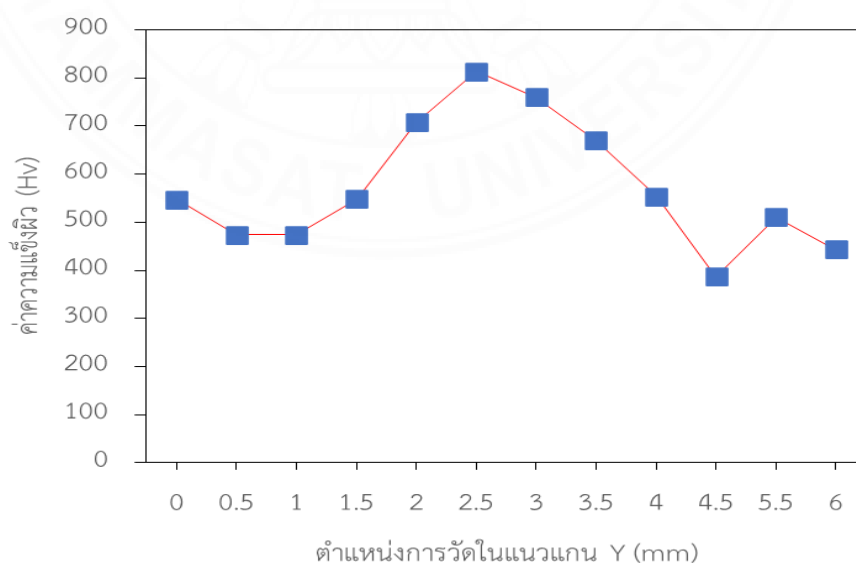
ภาพที่ 4.7 ตำแหน่งในการวัดความแข็งพื้นผิวรูเจาะ



ภาพที่ 4.8 ภาควงของหน้าตัดของรูเจาะแบบเสียดทานของแผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ Ti-6Al-4V
หลังเจาะ

4.5.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งขึ้นงานช่วงระยะ Y

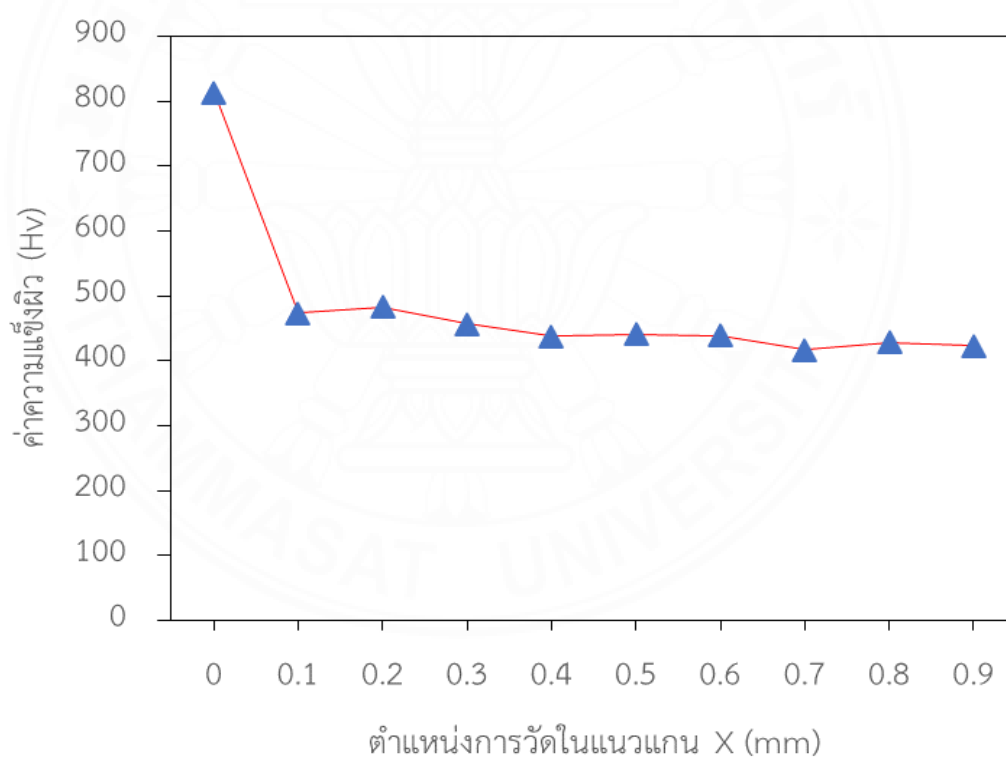
ผลการทดสอบความแข็งที่ภาควงหน้าตัดของรูเจาะในแนวแกน Y เพื่อวัดความแข็งที่พื้นผิวรูเจาะ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ที่แสดงค่าความแข็งบนแกน Y พบว่าค่าความแข็งของ Ti-6Al-4V เพิ่มขึ้นสูงที่สุดที่จะอยู่ในตำแหน่งที่ระยะความลึก 2.5 มม. จากจุดเริ่มต้นในแนวแกน Y เนื่องจากในจุดดังกล่าวเกิดการไหลของเกรนจนเกิดความหนาแน่นของวัสดุในบริเวณดังกล่าวมีค่าที่เพิ่มขึ้นจนส่งผลให้ บริเวณดังกล่าวมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวรูเจาะกับตำแหน่งในการวัดความแข็งพื้นผิวรูเจาะ
ในแนวแกน Y

4.5.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งขึ้นงานช่วงระยะ X

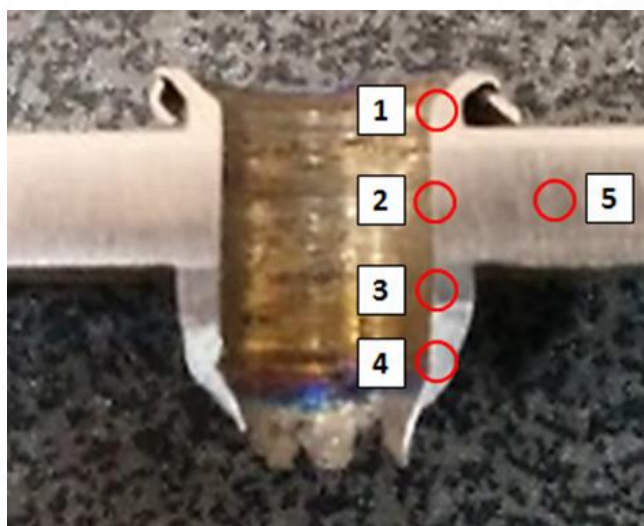
การทดสอบความแข็งที่ภาคหน้าตัดของรูเจาะในแนวแกน X เพื่อวัดความแข็งที่พื้นผิวรูเจาะ ดังแสดงในภาพที่ 4.10 พบว่า จุดที่มีความแข็งสูงสุดอยู่ที่ระยะห่าง 0.02 มม. จากผิวรูเจาะ หรือตำแหน่งที่ 0.00 มม ในแนวแกน X ซึ่งเป็นจุดแรกที่วัดในแนวแกน X โดยพบว่ามีความแข็งสูงกว่าค่าความแข็งปกติของวัสดุ โดยค่าความแข็งเท่ากับ 813.2 HV และเมื่อทำการวัดค่าความแข็งในจุดอื่น ๆ ในระยะที่ห่างจากพื้นผิวรูเจาะที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งก็มีค่าที่ ลดลงจนเหลือค่าความแข็งที่วัดได้เท่ากับค่าความแข็งดั้งเดิมของวัสดุ สิ่งนี้บ่งชี้ว่าในบริเวณที่วัสดุสัมผัสโดยตรงกับเครื่องมือเจาะ ความร้อนจากแรงเสียดทานจนทำให้พื้นผิวของรูเจาะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เราสามารถอธิบายได้ว่า ความแข็งเพิ่มขึ้นที่ผิวรูเจาะเนื่องจากเป็นพื้นที่ ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนและการตกผลึกใหม่ (Boopathi 2017, Eliseev 2017).



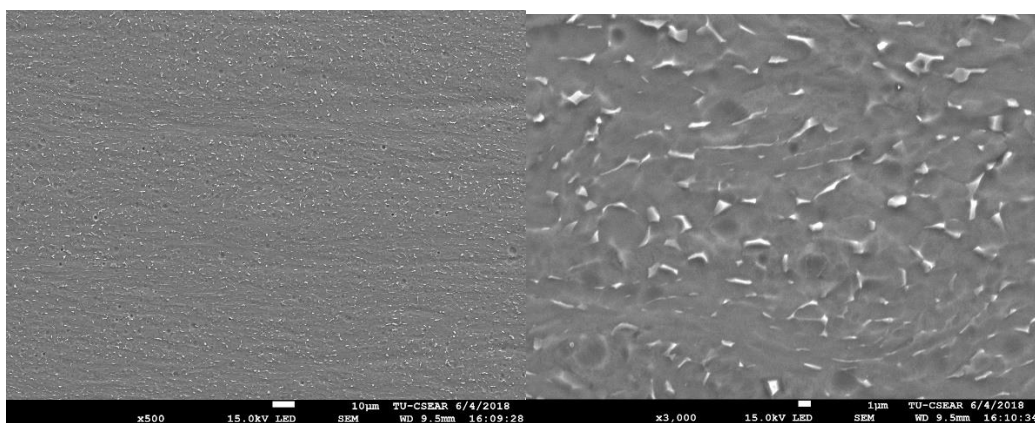
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวรูเจาะกับระยะห่างจากผิวรูเจาะในแนวแกน X

4.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเพื่อเปรียบเทียบถึงลักษณะโครงสร้างของวัสดุไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V เพื่อที่อาจจะช่วยสามารถอธิบายถึงอิทธิพลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจนทำให้เกิดความแตกต่างในเรื่องความแข็งแรงของไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ได้ โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ดังตารางที่ 4.2 โดยใช้ความเร็วรอบในการเจาะที่ 4,500 รอบต่อนาที และอัตราป้อนที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผู้วิจัยทำการกัดกรดชิ้นงานทดสอบด้วยน้ำยาเคมีไฮโรฟลูออริกแอซิด 50% ผสมเข้ากับกรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50% ด้วยเวลาในการกัดกรดคือ 8 วินาที ก่อนที่จะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM ด้วย กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่าตามลำดับตามจุดที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 4.11



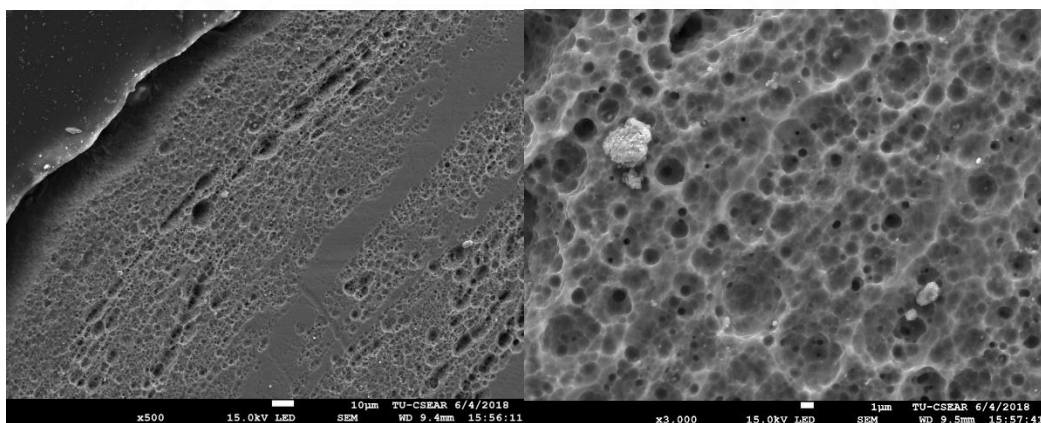
ภาพที่ 4.11 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาควัสดุไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V



(ก) 500 เท่า

(ข) 3000 เท่า

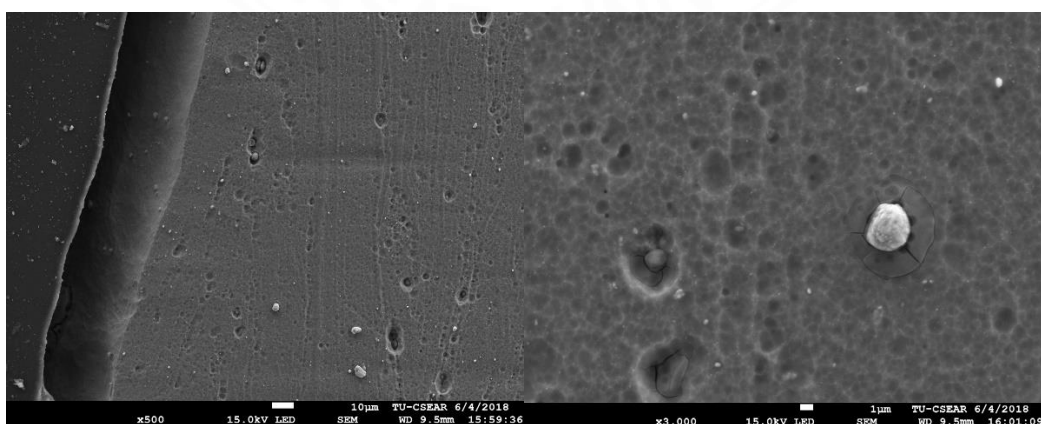
ภาพที่ 4.12 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 5



(ก) 500 เท่า

(ข) 3000 เท่า

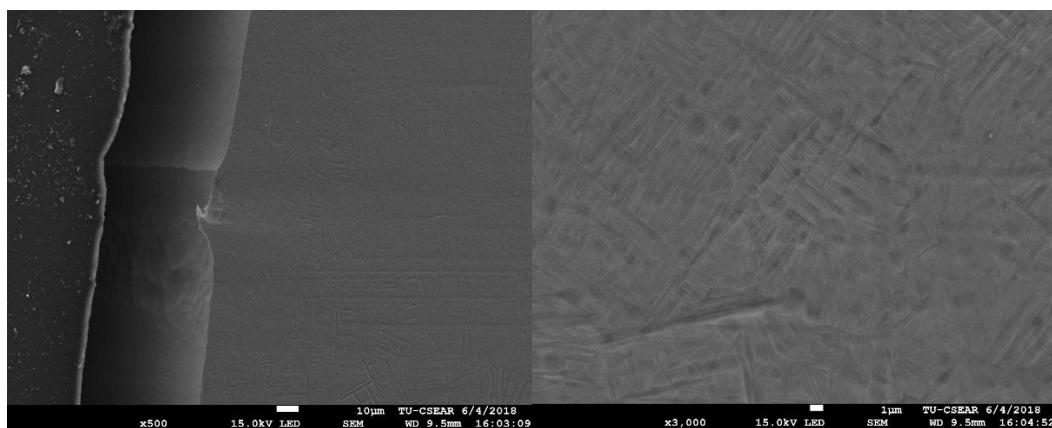
ภาพที่ 4.13 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 1



(ก) 500 เท่า

(ข) 3000 เท่า

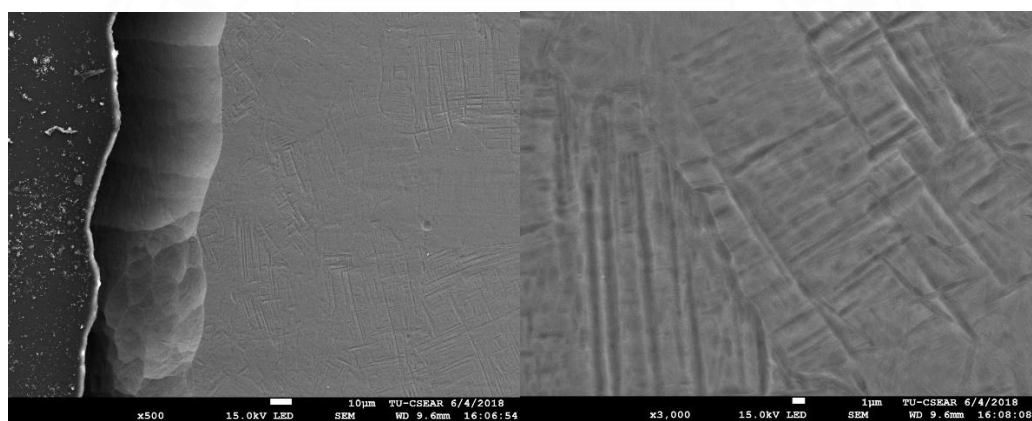
ภาพที่ 4.14 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 2



(ก) 500 เท่า

(ข) 3000 เท่า

ภาพที่ 4.15 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 3



(ก) 500 เท่า

(ข) 3000 เท่า

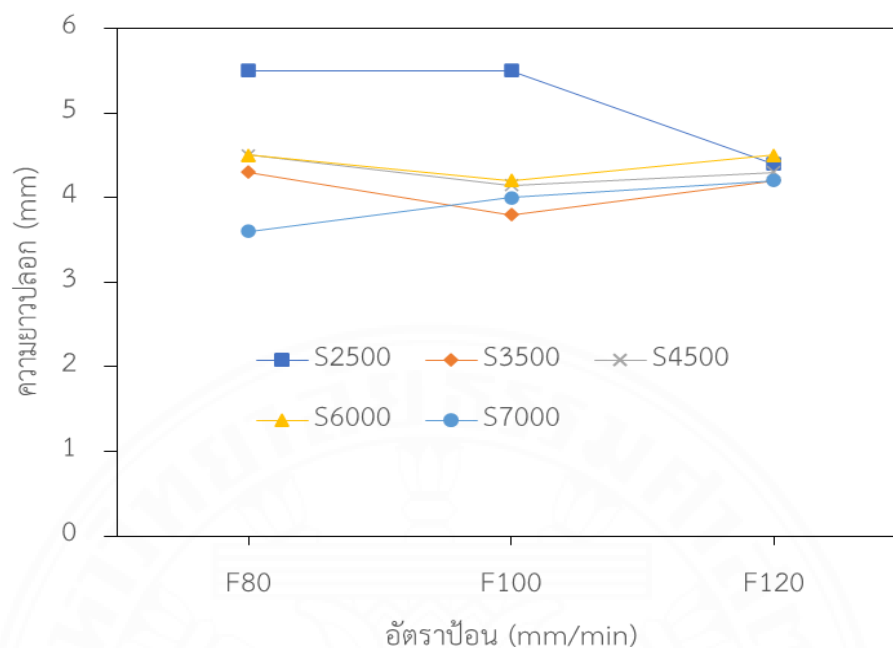
ภาพที่ 4.16 จุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจุดที่ 4

จากภาพที่ 4.11 ที่ได้แสดงภาพตัดขวางของรูเจาะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานกับวัสดุไทเทเนียม Ti-6AL-4V และแสดงตำแหน่งที่ทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนโดยแสดงโครงสร้างจุลภาคของไทเทเนียม Ti-6AL-4V จำนวน 5 ตำแหน่ง โดยภาพที่ 4.12 หรือตำแหน่งที่ 5 จะเป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุก่อนที่จะถูกเจาะจากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าพบเป็นเกรนที่เกิดจากผลึกที่โตไม่เท่ากันในทุกทิศทางในวัสดุพื้นฐาน โดยเมื่อทำการเจาะโดยใช้กระบวนการโดยใช้แรงเสียดทาน จะทำให้วัสดุเกิดความร้อนจากการเสียดสีกันระหว่างอุปกรณ์เจาะกับวัสดุจากผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและไหลตัวขึ้นสู่ปากรู และพบการเกิดช่องว่าง (Void formation) ดังแสดงในภาพ

ที่ 4.13 โดยการเกิดช่องว่างที่เกิดขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีกันระหว่างอุปกรณ์เจาะและวัสดุและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากการที่อุปกรณ์เจาะเคลื่อนที่ออกจากวัสดุก่อนที่วัสดุจะเรียงชิดกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.14 และเมื่อพิจารณาในภาพที่ 4.15 จะพบว่า ขนาดของเกรนในบริเวณดังกล่าวมีขนาดที่หยาบขึ้นซึ่งเป็นผลจากผลกระทบทางความร้อนและความเค้นอัดที่เกิดขึ้นจากการที่อุปกรณ์เจาะอัดตัวกับวัสดุและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเมื่ออุปกรณ์เจาะยกตัวหลังการเจาะ ซึ่งส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดการแข็งของผิวรูเจาะสูงขึ้นกว่าบริเวณอื่น ๆ และเกิดการไหลของเกรนไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเครื่องมือเจาะ เนื่องจากการใช้ความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาที ความร้อนสูงจะเกิดขึ้นที่ส่วนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีกันระหว่างอุปกรณ์เจาะและวัสดุเพียงพอที่จะเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุชิ้นงาน Ti-6AL-4V อยู่ในสภาวะพลาสติกและอ่อนตัวลง โดยในขณะที่บริเวณศูนย์กลางของอุปกรณ์เจาะเคลื่อนที่เข้าสู่วัสดุ Ti-6AL-4V จะมีการตกผลึกซ้ำ ในบริเวณดังกล่าว โดยหลังจากการอุปกรณ์เจาะเคลื่อนที่ถึงบริเวณ center region บริเวณศูนย์กลาง ของบริเวณรูปทรงปรวยและทรงกระบอกของอุปกรณ์เจาะความร้อนที่เกิดขึ้นและส่งเข้าสู่วัสดุ Ti-6AL-4V โครงสร้างเกรนของวัสดุจะถูกยึดไปทางด้านล่าง

4.7 ความยาวของปลอกกูเจาะที่เกิดขึ้นจากการทดลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

จากการทดลองการเจาะภายใต้สภาวะปัจจัยของความเร็รรอบและอัตราป้อนที่กำหนดตาม พบว่า ปลอกของรูเจาะที่เกิดขึ้นจะมีความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปัจจัยอัตราป้อนในการทดลองและในส่วนของการใช้ปัจจัยความเร็รรอบ การใช้ความเร็รรอบที่น้อยลงจะส่งผลปลอกกูเจาะมีความยาวเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.17 โดยการใช้ปัจจัยอัตราป้อนและความเร็รรอบที่ทำให้เกิดปลอกกูที่มีความยาวสูงสุดที่สุด คือ การใช้อัตราป้อนที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และการใช้ปัจจัยความเร็รรอบ 2500 รอบต่อนาที เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดปลอกกูที่มีความยาวสูงสุดในการจำลองคือ 5.5 มิลลิเมตร โดยแสดงให้เห็นว่า ความเร็รรอบที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลให้ความยาวปลอกกูมีขนาดที่เพิ่มขึ้น โดยคาดว่าสาเหตุที่ใช้ความเร็รรอบที่มีค่าต่ำทำให้ปลอกกูเจาะมีความยาวที่เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องการใช้ความเร็รรอบต่ำจะทำให้วัสดุมีอุณหภูมิที่ไม่มากเกินไปทำให้วัสดุยังมีสถานะของแข็งกึ่งของเหลวทำให้เมื่ออุปกรณ์เจาะเคลื่อนที่กดผ่าน วัสดุจึงสามารถไหลตัวขึ้นรูปเป็นปลอกกูเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งต่างจากการใช้ความเร็รรอบที่สูงซึ่งทำให้วัสดุมีอุณหภูมิที่สูงมากจนทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวมากขึ้นทำให้เมื่ออุปกรณ์เจาะกดตัวผ่าน วัสดุซึ่งมีความอ่อนตัวสูงจนทำให้เกิดการอัดตัวเข้ากับผนังของรูเจาะไม่เกิดการไหลตัวขึ้นรูปเป็นปลอกกูเจาะ



ภาพที่ 4.17 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของปลอกูเจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลอง กับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ

4.8 คุณสมบัติเฉพาะของรูที่ถูกเจาะด้วยกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

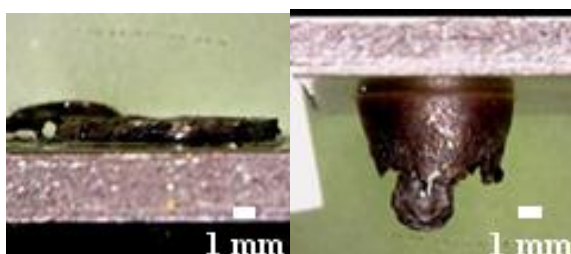
การทดสอบเจาะชิ้นงานโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน เพื่อทำการศึกษารูปทรงของปลอกูและวงแหวนที่เกิดขึ้นที่ปากกูเจาะหลังการเจาะโดยใช้ปัจจัยในการเจาะที่ทำให้เกิดแรงบิดและแรงกดต่ำสุด จากปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ตามที่กำหนด



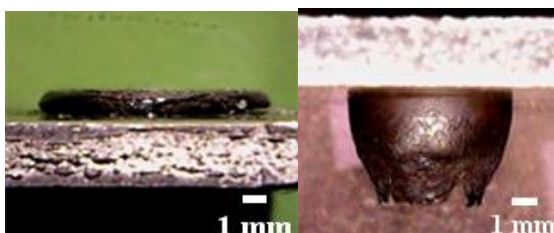
ภาพที่ 4.18 ลักษณะของรูเจาะจากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

