

การตัดเนื้องอกเหล็กกล้าด้วยแม่พิมพ์



นางสาวพีรภา เนตรพุกกณะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

STEEL ROD PUNCH/DIE SHEAR CUTTING



Pirapa Natpukkana

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Materials Engineering


Suranaree University of Technology

Academic Year 2018


การตัดเนื้องา่งหลักกล้าด้วยแม่พิมพ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติใ้บัณฑิตวิทยาลัยบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ฐาปนีย์ พัชรวิชญ์)
ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ภูษิต มิตรสมหวัง)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)




(ผศ. ดร.รัตน ปริสุทธิกุล)
กรรมการ




(ผศ. ดร.อุษณีย์ กิตกำธร)
กรรมการ



(ผศ. ดร.เสกสรร ไชยจิตต์)
กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนดัธร ชานีประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พรีภา เนตรพุกคณะ : การตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าด้วยแม่พิมพ์ (STEEL ROD PUNCH/DIE SHEAR CUTTING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูษิต มิตระสมหวัง, 133 หน้า.

งานวิจัยนี้ถูกกระทำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าเกรด JIS SCM 420 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.48 มิลลิเมตร ผู้วิจัยอาศัยการทดลองตัดเฉือนและการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ ความเสียหายของแม่พิมพ์ตัดต่อผลการตัดเฉือน ยิ่งไปกว่านั้นผู้วิจัยได้เสนอเทคนิคการกรัดร่องบนชิ้นงานก่อนการตัดเฉือนเพื่อปรับปรุงคุณภาพขอบตัด และศึกษาความเป็นไปได้ และผลการตัดเฉือนด้วยเทคนิคดังกล่าว

จากผลการตัดเฉือนโดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์พบว่าการใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่น้อยลงส่งผลให้แรงต้านการตัดสูงสุดเพิ่มสูงขึ้น ขอบตัดมีคุณภาพดี กล่าวคือบริเวณส่วนโค้งมนและครีบบริเวณขอบตัดมีขนาดเล็ก ผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้ทราบว่า การใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์น้อยส่งผลให้ความเค้นในชิ้นงานบริเวณคมตัดสูงและทำให้แท่งโลหะขาดโดยเกิดการเสีรูอย่างถาวรน้อย ขอบตัดที่ได้จึงมีคุณภาพดี นอกจากนี้การใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์น้อยชิ้นงานถูกตัดขาดโดยการตัดเฉือนทั้งแบบปกติและแบบการตัดเฉือนครั้งที่สอง ในขณะที่แท่งเหล็กกล้าถูกตัดโดยการตัดเฉือนแบบปกติเท่านั้น ในกรณีที่ใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มาก

จากการตรวจสอบความเสียหายของคมตัดแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานในการตัดมาแล้วประมาณ 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้ง พบว่าแม่พิมพ์บนมีความเสียหายคล้ายคลึงกันแต่แม่พิมพ์ล่างเกิดความเสียหายมากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการตัดเฉือนโดยแม่พิมพ์ที่มีความเสียหายมากขึ้นส่งผลให้ครีบบริเวณส่วนโค้งมนใหญ่ขึ้น

จากการศึกษาการตัดเฉือนด้วยเทคนิคการกรัดร่องพบว่าเทคนิคนี้ช่วยปรับปรุงคุณภาพขอบตัด กล่าวคือไม่เกิดส่วนโค้งมน ลดการเกิดครีบบริเวณขอบนอกขอบตัดและรักษาความกลมของขอบตัดได้เป็นอย่างดี ผลการจำลองการตัดแท่งเหล็กกล้าที่ผ่านการกรัดร่องแสดงให้เห็นว่า การกรัดร่องช่วยลดการเสีรูอย่างถาวรของแท่งเหล็กกล้าก่อนถูกตัดขาดได้มาก จึงส่งผลให้ขอบตัดไม่เกิดส่วนโค้งมนและคงความกลมไว้ได้ สุดท้ายผู้วิจัยพบว่าต้องกรัดบนแท่งเหล็กกล้าที่สึกขึ้นช่วยลดโอกาสในการเกิดครีบบริเวณขอบนอกขอบตัดลงอย่างมีนัยสำคัญ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา นริศ เนตรพุกคณะ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ภูษิต มิตระสมหวัง

PIRAPA NATPUKKANA : STEEL ROD PUNCH/DIE SHEAR CUTTING.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PUSIT MITSOMWANG, Ph.D.,

133 PP.

PUNCH/DIE SHEARING/STEEL ROD/SHEAR EDGE/TOOL DAMAGE/
NOTCHING TENIQUE

This research was carried out to study the shear cutting of JIS SCM 420 steel rod which had a diameter of 4.48 mm. Shear cutting experiments and finite element method (FEM) analysis were conducted to investigate the effect of punch/die clearance and cutting tool damage on shear cutting result. Also, the notch shear cutting technique for improving quality of sheared edge was proposed and investigated.

By varying the clearance, it was found that the small clearance caused high maximum cutting load resistance and provided better sheared edge. Namely, the rollover and burr were small. From the FEM results, it was known that the use of the small clearance increased the maximum stress near the cutting edge and caused the steel rod separation with small plastic deformation. This result in the occurrence of good sheared edge. Moreover, using the small clearance, the steel rod tended to separate by both simple shearing and secondary shearing modes. But, the steel rod was separated by only simple shearing mode when using a certain large clearance.

This investigation of cutting tool which had been used at 50,000, 100,000 and 150,000 cycle times of cutting revealed that damage of upper die was similar, while the damage of lower die increased with cycle times of cut. The shear cutting using the damaged tools caused the large rollover and burr at the sheared edge

The study of the notch shear cutting showed that the technique improved the quality of sheared edge, remarkably. Namely, the rollover did not occur. The occurrence of the long burr from the steel rod surface decreased. The roundness of the steel rod was kept. The simulation results revealed that the notch on the steel rod reduced the plastic deformation during shearing. Consequently, the quality of sheared edge was improved. Finally, it was found that the probability of the long burr occurrence significantly decreased with increasing the depth of notch on the steel rod.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature ศิษย์ วรรณพดุม

Advisor's Signature ศ.ดร. อรุณ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากการได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งในด้านวิชาการ และในส่วนของ การดำเนินงานจากบุคคลต่างๆ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูมิ ต.มิตรสมหวัง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา และเป็นผู้ให้คำแนะนำรวมถึงคำปรึกษาที่มีประโยชน์ยิ่งในงานวิจัยตลอดจนการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตน บ.วิสุทธิกุล ผู้ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาความรู้ทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

นางสาวศิริรัตน์ ภาคอินทรีย์ และ นายสิทธิพล บุญมาปิด ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนด้านการดำเนินงานวิจัยและเป็นผู้ช่วยอันสำคัญยิ่งในงานวิจัยครั้งนี้

Prof. Dr. Shigeru Nagasawa และ นายเทพวัชระ รุจิราภา ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนอุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ในการดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยมอเตอร์เซน จำกัด สำหรับการสนับสนุนด้านชิ้นงานและแม่พิมพ์ตัดเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้ จนกระทั่งการดำเนินงานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้จัดทำตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

พีรภา เนตรพุกคณะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	6
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	7
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 กระบวนการตัดโดยใช้แม่พิมพ์.....	9
2.2 ผลของตัวแปรการตัดต่อลักษณะขอบตัด.....	11
2.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ต่อผลการตัดเนียน.....	11
2.2.2 อิทธิพลของวัสดุต่อผลการตัดเนียน.....	17
2.2.3 อิทธิพลของการสึกหรอของแม่พิมพ์ต่อผลการตัดเนียน.....	20
2.3 เทคนิคการปรับปรุงขอบตัดเนียน.....	28
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.4.1 การเสียรูปของโลหะเนื่องจากแรงทางกล.....	31
2.4.2 ความเค้น ความเครียด และเกณฑ์การครากของวัสดุ.....	32
2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการทดลอง และการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	43
3.1	วัสดุ และอุปกรณ์.....	43
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	43
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	44
3.2	วิธีการศึกษา.....	46
3.2.1	การเตรียมชิ้นงาน.....	46
3.2.2	การตัดเฉือนชิ้นงาน	47
3.3	การตรวจสอบลักษณะขอบตัด ลักษณะพื้นผิว ความกลมของขอบตัด และการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด	48
3.3.1	การตรวจสอบลักษณะขอบตัด.....	48
3.3.2	การตรวจสอบลักษณะพื้นผิว	48
3.3.3	การตรวจสอบความกลมของขอบตัด.....	48
3.3.4	การตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด	49
3.4	การศึกษาโดยการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	49
3.4.1	โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการจำลองการตัดเฉือน	50
3.4.2	การตรวจสอบ โมเดลวัสดุ	51
4	การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์	53
4.1	แรงต้านการตัดเฉือน	54
4.2	ลักษณะขอบตัดเฉือน	57
4.3	ความกลมของขอบตัด	59
4.4	พื้นผิวขอบตัดเฉือน	61
4.5	การวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	64
4.6	สรุปการวิจัย	67
5	การศึกษาความเสียหายในแม่พิมพ์ต่อการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า	69
5.1	การศึกษาความเสียหายของแม่พิมพ์ตัดตามอายุการใช้งานของแม่พิมพ์.....	69
5.2	การศึกษาอิทธิพลความเสียหายของแม่พิมพ์ตัดต่อผลการตัดเฉือน แท่งเหล็กกล้า JIS SCM 420.....	75

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.1	แรงต้านการตัดเฉือน	75
5.2.2	ลักษณะขอบตัดเฉือน	78
5.2.3	ความกลมของขอบตัด	80
5.2.4	พื้นผิวของขอบตัดเฉือน	80
5.3	สรุปการวิจัย	81
6	การประยุกต์ใช้เทคนิคการกรัดร่องก่อนทำการตัดเฉือน	82
6.1	การตัดเฉือน โดยใช้เทคนิคการกรัดร่องเปรียบเทียบกับ การตัดเฉือนแบบปกติ	82
6.1.1	แรงต้านการตัดเฉือน	83
6.1.2	ลักษณะขอบตัดเฉือน	85
6.1.3	ความกลมของขอบตัด	87
6.1.4	พื้นผิวของขอบตัดเฉือน	88
6.1.5	การวิเคราะห์ผลการตัดด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	89
6.2	ผลของความถี่การกรัดต่อผลการตัดเฉือนแห้งเหล็กกล้า	90
6.2.1	แรงต้านการตัดเฉือน	90
6.2.2	ลักษณะขอบตัดเฉือน	93
6.2.3	ความกลมของขอบตัด	94
6.2.4	พื้นผิวของขอบตัดเฉือน	95
6.3	สรุปการวิจัย	95
7	สรุป	97
	รายการอ้างอิง	98
	ภาคผนวก	101
ภาคผนวก ก.	แรงในการตัดเฉือน	101
ภาคผนวก ข.	การตรวจสอบขอบตัดเฉือนของชิ้นงาน	103
ภาคผนวก ค.	การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคการลอกลาย	105
ภาคผนวก ง.	การตรวจวัดและวิเคราะห์ผลความเสียหายของแม่พิมพ์	109
ภาคผนวก จ.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	112
	ประวัติผู้เขียน	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทดสอบแต่ละชนิด..... 17
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420..... 43
3.2	สมบัติทางกลของวัสดุแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420..... 43