ในการที่จะารู้ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานคือมีสภาพปลอกกรุเจาะมีความยาวเพียงพอ และวงแหวนปากกรุที่มีขนาดและรูปทรงที่เหมาะสมนั้นจำเป็นจะต้องมีการกำหนดค่าปัจจัยที่ใช้ในการเจาะที่มีความเหมาะสม โดยภาพที่ 4.19 และ 4.20 แสดงถึงรูปร่างของปลอกกรุและวงแหวนที่เกิดขึ้นที่ปากกรุเจาะ ตามปัจจัยที่กำหนด และเมื่อวิเคราะห์โดยพิจารณาถึงแรงกด แรงบิดที่เกิดขึ้น จากการใช้ปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนที่แตกต่างกัน โดยภาพที่ 4.19 แสดงรูเจาะที่เกิดขึ้นโดยใช้แรงกดน้อยที่สุดซึ่งพบว่า วงแหวนที่ปากกรุเกิดการฉีกขาด ปลอกกรุมีความยาวที่สั้น และเกิดตุ่มโลหะที่ปลายของปลอกกรุ และภาพที่ 4.20 แสดงรูปร่างของรูเจาะที่เกิดแรงบิดน้อยที่สุด ซึ่งมีลักษณะดีที่สุดสำหรับวงแหวนปากกรุและปลอกกรุ ซึ่งมาจากการเจาะโดยใช้ปัจจัยความเร็วรอบที่ 4500 รอบต่อนาที และอัตราป้อน 80 มม./นาท ด้วยปัจจัยการเจาะนี้ ทำให้เกิดแรงบิดและแรงกดอยู่ที่ 2.8160 N/m และ 1.8380 kN ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.4

โดยเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยการเจาะที่มีการใช้ความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาทีและการใช้อัตราการป้อน 80 มม./นาท ที่ทำให้เกิดวงแหวนปากกรุและปลอกกรุที่เหมาะสม พบว่า การใช้ปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนดังกล่าว สร้างความร้อนที่เหมาะสมระหว่างอุปกรณ์เจาะและวัสดุจนทำให้แผ่นไททาเนียมเกิดการอ่อนตัว พอที่อุปกรณ์เจาะสามารถเจาะรูได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องมือเจาะ ดังแสดงในภาพที่ 4.20 เมื่อวัสดุที่อ่อนตัวสามารถไหลไปตามเครื่องมือเจาะได้อย่างง่ายดาย นอกจากนี้เมื่อวัสดุที่อ่อนตัวนี้ก็จะทำให้สามารถไหลตัวขึ้นและลงเพื่อสร้างวงแหวนปากกรุและปลอกกรุได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังส่งผลให้รูเจาะมีลักษณะที่เหมาะสมอีกด้วย แต่เมื่อใช้ความเร็วรอบและอัตราป้อนที่ 7000 รอบต่อนาทีและ 80 มม./นาท ซึ่งจะทำให้ อุปกรณ์เจาะและผิวรู เกิดการสัมผัสกันเป็นเวลานานซึ่งจะทำให้พื้นผิวของรูร้อนสูง ด้วยปรากฏการณ์นี้ จะทำให้วัสดุที่ถูกเจาะอยู่ในสถานะของเหลว ส่งผลให้วัสดุที่มีสถานะของเหลว จำนวนมากไหลตัวติดไปตามหัวเจาะ จนไม่สามารถสร้างปลอกกรุและวงแหวนที่ไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 การเกิดปลอกกรุเจาะและวงแหวนจากการเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยปัจจัยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.20 การเกิดปลอกกรุเจาะและวงแหวนจากการเจาะรูโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยปัจจัยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาที

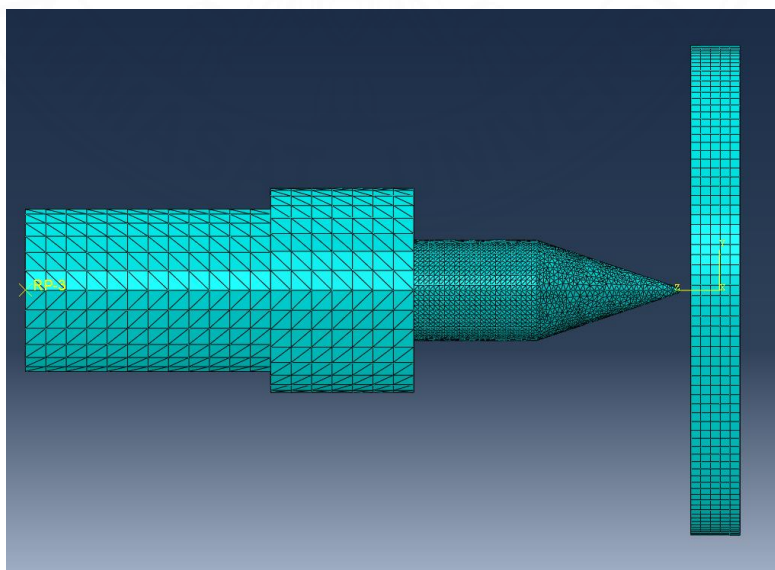


บทที่ 5

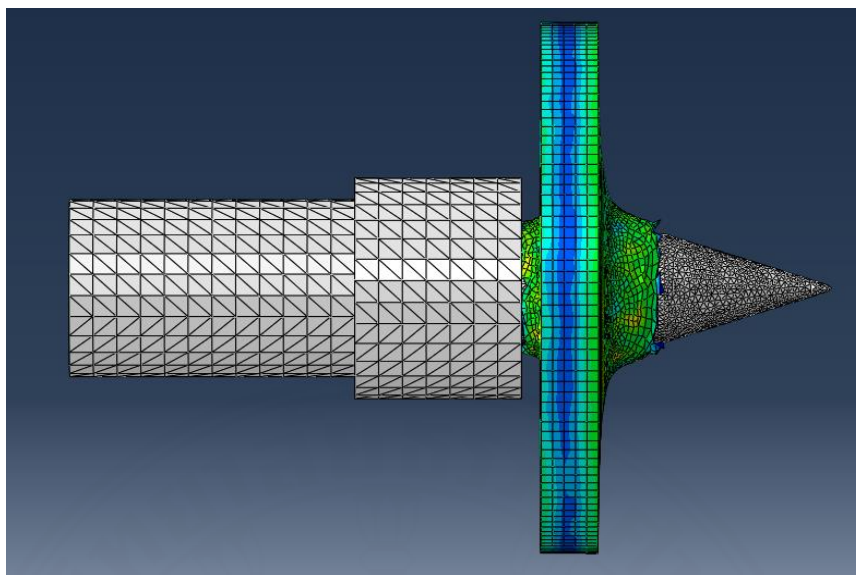
การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการศึกษากระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการเจาะที่มีผลต่อแรงบิด แรงกด และอุณหภูมิ ทำการจำลองโดยกำหนดให้อุปกรณ์เจาะเป็นแท่งโลหะทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์เจาะลงบนชิ้นงานแผ่นไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ดังแสดงในภาพที่ 5.1 ผู้วิจัยได้เลือกการจำลองโดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 2 ระดับ คือ อัตราป้อน (Feed) และความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์เจาะ (Speed) ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยจะแสดงผลการจำลองการเกิดแรงบิด แรงกด และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในจุดที่กำหนด ที่เกิดขึ้นจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในภาพที่ 5.1 และภาพที่ 5.2 โดยผลจากการจำลองดังกล่าวแบ่งเป็นขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 5.1 การทดสอบขนาด Mesh
- 5.2 การจำลองแรงบิดในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน
- 5.3 การจำลองแรงกดในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน
- 5.4 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
- 5.5 ความยาวของปลอกกูเจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน



ภาพที่ 5.1 เครื่องมือเจาะและวัสดุในการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

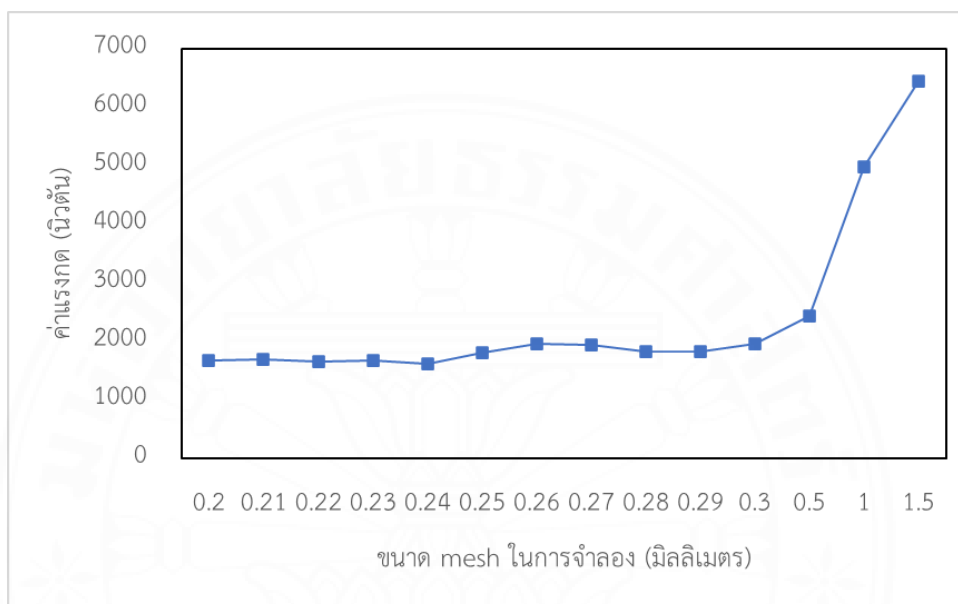


ภาพที่ 5.2 การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน
โดยใช้ปัจจัยความเร็วรอบ 2500 RPM และใช้อัตราป้อน 120 mm/min ในช่วงเวลาที่ 6.5 วินาที

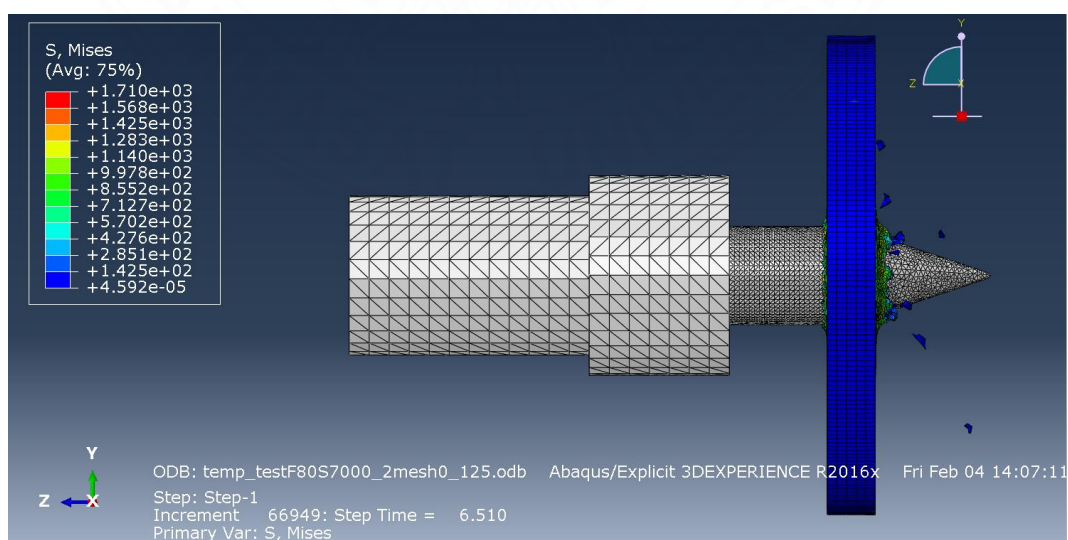
5.1 การทดสอบขนาด Mesh

ในการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเมนต์ การกำหนดขนาดของ Mesh ที่เหมาะสมในจุดที่มีการเปลี่ยนรูปทรงมีความสำคัญเป็นอย่างสูงเนื่องจาก การกำหนดขนาดของ Mesh ที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะส่งผลให้ค่าต่าง ๆ ที่ต้องการทราบผลนั้นมีความผิดพลาดมากกว่าค่าที่แท้จริงเป็นอย่างสูงแต่อย่างไรก็ตามการกำหนด ขนาดของ Mesh ให้มีขนาดเล็กนั้น ก็สร้างปัญหาในการจำลองด้วยเช่นกัน เช่น การใช้เวลานานในการจำลองหรือเกิดการฉีกขาดของ Element จนทำให้การจำลองไม่ประสบผลสำเร็จ ดังนั้น การใช้ขนาดของ Mesh ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างสูง โดยในงานวิจัยนี้ จะทำการกำหนดปรับขนาดของ Mesh ที่ใช้ในการจำลอง ให้มีขนาดที่ทำให้ผลลัพธ์ด้านแรงกดมีค่าที่ไม่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อปรับขนาดของ Mesh มีขนาดที่ลดลง โดยทำการจำลองการลดขนาดของ Mesh เพื่อตรวจสอบถึงความสัมพันธ์ของขนาด Mesh ที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปต่อผลลัพธ์ด้านแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยทำการปรับขนาดของ mesh ให้มีขนาดลดลงโดยเริ่มจากขนาด 1.5 มิลลิเมตรและลดลงจนถึงขนาด 0.20 มิลลิเมตรดังแสดงในภาพที่ 5.3 โดยใช้ปัจจัยการเจาะที่ทำให้เกิดแรงกดน้อยที่สุดจากการทดลอง คือ ปัจจัยความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที และปัจจัยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผลการจำลองการลดขนาด Mesh พบว่า เมื่อทำการใช้ขนาดของ Mesh ที่มีขนาด 1.5 มิลลิเมตรเล็กลงจนถึงขนาด 0.3 มิลลิเมตร ค่าแรงกดที่ได้ก็จะมีขนาดที่ลดลงแต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการจำลองโดยใช้ขนาดของ Mesh ที่มีขนาด 0.29-0.20

มิลลิเมตรพบว่าผลลัพธ์ด้านแรงกดที่เกิดขึ้นมีค่าที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.3 จากผลการจำลองทางผู้วิจัยจึงทำการเลือกใช้ mesh ขนาด 0.25 มิลลิเมตรซึ่งเป็นค่ากลางของขนาด Mesh ที่ใช้ในการจำลองซึ่งเป็นขนาด Mesh ที่ผลลัพธ์ด้านแรงกดมีความเสถียรและใช้เวลาในการจำลองที่เหมาะสมเป็นขนาด Mesh ในการจำลองผลลัพธ์ในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน



ภาพที่ 5.3 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ Mesh กับแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลอง

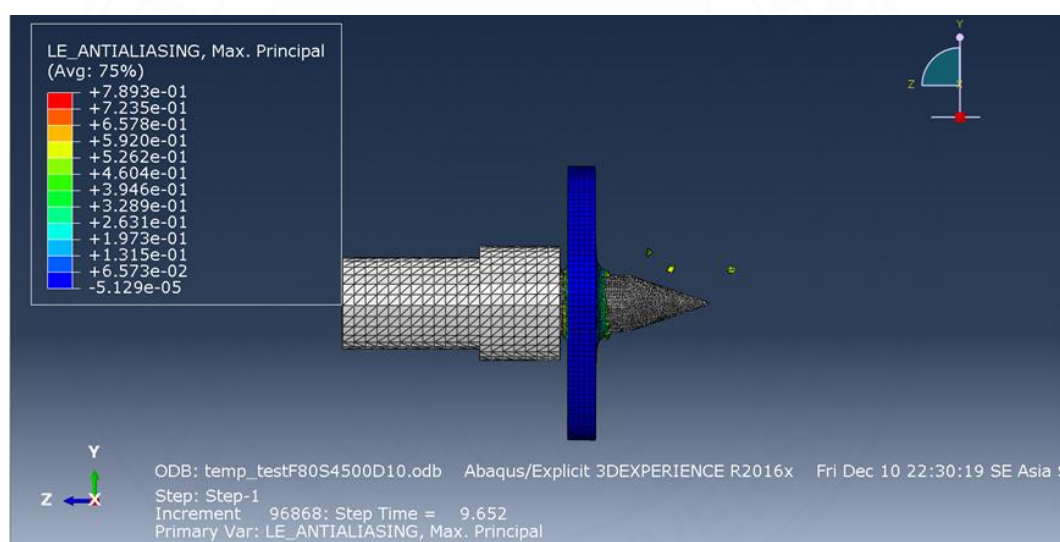


ภาพที่ 5.4 การจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้ขนาด Mesh 0.25 มิลลิเมตร

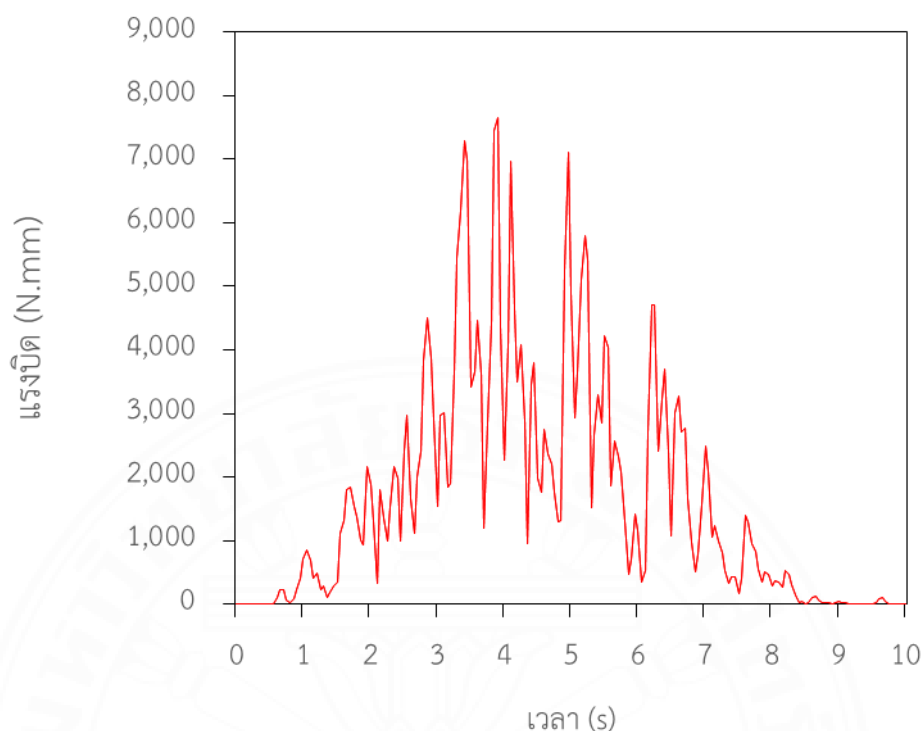
5.2 การจำลองแรงบิดโดยใช้กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

5.2.1 ผลการจำลองแรงบิดกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็ง

จากการจำลองการเกิดแรงบิดดังแสดงในภาพที่ 5.5 แรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นตามระยะทางที่อุปกรณ์เจาะได้เคลื่อนที่หมุนกลงไปบนวัสดุและจะลดลงเมื่อส่วนที่มุมเรียวของอุปกรณ์เจาะทะลุผ่านเนื้อของวัสดุ ไปถึงส่วนที่เป็นบริเวณก้านตรงของอุปกรณ์ จนเกิดรูเจาะในขนาดกว้างมากขึ้นจนทำให้อุปกรณ์เจาะมีการอัดตัวกับวัสดุที่น้อยลง ทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าที่ลดลงจนหมดไปเมื่ออุปกรณ์ทะลุผ่านวัสดุและหยุดการเคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพที่ 5.6

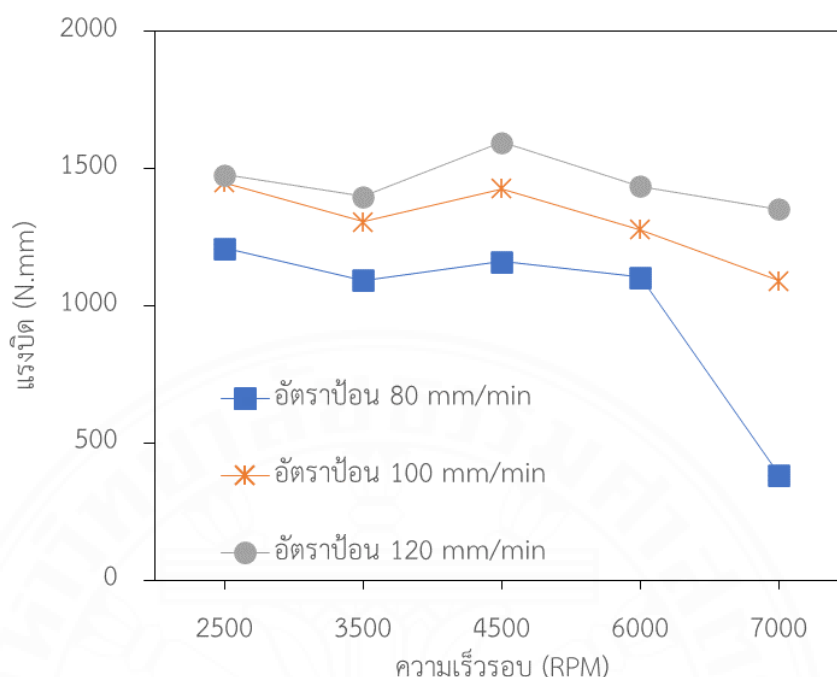


ภาพที่ 5.5 การจำลองการวัดแรงบิดด้วยค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งด้วยโดยใช้อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีความเร็วรอบ 7000 ต่อนาทีที่เวลา 9.562 วินาที



ภาพที่ 5.6 ผลการจำลองการเกิดแรงบิดด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที

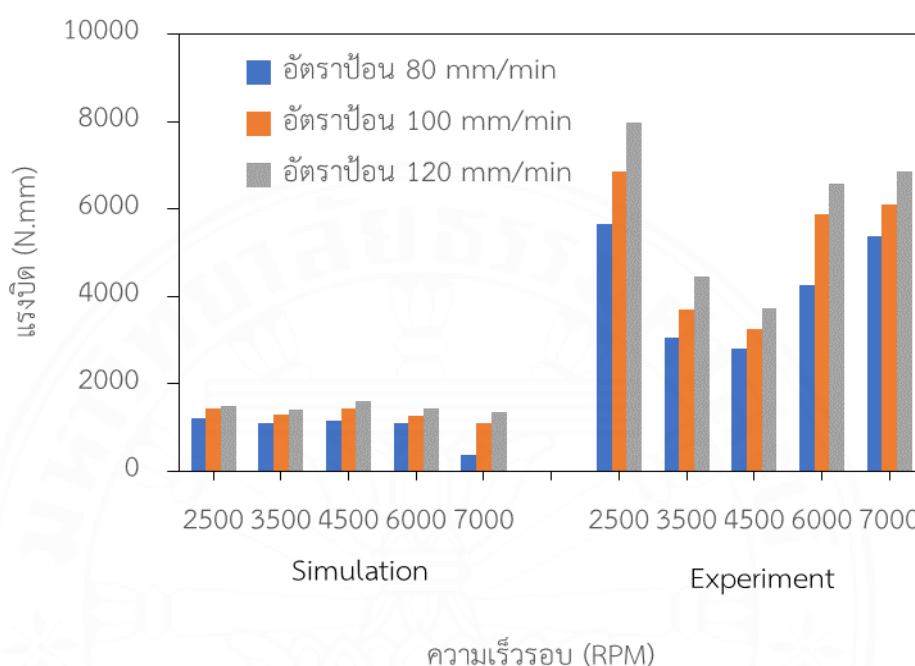
จากผลการจำลองการเกิดแรงบิดดังแสดงในภาพที่ 5.7 จากผลการจำลองพบว่า ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในแต่ละปัจจัยอัตราป้อน 80 100 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที การใช้ค่าอัตราป้อนที่มีค่าน้อยที่สุด คือ อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นปัจจัยอัตราป้อนที่ทำให้เกิดค่าแรงบิดต่ำสุด และเมื่อพิจารณาถึงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากปัจจัยความเร็วรอบทั้ง 5 ระดับ คือ 2500 3500 4500 6000 และ 7000 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อใช้ค่าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจากความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที จนถึง 6000 รอบต่อนาที ค่าแรงบิดจะมีค่าใกล้เคียงกัน และจะมีค่าที่ลดลงชัดเจนเมื่อใช้ความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที ซึ่งการใช้ค่าความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที จะเป็นปัจจัยความเร็วรอบที่ทำให้เกิดค่าแรงบิดต่ำสุด