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กระบวนการตัดเนื้อด้วยชุดแม่พิมพ์ 2
1.2	กลไกการตัดชิ้นงาน โลหะแผ่นด้วยชุดแม่พิมพ์ 2
1.3	ขอบตัดด้านข้างของชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่น เกรด SPCC 3
1.4	ปัญหาที่เกิดจากครีบในชิ้นส่วนโลหะเมื่อนำไปใช้งาน 4
1.5	กระบวนการกำจัดครีบโดยใช้การขัดสีด้วยเม็ดทราย..... 5
1.6	การเสีรูปร่างของชิ้นงาน โลหะ 6
2.1	ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการตัดเนื้อ โดยใช้ชุดแม่พิมพ์ 9
2.2	ลำดับการเสีรูปร่างของโลหะแผ่นในระหว่างการตัดเนื้อเทียบกับเส้นโค้งแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดลึกลงของฟันซี่ 11
2.3	กลไกการตัดขาดของวัสดุและลักษณะของขอบตัดเนื้อที่ได้เมื่อมีการใช้ค้ำระยะห่าง ระหว่างแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันในการตัดเนื้อโลหะแผ่น..... 13
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการตัดกับค้ำระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์..... 14
2.5	ลักษณะของขอบตัดจากการจำลองเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ 15
2.6	ลักษณะการเกิดรอยแตกของชิ้นงาน ที่ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 0.05 และ 0.85 เท่าของความหนาชิ้นงาน 16
2.7	ขนาดของบริเวณต่างๆบนขอบตัดของชิ้นงานเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค้ำระยะห่าง ระหว่างแม่พิมพ์..... 16
2.8	ลักษณะขอบตัดจากการตัดเนื้อโดยใช้วัสดุต่างชนิด (a) เหล็กกล้าผ่านกระบวนการ ลากขึ้นรูป (b) โลหะอะลูมิเนียมผสมและ (c) โลหะผสมแมกนีเซียม 18
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการตัด และระยะกดลึกลงของฟันซี่ 19
2.10	อิทธิพลของวัสดุที่มีผลต่อการเกิดส่วนโค้งมน (Rollover zone) ใช้ค้ำระยะห่าง ระหว่างแม่พิมพ์ที่ 0.05 เท่า เมื่อเทียบกับความหนาชิ้นงาน 19
2.11	การสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด..... 20
2.12	ตำแหน่งการสึกหรอของฟันซี่..... 21
2.13	รูปแบบการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัดเนื้อโลหะ 22

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 การสึกหรอที่เกิดกับแม่พิมพ์ตัด	23
2.15 ขนาดครีปที่พบเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ตัดแต่ละแบบ	23
2.16 การสึกหรอด้านข้างของพันธที่เปลี่ยนแปลงไป	24
2.17 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพันธ	24
2.18 การสึกหรอด้านข้างของพันธที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากทำการตัดชิ้นงานที่ 100 และ 7,000 ชิ้น	25
2.19 ตำแหน่งที่เกิดรอยแตกเริ่มต้นขึ้นบนชิ้นงาน เมื่อใช้แม่พิมพ์ตัดมีรัศมีต่างๆ	26
2.20 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงานที่ได้จากการจำลองตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีรัศมีแตกต่างกัน	26
2.21 ขนาดของครีปที่เกิดขึ้นเทียบกับความหนาชิ้นงานเมื่อรัศมีขอบแม่พิมพ์ที่ใช้ตัด มีค่าแตกต่างกัน	27
2.22 การสึกหรอที่พบบนผิวแม่พิมพ์	28
2.23 ตำแหน่งที่ตรวจสอบการสึกหรอ และการสึกหรอที่พบเมื่อทำการตรวจสอบ ที่ตำแหน่งของเส้น A	28
2.24 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงาน โลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสม AA5754 และ AA6014 เมื่อทำการบากร่องบรีวผิวด้านบน	29
2.25 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงาน โลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสม AA5754 และ AA6014 เมื่อทำการบากร่องบรีวผิวด้านล่าง	29
2.26 นิยามในการกำหนดตำแหน่งของปลายร่องบากเมื่อติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ตัด	30
2.27 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงาน โลหะแผ่นที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของปลายร่องบากที่ระยะต่างๆ	30
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในโลหะ	31
2.29 ความเค้นที่กระทำกับเอลิเมนต์	33
2.30 ความเค้นระนาบ	34
2.31 ความเค้นในชิ้นงานทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว	37
2.32 ความเค้นเฉือนในชิ้นงานทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว	38
2.33 การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์แบ่งแผ่นโลหะออกเป็นเอลิเมนต์มีรูปร่างต่างๆ	39
2.34 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ กัน	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.35	41
<p>เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ.....</p>	
3.1	44
<p>ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ</p>	
3.2	46
<p>วิธีการศึกษาเบื้องต้นในงานวิจัยนี้.....</p>	
3.3	47
<p>ชุดแม่พิมพ์ตัดเนื้อแท่งโลหะ</p>	
3.4	49
<p>การวัดระยะเพื่อหาค่าความกลมของขอบตัด</p>	
3.5	50
<p>โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับจำลองการตัดเนื้อแท่งโลหะด้วยแม่พิมพ์</p>	
3.6	51
<p>การทดสอบการตัดงอแบบ 3 จุด.....</p>	
3.7	52
<p>กระบวนการทดสอบเพื่อหาโมเดลวัสดุที่เหมาะสม.....</p>	
4.1	54
<p>การเสีรูปของชิ้นงานต่อระยะการกดลึงของแม่พิมพ์และแรงด้านการตัด.....</p>	
4.2	55
<p>ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านการตัดเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่าง แม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ</p>	
4.3	56
<p>ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงด้านการตัดสูงสุดกับระยะห่างระหว่าง แม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ</p>	
4.4	56
<p>ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแรงด้านการตัดสูงสุดกับระยะห่าง ระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ</p>	
4.5	57
<p>ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่มีการตัดขาดของชิ้นงานกับค่าระยะห่าง ระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ</p>	
4.6	58
<p>ลักษณะขอบตัดของชิ้นงานในกรณีที่ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มีค่าต่างๆ (a) ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ 40 μm (b) ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ 100 μm และ (c) ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ 250 μm.....</p>	
4.7	58
<p>ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของส่วนโค้งมนกับค่าระยะห่างระหว่าง แม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ</p>	
4.8	59
<p>ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของครีบกับกับค่าระยะห่าง ระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ</p>	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานแท่งเหล็กกล้า (a) ชิ้นงานเริ่มต้น แม่พิมพ์ 100 μm (d) กรณีระยะห่างแม่พิมพ์ 250 μm และ (e) การตรวจวัดระยะในแนวแกน X และแกน Y	60
4.10 การประเมินค่าความกลมของชิ้นงาน	61
4.11 ค่าความกลมของชิ้นงานเมื่อทำการตัดเฉือนโดยใช้ ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ในกรณีต่างๆ	61
4.12 พื้นผิวของแท่งเหล็กกล้าภายหลังการตัดเฉือน (a) ระยะห่าง ระหว่างแม่พิมพ์ 40 μm (b) ระยะห่างแม่พิมพ์ 100 μm และ (c) ระยะห่างแม่พิมพ์ 250 μm	62
4.13 รูปแบบการแตกของชิ้นงาน โลหะ	63
4.14 สมบัติทางกลของเหล็กกล้า JIS SCM 420 ที่ได้จากการปรับปรุงและพัฒนาขึ้น	65
4.15 กราฟเปรียบเทียบผลของแรงต้านการตัดต่อระยะกดลึงของหัวคดระหว่าง การทดลองการตัดงอแบบ 3 จุด และการจำลองโดยใช้ FEM	65
4.16 จำนวนชิ้นงานที่พบครีบก้นเกินออกมาจากขอบตัดเมื่อมีการใช้ระยะความถี่ร่อง ที่เปลี่ยนแปลงไป	66
4.17 การจำลองกระบวนการตัดเฉือนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	67
5.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่ตัดเฉือน	70
5.2 ความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principle stress) ในแม่พิมพ์	71
5.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดเมื่อทำการวิเคราะห์ ด้วย SEM	72
5.4 ความยาวของความเสียหายในแม่พิมพ์บนเทียบกับมุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์	73
5.5 ความสูงของความเสียหายในแม่พิมพ์บนเทียบกับมุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์	73
5.6 ความยาวของความเสียหายในแม่พิมพ์ล่างเทียบกับมุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์	74
5.7 ความสูงของความเสียหายในแม่พิมพ์ล่างเทียบกับมุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์	74
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดเฉือนกับระยะการกดลึงของแม่พิมพ์ตัด สำหรับแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้ง	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันการตัดสูงสุดกับแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วที่จำนวนครั้งต่างๆ	76
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแรงดันการตัดสูงสุดกับแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วที่จำนวนครั้งต่างๆ	77
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่มีการตัดขาดของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วที่จำนวนครั้งต่างๆ	77
5.12 ภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัดเนียนแห่งเหล็กกล้าซึ่งถูกตัดด้วยแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานในจำนวนครั้งการตัดที่แตกต่างกัน	78
5.13 ขนาดของส่วนโค้งมนเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ซึ่งมีจำนวนครั้งการตัดต่างๆ	79
5.14 ขนาดของครีบบนเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ซึ่งผ่านการใช้งานมาแล้ว	79
5.15 ค่าความกลมของชิ้นงานเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ซึ่งมีจำนวนครั้งการตัดต่างๆ	80
5.16 พื้นผิวของชิ้นงานเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ซึ่งผ่านการใช้งานที่จำนวนการตัดต่างๆ	81
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการตัดของชิ้นงานที่ใช้เทคนิคการกรัดร่องและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรัดร่องกับระยะการกดลึกของแม่พิมพ์	83
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันการตัดสูงสุด (f_{Peak}) เมื่อทำการตัดเนียนด้วยชิ้นงานที่ไม่ได้กรัดร่องและชิ้นงานที่ทำการกรัดร่อง	84
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่มีแรงดันการตัดสูงสุด (d_{Peak}) เมื่อทำการตัดเนียนด้วยชิ้นงานที่ไม่ได้กรัดร่องและชิ้นงานที่ทำการกรัดร่อง	84
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ชิ้นงานเกิดการขาดออกจากกัน (d_{Sep}) เมื่อทำการตัดเนียนด้วยชิ้นงานที่ไม่ได้กรัดร่องและชิ้นงานที่ทำการกรัดร่อง	85
6.5 ภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัด	86
6.6 จำนวนชิ้นงานที่พบครีบบนออกมาจากขอบตัดในกรณีการตัดเนียนแบบปกติ และกรณีที่ใช้เทคนิคการกรัดร่อง	87
6.7 คำจำกัดความของขนาดความสูงครีบบนที่พบ	87
6.8 ความกลมของชิ้นงานที่ทำการกรัดร่องและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรัดร่อง	88
6.9 ภาควัดขวางของแท่งโลหะซึ่งได้จากการตัดเนียน	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ ทำการกรีดร่องและชิ้นงานที่ทำการกรีดร่อง.....	89
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดสูงสุดและระยะกดลี้กของแม่พิมพ์บน ในกรณีความลี้กรีดเท่าๆกับ 333, 426 และ 537 ไมโครเมตร	90
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงต้านการตัดสูงสุด กับระยะความลี้กรีดที่เปลี่ยนแปลงไป.....	91
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแรงต้านการตัดสูงสุด กับระยะความลี้กรีดที่เปลี่ยนแปลงไป.....	92
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดการขาดออกจากกันของชิ้นงาน กับระยะความลี้กรีดที่เปลี่ยนแปลงไป.....	92
6.15 ภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัดที่ความลี้กรีดระยะต่างๆ.....	93
6.16 จำนวนชิ้นงานที่พบครีบก้นเกินออกมาจากขอบตัดเมื่อมีการใช้ระยะความลี้กรีด ที่เปลี่ยนแปลงไป	94
6.17 ความกลมของชิ้นงานที่ทำการกรีดร่องด้วยค่าความลี้กที่มีระยะแตกต่างกัน	94
6.18 ภาพถ่ายพื้นผิวของชิ้นงาน	95