ภาพที่ 5.7 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็ง

โดยเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงบิดกับปัจจัยที่ใช้ในการเจาะระหว่างการจำลองและการทดลองดังที่แสดงในภาพที่ 5.8 นั้น จะพบว่า แรงบิดที่ได้ในการจำลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงแต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าผลที่ได้จากการจำลองนั้นมีความสอดคล้องกับการทดลองจริง โดยในการจำลองในส่วนปัจจัยอัตราป้อนที่แตกต่างกัน คือ 80 100 120 มิลลิเมตรต่อนาที การใช้อัตราป้อนในการเจาะ 120 มิลลิเมตรต่อนาที จะเป็นค่าปัจจัยอัตราป้อนที่ทำให้เกิดค่าแรงบิดสูงสุดค่าและเมื่อใช้ค่าอัตราป้อนที่ลดลงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าที่ลดลงด้วยเช่นกันและเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการใช้ค่าความเร็วรอบที่มีผลกระทบต่อการเกิดแรงบิด พบว่า เมื่อใช้ความเร็วรอบในการจำลอง 2500 ถึง 6000 รอบต่อนาทีแรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากเมื่อใช้ความเร็วรอบในช่วงดังกล่าวในการเจาะ อุปกรณ์เจาะยังเกิดการเสียดสีกับวัสดุในความเร็วที่น้อยเกินไปทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นยังไม่มากเพียงพอที่จะทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและยังมีความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเร็วรอบ 7000 ต่อนาที พบว่า ค่าแรงบิด มีค่าลดลง อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอุปกรณ์เจาะมีการเสียดสีกับวัสดุในความเร็วที่สูงขึ้น ความร้อนที่วัสดุจึงเพิ่มขึ้นจนส่งผลให้วัสดุเกิดการอ่อนขึ้นด้วยเช่นกันซึ่งส่งผลให้การอัดตัวกันระหว่างอุปกรณ์เจาะลดน้อยลงจนทำ

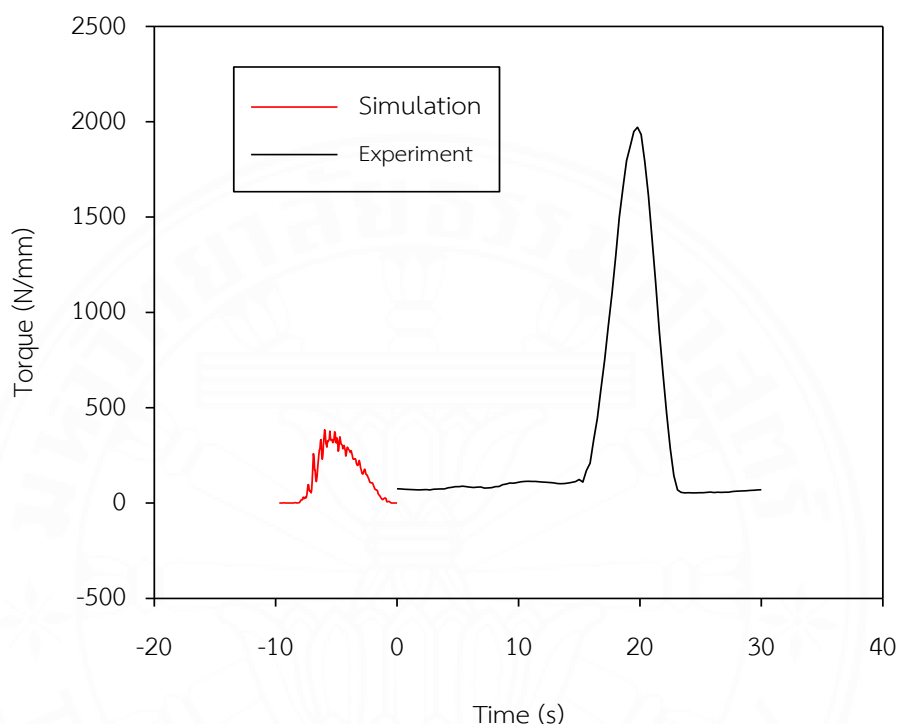
ให้แรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองมีค่าลดลงตามลำดับปัจจัยความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น ในทุกปัจจัยอัตราป้อน โดยพบว่า การใช้ ปัจจัยการเจาะ ด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที เป็นปัจจัยการเจาะที่ส่งผลให้ เกิดแรงบิดน้อยที่สุด



ภาพที่ 5.8 การเปรียบเทียบผลแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็ง และการทดลองจริง

และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการจำลองที่ใช้ ปัจจัยความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที และอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีในการเจาะ พบว่า ค่าแรงบิด ที่ได้จากการทดลองมีลักษณะแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของแรงบิดที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการจำลอง โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นตามระยะทางที่อุปกรณ์เจาะได้เคลื่อนที่ตกลงไปบนวัสดุและจะเริ่มลดลงเมื่อบริเวณมุมเรียวของอุปกรณ์เจาะทะลุผ่านเนื้อของวัสดุไปถึงส่วนที่เป็นบริเวณก้านตรงของอุปกรณ์ จนเกิดรูเจาะในขนาดกว้างมากขึ้นจนทำให้อุปกรณ์มีการอัดตัวกับวัสดุที่น้อยลง จนทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าที่ลดลงจนหมดไปเมื่ออุปกรณ์ทะลุผ่านวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงขนาดของแรงบิดที่เกิดขึ้นพบว่า ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นพบว่ามีความมากกว่าค่าแรงบิดที่ได้จากการจำลอง โดยคาดว่า เนื่องจากการจำลองนั้น ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างอุปกรณ์เจาะกับวัสดุ ยังมีการส่งถ่ายไปสู่ชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง และอุปกรณ์เจาะถูกกำหนดให้ไม่มีการเสีรูปทำให้ในการจำลองวัสดุมีอุณหภูมิขณะทำการเจาะที่สูงกว่าอุณหภูมิจากการทดลองจริงจึงทำให้ ในการจำลองวัสดุ

ได้รับความร้อนจากการเสียดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ จนมีความอ่อนตัวที่สูงทำให้ในการจำลองอุปกรณ์จะเกิดการอัดตัวกับวัสดุที่อ่อนตัวทำให้เกิดแรงบิดที่น้อยกว่าการทดลองจริงดังแสดงในภาพที่ 5.9

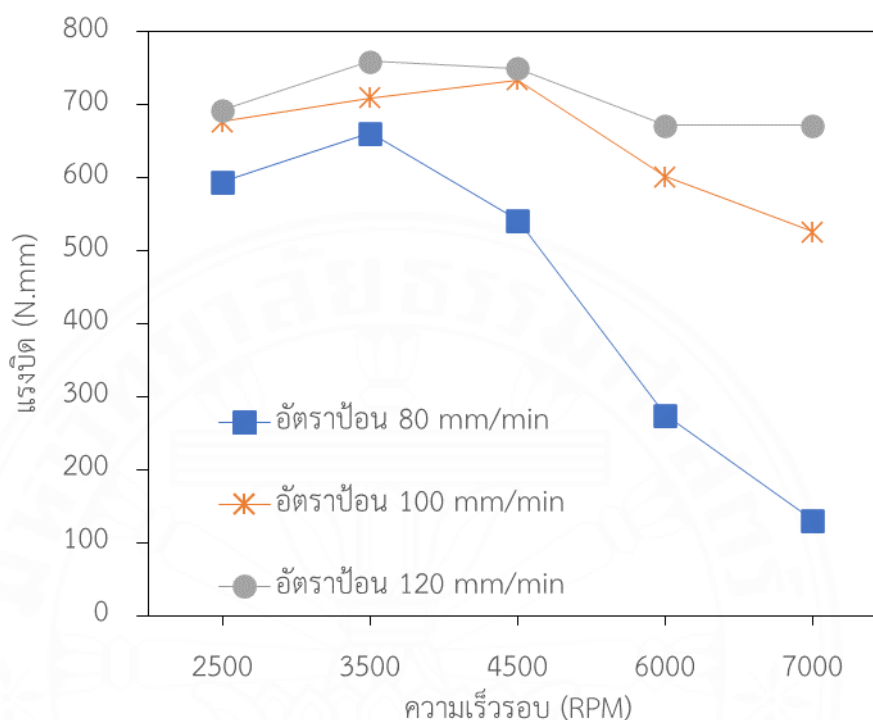


ภาพที่ 5.9 การเปรียบเทียบแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองและการทดลองจริง

5.2.2 ผลการจำลองแรงบิดกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว

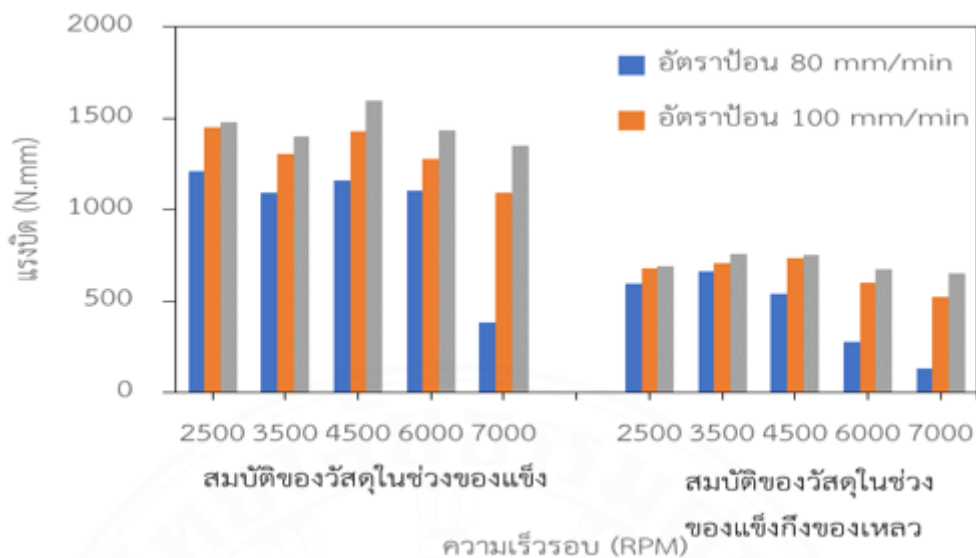
จากผลการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยปรับค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลวเพื่อให้ทราบแรงบิดที่เกิดขึ้น โดยได้ผลการจำลองการเกิดแรงบิดดังแสดงในภาพที่ 5.10 จากผลการจำลองพบว่าค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าสมบัติของวัสดุในการจำลองให้มีค่าอยู่สถานะของแข็งกึ่งของเหลว พบว่าค่าแรงบิดที่ได้มีค่าที่ลดลง เมื่อเทียบกับผลการจำลองโดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุในช่วงที่วัสดุมีสถานะเป็นของแข็ง ในทุกชุดปัจจัยที่ทำการจำลองจากการใช้ปัจจัยอัตราป้อน 80 100 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที การใช้ค่าอัตราป้อนที่มีค่าที่น้อยที่สุดคือ อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นปัจจัยอัตราป้อนที่ทำให้เกิดค่าแรงบิดต่ำสุด และเมื่อพิจารณาถึงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากปัจจัยความเร็วรอบทั้ง 5 ระดับ คือ 2500 3500 4500 6000 และ 7000 รอบต่อนาที พบว่า เมื่อใช้ค่าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจากความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีจนถึง 7000

รอบต่อนาที ค่าแรงบิดจะมีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งการใช้ค่าความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที จะเป็นปัจจัยความเร็วรอบที่ทำให้เกิดค่าแรงบิดต่ำสุด



ภาพที่ 5.10 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ โดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว

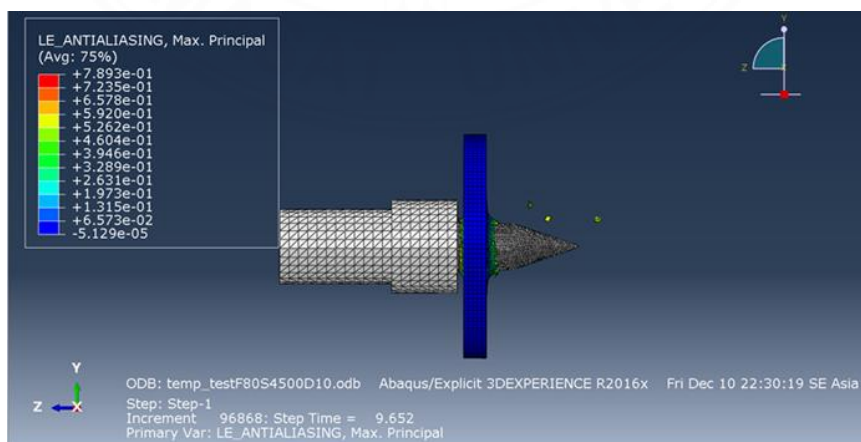
โดยเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงบิดกับปัจจัยที่ใช้ในการเจาะระหว่างการจำลองโดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลวกับการจำลองโดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งดังแสดงในภาพที่ 5.11 นั้น จะพบว่า ในการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุในช่วงของแข็งกึ่งของเหลวมีค่าแรงบิดที่น้อยกว่าเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบในการทดลอง 2500-7000 รอบต่อนาที โดยพบว่า เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นแรงบิดที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าที่ลดลงและเมื่อเปรียบเทียบกับ การจำลอง โดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งก็พบว่า ค่าที่ได้มีค่าที่ลดลงในทุกปัจจัยการทดลอง ซึ่งมีผลมาจากค่าความเค้นครากที่มีค่าลดลงจากการเปลี่ยนสมบัติของวัสดุจากสถานะของแข็งเป็นของแข็งกึ่งของเหลว



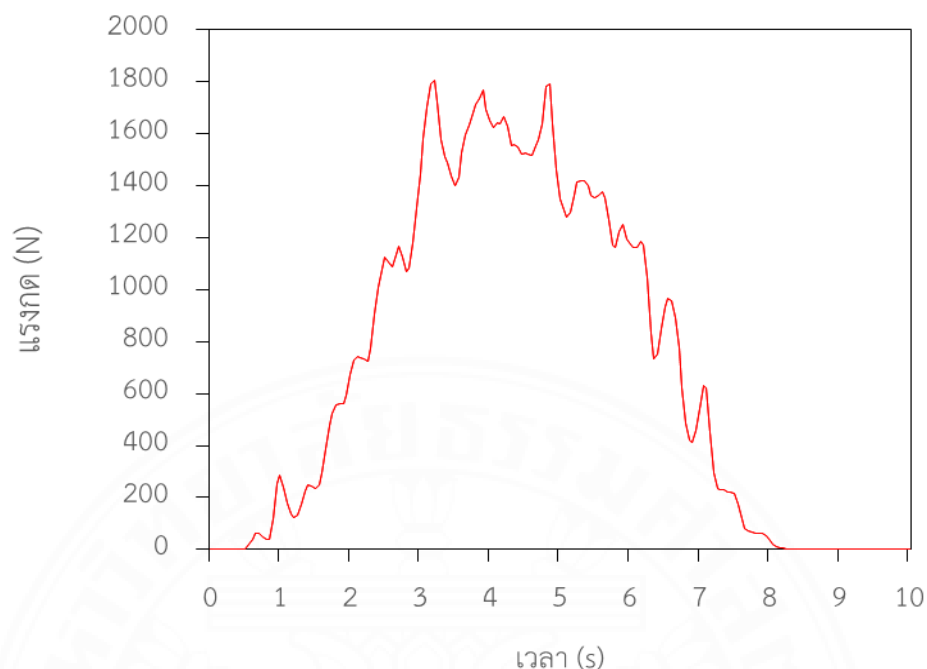
ภาพที่ 5.11 การเปรียบเทียบผลแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งและการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว

5.3 การจำลองแรงกดในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

เมื่อทำการจำลองการเจาะ ลงบนวัสดุดังแสดงในภาพที่ 5.12 พบว่า แรงกดที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดสูงสุดและจะมีค่าที่ลดลงเมื่อช่วงลำตัวของอุปกรณ์เจาะทะลุผ่านเนื้อวัสดุและแรงกดจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งบริเวณลำตัวของอุปกรณ์กดทะลุผ่านวัสดุดังแสดงในภาพที่ 5.13



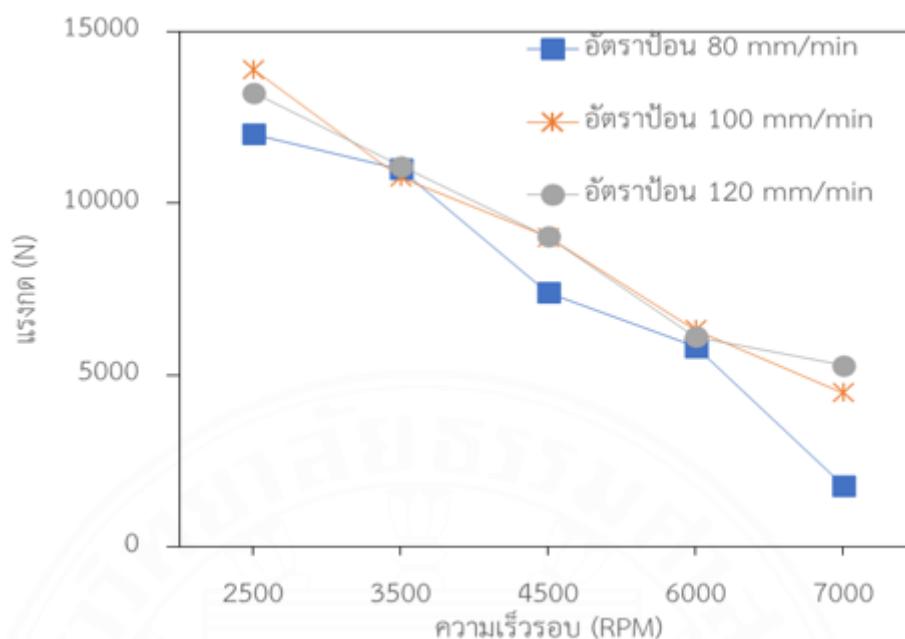
ภาพที่ 5.12 ภาพจำลองการเจาะด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่ออนาทีที่ความเร็วรอบ 7000 รอบต่ออนาที ที่เวลา 9.562 วินาที



ภาพที่ 5.13 การจำลองการเกิดแรงกดที่เกิดขึ้นจากการใช้ปัจจัยด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที
ความเร็วรอบ 7000 ต่อนาที

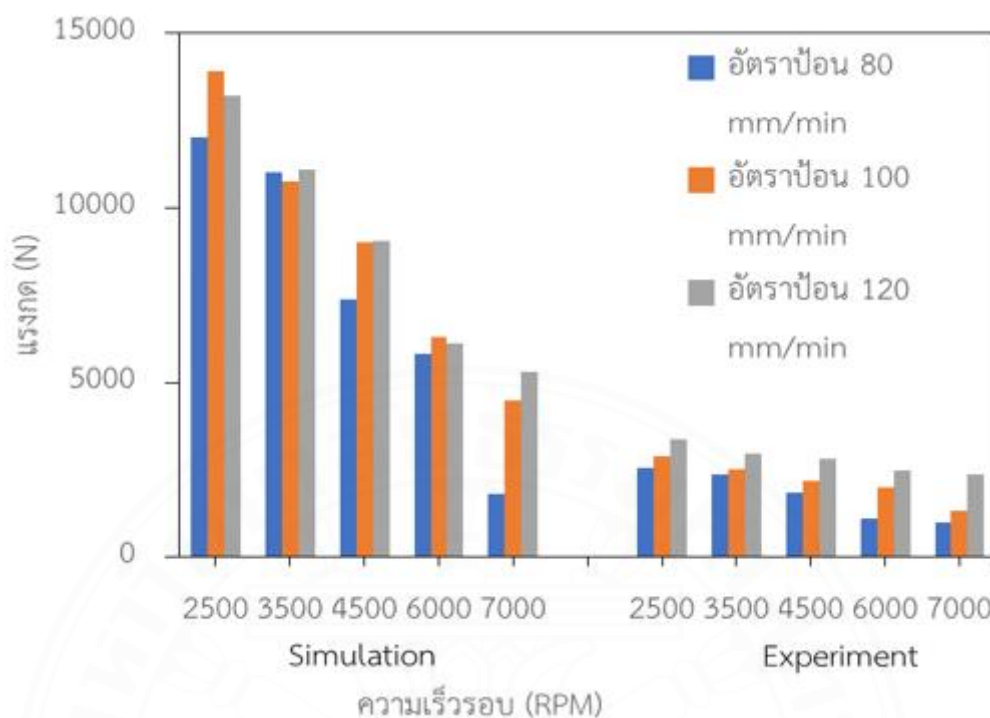
5.3.1 ผลการจำลองแรงกดในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็ง

จากผลการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่มีต่อแรงกดที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ปัจจัยความอัตราป้อนและความเร็วรอบที่ต่างกันโดยเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนในการจำลองดังที่กำหนดแสดงในภาพที่ 5.14 ที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอัตราป้อนและความเร็วรอบต่อแรงกดในแนวแกนที่เกิดขึ้นกับวัสดุ โดยจะเห็นได้ว่าแรงกดจะลดลงเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบในการเจาะที่เพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อัตราป้อนที่ต่างกันทั้งในสามระดับค่าแรงกดจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยจากผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการเจาะด้วยแรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าปัจจัย อัตราป้อน 80 มม./นาที และความเร็วแกนรอบ 7,000 รอบต่อนาที และเป็นค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าแรงกดน้อยที่สุดจากการจำลอง



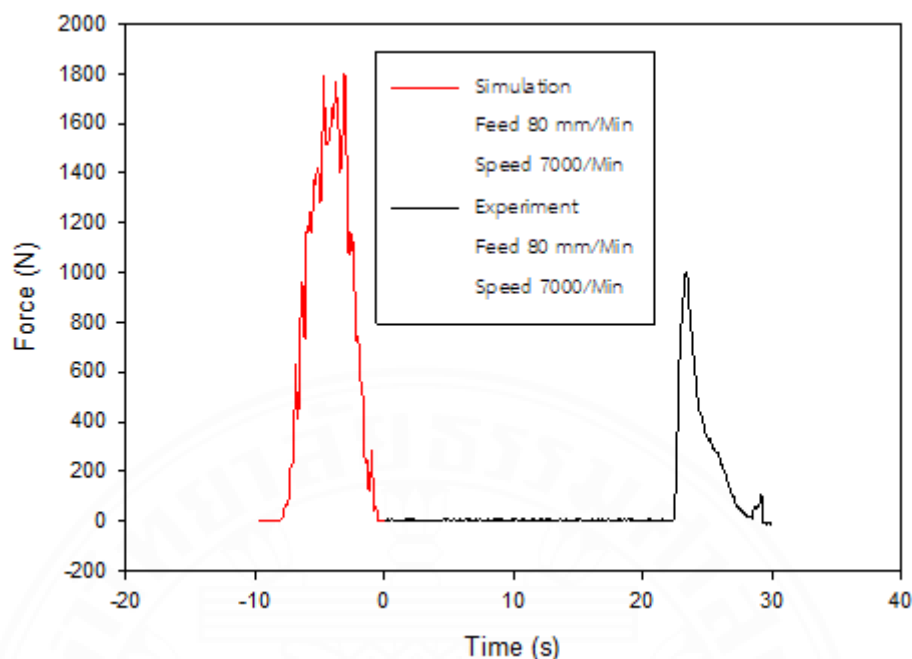
ภาพที่ 5.14 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ โดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็ง

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกับการทดลองพบว่าค่าแรงกดที่ได้จากการจำลองจะมีค่าที่สูงกว่าค่าแรงกดที่ได้จากการทดลอง โดยอาจมีสาเหตุมาจากการจำลองนั้นการกระจายตัวของความร้อนมีการลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ในการจำลอง วัสดุในการจำลองยังมีลักษณะเป็นของแข็งทำให้เมื่ออุปกรณ์จะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุจึงทำให้เกิดแรงต้านที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มการเกิดแรงกดจากการจำลองนั้นมีลักษณะสอดคล้องกับการทดลอง โดยเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบเพิ่มขึ้นค่าแรงกดที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าที่ลดลง แต่ในส่วนของการใช้ปัจจัยอัตราป้อนที่แตกต่างกันนั้น ผลของค่าแรงกดที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่แตกต่างจากการทดลอง คือ ค่าแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองจะมีค่าที่ขัดแย้งกันไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระดับของปัจจัย ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่า การใช้อัตราป้อนที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดแรงกดมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามลำดับการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อน นั่นก็คือเมื่อใช้อัตราป้อนที่สูงขึ้นค่าแรงกดก็จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในภาพที่ 5.15 โดยค่าแรงกดต่ำสุดที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราป้อนและความเร็วรอบและเท่ากับ 80 มิลลิเมตรต่อนาที และ 7000 รอบต่อนาที



ภาพที่ 5.15 การเปรียบเทียบผลแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลวและการทดลองจริง

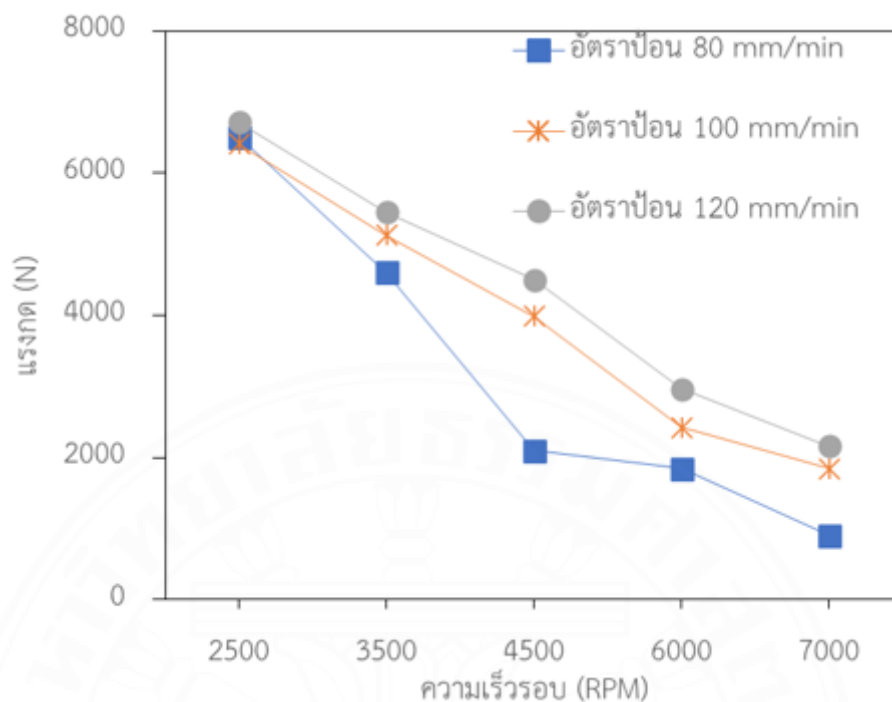
โดยเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับจำลองจากการใช้ปัจจัยในการเจาะเดียวกัน โดยใช้ชุดปัจจัย อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความรอบ 7000 รอบดังแสดงในภาพที่ 5.16 ก็พบว่า ค่าแรงกดที่ได้จากการทดลองมีลักษณะแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของแรงกดที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับการจำลองด้วยเช่นกัน คือ แรงกดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุปกรณ์เจาะกดลงบนผิวของวัสดุ และเมื่อบริเวณปลายของอุปกรณ์เจาะเคลื่อนที่ทะลุผ่านพื้นผิวด้านล่างของวัสดุ แรงที่เกิดขึ้นก็จะมีการลดลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 5.16 การเปรียบเทียบแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองและการทดลองจริง

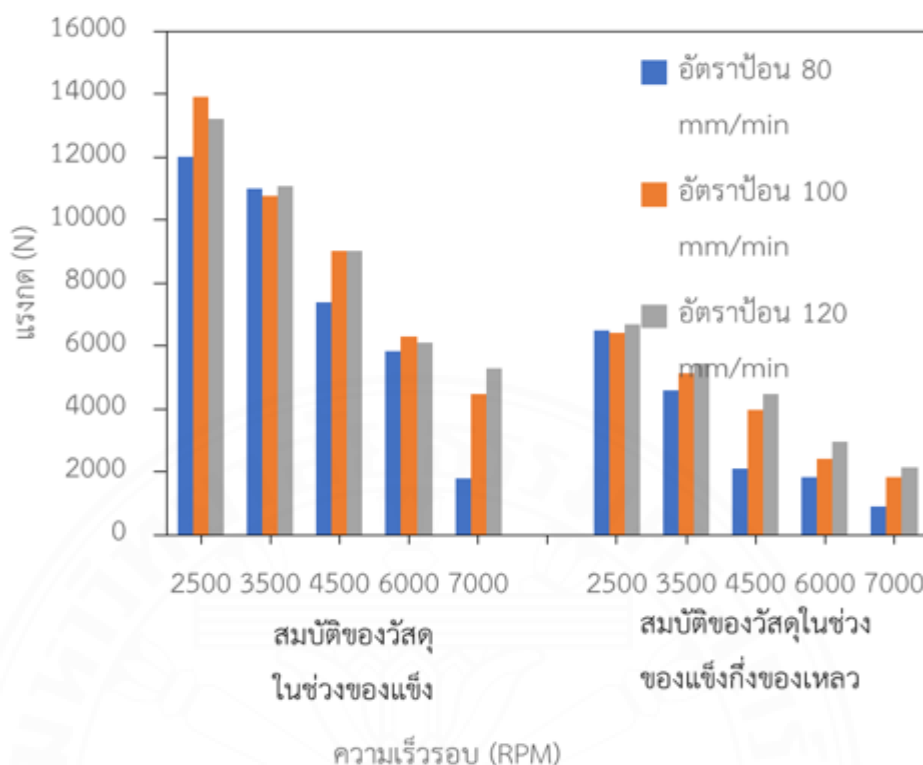
5.3.2 ผลการจำลองแรงกดในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยปรับค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว

จากผลการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยปรับค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว เพื่อให้ทราบถึงแรงกดที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ปัจจัยความอัตราป้อนและความเร็วรอบที่แตกต่างกันโดยใช้ปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ดังแสดงในภาพที่ 5.17 ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับลดค่าของสมบัติของวัสดุให้อยู่ในช่วงสถานะของแข็งกึ่งของเหลวซึ่งเป็นสถานะของวัสดุที่เกิดขึ้นขณะที่วัสดุถูกเจาะโดยพบว่า ค่าแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองของทุกปัจจัยการทดลองมีค่าที่ลดลง โดยเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของอัตราป้อนและความเร็วรอบต่อแรงกดในแนวแกนที่เกิดขึ้นกับวัสดุ โดยจะเห็นได้ว่าแรงกดจะลดลงเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบในการเจาะที่เพิ่มขึ้นและเมื่อใช้อัตราป้อนที่แตกต่างกันทั้งในสามระดับค่าแรงกดจะพบว่าเมื่ออัตราป้อนมีค่าที่เพิ่มขึ้นแรงกดก็จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยจากผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการเจาะด้วยแรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าปัจจัย อัตราป้อน 80 มม./นาที และความเร็วรอบ 7,000 รอบต่อนาที และเป็นค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าแรงกดน้อยที่สุดจากการจำลอง



ภาพที่ 5.17 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ โดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของแรงกดที่ได้จากการจำลอง โดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งพบว่า ค่าแรงกดการจำลองที่ใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลวที่จะมีค่าน้อยกว่าค่าแรงกดที่ใช้ค่าสมบัติของวัสดุที่เป็นของแข็ง โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริงเพิ่มขึ้นโดยมีสาเหตุ เนื่องจากลักษณะการอัดตัวระหว่างอุปกรณ์เจาะกับวัสดุมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงเพิ่มขึ้น คือ อัดตัวกับวัสดุในช่วงที่วัสดุอ่อนตัวลงและมีแนวโน้มการเกิดแรงกดจากการจำลองนั้นที่ลักษณะสอดคล้องกับการทดลอง โดยเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบเพิ่มขึ้นค่าแรงกดที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าที่ลดลง และในส่วนของการใช้ปัจจัยอัตราป้อนที่แตกต่างกันนั้น ค่าแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองจะมีการเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของปัจจัยอัตราป้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราป้อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดแรงกดมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามลำดับการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อน ดังแสดงในภาพที่ 5.18 โดยค่าแรงกดต่ำสุดที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราป้อนและความเร็วรอบและเท่ากับ 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและ 7000 รอบต่อนาที

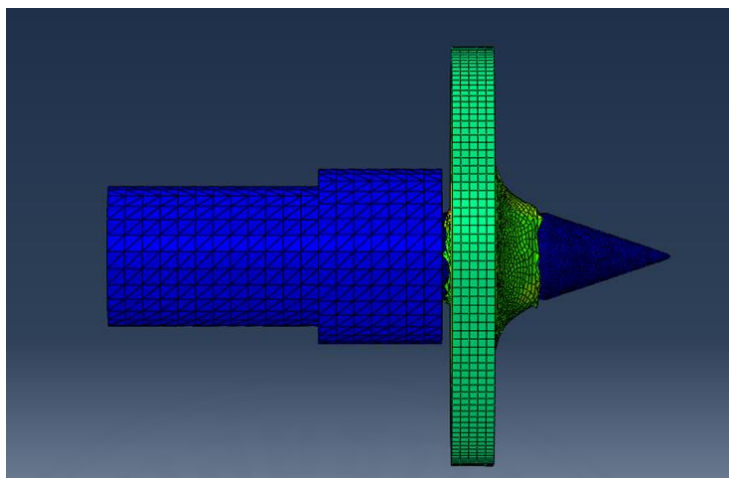


ภาพที่ 5.18 การเปรียบเทียบผลแรงกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งและการจำลองโดยใช้สมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็งกึ่งของเหลว

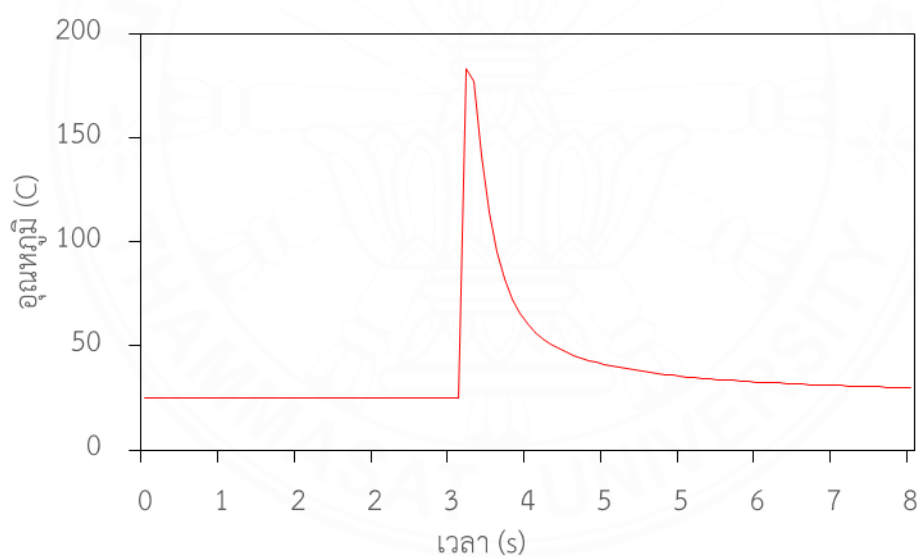
5.4 การจำลองอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

5.4.1 การตรวจสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการจำลองเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

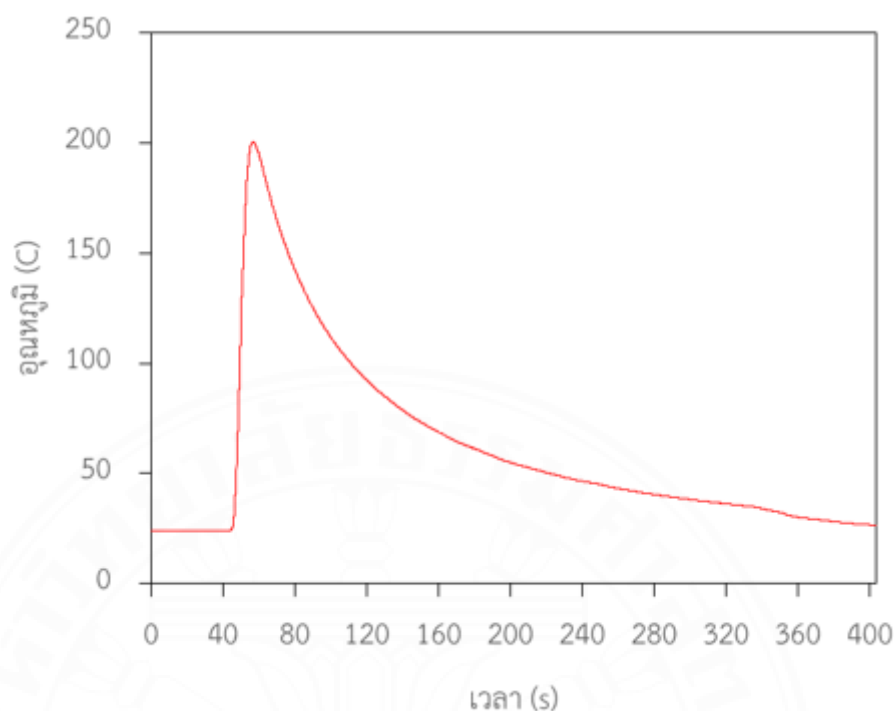
จากภาพที่ 5.19 ที่แสดงการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น พบว่า เมื่ออุปกรณ์เจาะกดลงบนเนื้อวัสดุจะมีอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุปกรณ์เจาะทำการเจาะวัสดุจนเกิดการทะลุเป็นรู อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการจำลองก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.20 โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองจริงที่แสดงในภาพที่ 5.21 พบว่า ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นความคล้อยคลึงกับการทดลองจริง คือ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุปกรณ์เจาะกดลงบนผิวของวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของการลดลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้น เมื่อบริเวณปลายของอุปกรณ์เจาะเคลื่อนที่ทะลุผ่านพื้นผิวด้านล่างของวัสดุไทเทเนียม อุณหภูมิที่เกิดขึ้นก็จะมีการลดลงด้วยเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่งใช้เวลามากกว่าการลดลงของอุณหภูมิในการจำลอง



ภาพที่ 5.19 การใช้ โปรแกรม ABAQUS เพื่อทำการจำลองการเกิดอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการ
เจาะแผ่นไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V

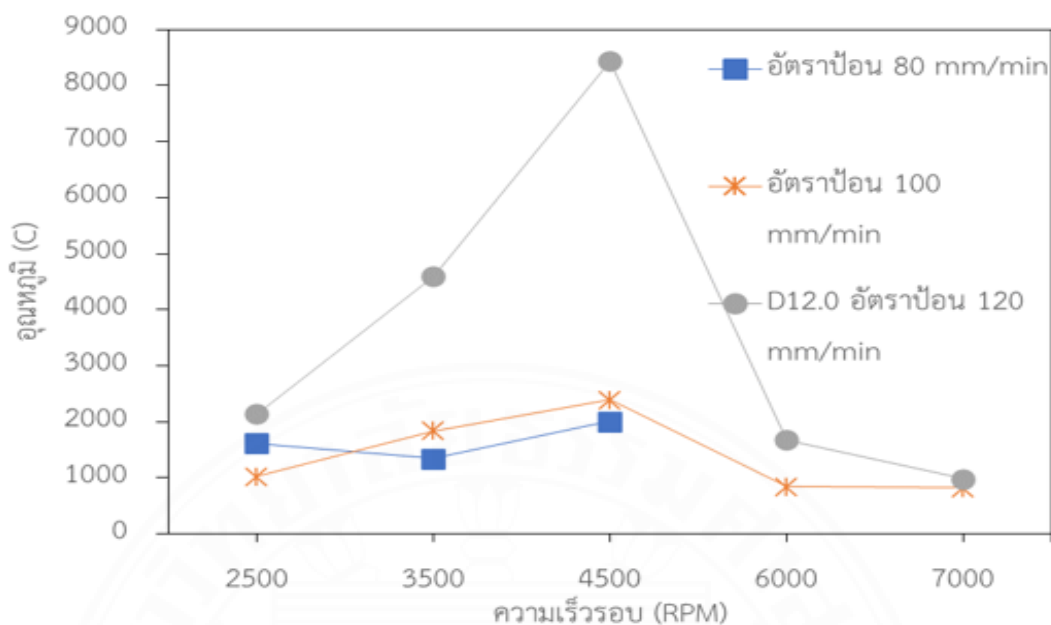


ภาพที่ 5.20 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน โดยใช้ปัจจัย
การเจาะ อัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที



ภาพที่ 5.21 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลอง โดยใช้ปัจจัยการเจาะอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที

จากการจำลองการเจาะภายใต้สภาวะปัจจัยของความเร็วรอบและอัตราป้อนที่กำหนดเพื่อจำลองการเกิดขึ้นของอุณหภูมิพบว่าเมื่อทำการใช้ปัจจัยในการจำลอง โดยใช้อัตราการป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที ในทุกปัจจัยความเร็วรอบ โดยในการใช้ปัจจัยความเร็วรอบ 6000 และ 7000 ต่อนาทีนั้น พบว่า โปรแกรมไม่สามารถจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้ โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงสุดที่ได้มาจากการจำลองเจาะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะการทำงานที่อัตราการป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 8438 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดขึ้น 821 องศาเซลเซียส เมื่อเจาะอยู่ภายใต้สภาวะการทำงานที่อัตราการป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที โดยเมื่อพิจารณาจากผลการจำลองในปัจจัยที่ประสบความสำเร็จในการจำลองพบว่า ทั้งปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยเมื่อใช้ปัจจัยทั้งสองโดยกำหนดให้มีค่าที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันดังแสดงในภาพที่ 5.22 แต่อย่างไรก็ตาม ในการจำลองโดยใช้ค่าความเร็วรอบ 6000-7000 รอบต่อนาที กลับพบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการจำลองมีค่าลดลง



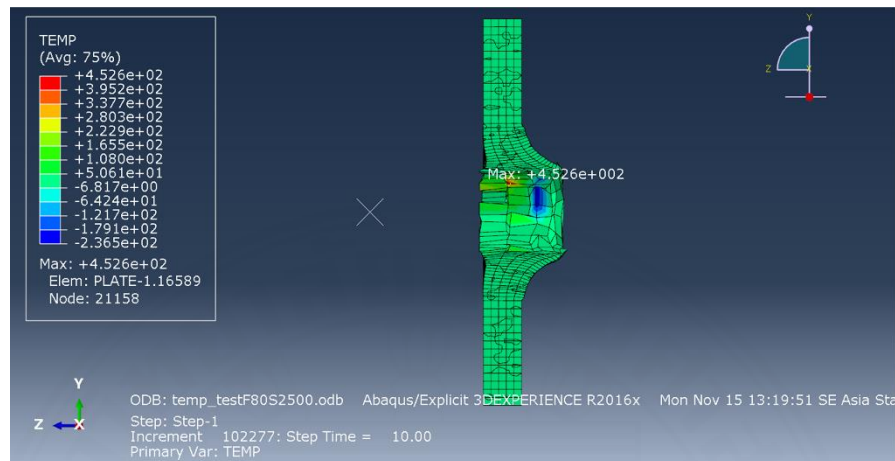
ภาพที่ 5.22 ผลการจำลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นที่แปรผันต่อค่าอัตราป้อนและความเร็วรอบ

จากผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการเจาะด้วยแรงเสียดทานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ค่าปัจจัยอัตราป้อน 80 มม./นาที และความเร็วแกนรอบ 7,000 รอบต่อนาที และเป็นค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดอุณหภูมิในการจำลองที่สูงที่สุดที่ โดยที่พบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการจำลองที่มีค่าสูงเกินกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นมีสาเหตุเนื่องมาจากการในการจำลองนั้น เอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองไม่สามารถเกิดการสลายตัวจากความร้อนที่ได้รับจึงเกิดการสะสมของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่วัสดุอาจจะเกิดการระเหยตัวเมื่อสะสมความร้อนถึงจุดระเหยจึงทำให้ในการจำลองตรวจพบอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ

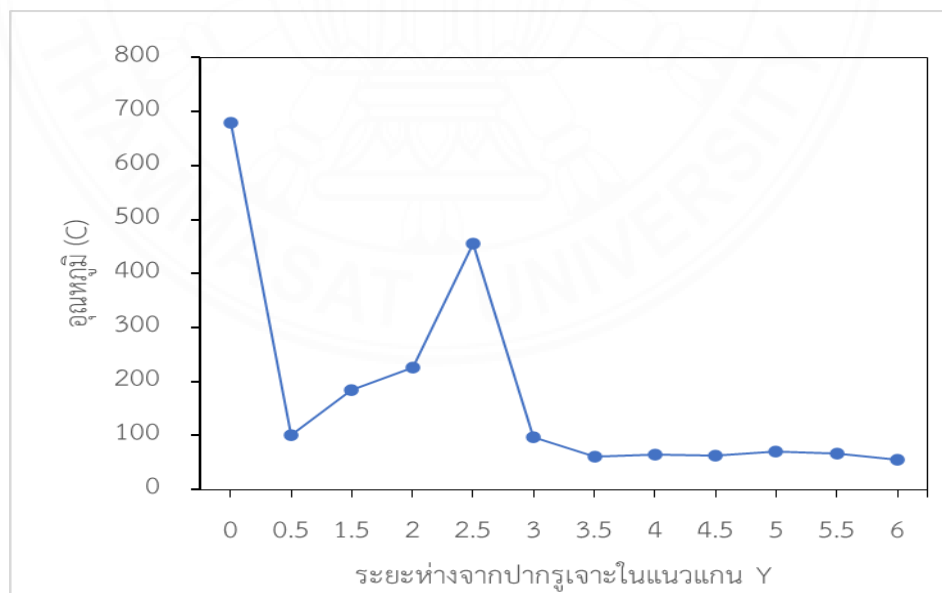
5.4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งผิวที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการจำลอง

จากการตรวจสอบความแข็งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวรูเจาะในหัวข้อ 4.4 ในแนวแกน X และแนวแกน Y ที่พบว่า ผิวของรูเจาะมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นและเนื่องจากการเกิดความแข็งที่ผิวของรูเจาะบนวัสดุ Ti-6Al-4V เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบทางความร้อน ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีความแข็งผิวเพิ่มขึ้น ในการตรวจสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นในการทดลองไม่สามารถตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงได้โดยตรงทำได้เพียงการวัดในจุดที่ใกล้เคียงเพื่อตรวจสอบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการการเสียดสี ผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานเพื่อ

ตรวจสอบการเกิดอุณหภูมิที่พื้นผิวรูเจาะที่สัมพันธ์กับบริเวณที่ความแข็งผิวมีค่าสูงขึ้นจากกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานดังภาพที่ 5.23

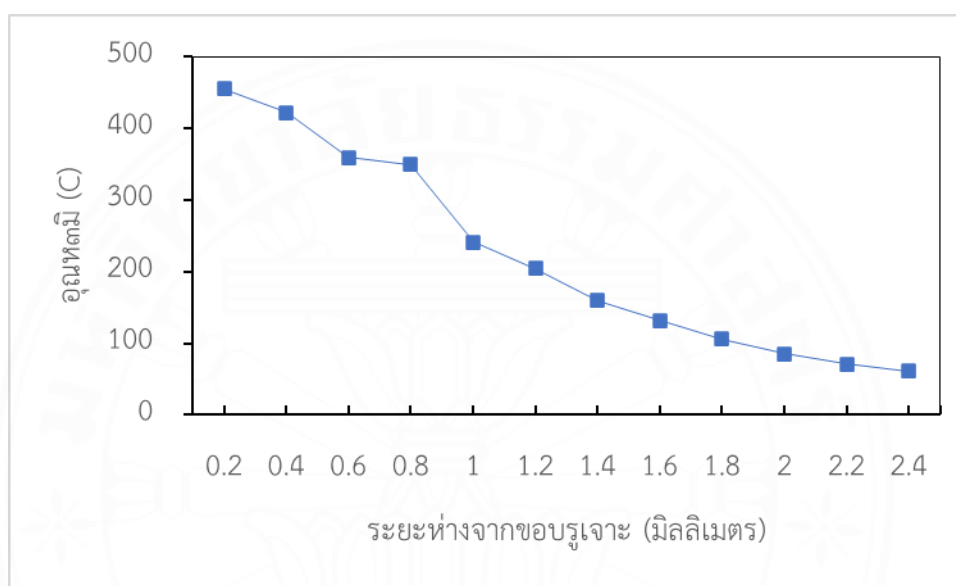


ภาพที่ 5.23 การใช้ โปรแกรม ABAQUS เพื่อทำการจำลองการเกิดอุณหภูมิในจุดที่ทำการวัดความแข็งที่เกิดขึ้นจากการการเจาะแผ่นไทเทเนียม เกรด Ti-6Al-4V โดยใช้ปัจจัยการเจาะ อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่ออนาทีและความเร็วรอบ 2500 รอบต่ออนาที



ภาพที่ 5.24 ผลการจำลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับระยะห่างจากขอบรูเจาะในแนวแกน Y