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	มุมปลายมีดร่องกรีด
B_1	=	ความยาวของครีบ
B_h	=	ความสูงของครีบ
C	=	ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ของฟันซ์และคาย
$C.T.$	=	จำนวนรอบหรือครั้งในการใช้งานแม่พิมพ์ตัดในการตัดเฉือน (Cycle time)
d	=	ระยะการกดลึกของแม่พิมพ์
d_n	=	ระยะความลึกร่องกรีด
d_{peak}	=	ตำแหน่งของแรงต้านการตัดสูงสุด หรือจุดสุดท้ายที่เกิดการเสียรูปแบบถาวร
d_{sep}	=	ตำแหน่งของชิ้นงานที่เกิดการตัดขาดหรือจุดการแตกหัก ซึ่งเป็นจุดที่รอยแตกเริ่มการขยายตัว
D_1	=	ความยาวของความเสียหายในแม่พิมพ์
D_h	=	ความสูงของความเสียหายในแม่พิมพ์
f	=	แรงต้านการตัดเฉือน
f_{max}	=	แรงต้านการตัดสูงสุด
L.B.	=	ขอบเขตล่างของแรงต้านการตัดเฉือน (Lower boundary)
R_1	=	ความยาวของส่วนโค้งมน
R_h	=	ความสูงของส่วนโค้งมน
U.B.	=	ขอบเขตบนของแรงต้านการตัดเฉือน (Upper boundary)
v	=	ความเร็วในการเคลื่อนที่แม่พิมพ์ตัด (ตัวบน, ฟันซ์)
σ_f	=	ความเค้นการไหล (Flow Stress)
ϵ_p	=	ความเครียดแบบคงรูป (Plastic Strain)
θ	=	มุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์ตัด

บทที่ 1

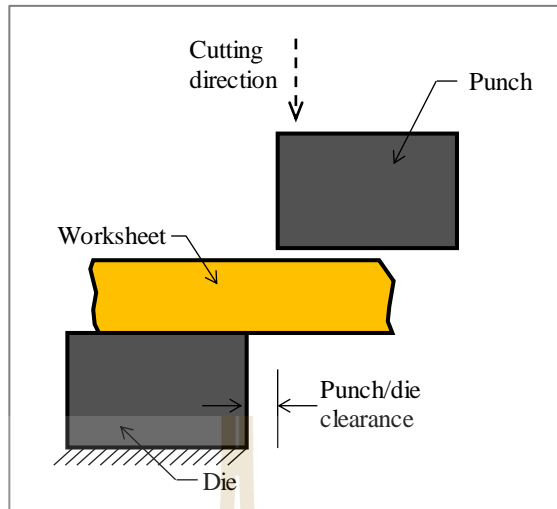
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

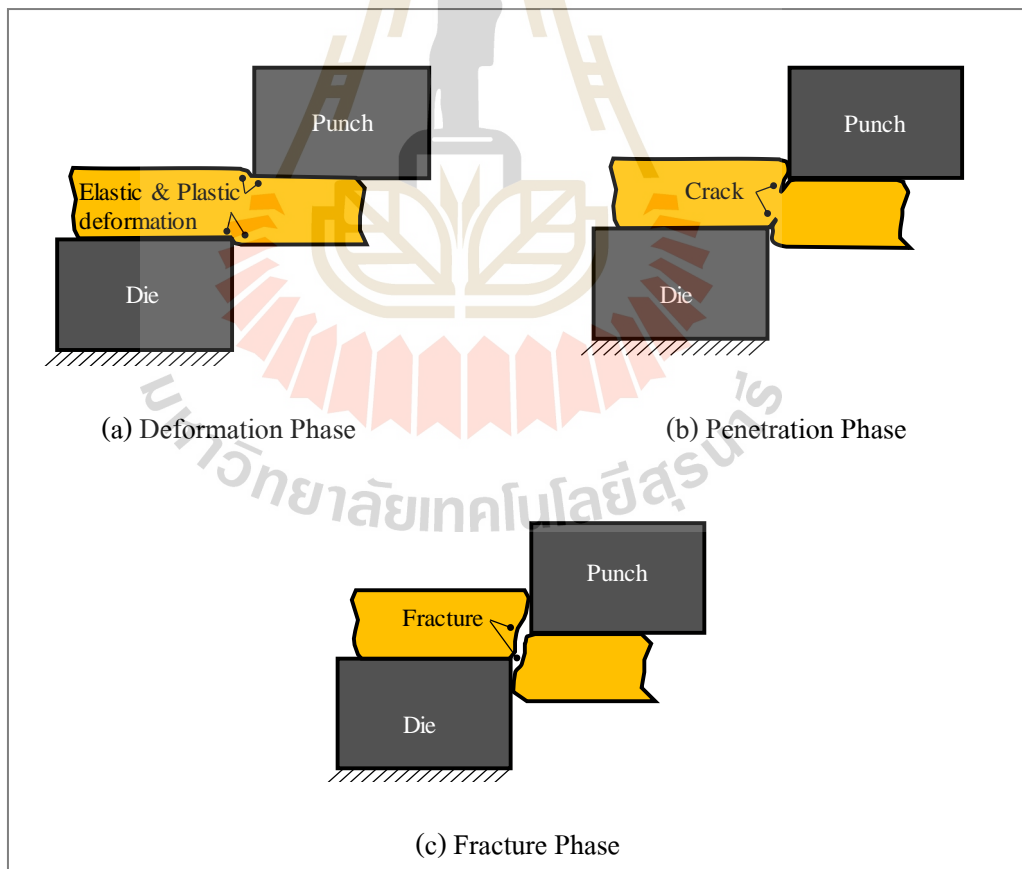
กระบวนการตัดเฉือนโดยใช้แม่พิมพ์ (Punch/Die Shearing Process) เป็นกระบวนการที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องทำการตัดหรือทำให้วัสดุเกิดการฉีกขาด (Totre, A. et al., 2013) ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมการตัดโลหะแผ่น อุตสาหกรรมการทอบขึ้นรูปในกรณีที่แท่งโลหะเริ่มต้น (Billet) มีขนาดเล็กกระบวนการตัดเฉือนจะถูกใช้เพื่อเตรียมแท่งโลหะเริ่มต้นก่อนทำการทอบขึ้นรูป และอุตสาหกรรมการผลิตโซ่ซึ่งกระบวนการตัดเฉือนถูกใช้ในการตัดแท่งเหล็กกล้าเพื่อใช้เป็นสลักโซ่ (Pin) รวมไปถึงการใช้เพื่อตัด link plate จากเหล็กกล้าแผ่น กระบวนการตัดเฉือนเป็นกระบวนการที่มีจุดเด่นหลายประการ เช่น เป็นกระบวนการที่มีกำลังการผลิตสูง มีความเสถียรสูง มีต้นทุนต่อการผลิตต่ำในกรณีที่มีการตัดชิ้นงานเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้กระบวนการตัดเฉือนก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการตัดวัสดุอื่น เช่น การตัดโลหะด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซและควันจากการเผาไหม้ของวัสดุ เป็นต้น

โดยทั่วไปชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการตัดเพื่อขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยใช้แม่พิมพ์ มักประกอบไปด้วยชุดแม่พิมพ์บน (Punch) ชุดแม่พิมพ์ล่าง (Die) และโลหะแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยกลไกในกระบวนการตัดนี้จะอาศัยการตัดขาดออกจากกันของเนื้อวัสดุด้วยแรงเฉือนเป็นหลัก ซึ่งกระทำโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของชุดแม่พิมพ์บนผ่านชุดแม่พิมพ์ล่างทำให้เนื้อชิ้นงานโลหะแผ่นเกิดการเสียรูปและขาดออกจากกันในที่สุด โดยกลไกที่อธิบายการตัดและการเสียรูปของชิ้นงาน มี 3 ช่วง คือ

- 1) ช่วงเริ่มต้นของการตัดชิ้นงานมีการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและเสียรูปแบบถาวร เราเรียกช่วงนี้ว่า “Deformation Phase” ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (a)
- 2) ช่วงเกิดรอยแตกเริ่มต้นขึ้นในเนื้อวัสดุเนื่องจากความเค้นสูงบริเวณมุมของแม่พิมพ์ เราเรียกช่วงนี้ว่า “Penetration Phase” ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (b)
- 3) ช่วงการตัดขาดออกจากกันเนื่องจากรอยแตกมีการขยายตัวมาบรรจบกันอย่างสมบูรณ์ ช่วงนี้ถูกเรียกว่า “Fracture Phase” ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (c)

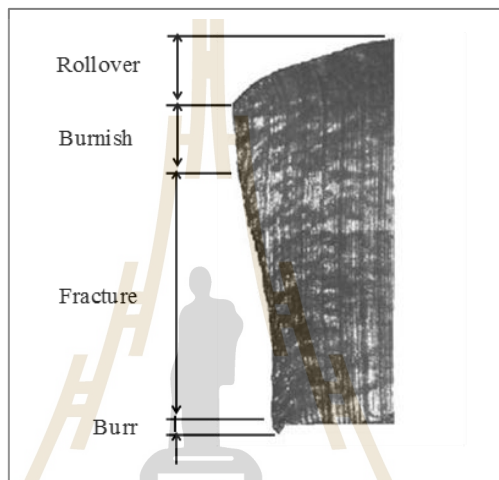


รูปที่ 1.1 กระบวนการตัดเฉือนด้วยชุดแม่พิมพ์



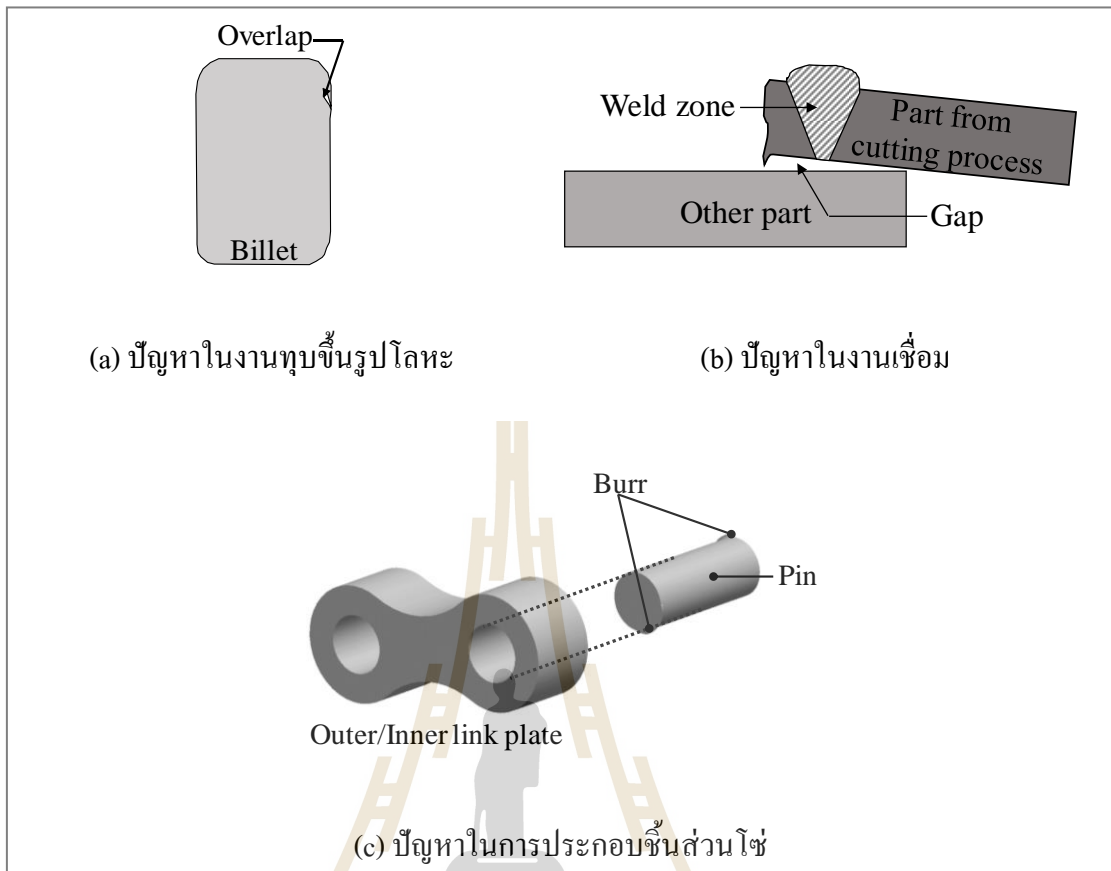
รูปที่ 1.2 กลไกการตัดชิ้นงานโลหะแผ่นด้วยชุดแม่พิมพ์

โดยปกติขอบตัดของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือน ประกอบไปด้วย 4 บริเวณที่มีความแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 1.3 คือ 1) บริเวณส่วนโค้ง (Rollover Zone) เกิดจากการเสียรูปแบบถาวร 2) บริเวณผิวเรียบ (Shear/Burnish Zone) เป็นผิวที่เกิดขึ้นจากความเค้นเฉือน 3) บริเวณผิวขรุขระ (Fracture/Rupture Zone) เป็นผลจากการขยายตัวของรอยแตก (Crack) จากบริเวณผิวด้านบนของชิ้นงานและจากบริเวณผิวด้านล่างของชิ้นงาน และ 4) บริเวณครีป (Burr Zone) เป็นผลมาจากการเสียรูปแบบถาวรของเนื้อโลหะก่อนโลหะเกิดการขาดอย่างสมบูรณ์



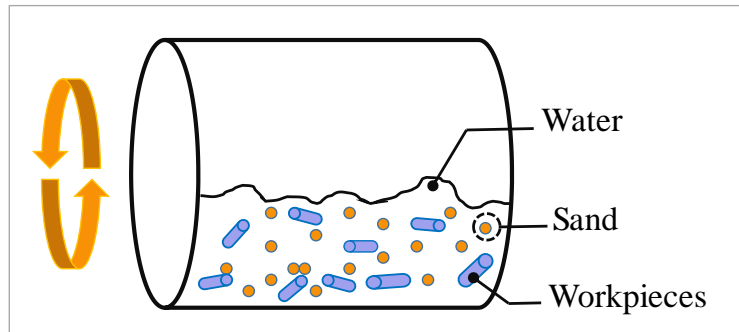
รูปที่ 1.3 ขอบตัดด้านข้างของชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่น เกรด SPCC (Hatanaka, N. et al., 2003)

เมื่อพิจารณาลักษณะขอบตัดจากรูปที่ 1.3 สังเกตได้ว่าบริเวณหนึ่งที่เกิดปัญหาเป็นอย่างมากในการนำชิ้นงานตัดเฉือนไปใช้งานคือบริเวณครีป เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณของเนื้อโลหะส่วนที่ยื่นออกมาจากผิวของชิ้นงานตัด โดยครีปที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดปัญหาในการใช้งานชิ้นงานตัดเฉือน เช่น ในกรณีการทูลขึ้นรูปโลหะ หากแท่งโลหะเริ่มต้นที่เตรียมมามีครีปเกิดอยู่บริเวณขอบตัดเมื่อทำการทูลขึ้นรูป ครีปจะเกิดการเสียรูปและพับเข้าไปยังชิ้นงานทูลขึ้นรูปซึ่งถ้าหากครีปไม่สามารถประสานกันเป็นเนื้อเดียวกับชิ้นงานทูลขึ้นรูปได้ ในที่สุดชิ้นงานทูลขึ้นรูปจะปรากฏข้อบกพร่องที่เรียกว่ารอยพับ (Overlap) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (a) ในกรณีงานเชื่อมชิ้นงานโลหะหากครีปที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดใหญ่และทำให้เกิดช่องว่างขึ้นตามที่แสดงในรูปที่ 1.4 (b) ช่องว่างนี้อาจส่งผลกระทบต่อ การเชื่อมติดระหว่างโลหะทั้งสองแผ่นได้ และในการประกอบชิ้นส่วนของโซ่กล้าวคือต้องประกอบ สลักโซ่ เข้ากับแผ่นประกบ ดังที่แสดงในรูปที่ 1.4 (c) หากมีครีปขนาดใหญ่เกิดขึ้นบริเวณขอบของแท่งโลหะจะส่งผลให้เกิดปัญหาในการประกอบสลักโซ่เข้ากับแผ่นประกบได้



รูปที่ 1.4 ปัญหาที่เกิดจากครีบบนชิ้นส่วนโลหะเมื่อนำไปใช้งาน

โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาไปที่การตัดเฉือนบนชิ้นงานแท่งโลหะเท่านั้น ในกรณีของแท่งโลหะผู้ปฏิบัติงานในภาคอุตสาหกรรมได้ทำการแก้ไขปัญหาครีบที่เกิดขึ้น โดยการใช้กระบวนการในการกำจัดครีบบนชิ้นงานต่างๆ หนึ่งในวิธีการที่นิยมใช้คือ กระบวนการขัดสีชิ้นงานตัดด้วยเม็ดทราย ดังแสดงในรูปที่ 1.5 กระบวนการนี้มีจุดเด่นที่สำคัญคือ มีกำลังการผลิตสูง สามารถกำจัดครีบบนชิ้นงานได้จำนวนหลายชิ้นงานต่อการขัดในแต่ละครั้ง แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดครีบบนชิ้นงานด้วยวิธีนี้ก็ยังมีข้อด้อยที่สำคัญกล่าวคือ ในระหว่างกระบวนการขัดสีได้ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นกับชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องมีการใช้น้ำเพื่อการระบายความร้อนที่เกิดขึ้น น้ำที่ใช้จะต้องมีการควบคุมคุณภาพไม่ให้มีส่วนประกอบของคลอไรด์มากเกินไปเกินมาตรฐาน ซึ่งคลอไรด์นั้นมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงานโลหะ อีกทั้งน้ำเหลือทิ้งภายหลังจากกระบวนการขัดสีถูกพบว่ามีการปนเปื้อนเป็นอย่างมากทำให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 1.5 กระบวนการกำจัดคราบโดยใช้การขัดสีด้วยเม็ดทราย

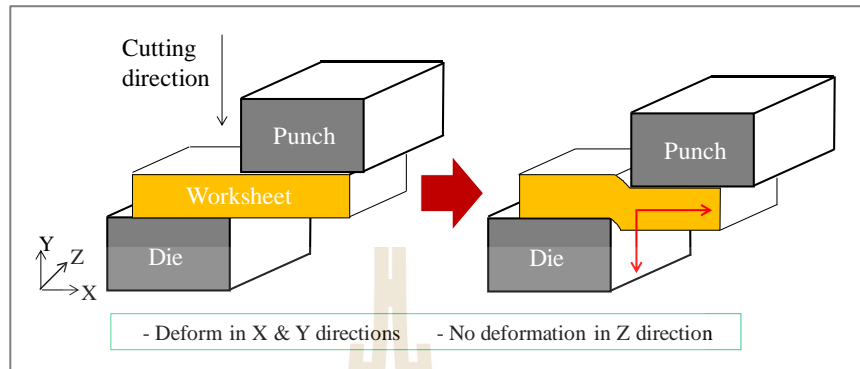
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าอิทธิพลของตัวแปรการตัดพื้นฐาน เช่น ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ การสึกหรอของแม่พิมพ์ เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการตัดเฉือนชิ้นงานโลหะแผ่นซึ่งส่งผลไปถึงคุณภาพของขอบตัดที่ได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องทั้งหมด พบว่างานวิจัยเหล่านั้นได้ถูกกระทำบนโลหะที่มีรูปร่างเป็นแผ่นเท่านั้น และจากที่ทำการสำรวจนั้นไม่พบงานวิจัยที่ทำการศึกษการตัดเฉือนในโลหะแท่ง ซึ่งพฤติกรรมการเสียรูปของโลหะแผ่นและแท่งนั้นมีความแตกต่างกัน กล่าวคือในกรณีการตัดโลหะแผ่นนั้นมีความโน้มเอียงการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระนาบ X และ Y เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1.6 (a) ซึ่งเรียกรูปการเสียรูปในลักษณะนี้ว่า “2 Dimensional Deformation” แต่ในกรณีการตัดโลหะแท่งนั้นวัสดุจะเกิดการเสียรูปแบบสามมิติ “3 Dimensional Deformation” คือ มีการเสียรูปในระนาบ X Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 1.6 (b) ด้วยพฤติกรรมการเสียรูปที่มีความแตกต่างกัน ความรู้และความเข้าใจในพฤติกรรมการตัดบนโลหะแผ่นนั้นจึงไม่เพียงพอต่อการอธิบายพฤติกรรมของโลหะแท่งอย่างสมบูรณ์ได้

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงตั้งวัตถุประสงค์สองประการแรกของงานวิจัยคือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดพื้นฐาน ได้แก่ ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ ต่อผลการตัดเฉือนของแท่งโลหะ และเพื่อศึกษาอิทธิพลของการสึกหรอของแม่พิมพ์ที่มีต่อผลการตัดเฉือนของแท่งโลหะ

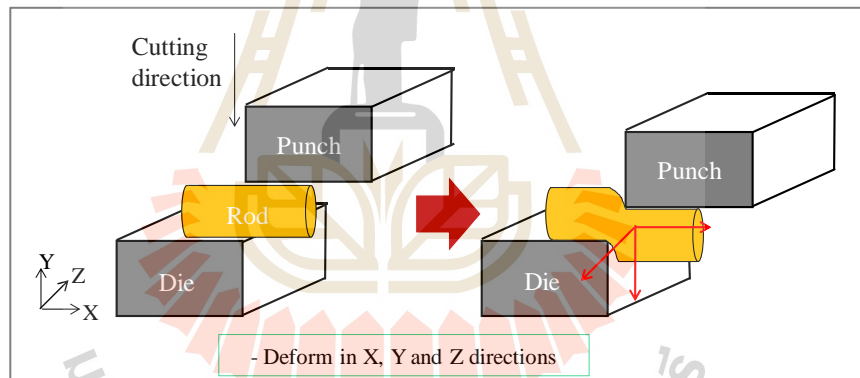
นอกจากการศึกษาผลของตัวแปรการตัดพื้นฐาน และการสึกหรอของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการตัดเฉือนแล้ว ผู้วิจัยยังมีแนวคิดในการปรับปรุงคุณภาพขอบตัดเฉือนของแท่งเหล็กกล้าโดยอาศัยเทคนิคการกรัดร่องบนผิวแท่งเหล็กกล้าก่อนการตัดเฉือนด้วย ดังนั้นวัตถุประสงค์ประการที่สามของงานวิจัยนี้คือ เพื่อเปรียบเทียบผลการตัดเฉือนระหว่างการตัดแบบปกติและแบบประยุกต์ใช้เทคนิคการกรัดร่องบนผิวชิ้นงานก่อนการตัดเฉือนเพื่อมุ่งปรับปรุงคุณภาพขอบตัดของแท่งโลหะ

ยิ่งไปกว่านั้นในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้พัฒนาโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) สำหรับจำลองการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าด้วย เพื่อช่วยให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นเกี่ยวกับอิทธิพล

ของตัวแปรการตัดเฉือนพื้นฐาน โดยผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ร่วมกับผลทดลองการตัดเฉือนด้วย



(a) กรณี โลหะแผ่น



(b) กรณี โลหะแท่ง

รูปที่ 1.6 การเสียรูปของชิ้นงานโลหะ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

ในงานวิจัยการศึกษาการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าด้วยแม่พิมพ์มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ ต่อผลการตัดเฉือนของแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 (ไม่กรัดร่องที่พื้นผิว)
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลเสียหายของแม่พิมพ์ ต่อผลการตัดเฉือนของแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 (ไม่กรัดร่องที่พื้นผิว)

3. เพื่อเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้เทคนิคการกรัดร่องบนแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 (กรัดร่องที่พื้นผิว) ก่อนการตัดเนื้อกับการตัดแบบปกติเพื่อปรับปรุงคุณภาพของข้อตัด

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1. ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ น่าจะมีผลต่อผลการตัดเนื้อของแท่งเหล็กกล้าในด้านต่างๆ เช่น แรงด้านการตัด ตำแหน่งการขาดของแท่งโลหะรวมไปถึงลักษณะของข้อตัดเนื้อ