และเมื่อทำการตรวจสอบ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการจำลองตามภาพตัดขวางในแนวแกน Y จากการจำลอง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.24 พบว่า ในจุดที่เกิดความแข็งสูงสุด ในตำแหน่ง ระยะห่างจากปากกรูเจาะ 2.5 มิลลิเมตร พบว่าใน ตำแหน่งดังกล่าว เป็นจุดที่ เกิดอุณหภูมิสูงสุดด้วยเช่นกัน โดยมีอุณหภูมิ เท่ากับ 430 องศาเซลเซียส

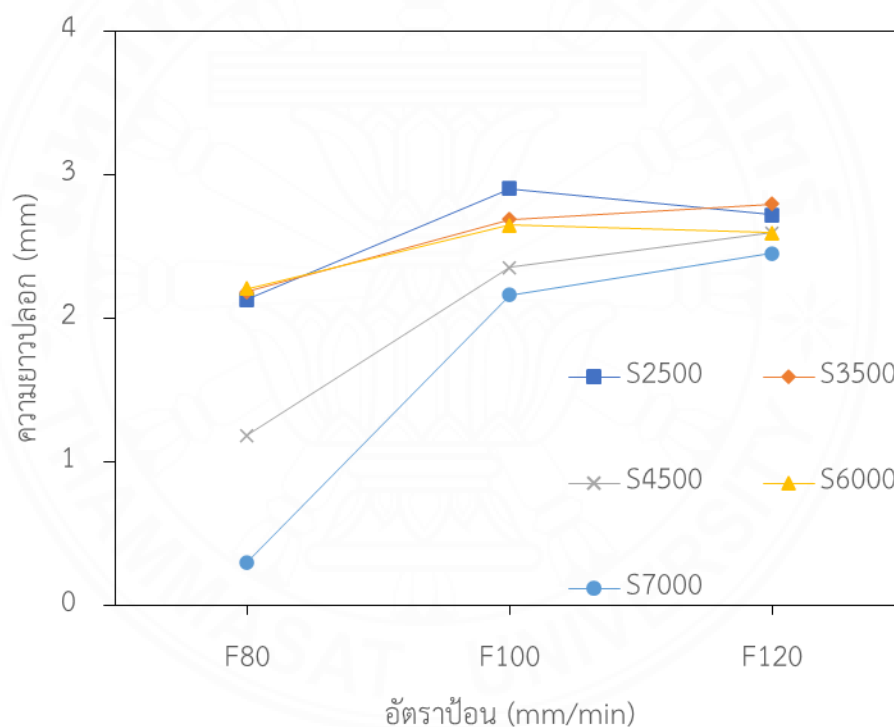


ภาพที่ 5.25 ผลการจำลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับระยะห่างจากขอบรูเจาะ
ในแนวแกน X

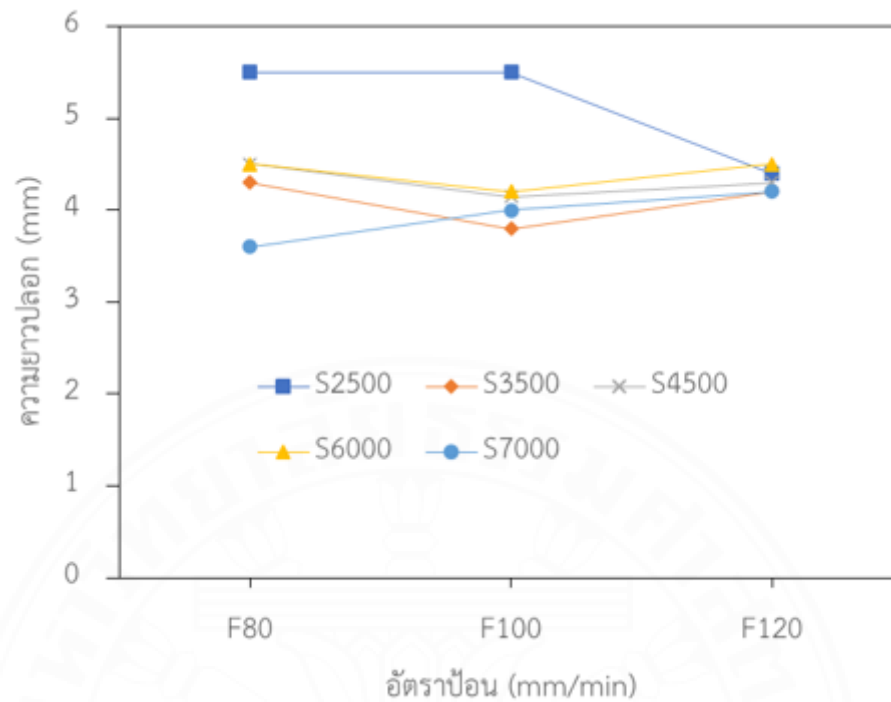
และเมื่อทำการตรวจสอบความแข็งตามภาพตัดขวางในแนวแกน x และแนวแกน Y ดังแสดงในภาพที่ 4.11 ที่เปรียบเทียบกับค่าการเกิดอุณหภูมิจากการจำลองพบว่า เมื่อตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิในการจำลอง มีระยะที่ห่างออกจากผิวรูเจาะ ก็พบว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้น มีค่าลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ในจุดที่อุณหภูมิสูงที่สุดนั้นก็มีค่าความแข็งที่สูงที่สุด จากตำแหน่งที่ทำการวัดด้วยเช่นกัน

5.5 ความยาวของปลอกกู๊เจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทาน

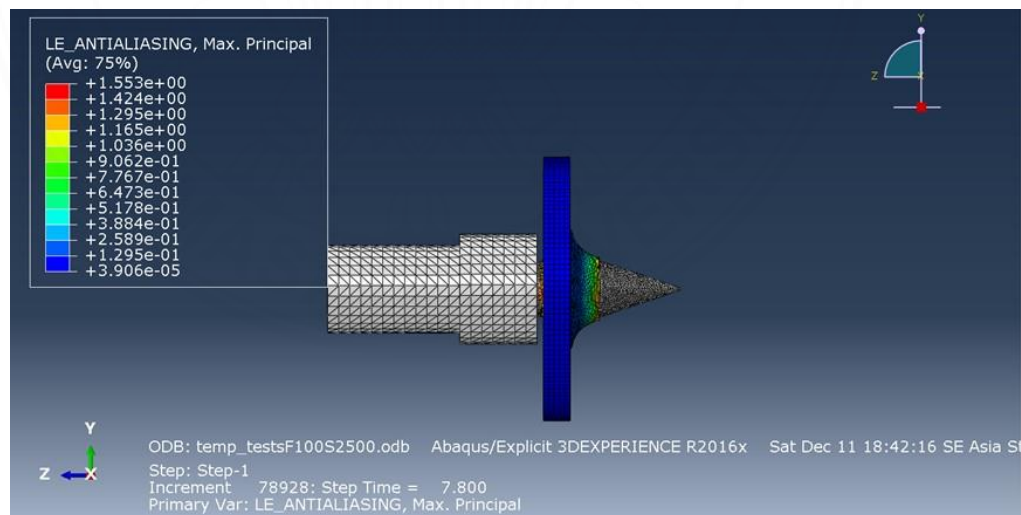
จากการจำลองการเจาะภายใต้สภาวะปัจจัยของความเร็รรอบ และอัตราป้อนตามที่กำหนด พบว่าปลอกของรูเจาะที่เกิดขึ้นจะมีความยาวเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปัจจัยอัตราป้อนในการจำลอง และในส่วนของการใช้ปัจจัยความเร็รรอบ การใช้ความเร็รรอบที่น้อยลงจะส่งผลปลอกกู๊เจาะมีความยาวเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.26 โดยการใช้ปัจจัยอัตราป้อนและความเร็รรอบที่ทำให้เกิดปลอกกู๊เจาะที่มีความยาวสูงสุด คือ การใช้อัตราป้อนที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และการใช้ปัจจัยความเร็รรอบ 2500 รอบต่อนาที เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดปลอกกู๊เจาะที่มีความยาวสูงที่สุดในการจำลองคือ 2.908 มิลลิเมตร



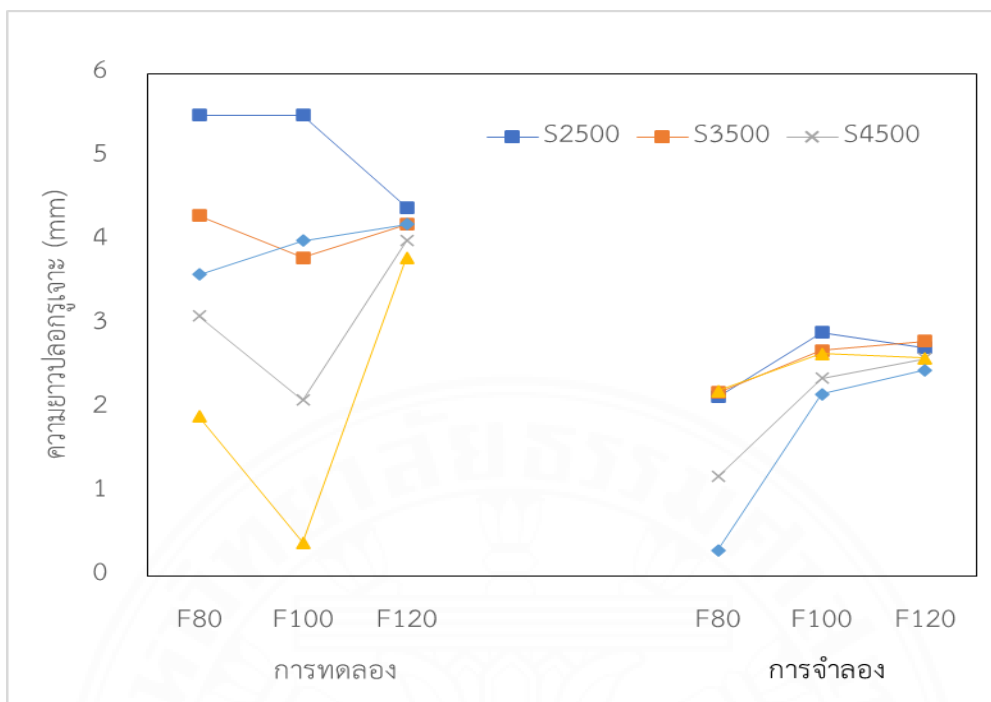
ภาพที่ 5.26 ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของปลอกกู๊เจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลองกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็รรอบ



ภาพที่ 5.27 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของปลอกกูเจาะที่เกิดขึ้นจากการทดลองกับปัจจัยอัตราป้อนและปัจจัยความเร็วรอบ



ภาพที่ 5.28 ภาพจำลองการวัดการเจาะด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ความเร็วรอบ 2500 ต่อนาที ที่เวลา 7.8 วินาที



ภาพที่ 5.29 การเปรียบเทียบความยาวของปลอกกรูเจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลองและการทดลองจริง

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของปลอกกรูเจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลองกับการทดลองพบว่า ในการทดลองโดยใช้ปัจจัยในการเจาะที่ระดับเดียวกันกับการจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 5.13 ความยาวปลอกกรูเจาะที่เกิดขึ้นจากการทดลองจะมีขนาดที่ยาวกว่าความยาวปลอกกรูเจาะที่เกิดขึ้นจากการจำลอง แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของคุณสมบัติของปัจจัยที่มีผลต่อความยาวของปลอกกรูเจาะ ผลการจำลองมีความสอดคล้องกันกับการทดลองในส่วนการใช้ปัจจัยความเร็วรอบ นั่นคือ เมื่อใช้ความเร็วรอบที่ต่ำลงปลอกกรูจะมีความยาวที่เพิ่มขึ้นโดยความยาวปลอกกรูที่มีค่ายาวที่สุดเกิดจากการใช้ปัจจัยการเจาะที่ใช้ค่าความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ทั้งในการจำลองและการทดลอง แต่ในส่วนของการใช้ปัจจัยอัตราป้อน ในการจำลองจะพบว่า เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นความยาวของปลอกกรูเจาะก็จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างจากผลการทดลองที่พบว่าความยาวปลอกกรูเจาะที่ได้จากการทดลองที่มีการปรับค่าปัจจัยอัตราป้อนที่แตกต่างกัน มีค่าความยาวปลอกกรูเจาะที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยในการทดลองความยาวของปลอกกรูสูงสุดจะมีขนาด 5.5 มิลลิเมตร แต่ในการจำลองค่าความยาวปลอกกรูสูงสุดจะมีขนาด 2.9 มิลลิเมตร

โดยสาเหตุที่ใช้ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เป็นค่าปัจจัยความเร็วรอบที่ทำให้เกิดความยาวของปลอกกรูที่ยาวที่สุดนั้นเป็นผลมาจาก เมื่อใช้ความเร็วรอบที่ต่ำ ที่ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป คือยังเนื้อวัสดุยังไม่เกิดการอ่อนตัวมากเกินไปยังสามารถไหลตัวยึดติดกับ

อุปกรณ์เจาะที่มีการเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุจนทำให้เกิดการการขึ้นรูปเป็นปลอกรู แต่เมื่อมีการความเร็วยรอบที่สูงขึ้นนั้น วัสดุจะเกิดความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีกันระหว่างอุปกรณ์เจาะและวัสดุที่สูงเกินไป จนทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการอัดตัวเข้ากับผนังขอรูเจาะจนไม่สามารถไหลตัวลงสู่ด้านล่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษากระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานโดยใช้การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงโดยใช้อุปกรณ์เจาะที่ทำจากวัสดุทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ที่ทำการเจาะกับวัสดุไทเทเนียมอัลลอย Ti-6Al-4V เกรด 5 โดยใช้เครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะของปัจจัยที่ส่งผลต่อการจำลองการเจาะขึ้นงาน อันได้แก่ อัตราป้อน ความเร็วรอบ และขนาดของ Mesh ในการทำการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองเจาะจริง โดยทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น คือ แรงกด แรงบิด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น จากนั้นนำเอาผลที่ได้มาวิเคราะห์สามารถสรุปได้ ดังนี้

6.1.1 จากการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานพบว่า แรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับการทดลองจริง มีการเกิดแรงบิดไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง โดยเมื่อใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นค่าแรงบิดจะมีค่าที่ลดลงในการจำลองเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบ 2500 ถึง 4500 รอบต่อนาที

6.1.2 จากการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานพบว่า แรงกดที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับการทดลองจริง โดยมีการเกิดแรงกดไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง โดยเมื่อใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นค่าแรงกดจะมีค่าที่ลดลง ในการจำลองเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบ 2500 ถึง 7500 รอบต่อนาที

6.1.3 จากการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานพบว่า แรงกดที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับการทดลองจริง โดยมีการเกิดแรงกดไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง โดยเมื่อใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นค่าแรงกดจะมีค่าที่ลดลง ในการจำลองเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบ 2500 ถึง 7500 รอบต่อนาที

6.1.4 ในการจำลองพบว่าเมื่อทำการจำลอง โดยใช้ปัจจัยอัตราป้อนที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ปลอกของรูเจาะที่เกิดในการจำลองมีขนาดที่ยาวขึ้น และเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบที่ต่ำจะทำให้ความยาวของปลอกภูมิความยาวที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

6.1.5 จากการจำลองกระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานพบว่า การปรับของวัสดุให้มีความเค้นครากอยู่ในสถานะของแข็งกึ่งของเหลวจะทำให้แรงกดที่เกิดขึ้น ในการจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลอง

6.1.6 จากผลการทดลอง ปัจจัยความเร็วรอบและปัจจัยอัตราป้อน มีผลกระทบต่อแรงบิดที่เกิดขึ้น โดยพบว่า เมื่อความเร็วรอบในการเจาะสูงขึ้นจะผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง เมื่อใช้ค่าความเร็วรอบ 2500 ถึง 4500 ต่อนาที แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ความเร็วรอบ 6000 ถึง 7000 ต่อนาทีค่าแรงบิดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างสองพื้นผิวในจำนวนรอบที่สูง นั้นไม่เพียงทำให้แผ่นไทเทเนียมอ่อนลง แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นทำยังทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นกึ่งของเหลวจนทำให้เกิดการยึดติดกันระหว่างวัสดุกับเครื่องมือเจาะทำให้เครื่องมือเจาะเกิดความเสียหายในส่วนปลาย และส่งผลให้แรงบิดเพิ่มขึ้นและการใช้อัตราป้อนที่ต่ำจะทำให้เกิดแรงบิดน้อยกว่าการใช้อัตราป้อนที่สูงกว่าในการทดลอง

6.1.7 จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยความเร็วรอบและปัจจัยอัตราป้อน มีผลกระทบต่อแรงกดที่เกิดขึ้น โดยพบว่า เมื่อความเร็วรอบในการเจาะสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงกดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง และการใช้อัตราป้อนที่ต่ำจะทำให้เกิดแรงกดน้อยกว่าการใช้ความเร็วรอบที่สูงกว่า

6.1.8 ลักษณะทางกายภาพและขนาดรูที่สมบูรณ์ที่สุด คือ ปากรูและปลอกรูไม่เกิดการฉีกขาดรวมถึงขนาดขอบปากรูเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ขนาดความสูงปากรูเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร และขนาดความยาวปลอกรูเท่ากับ 4.0 มิลลิเมตร เมื่อใช้ความเร็วรอบที่ 4500 รอบต่อนาที และที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที

6.1.9 กระบวนการเจาะโดยใช้แรงเสียดทานจะทำให้พื้นผิวรูเจาะจะค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้น โดยพื้นผิวรูเจาะที่มีค่าความแข็งผิวสูงสุดจะอยู่ที่จุดความลึก 2 มิลลิเมตรในแนวแกน Y โดยมีค่าความแข็งผิวเท่ากับ 813 Hv ซึ่งเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากค่าความแข็งปกติของวัสดุ ไทเทเนียมอัลลอย Ti-6Al-4V

6.1.10 ในการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบที่ต่ำจะทำให้ความยาวของปลอกรูมีความยาวที่เพิ่มขึ้น โดยใช้ปัจจัยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีจะส่งผลให้ปลอกของรูเจาะที่เกิดในการจำลองมีขนาดที่ยาวที่สุด แต่เมื่อใช้ปัจจัยความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นจาก 3500 เพิ่มขึ้นไปถึง 7500 รอบต่อนาที พบว่าความยาวปลอกรูมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และในส่วนของการใช้ปัจจัยอัตราป้อนพบว่า การใช้ค่าปัจจัยอัตราป้อนที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้ปลอกรูเจาะมีค่าความยาวที่แตกต่างกัน

6.2 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดของงานวิจัย

สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาวิจัยทดลองเกี่ยวกับกระบวนการเจาะแบบเสียดทานสามารถที่จะศึกษาวิจัยเพิ่มเติมจากข้อเสนอแนะได้ดังต่อไปนี้

6.2.1 การศึกษาอิทธิพลปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างวัสดุไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V จากกระบวนการเจาะแบบแรงเสียดทานโดยปัจจัยการเจาะที่แตกต่างกัน

6.2.2 ศึกษาการทำ Heat treatment ในดอกเจาะแรงเสียดทานเพื่อความคงทนของดอกเจาะแรงเสียดทาน



รายการอ้างอิง

บทความวารสาร

- Akyildiz, H. (2014). An Experimental Study On Friction Drilling Of St12 Steel. *Transactions- Canadian Society for Mechanical Engineering*, 38, 319-329.
- Aslan, F., Langlois, L., Mangin, P., & Balan, T. (2018). Identification of Drilling Parameters during the Flow Drill Screw Driving Process. *Key Engineering Materials*, 767, 465-471. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.767.465
- Chow, H.-M., Lee, S.-M., & Yang, L.-D. (2008). Machining characteristic study of friction drilling on AISI 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 207(1), 180-186. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.064
- Dehghan, S., Ismail, M. I. S., Mohd ariffin, M. k. a., & Baharudin, B. T. (2018). Experimental investigation on friction drilling of titanium alloy. *Engineering Solid Mechanics*, 6, 135-142. doi:10.5267/j.esm.2018.2.002
- Dehghan, S., Ismail, M. I. S., & Souri, E. (2020). A thermo-mechanical finite element simulation model to analyze bushing formation and drilling tool for friction drilling of difficult-to-machine materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 1004-1018. doi:10.1016/j.jmapro.2020.07.022
- Demir, Z. (2013). Investigate the Friction Drilling of Aluminium Alloys According to the Thermal Conductivity. 2.
- Demir, Z. Experimental Investigation of A7075-T651 Aluminum Alloy and St37 Steel Material Punching by Frictional Drilling Method. Ph.D. Thesis. Institute of Natural and Applied Sciences, Firat University, 2012.
- El-Bahloul, S., Elshourbagy, H., Al-Makky, M., & El-Midany, T. (2013). *Thermal Friction Drilling: (A Review)*.
- Eliseev, A., Fortuna, S., Kolubaev, E., & Kalashnikova, T. (2017). Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling. *Materials Science and Engineering: A*, 691. doi:10.1016/j.msea.2017.03.040

- Kaya, M., Aktaş, A., Beylergil, B., & Akyildiz, H. (2014). An experimental study on friction drilling of ST12 steel. *Transactions- Canadian Society for Mechanical Engineering*, 38, 319-329. doi:10.1139/tcsme-2014-0023
- Kerkhofs, M., Van Stappen, M., D'Olieslaeger, M., Quaeyhaegens, C., & Stals, L. M. (1994). The performance of (Ti,Al)N-coated flowdrills. *Surface and Coatings Technology*, 68-69, 741-746. doi:https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90247-X
- Krasauskas, P. (2012). Experimental and statistical investigation of thermo-mechanical friction drilling process. *Mechanika*, 17. doi:10.5755/j01.mech.17.6.1014
- Ku, W.-L., Hung, C.-L., Lee, S.-M., & Chow, H.-M. (2011). Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 935-944. doi:10.1007/s00170-010-2899-5
- Kumar, R., & Jesudoss Hynes, N. R. (2019). Thermal drilling processing on sheet metals: A review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(3), 193-205. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.08.003
- Krishna, P. G., Kishore, K., & Satyanarayana, V. V. (2010). Some investigations in friction drilling AA6351 using high speed steel tools. *Engineering and Applied Sciences*, 5(3), 11-15
- Li, H., Wu, J., Chen, L., Zhang, C., & Li, Z. (2018). An improved drilling force model in friction drilling AISI 321. *Journal of Physics: Conference Series*, 1074, 012147. doi:10.1088/1742-6596/1074/1/012147
- Marimuthu, B., Subramaniam, S., & T.C, K. (2017). Investigation of Surface Texture Generated by Friction Drilling on Al2024-T6.
- Miller, S., Li, R., Wang, H., Jr, S., & Shih, A. (2006). Experimental and Numerical Analysis of the Friction Drilling Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The Asme - J MANUF SCI ENG*, 128, 802-810. doi:10.1115/1.2193554
- Miller, S., Shih, A., & Blau, P. (2005). Microstructural Alterations Associated With Friction Drilling of Steel, Aluminum, and Titanium. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14, 647-653. doi:10.1361/105994905X64558

- Miller, S., Tao, J., & Shih, A. (2006). Friction drilling of cast metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1526-1535.
doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.09.003
- Nama, S., Namer, N., & Abdullah, I. (2016). Effect of Pre-hole Diameter on Bushing Dimensions for Friction Effect of Pre-hole Diameter on Bushing Dimensions for Friction Drilling Process of A6063-T6 Aluminum Alloy. 39, 373-387.
- Pantawane, P., & Ahuja, B. (2011). Experimental investigations and multi-objective optimization of friction drilling process on AISI 1015. *International Journal of Applied Engineering Research* 0976-4259.
- Park, H., & Ansari, M. (2018). Numerical investigation and an effective predicting system on the Selective Laser Melting (SLM) process with Ti6Al4V alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 400, 042046.
doi:10.1088/1757-899X/400/4/042046
- Su, K.-Y., Welo, T., & Wang, J. (2018). Improving Friction Drilling and Joining through Controlled Material Flow. *Procedia Manufacturing*, 26, 663-670.
doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.077
- Zhang, Y., Sato, Y., Kokawa, H., Park, S., & Hirano, S. (2008). Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing - MATER SCI ENG A-STRUCT MATER*, 485, 448-455. doi:10.1016/j.msea.2007.08.051
- นฤมิตร ตรีเดช และ สันติรัฐ นันสะอาจ. (2555). การศึกษาพารามิเตอร์การเจาะแบบแรงเสียดทานต่อการเจาะเหล็กกล้าผสม (AISI 4140)
- บรรพต มหาคาม. (2554). การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเจาะแบบแรงเสียดทานต่อ สมบัติงานเจาะอะลูมิเนียมผสม AA 2024

ดัชนีนิพนธ์

Scott F. Miller, Experimental Analysis and Numerical Modeling of the Friction Drilling Process (2016)

วิทยานิพนธ์

บรรพต มหาคาม, (2554), การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเจาะแบบแรงเสียดทานต่อสมบัติงานเจาะอลูมิเนียมผสม (AA2024), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