2. การสึกหรอของแม่พิมพ์น่าจะมีผลต่อ ผลการตัดเนื้อของแท่งเหล็กกล้าในด้านต่างๆ เช่น แรงด้านการตัด ตำแหน่งการขาดของแท่งโลหะรวมไปถึงลักษณะของข้อตัดเนื้อ

3. การกรัดร่องบนชิ้นงานก่อนการตัดเนื้อน่าจะส่งผลต่อแรงด้านการตัดเนื้อรวมไปถึงลักษณะของข้อตัดเนื้อ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ในการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ ที่มีผลต่อลักษณะของข้อตัดและพฤติกรรมการตัดเนื้อนั้น กระทำโดยอาศัยการตัดเนื้อบนแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.48 มิลลิเมตรเท่านั้น แม่พิมพ์ที่ใช้ตัดเนื้อทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง JIS SKD11 มีการปรับเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ตั้งแต่ 40 ถึง 250 ไมโครเมตร

2. ในส่วนการศึกษการสึกหรอของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการตัดเนื้อของแท่งโลหะ กระทำโดยอาศัยการตัดเนื้อบนแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.48 มิลลิเมตรแม่พิมพ์ที่ใช้ตัดเนื้อทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง JIS SKD11 ทำการศึกษาโดยปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ตัดที่ผ่านการตัดไปประมาณ 50,000 ครั้ง (50,000 Cycle Time) 100,000 ครั้ง (100,000 Cycle Time) และ 150,000 ครั้ง (150,000 Cycle Time)

3. สำหรับการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้เทคนิคการกรัดร่องในการขึ้นรูป ในกระบวนการตัดเนื้อนั้นได้กระทำการตัดเนื้อโดยใช้แท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.48 มิลลิเมตรเท่านั้น ในการศึกษานี้จะทำการกรัดร่องบนชิ้นงานก่อนตัดเนื้อโดยใช้เครื่องกลึง (Turning Machine) ส่วนแม่พิมพ์ตัดเนื้อเป็นแม่พิมพ์ชุดเดียวกับที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการตัดแท่งเหล็กกล้า

2. เกิดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลการศึกษารองของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการตัดแต่งเหล็กกล้า
3. ทราบเกี่ยวกับผลการตัดเฉือนแต่งเหล็กกล้าในกรณีที่ทำกรรไกรร่องลงบนผิวชิ้นงานก่อนการตัดเฉือน

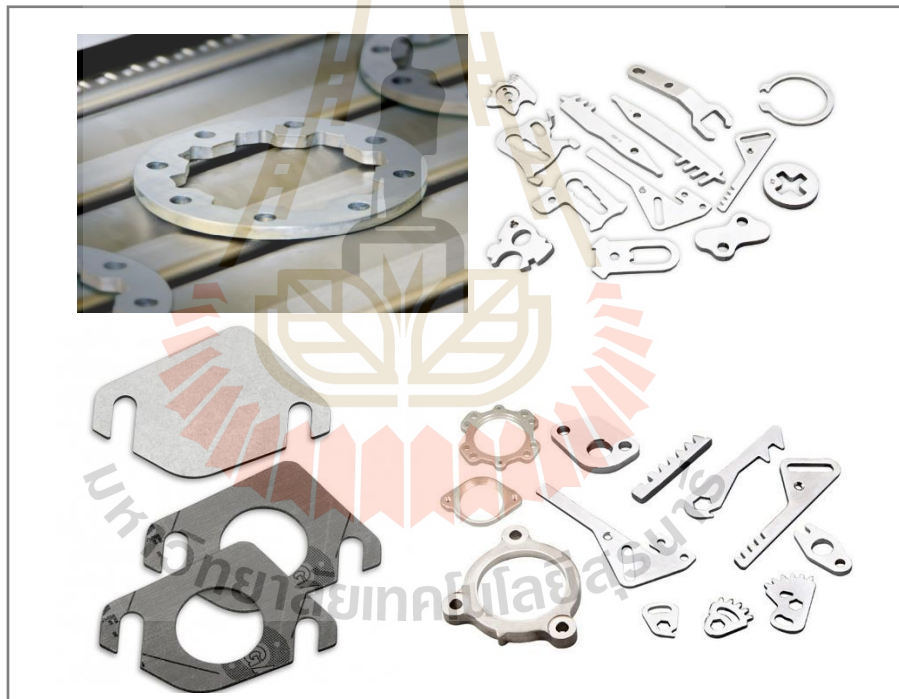


บทที่ 2

ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการตัดโดยใช้แม่พิมพ์ (Punch/Die Shearing Process)

กระบวนการตัดเฉือนโดยใช้แม่พิมพ์ เป็นกระบวนการตัดที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการตัดโลหะ เนื่องจากเป็นกระบวนการหลักที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานเริ่มต้น (Raw Material) ให้มีขนาดและรูปร่างตามต้องการดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4 ก่อนที่จะนำไปผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปหรือเข้าสู่ขั้นตอนการประกอบกับชิ้นส่วนอื่นให้กลายเป็นชิ้นงานในลำดับถัดไป



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือนโดยใช้ชุดแม่พิมพ์ (Hans Weber Maschinenfabrik GmbH, 2019), (New Swan Pvt. Ltd., 2019) and (Tafmet Tadeusz Fita, 2019),

โดยทั่วไปแล้วแม่พิมพ์ตัดเดือนมักจะประกอบไปด้วย แม่พิมพ์บนหรือพื้น แม่พิมพ์ล่างหรือคาย และชิ้นงานตัดซึ่งเป็น โลหะแผ่นหรือโลหะแท่ง การขาดออกจากกันของวัสดุนั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการได้รับแรงกระทำจากแม่พิมพ์บนที่เคลื่อนที่ลงมาผ่านชิ้นงานโลหะและแม่พิมพ์ล่าง มีผลทำให้เนื้อวัสดุของโลหะนั้นเกิดการเสียรูปและค่อยๆขาดออกจากกันในที่สุด รายละเอียดของขั้นตอนในการตัดเดือนถูกแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการตัดเดือน ชิ้นงาน และการเสียรูปของเนื้อวัสดุในระหว่างการตัดเดือน โดยเส้นกราฟในแนวแกนนอนเป็นค่าระยะการกดลึกของแม่พิมพ์ตัดที่ระยะต่างๆ ส่วนแกนตั้งเป็นค่าแรงต้านการตัดซึ่งทำการบันทึกไว้ในระหว่างทำการตัดเดือน โดยกลไกอธิบายการเสียรูปและการขาดของชิ้นงานในกระบวนการตัดเดือนมี 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 แม่พิมพ์ถูกกดลงบน โลหะเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่น “ช่วงเริ่มต้น”

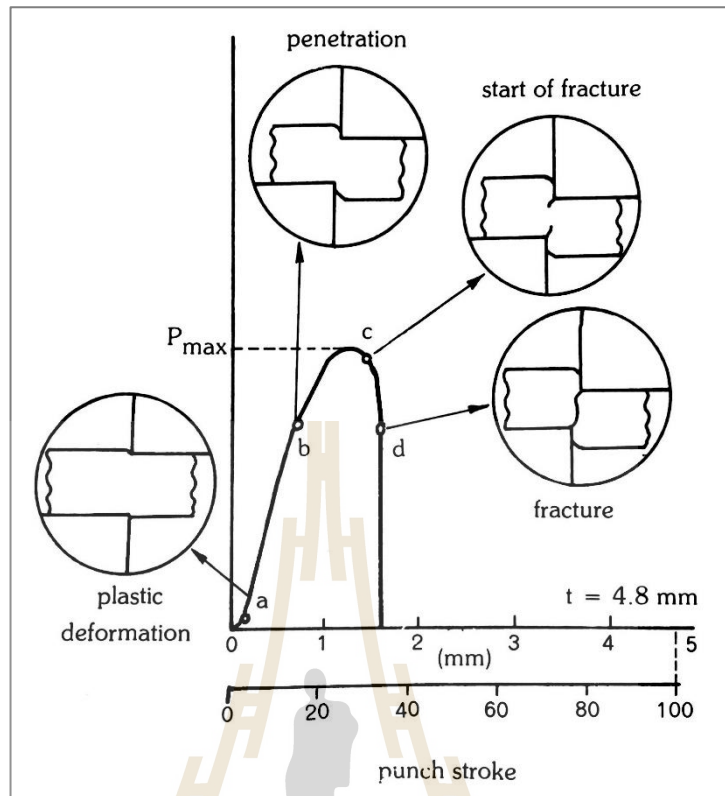
ขั้นที่ 2 ชิ้นงานเกิดการเสียรูปจากการได้รับแรงกระทำเรียกขั้นตอนนี้ว่า “ช่วงการเปลี่ยนรูป”

ขั้นที่ 3 ชิ้นงานเริ่มเกิดรอยแตกเล็กๆ และรอยแตกนี้เริ่มดำเนินต่อไปเรื่อยๆ เรียกขั้นตอนนี้ว่า “ช่วงระยะการเกิดรอยแตกบริเวณมุมของแม่พิมพ์”

ขั้นที่ 4 รอยแตกดำเนินมาบรรจบกันจากทั้งสองด้านเป็นเหตุให้ชิ้นงาน เกิดการขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์เรียกขั้นตอนนี้ว่า ช่วงการฉีกขาด (Fracture Phase)

ขอบตัดของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดเดือนมามีลักษณะเฉพาะลักษณะ ซึ่งประกอบไปด้วย 4 บริเวณที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

- บริเวณส่วนโค้งมน (Rollover Zone) เป็นผลมาจากการเสียรูปอย่างถาวรในช่วงแรกของการตัดเดือน
- บริเวณผิวเรียบ (Burnish Zone) เป็นผลมาจากการที่วัสดุฉีกขาดเนื่องจากแรงเฉือนเป็นหลัก ลักษณะพื้นผิวจึงมีความเรียบ เป็นมันวาว
- บริเวณที่ชิ้นงานเกิดการแตกหัก (Fracture Zone) เกิดจากการขยายตัวของรอยแตกขณะตัด ลักษณะพื้นผิวในบริเวณนี้มีความขรุขระ ไม่เรียบเนียน
- บริเวณครีป (Burr Zone) เป็นบริเวณเนื้อ โลหะส่วนท้ายสุดซึ่งเกิดจากการฉีกขาดของเนื้อวัสดุในช่วงท้ายของกลไกการตัดขาด มีลักษณะแหลมคมยื่นเกินออกมาจากขอบของชิ้นงานตัด



รูปที่ 2.2 ลำดับการเลี้ยวรูปของโลหะแผ่นในระหว่างการตัดเฉือนเทียบกับเส้นโค้ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดลึกของพินซ์ (ชาญชัย ทรัพย์ยากร และคณะ, 2551)

2.2 ผลของตัวแปรการตัดต่อลักษณะขอบตัด (Effects of Shearing Parameters on Sheared Edge)

ในกระบวนการตัดเฉือนด้วยชุดแม่พิมพ์ การพิจารณาคูณภาพของชิ้นงานที่ได้ขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะของขอบตัดเป็นหลัก โดยในการตัดเฉือนก็มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อลักษณะของขอบตัด จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดเฉือนพบว่า ระยะห่างหรือช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่าง ชนิดของวัสดุที่นำมาตัด และลักษณะของคมตัดของแม่พิมพ์ ส่งผลอย่างมากต่อลักษณะขอบตัด (Quazi, T.Z. et al., 2012)

2.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ต่อผลการตัดเฉือน (Effects of Punch/Die Clearance on Shear Cutting Results)

ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ มีผลเป็นอย่างมากต่อลักษณะขอบตัดและพื้นผิวของชิ้นงานตัดซึ่งส่งผลถึงคุณภาพของชิ้นงานตัด อีกทั้งยังเป็นตัวแปรหนึ่งที่กำหนดอายุการใช้งานของ

แม่พิมพ์ตัด ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมทำให้ได้แรงต้านการตัดต่ำ ลักษณะขอบตัดของชิ้นงานสะอาดมีคุณภาพดี หากระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ตัดมีค่ามากเกินไปจะส่งผลต่อลักษณะขอบตัดในส่วนของบริเวณโค้งมนและบริเวณครีบบนให้มีขนาดเพิ่มขึ้น และหากระยะห่างของแม่พิมพ์ตัดมีค่าน้อยเกินไปก็จะมีผลต่อพื้นผิวและลักษณะของขอบตัด โดยเฉพาะการเกิดรอยแตกที่สอง (Secondary Shear) รวมทั้งยังมีผลทำให้แรงตัดสูง ส่งผลให้ลดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ตัด ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงหรือสร้างแม่พิมพ์ใหม่เพิ่มขึ้น

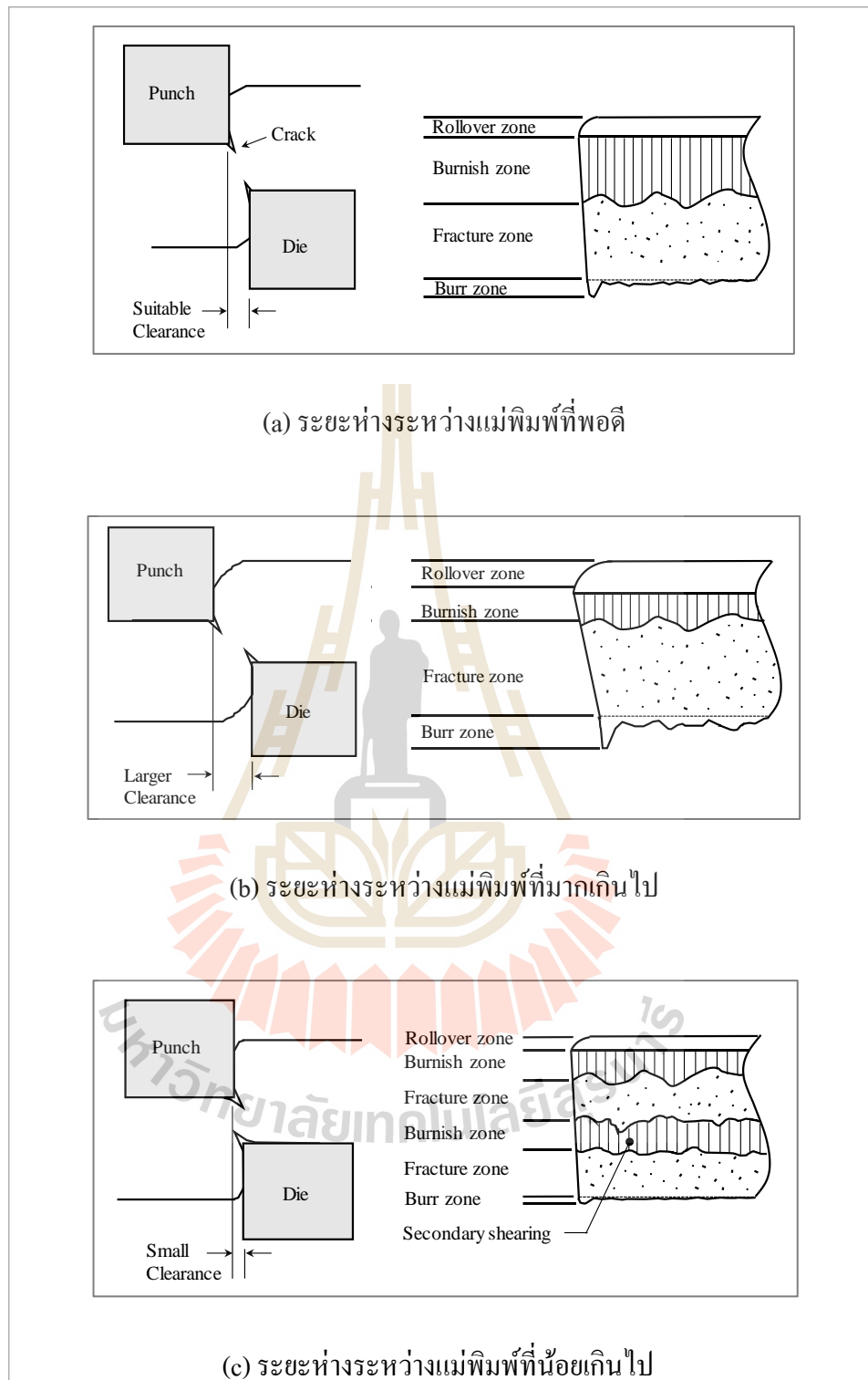
อิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อลักษณะของขอบตัด แบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

กรณีที่ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มีความเหมาะสม รอยแตกที่เกิดขึ้นบนเนื้อวัสดุซึ่งใกล้กับบริเวณปลายคมตัดของแม่พิมพ์นั้นมีการขยายตัวและมาบรรจบกันอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (a)

กรณีที่ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มากเกินไป รอยแตกที่เกิดขึ้นบนเนื้อวัสดุซึ่งใกล้กับบริเวณปลายคมตัดของแม่พิมพ์มีการขยายตัวและมาบรรจบกันอย่างสมบูรณ์ แต่ส่งผลให้ลักษณะขอบตัดมีบริเวณของส่วนโค้งและครีบบนขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูป 2.3 (b)

กรณีที่ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์น้อยเกินไป รอยแตกของเนื้อวัสดุ ณ บริเวณใกล้กับปลายคมตัดของแม่พิมพ์มีการขยายตัวแต่ไม่สามารถมาบรรจบกันอย่างสมบูรณ์ในช่วงแรก ซึ่งในท้ายที่สุดจะเกิดการขาดออกจากกันเนื่องจากระยะการกดลึกของแม่พิมพ์ตัดที่มากขึ้น ลักษณะขอบตัดที่ได้มีลักษณะผิวเรียบเนียนเกิดขึ้น 2 บริเวณ อันเป็นผลเนื่องมาจากการตัดเนื้อครั้งที่สอง (Secondary Sheared or Secondary Crack) ก่อนที่จะเกิดการขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (c)

การประเมินค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งานของชิ้นงานหลังจากการตัดเฉือน และตัวชิ้นงานที่จะนำไปทำการตัดเฉือนว่ามีขนาดรูปร่าง ความหนา และชนิดของวัสดุเป็นหลัก ซึ่งค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมในแต่ละงานนั้นต้องผ่านการทดสอบหรือใช้วิธีการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่าที่เหมาะสมมาก่อน โดยสามารถพิจารณาจากลักษณะขอบตัดที่ได้

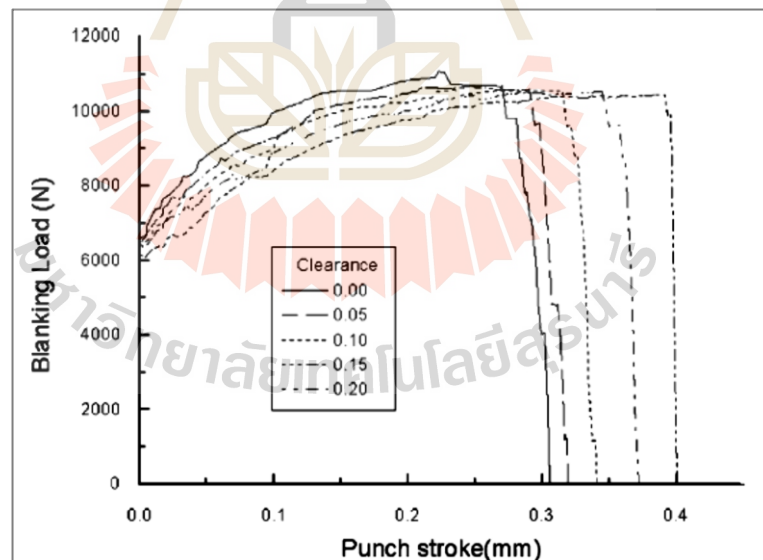


รูปที่ 2.3 กลไกการตัดขาดของวัสดุและลักษณะของขอบตัดเฉือนที่ได้เมื่อมีการใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันในการตัดเฉือนโลหะแผ่น (ชาญชัย ทรัพย์ากร และคณะ, 2551), (ศิริชัย ต่อสกุล และคณะ, 2554) และ (Klocke, F., 2013)

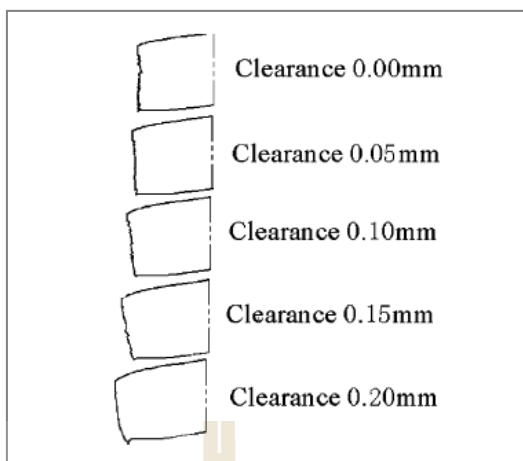
หลักการพื้นฐาน โดยทั่วไปที่ใช้ในการกำหนดขนาดของช่องว่างระหว่างพินซ์และ
 ดายที่เหมาะสมมีดังต่อไปนี้ (Kmutt, 2019)

1. โลหะหนาต้องการขนาดของช่องว่างมาก
2. โลหะอ่อนต้องการขนาดของช่องว่างมาก
3. โลหะแข็งจะมีขนาดของช่องว่างประมาณ 6 ถึง 10 % ของความหนาของชิ้นงาน
4. โลหะอ่อนจะมีขนาดของช่องว่างประมาณ 10 ถึง 18 % ของความหนาของชิ้นงาน
5. โลหะแข็งจะเกิดส่วน โค้งมนและส่วนรอยตัดเฉือนน้อย
6. โลหะหนาจะเกิดส่วน โค้งมนมาก

จากงานวิจัยของ (Fang, G., et al., 2002) และ (Tekiner, Z. et al., 2006) ได้ทำการ
 ทดลองตัดแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสม เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ จากงานวิจัย
 ทั้งสองพบว่าค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มากขึ้นแปรผกผันกับแรงที่ใช้ในการตัดเฉือน เมื่อค่า
 ระยะห่างยิ่งมากแรงที่ใช้ในการตัดเฉือนกลับมีแนวโน้มลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ค่า
 ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มากขึ้นยังทำให้บริเวณส่วน โค้งมนและบริเวณของครีบบมีแนวโน้ม
 เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5



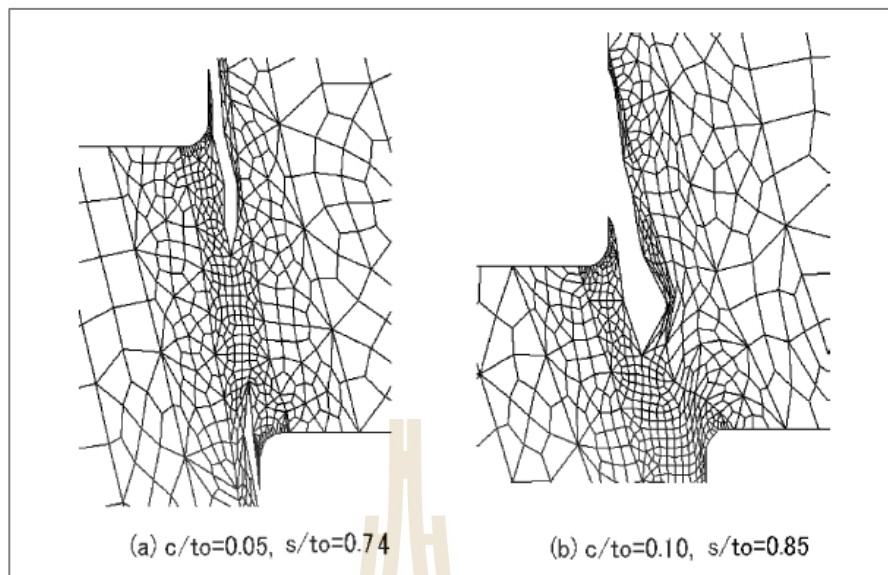
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการตัดกับค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์
 (Fang, G. et al., 2002)