<http://www.formdrill-usa.com/index.html>

<http://techintrend.net/p/what-is-friction-drilling-and-how-to-use-it-2/>

<http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>

<http://www.supraalloys.com/titanium-grades.php>

<http://www.aircraftmaterials.com/data/titanium/ti6al4v.html>

<http://www.aerospacemetals.com/titanium-Ti-6Al-4V-ams-4911.html>

<http://www.titaniumengineers.com/ti-6ai-4v.html>

https://www.mitsubishicarbide.com/mms/en/product/pdf/catalog/c007t_q.pdf

<http://www.twi.co.uk>

<http://www.instron.us>

<http://www.twiprofessional.com/content/jk74.html>

<https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=186>

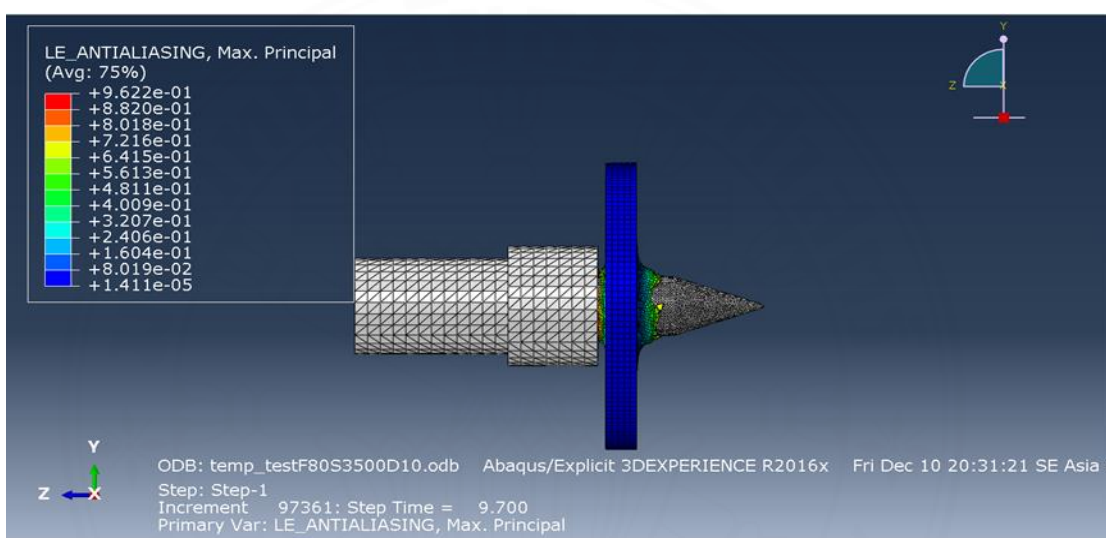


ภาคผนวก

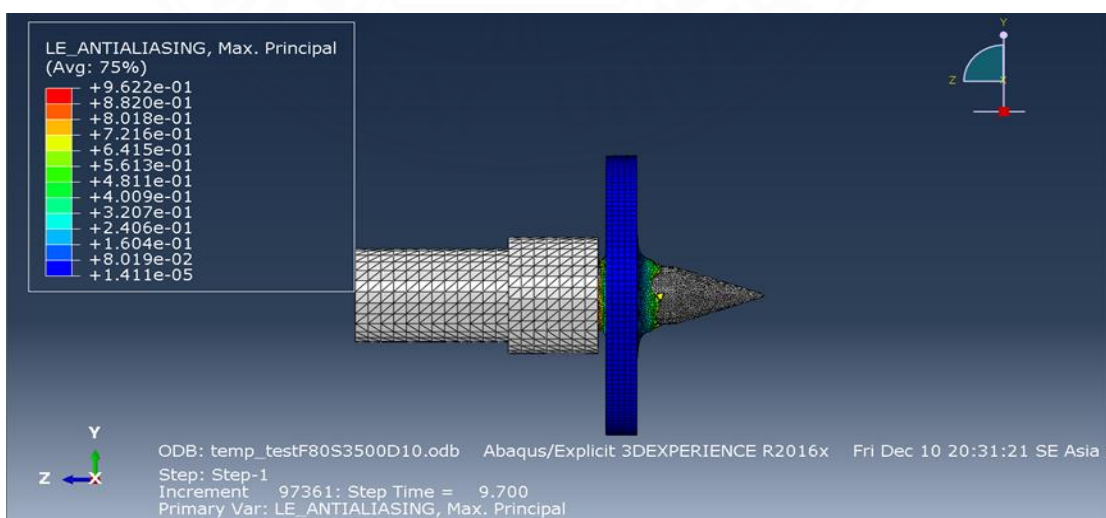
ภาคผนวก ก

ภาพการจำลองด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ในช่วงของแข็ง

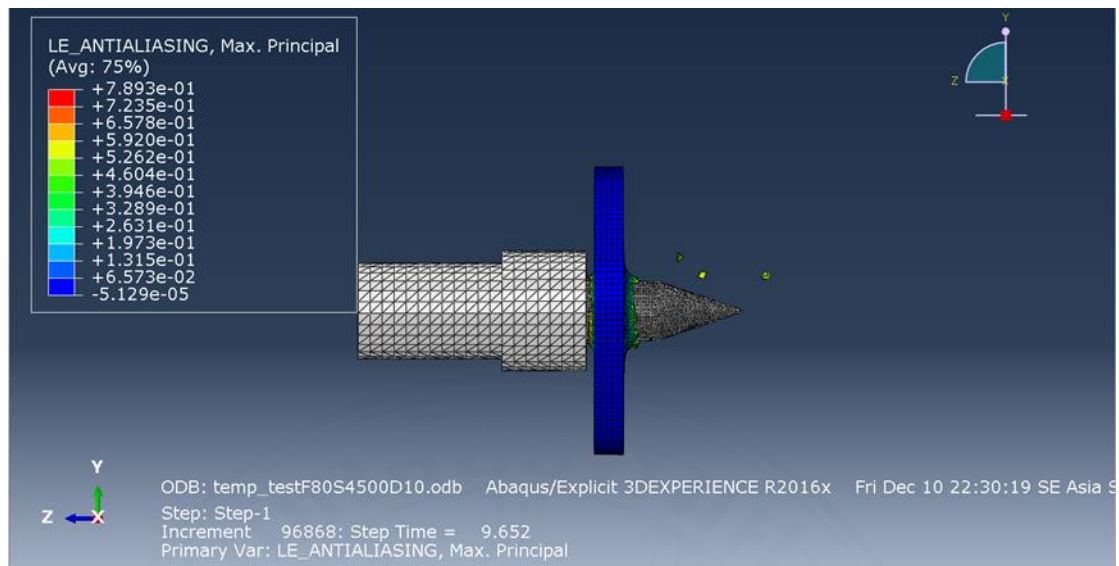
ภาพการจำลองด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABQUS2016 โดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ในช่วงของแข็ง ด้วยการใช้ปัจจัยอัตราป้อนและความเร็วรอบที่แตกต่างกัน



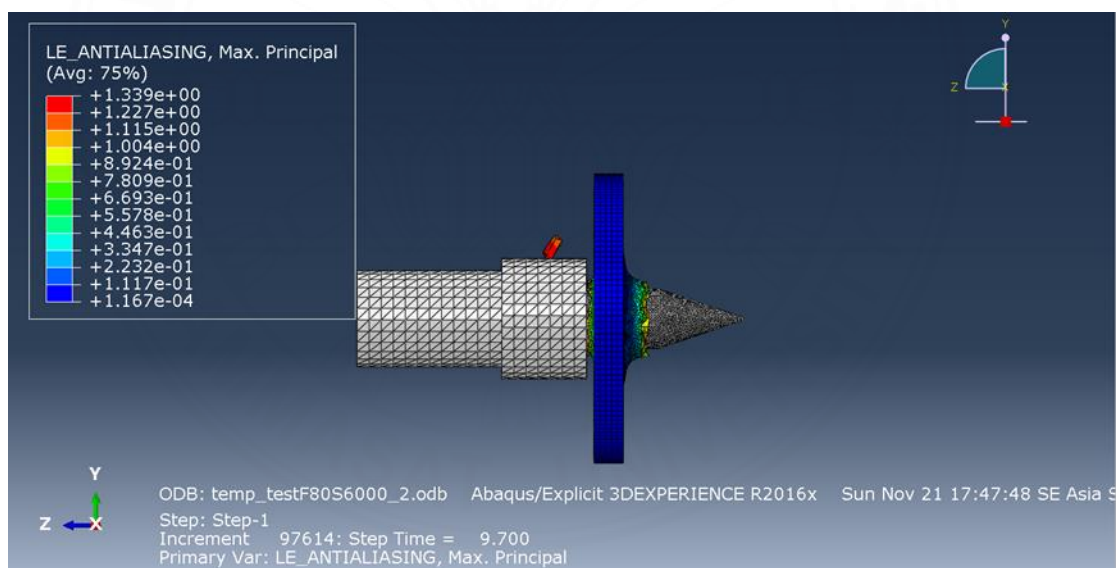
ภาพที่ ก.1 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 2500 ต่อนาที



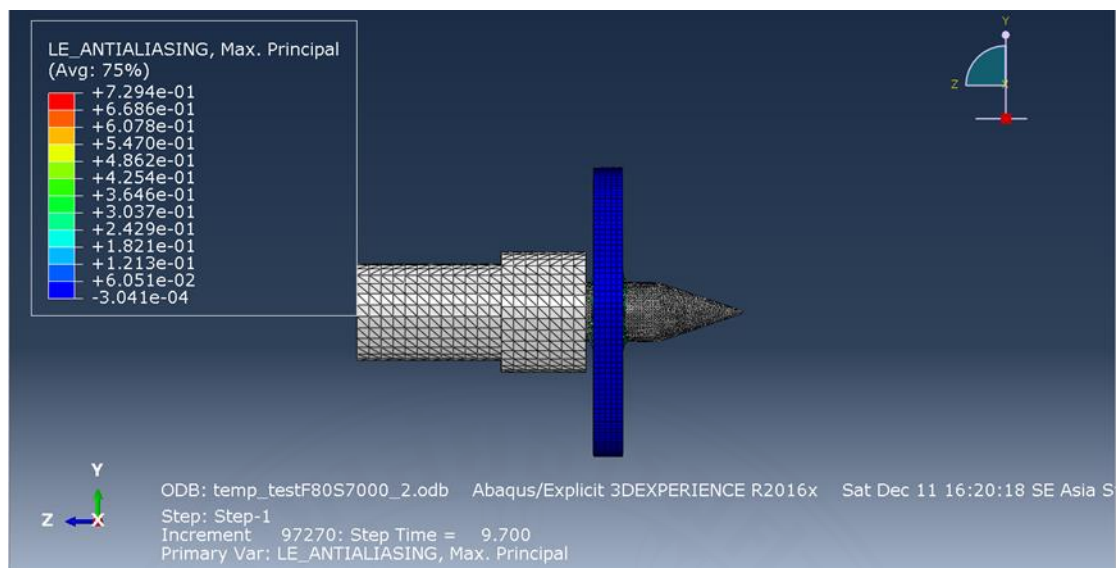
ภาพที่ ก.2 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 3500 ต่อนาที



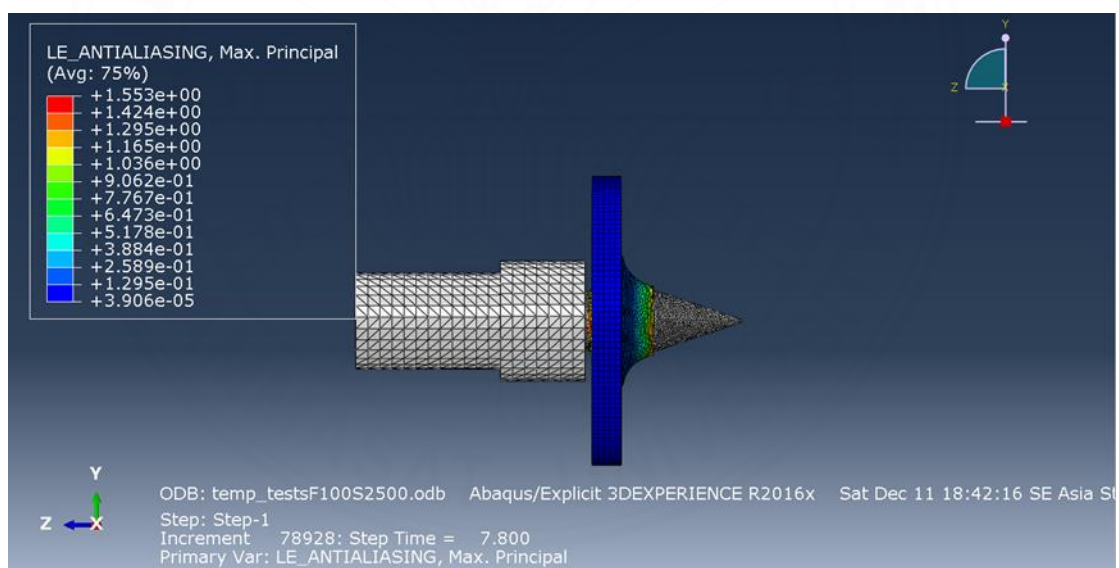
ภาพที่ ก.3 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ความเร็วรอบ 4500 ต่อนาที



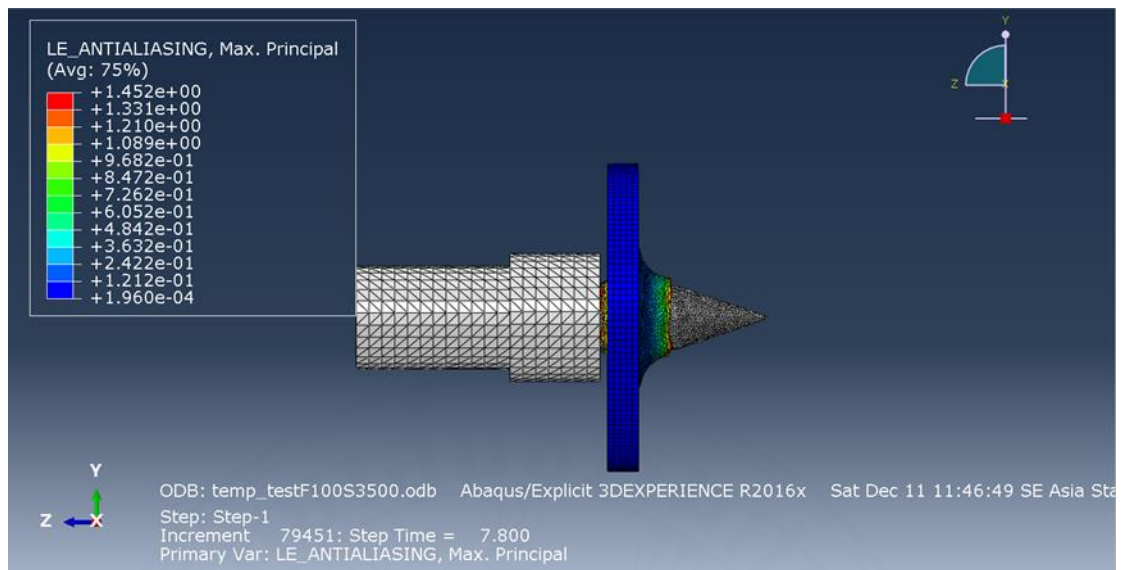
ภาพที่ ก.4 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ความเร็วรอบ 6000 ต่อนาที



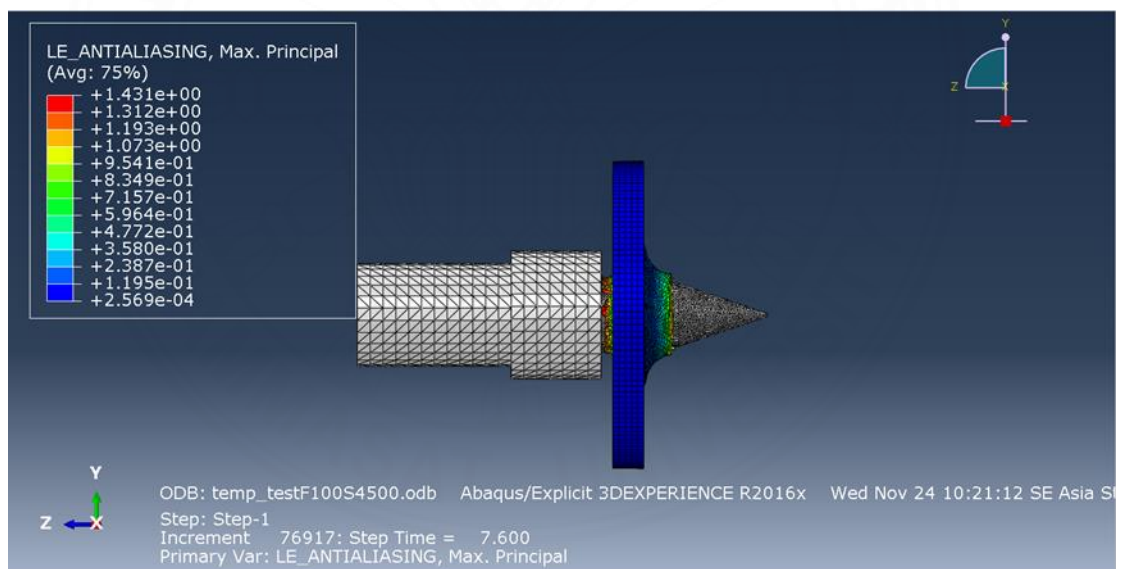
ภาพที่ ก.5 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 7000 ต่อนาที



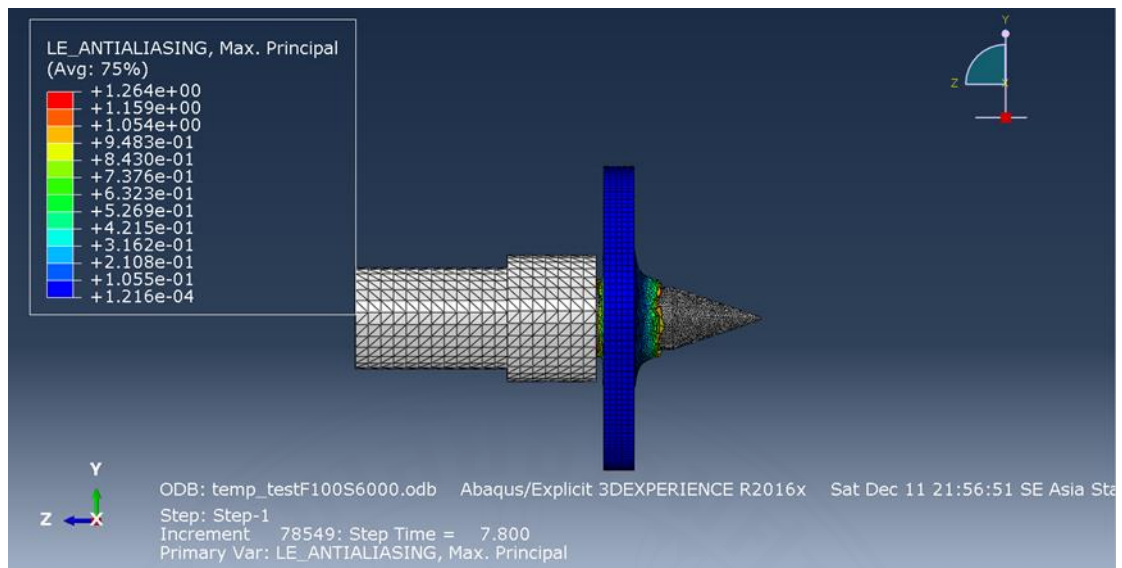
ภาพที่ ก.6 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 2500 ต่อนาที



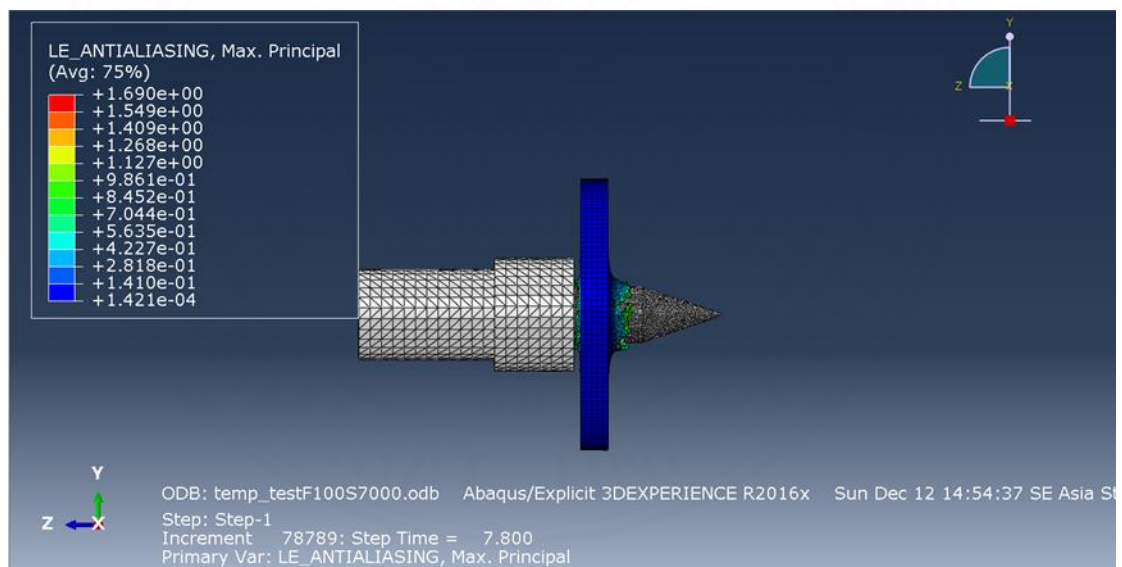
ภาพที่ ก.7 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 3500 ต่อวินาที



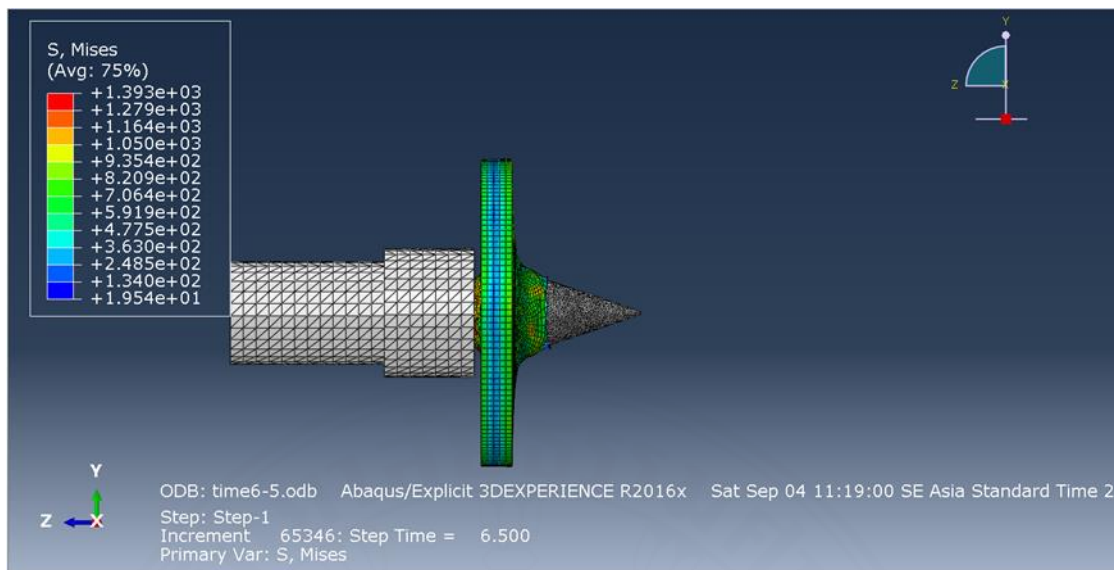
ภาพที่ ก.8 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 4500 ต่อวินาที