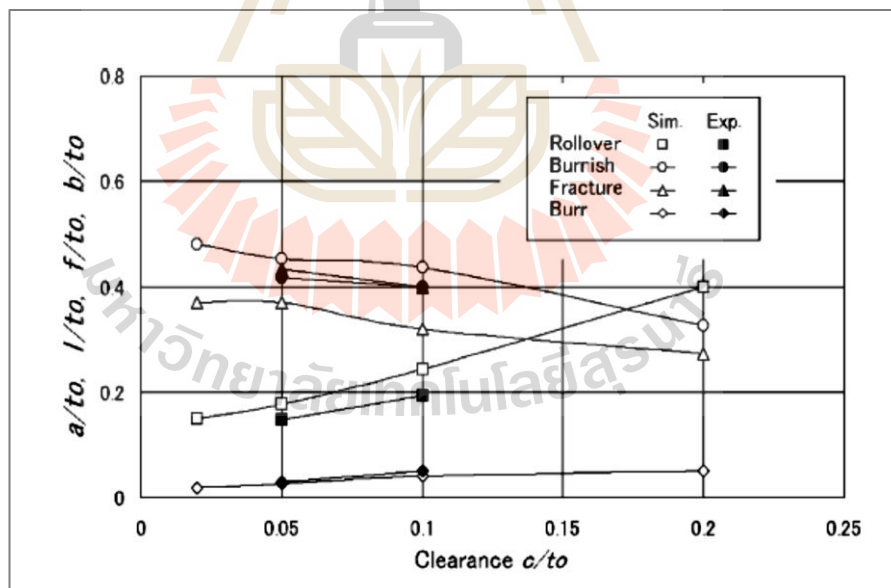
รูปที่ 2.5 ลักษณะของขอบตัดจากการจำลองเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ (Fang, G. et al., 2002)

จากการศึกษาอิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการตัดแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางซึ่งหนา 3 มิลลิเมตร โดยใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันของ (Hatanaka, N., et al., 2003) พบว่าเมื่อมีการใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มากส่งผลให้รอยแตกเริ่มต้น (Initial Crack) จากการตัดเฉือนเกิดขึ้นได้ช้าและลักษณะการเติบโตของรอยแตก (Crack Propagation) มีลักษณะที่อ้าค้งแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแตกต่างจากการตัดโดยใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์น้อยๆ อีกทั้งลักษณะการเติบโตของรอยแตกที่แตกต่างกันนี้ส่งผลไปถึงลักษณะขอบตัดของชิ้นงานที่ได้จากการตัดเฉือนด้วย กล่าวคือเมื่อใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มีค่ามาก ส่งผลให้ขนาดบริเวณส่วนโค้งและบริเวณครีบของขอบตัดชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีผลทำให้คุณภาพขอบตัดแย่ลง ดังแสดงในรูปที่ 2.7

จากการศึกษาพบว่าค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์เป็นตัวแปรหลักที่มีความสำคัญต่อคุณภาพ และลักษณะของขอบตัดเฉือนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขนาดของบริเวณส่วนโค้งมนและบริเวณครีบ ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มของค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเกิดรอยแตกของชิ้นงาน ที่ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 0.05 และ 0.85 เท่าของความหนาชิ้นงาน (Hatanaka, N. et al., 2003)



รูปที่ 2.7 ขนาดของบริเวณต่างๆบนขอบตัดของชิ้นงานเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ (Hatanaka, N. et al., 2003)

2.2.2 อิทธิพลของวัสดุต่อผลการตัดเฉือน (Effects of Material Types on Shear Cutting

Results)

ประเภทของชิ้นงานตัดที่แตกต่างกันนั้นทำให้สมบัติของวัสดุมีความแตกต่างกัน ทั้งความแข็ง ความแข็งแรง และการเสียรูป ซึ่งส่งผลต่อการกำหนดค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ตัดที่เหมาะสมและลักษณะขอบตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือน นอกจากนี้ยังส่งผลไปถึงอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ตัดอีกด้วย

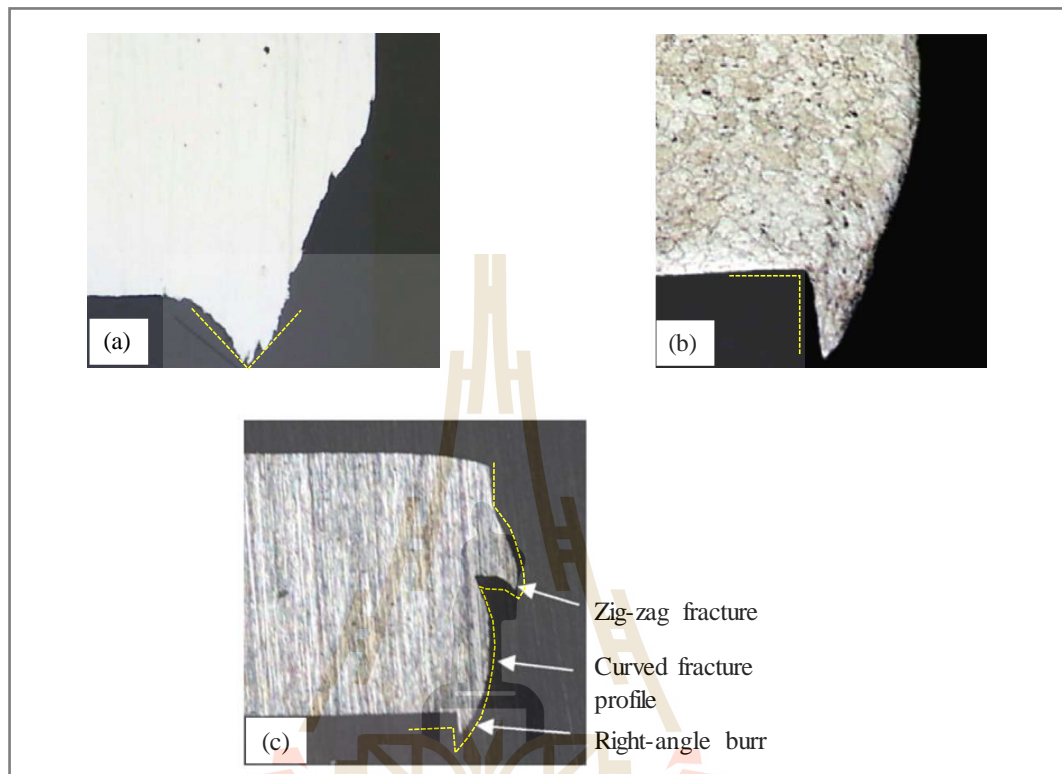
จากการศึกษาของ (Hilditch, T.B. et al., 2005) ได้ทดลองทำการตัดเฉือน โลหะแผ่น โดยใช้วัสดุต่างชนิดเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมของโลหะที่มีความแตกต่างกัน ในการศึกษาได้ใช้โลหะ 3 ประเภท ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) โลหะอะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloy) และ โลหะแมกนีเซียมผสม (Magnesium Alloy) ซึ่งมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทดสอบแต่ละชนิด

Material	Y.S. (MPa)	U.T.S (MPa)	Total Elongation (%)	Uniform Elongation (%)
6111-T4	190	310	23	21
CA5	150	280	44	27
HA3P	280	360	32	20
AZ31-B	250	290	23	12

จากการศึกษาพบว่าบริเวณของส่วนโค้งมนและส่วนของครีบบีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ แต่ลักษณะของขอบตัดในวัสดุแต่ละชนิดนั้นค่อนข้างแตกต่างกันเป็นอย่างมากอันเป็นผลมาจากพฤติกรรมการตัดเฉือนและลักษณะการขยายตัวของรอยแตกที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.8 ลักษณะบริเวณครีบบีแนวของเหล็กกล้ามีลักษณะคล้ายตัววี (V-Shape) โลหะอะลูมิเนียมผสมมีลักษณะครีบบีแนวมุมฉาก (Right-Angle) ซึ่งเป็นไปตามรูปทรงของแม่พิมพ์ตัด ส่วนโลหะแมกนีเซียมผสมมีลักษณะครีบบีแนวที่เป็นลักษณะเฉพาะคล้ายมีครีบบีแนวสองบริเวณ (Zigzag Fracture) เนื่องจากพฤติกรรมการขยายตัวของรอยแตกที่ยักไปมา (Zigzag Cracking) ทำให้รอยแตกมาบรรจบแบบปกติไม่ได้ ในการศึกษาพบว่าความสูงของส่วนโค้งเป็นผลโดยตรงจากความเหนียวและความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะ ส่วนความสูงของครีบบีแนวเป็นผลมาจากค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ จากผลการวิจัยนี้ ยืนยันว่าชนิดของวัสดุเป็นอีกหนึ่งตัวแปร

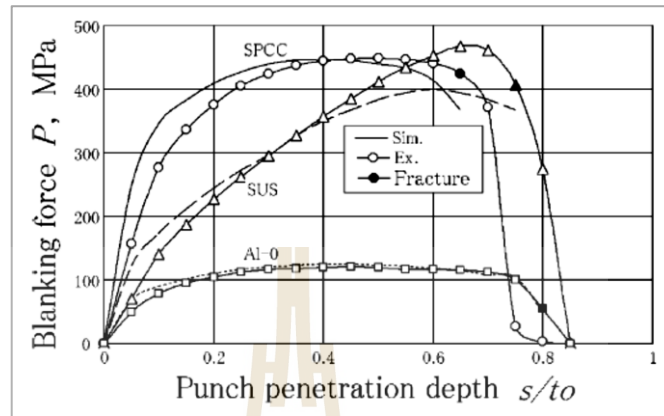
สำคัญซึ่งส่งผลต่อกระทบต่อขอบตัด ดังนั้นแล้วชนิดของโลหะก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดและพฤติกรรมการตัดเฉือนด้วย



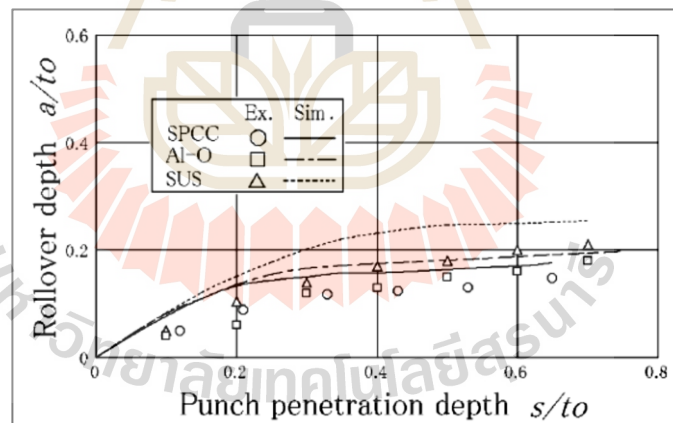
รูปที่ 2.8 ลักษณะขอบตัดจากการตัดเฉือน โดยใช้วัสดุต่างชนิด (a) เหล็กกล้า
(b) โลหะอะลูมิเนียมผสม (c) โลหะผสมแมกนีเซียม
(Hilditch, T.B. et al., 2005)

จากการศึกษากระบวนการตัดเฉือนในโลหะแผ่นของ (Hatanaka, N. et al., 2003) ซึ่งได้ทำการทดลองร่วมกับการจำลองผลในการตัดเฉือนโลหะแผ่นต่างชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (SPCC) เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) และโลหะอะลูมิเนียมผสม (Al-O) โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีความหนา 3 มิลลิเมตร จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าวัสดุแต่ละชนิดส่งผลต่อพฤติกรรมแรงต้านการตัดเฉือนและตำแหน่งที่เกิดการขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ซึ่งมีแตกต่างกันออกไปตามสมบัติของวัสดุ โดยเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS) มีแรงต้านการตัดสูงที่สุดและมีค่ามากกว่า เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และ โลหะอะลูมิเนียมผสมตามลำดับ ในส่วนของลักษณะขอบตัดแต่ละบริเวณก็จะมี การเกิดในอัตราที่แตกต่างกันในแต่ละวัสดุกล่าวคือ ลักษณะขอบตัดบริเวณส่วนโค้งมนจะมีขนาดโตที่สุด