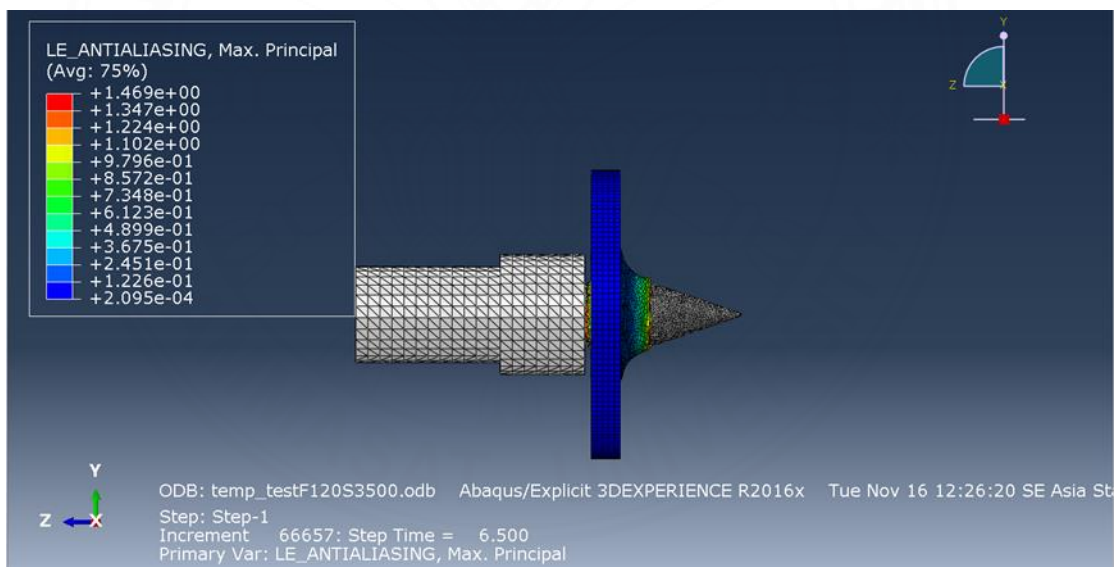
ภาพที่ ก.9 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 6000 ต่อนาที



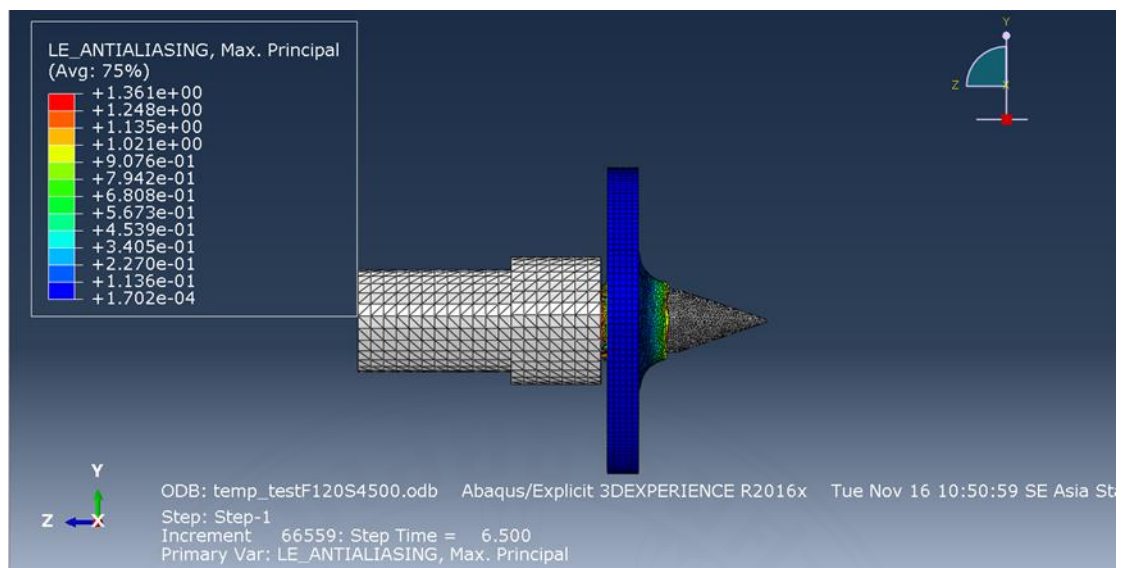
ภาพที่ ก.10 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 7000 ต่อนาที



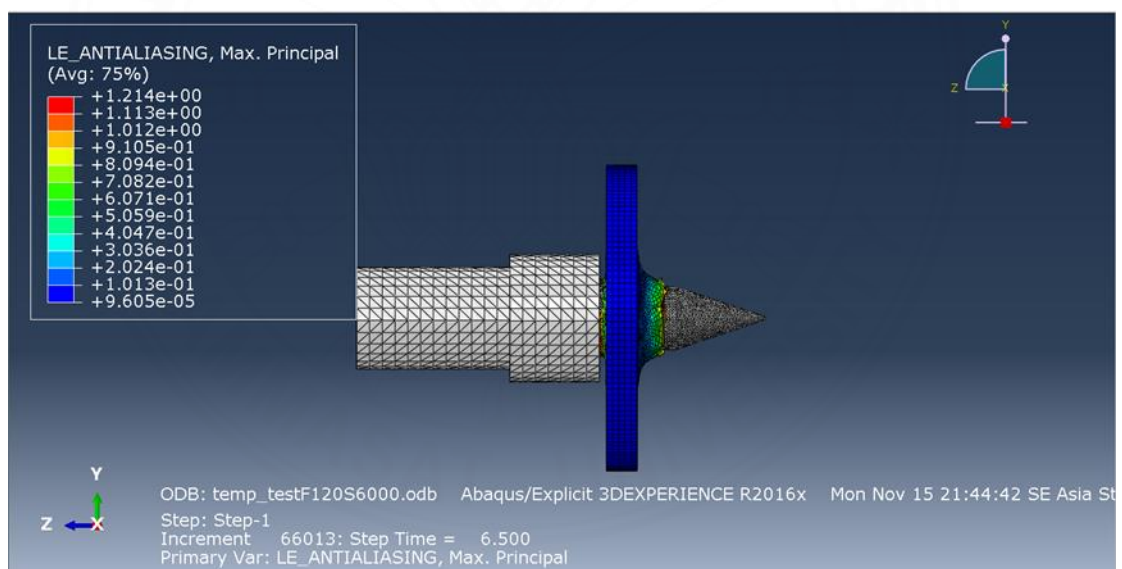
ภาพที่ ก.11 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ความเร็วรอบ 2500 ต่อนาที



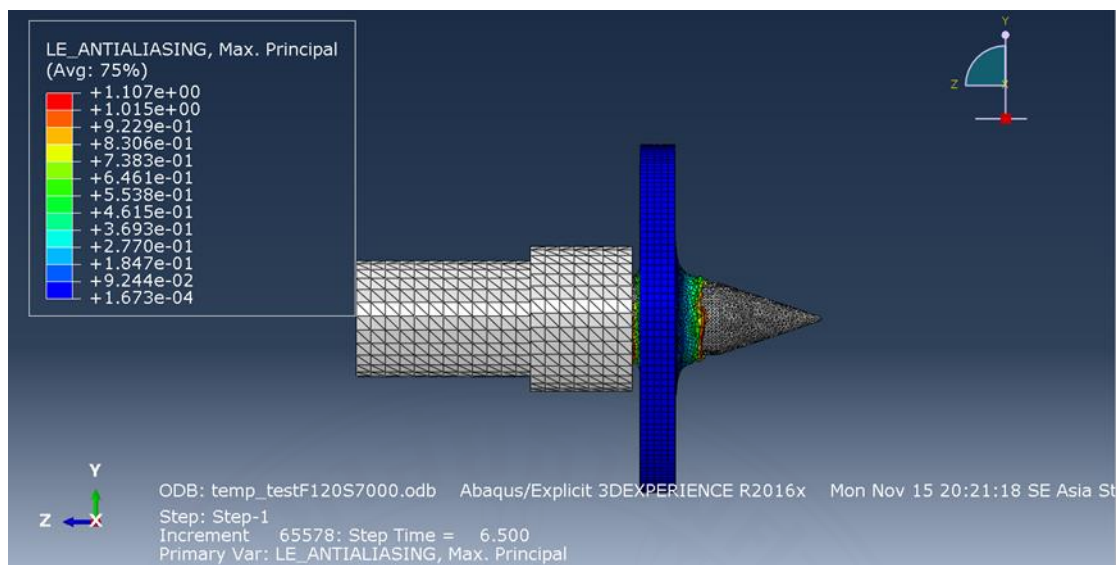
ภาพที่ ก.12 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ความเร็วรอบ 3500 ต่อนาที



ภาพที่ ก.13 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ความเร็วรอบ 4500 ต่อนาที



ภาพที่ ก.14 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ความเร็วรอบ 6000 ต่อนาที

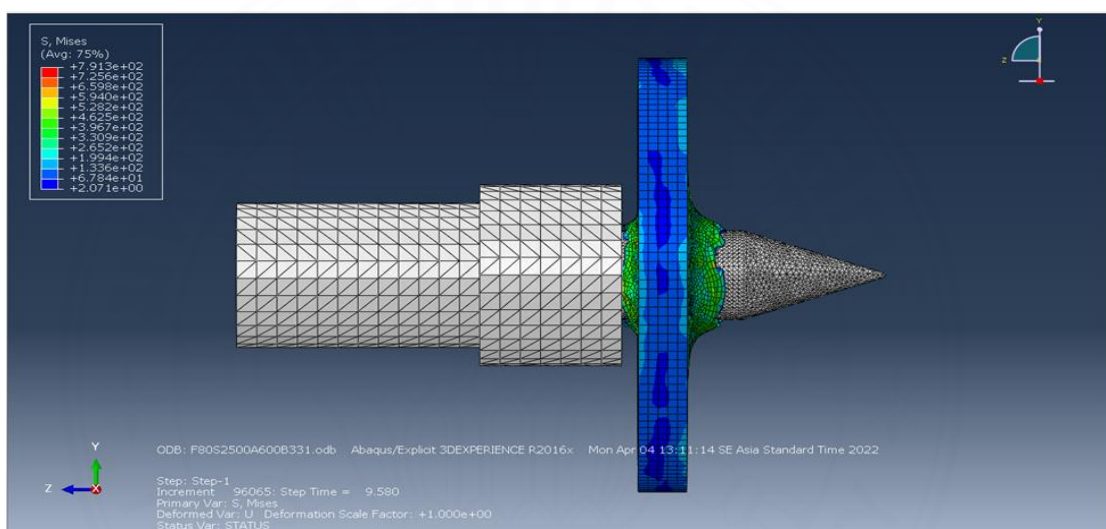


ภาพที่ ก.15 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 7000 ต่อนาที

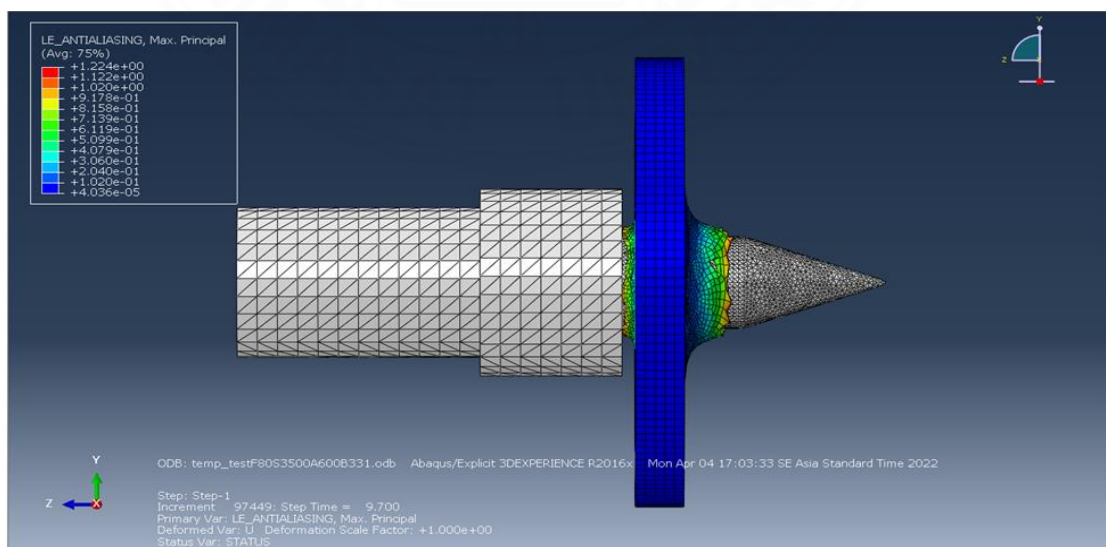
ภาคผนวก ข

ภาพการจำลองด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ในช่วงของแข็งกึ่งของเหลว

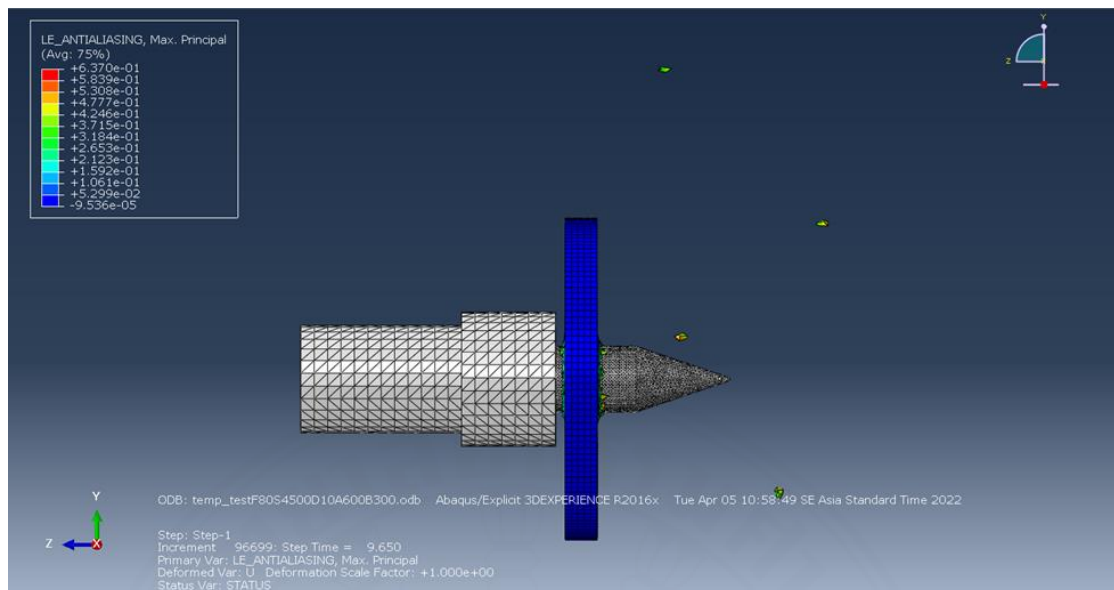
ภาพการจำลองด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABQUS2016 โดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ในช่วงของแข็งกึ่งของเหลว ด้วยการใช้อยู่ที่อัตราป้อนและความเร็วรอบที่แตกต่างกัน



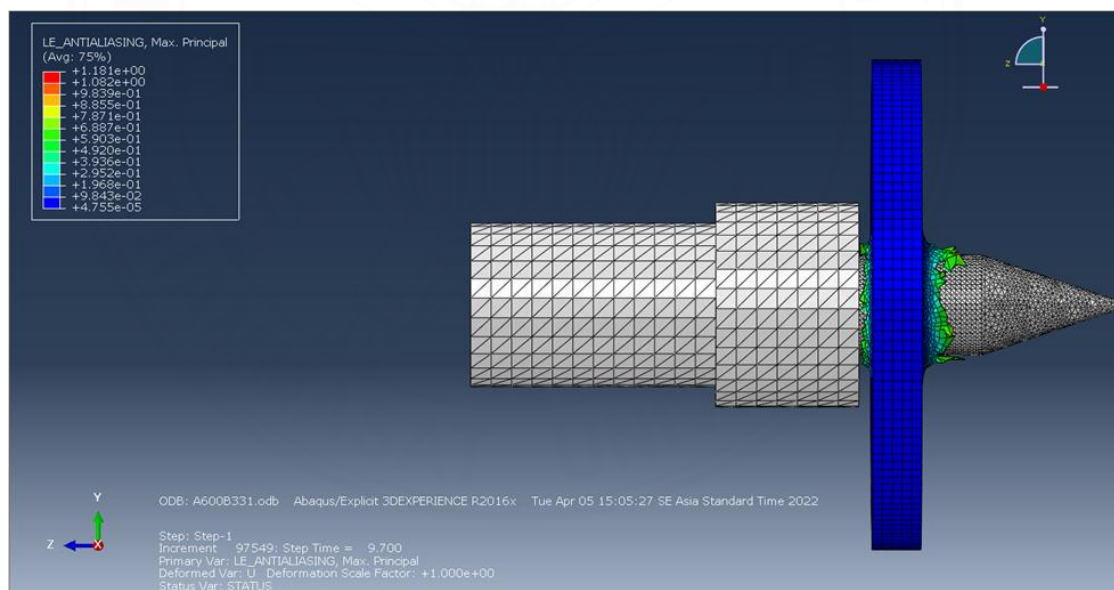
ภาพที่ ข.1 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 2500 ต่อนาที



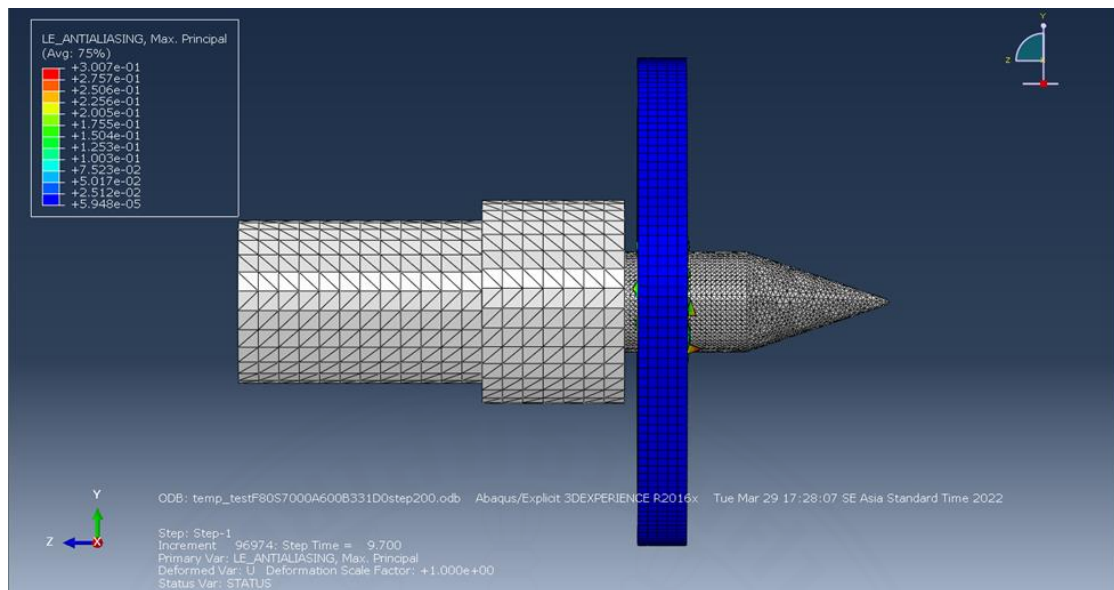
ภาพที่ ข.2 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 3500 ต่อนาที



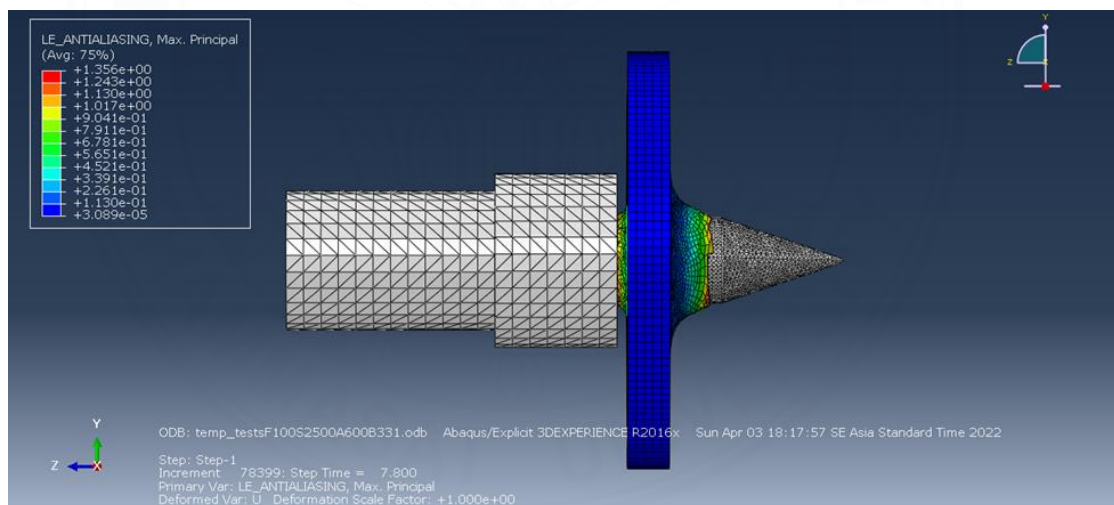
ภาพที่ ข.3 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อเวลาที่ความเร็วรอบ 4500 ต่อนาที



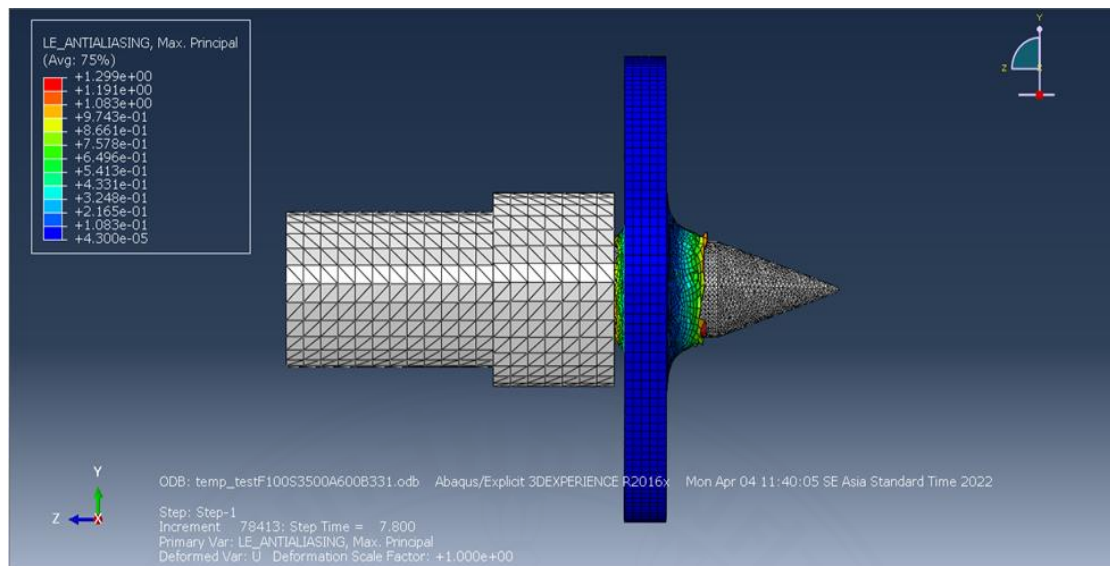
ภาพที่ ข.4 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อเวลาที่ความเร็วรอบ 6000 ต่อนาที



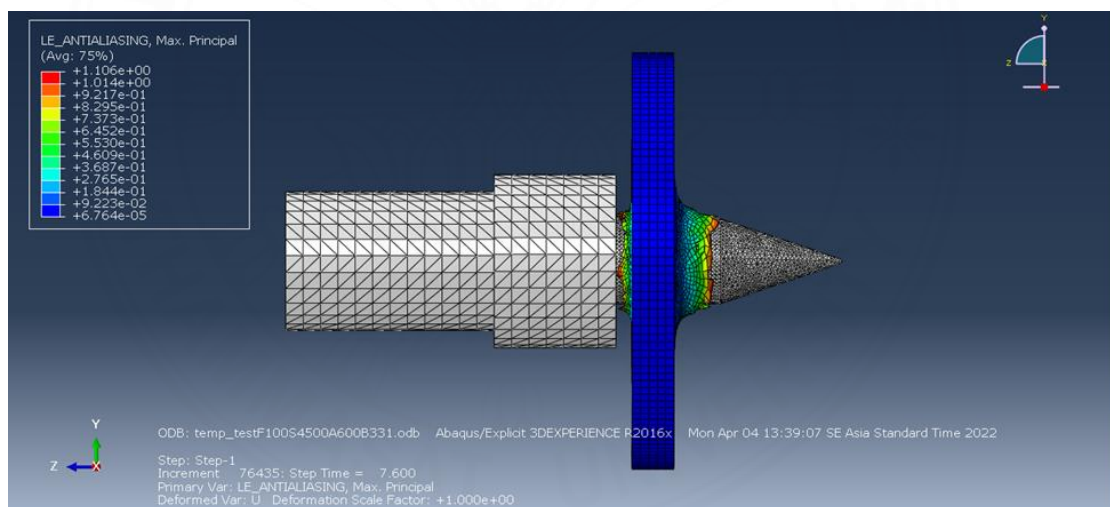
ภาพที่ ข.5 การจำลองด้วยอัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 7000 ต่อวินาที



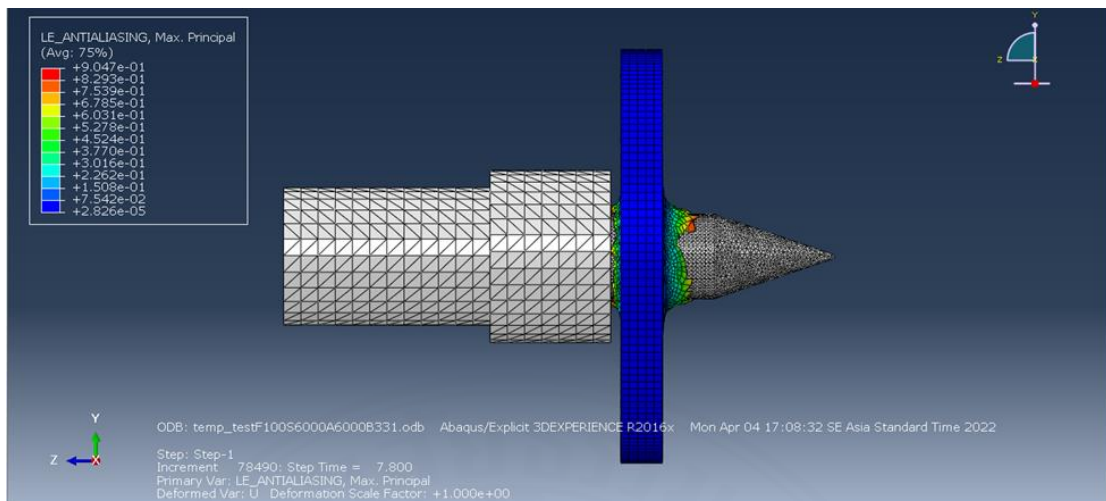
ภาพที่ ข.6 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 2500 ต่อวินาที



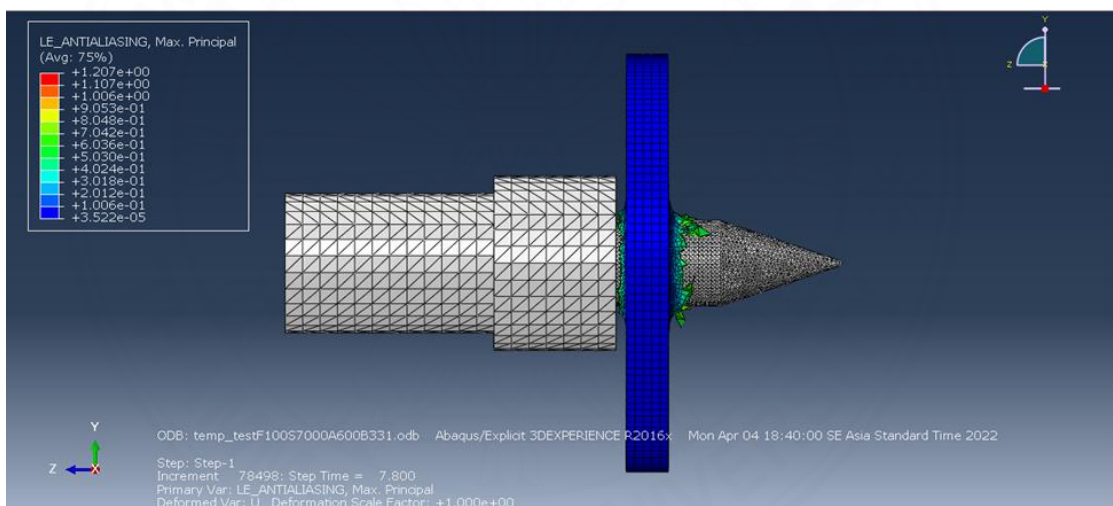
ภาพที่ ข.7 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วรอบ 3500 ต่อวินาที



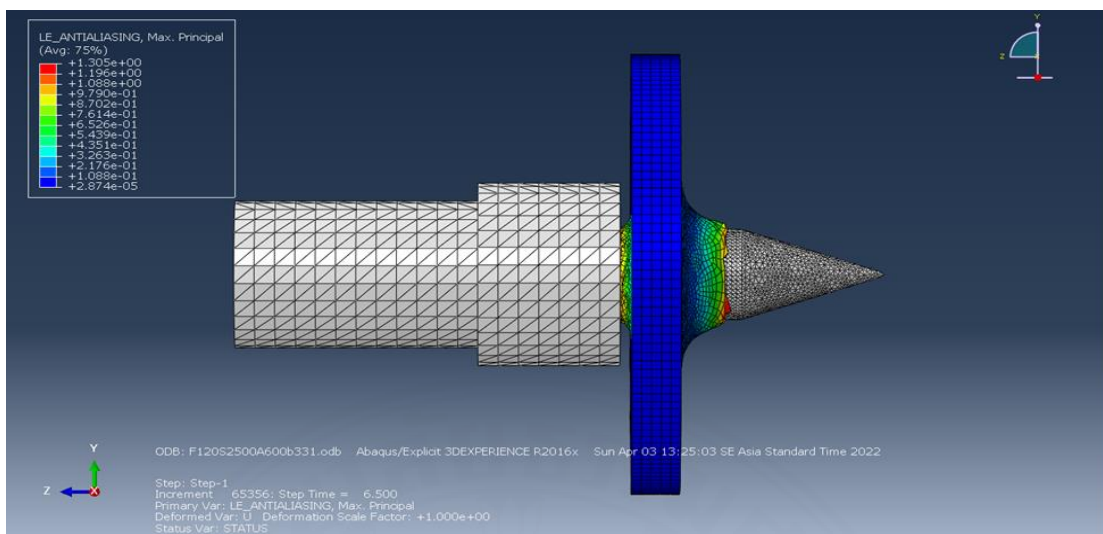
ภาพที่ ข.8 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วรอบ 4500 ต่อวินาที



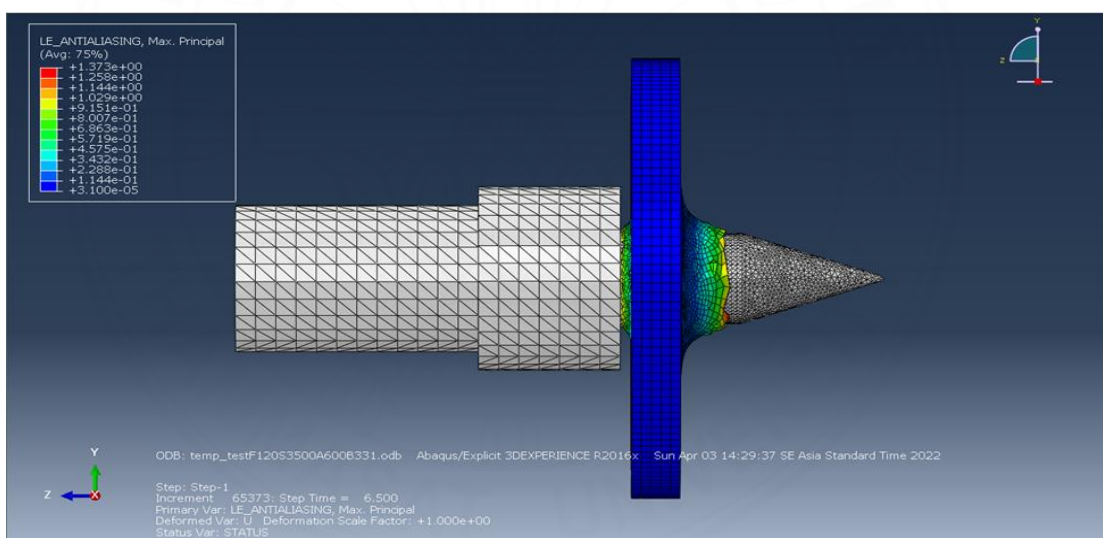
ภาพที่ ข.9 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 6000 ต่อนาที



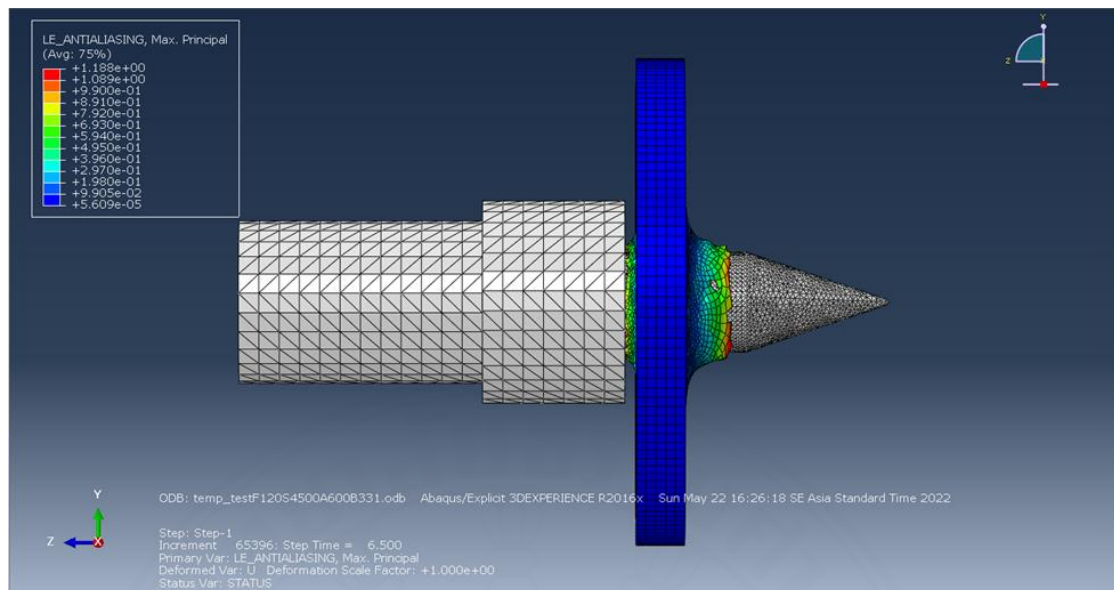
ภาพที่ ข.10 การจำลองด้วยอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 7000 ต่อนาที



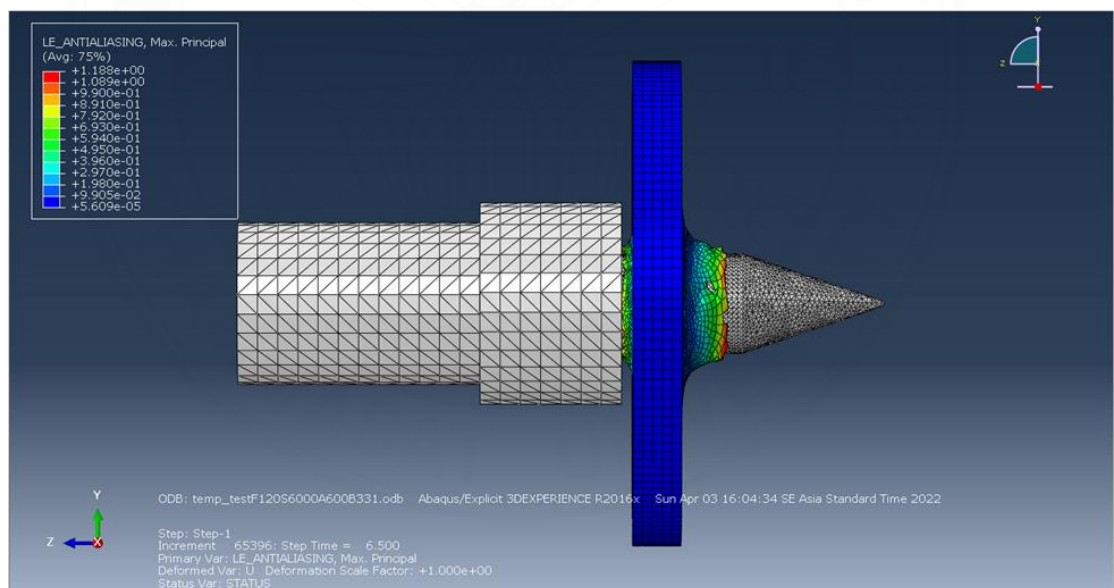
ภาพที่ ข.11 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 2500 ต่อนาที



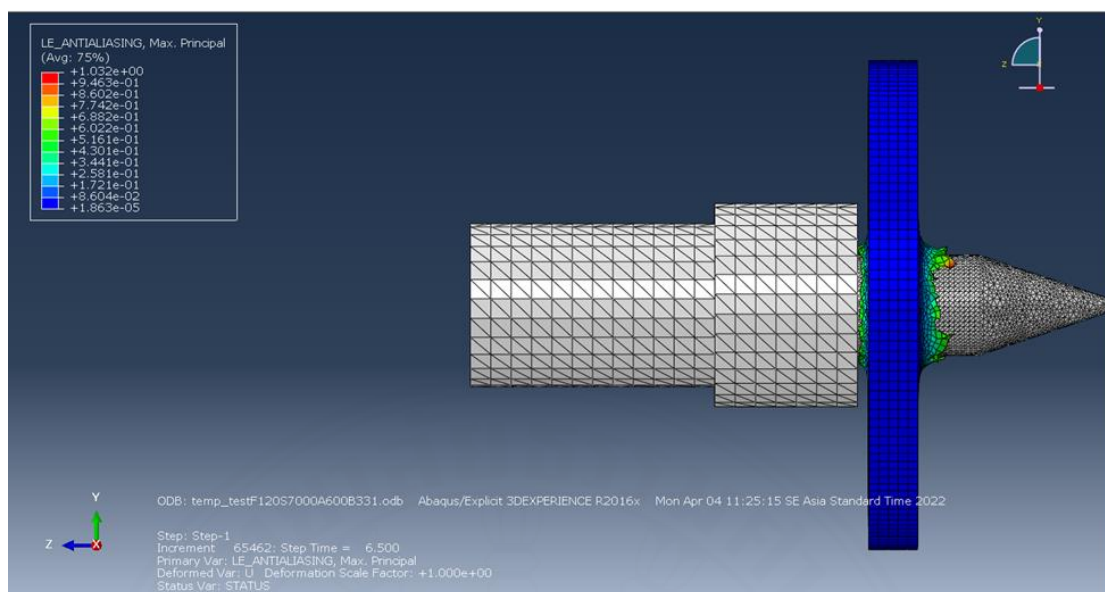
ภาพที่ ข.12 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 3500 ต่อนาที



ภาพที่ ข.13 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 4500 ต่อนาที



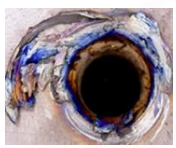
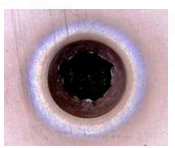
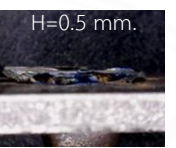
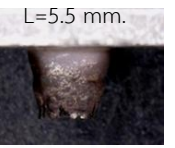
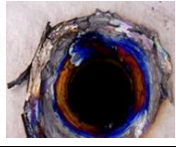
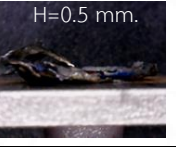
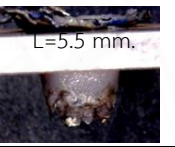
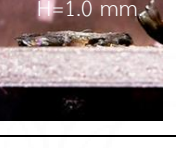
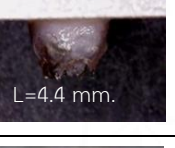
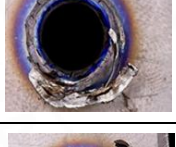
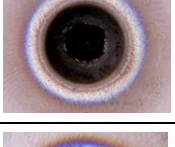
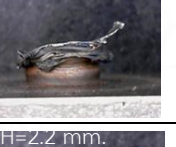
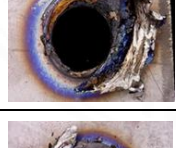
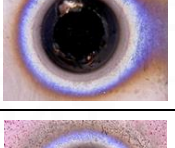
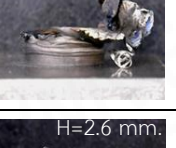
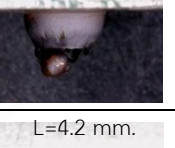
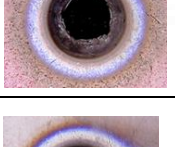
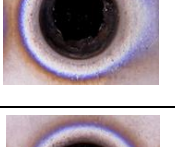
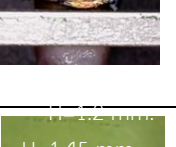
ภาพที่ ข.14 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 6000 ต่อนาที

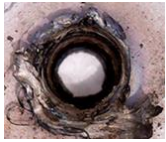
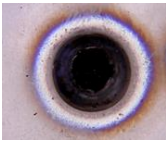
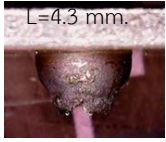
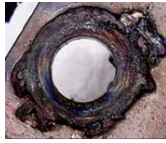
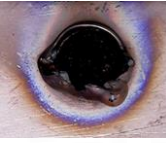
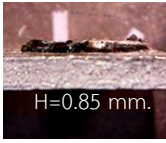
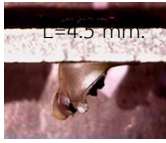
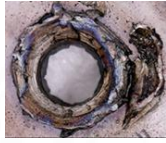
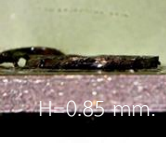
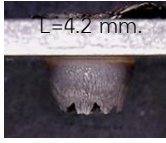
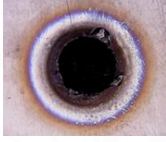
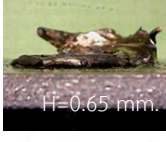
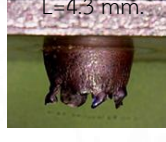
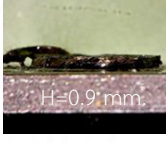
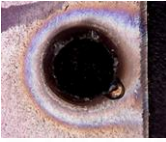
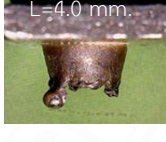
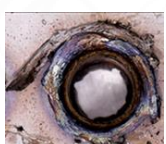
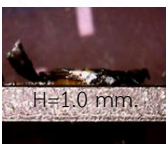
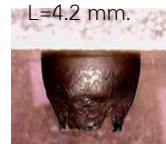


ภาพที่ ข.15 การจำลองด้วยอัตราป้อน 120 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วรอบ 7000 ต่อนาที

ภาคผนวก ค
ชิ้นงานจากการทดลอง

ตารางที่ ค. สภาพชิ้นงานหลังจากการทดลองในแต่ละเงื่อนไข

ปัจจัย	ภาพด้านบน	ภาพด้านล่าง	ภาพด้านข้างบน	ภาพด้านข้างล่าง
T1 , Run 1 V=2500 rpm f=80 mm/min			 H=0.5 mm.	 L=5.5 mm.
T1 , Run 2 V=2500 rpm f=100 mm/min			 H=0.5 mm.	 L=5.5 mm.
T1 , Run 3 V=2500 rpm f=120 mm/min			 H=1.0 mm.	 L=4.4 mm.
T1 , Run 4 V=3500 rpm f=80 mm/min			 H=2.5 mm.	 L=4.3 mm.
T1 , Run 5 V=3500 rpm F100 mm/min			 H=2.2 mm.	 L=3.8 mm.
T1 , Run 6 V=3500 rpm f=120 mm/min			 H=2.6 mm.	 L=4.2 mm.
T2 , Run 7 V=4500 rpm f=80 mm/min			 H=1.45 mm.	 L=4.5 mm.
T3 , Run 8 V=4500 rpm f=100 mm/min			 H=1.45 mm.	 L=4.15 mm.

ปัจจัย	ภาพด้านบน	ภาพด้านล่าง	ภาพด้านข้างบน	ภาพด้านข้างล่าง
T3 , Run 9 V=4500 rpm f=120 mm/min				
T4 , Run 10 V=6000 rpm f=80 mm/min				
T5 , Run 11 V=6000 rpm f=100 mm/min				
T5 , Run 12 V=6000 rpm f=120 mm/min				
T6 , Run 13 V=7000 rpm f=80 mm/min				
T7 , Run 14 V=7000 rpm f=100 mm/min				
T7 , Run 15 V=7000 rpm f=120 mm/min				

ภาคผนวก ง
 ตารางค่าความแข็งบนภาคครึ่งของตัดชิ้นงานวัสดุ Ti-6AL-4V ในแนวแกน Y และ
 แกน X

ตารางที่ ง.1 ผลค่าความแข็งในจุดที่กำหนด ในแนวแกน Y

ตำแหน่งการวัดความแข็งในแนวแกน Y (mm)	ค่าความแข็ง
0.0000	547.0
0.5000	474.2
1.0000	474.2
1.5000	548.6
2.0000	707.7
2.5000	813.2
3.0000	760.0
3.5000	670.0
4.0000	553.2
4.5000	386.8
5.5000	510.7
6.0000	443.7

ตารางที่ ง.2 ผลค่าความแข็งในจุดที่กำหนด ในแนวแกน X

ตำแหน่งการวัดความแข็งในแนวแกน X (mm)	ค่าความแข็ง
0	813.2
0.1	473.1
0.2	482.7
0.3	456.7
0.4	437.7
0.5	441.3
0.6	439.1
0.7	416.5
0.8	428.6
0.9	423.2

ภาคผนวก จ
ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็ง

ตารางที่ จ.1 ผลค่าแรงกดสูงสุดจากการจำลอง (kN)

Speed/Feed	F80	F100	F120
S2500	12007.6	13902.3	13211.5
S3500	11006.4	10770.2	11082.8
S4500	7400.12	9008.91	9037.44
S6000	5824.52	6317.34	6121.67
S7000	1804.75	4499.38	5284.21

ตารางที่ จ.2 ผลค่าแรงบิดสูงสุดจากการจำลอง (N.mm)

Speed/Feed	F80	F100	F120
2500	1209.7	1450	1479.39
3500	1093.83	1307.2	1400.29
4500	1161.78	1427.82	1597.77
6000	1106.15	1278.93	1437
7000	383.788	1092.46	1352.57

ตารางที่ จ.3 ผลค่าแรงบิดอุณหภูมิสูงสุดจากการจำลอง (C)

Speed/Feed	F80	F100	F120
2500	1616	1028	2141
3500	1343	1842	4596
4500	2009	2396	8438
6000		2071	2729
7000		821	2549

ผลการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุให้อยู่ช่วงของแข็ง
กึ่งของเหลว

ตารางที่ ฉ.1 ผลค่าแรงกดสูงสุดจากการจำลอง (kN)

Speed/Feed	F80	F100	F120
S2500	6512.23	6404.49	6712.99
S3500	4601.22	5124.92	5447.37
S4500	2094.53	3983.41	4500.59
S6000	1843.03	2425.15	2964.16
S7000	906.187	1841.8	2163.41

ตารางที่ ฉ.2 ผลค่าแรงบิดสูงสุดจากการจำลอง (N.mm)

Speed/Feed	F80	F100	F120
2500	595.209	677.448	693.187
3500	661.244	710	760.029
4500	542.429	734.42	750.037
6000	275.422	601.706	672.124
7000	131.052	526.473	654.236

ภาคผนวก ฉ
ผลการทดลองจริง

ผลการการทดลอง

ตารางที่ ฉ.1 ผลค่าแรงกดสูงสุดจากการทดลอง (kN)

Speed/Feed	F80	F100	F120
2500	2.5720	2.8740	3.3660
3500	2.3550	2.5120	2.9720
4500	1.8380	2.1980	2.8110
6000	1.0990	1.9810	2.4870
7000	0.9970	1.3250	2.3660

ตารางที่ ฉ.2 ผลค่าแรงบิดสูงสุดจากการทดลอง (N.m)

Speed/Feed	F80	F100	F120
2500	5.6610	6.8420	7.9650
3500	3.0520	3.7080	4.4630
4500	2.8160	3.2650	3.7160
6000	4.2570	5.8920	6.5840
7000	5.3830	6.1150	6.8510

ภาคผนวก ข
ผลการจำลองขนาดของ Mesh ที่แตกต่างกัน

ตารางแสดงผลการจำลองที่แปรผันต่อขนาดของ Mesh ที่แตกต่างกัน

ขนาด Mesh	ผลการจำลอง	ผลของแรงที่เกิดขึ้น(นิวตัน)
1.5 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	6437.8600
1 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	4973.4700
0.5 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	2426.1900
0.3 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1947.99
0.29 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1820.4
0.28 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1820.4
0.27 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1929.37
0.26 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1947.99
0.25 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1804.75
0.24 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1617.21
0.23 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1660.2
0.22 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1647.9
0.21 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1691.53
0.2 มิลลิเมตร	ทำการจำลองสำเร็จ	1664.23

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ธงชัย เฟื่องจันทร์ดี
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2553: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำแหน่ง	อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ทุนการศึกษา (ถ้ามี)	
ผลงานทางวิชาการ	INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS IN FRICTION DRILLING OF TITANIUM
ประสบการณ์ทำงาน	2562 อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2558 อาจารย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา 2544 ช่างเทคนิค มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)