เมื่อทำการตัดเฉือนเหล็กกล้าไร้สนิม และมีขนาดที่เล็กกว่าในกรณีของเหล็กกล้าคาร์บอน และ โลหะอะลูมิเนียมผสมตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการตัด และระยะกดลิกของพunch (Hatanaka, N., et al., 2003)



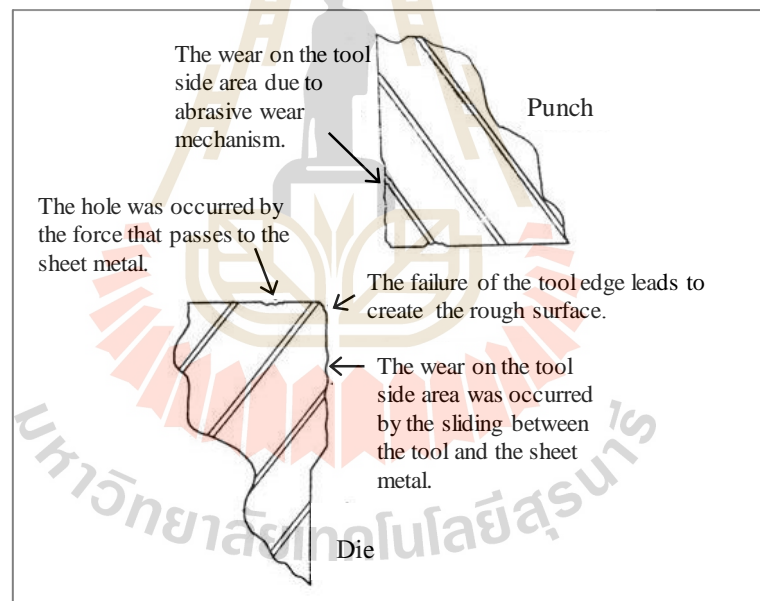
รูปที่ 2.10 อิทธิพลของวัสดุที่มีผลต่อการเกิดส่วนโค้งมน (Rollover Zone) ใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ 0.05 เท่า เมื่อเทียบกับความหนาชิ้นงาน (Hatanaka, N. et al., 2003)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องชี้ให้เห็นว่าชนิดของโลหะเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการตัด โดยเฉพาะแรงที่ใช้ในการตัดเฉือน และจากชนิดของโลหะแผ่นที่

มีความแตกต่างทำให้กลไกการตัดเฉือน รวมไปถึงพฤติกรรมการรีกขนาดของวัสดุนั้นมีความแตกต่างกันออกไปซึ่งทำให้ลักษณะของขอบตัดที่ได้มีลักษณะเฉพาะตัว

2.2.3 อิทธิพลของการสึกหรอของแม่พิมพ์ต่อผลการตัดเฉือน (Effects of Tool Wear on Shear Cutting Results)

การสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์เป็นสิ่งที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ในกระบวนการตัดเฉือนเนื่องจากในกระบวนการตัด ผิวสัมผัสของแม่พิมพ์และชิ้นงานตัดจำเป็นต้องมีการสัมผัสกันภายใต้สภาวะที่มีความเค้นสูง ยิ่งไปกว่านั้นการให้แรงกระทำทางกลเพื่อทำให้ชิ้นงานเกิดการตัดขาดออกจากกันยังส่งผลให้แม่พิมพ์ได้รับความเค้นและการสึกหรอมากขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวและการสูญเสียเนื้อวัสดุในแม่พิมพ์ตัดได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยทั่วไปแล้วการสึกหรอจะเกิดขึ้นมากกับแม่พิมพ์บนหรือฟันซ์ ส่วนแม่พิมพ์ล่างหรือคายจะเกิดการสึกหรอน้อยกว่ามาก



รูปที่ 2.11 การสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด (Kmutt, 2019)

ตำแหน่งที่เกิดการสึกหรอบนแม่พิมพ์ตัดดังแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อการซ่อมบำรุงแม่พิมพ์ และมีผลต่อคุณภาพหรือลักษณะขอบตัดของชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วย ตำแหน่งที่เกิดการสึกหรอบนแม่พิมพ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ตำแหน่งดังนี้

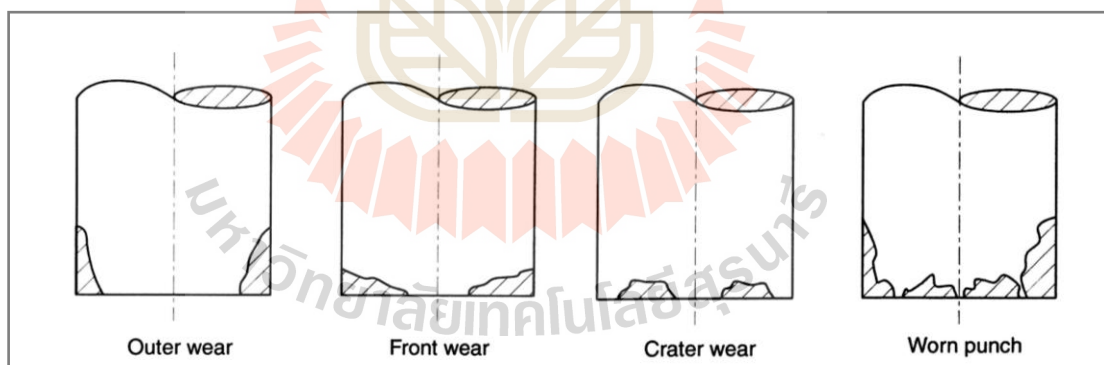
Outer Wear or Flank Wear เป็นการสึกหรอที่เริ่มต้นมาจากการสูญเสียเนื้อวัสดุบริเวณคมตัดหรือขอบของแม่พิมพ์ เมื่อมีการสึกหรอมากขึ้นจะส่งผลทำให้บริเวณด้านข้างของ

แม่พิมพ์ตัดเกิดการสึกหรอไปด้วย การสึกหรอ ณ ตำแหน่งนี้ส่งผลต่อระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ และส่งผลเป็นอย่างมากต่อลักษณะขอบตัดของชิ้นงาน โดยเฉพาะการเกิดบริเวณส่วนโค้งมนและ ครีบริบ

Front Wear or Face Wear เป็นการสึกหรอบริเวณผิวหน้าของแม่พิมพ์ เกิดขึ้นจากการได้รับแรงกระทำหรือการกระแทกซ้ำๆ กับชิ้นงานในระหว่างกระบวนการตัด เป็นผลทำให้เกิดความล้าขึ้นกับแม่พิมพ์จนนำมาสู่การสึกหรอบริเวณผิวหน้า การสึกหรอลักษณะนี้พบได้บ่อยเมื่อมีการผลิตชิ้นงานตัดจำนวนมากๆ

Crater Wear การสึกหรอแบบแอ่งหรือหลุม เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการขูดขีดรวมกับการสึกหรอแบบยึดติดทำให้ต้องใช้แรงในการตัดชิ้นงานมากกว่าปกติ การสึกหรอจะเกิดขึ้นบริเวณคมตัดและมีลักษณะเว้าเข้าสู่ศูนย์กลางของฟันซี่ (เฉลิมพล คล้ายนิล, 2557).

Worn Punch เป็นการสึกหรอทั่วทั้งผิวหน้าและด้านข้างของฟันซี่นับว่าเป็นการสึกหรอที่ร้ายแรงที่สุดที่เกิดขึ้นได้กับแม่พิมพ์ตัดหากขาดการเจียรซ่อมบำรุงแม่พิมพ์ การสึกหรอนี้ส่งผลต่อมิติและขนาดของแม่พิมพ์ตัดทำให้ขอบตัดไม่สะอาดกล่าวคือมีส่วนของเนื้อโลหะบริเวณครีบริบยื่นเกินออกมาจากขอบตัด และอาจส่งผลหนักทำให้แม่พิมพ์เสียหายจากการสูญเสียเนื้อแม่พิมพ์และการเกิดรอยแตกร้าวกับแม่พิมพ์หากยังมีการใช้งานแม่พิมพ์ตัดต่อไปเรื่อยๆ



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งการสึกหรอของฟันซี่ (Klocke, F., 2013)

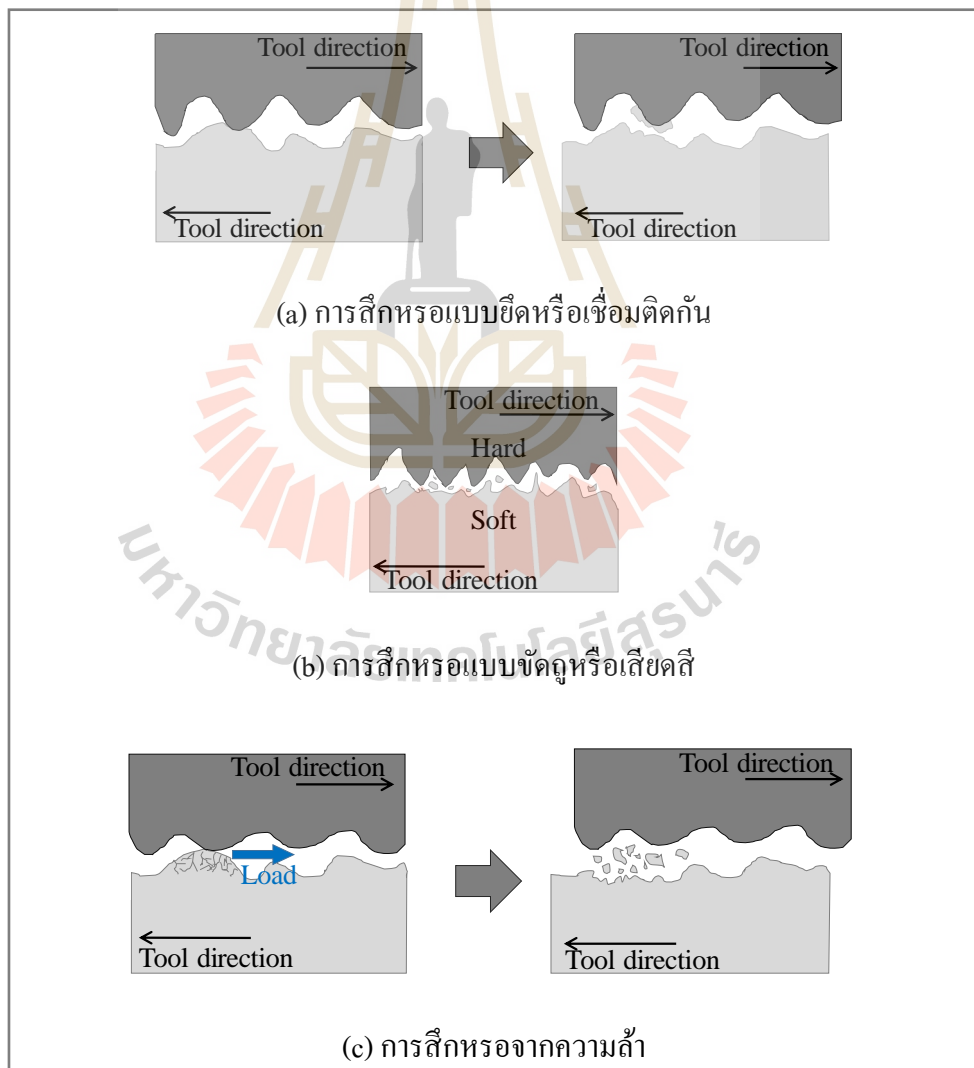
รูปแบบการสึกหรอที่อาจเกิดกับแม่พิมพ์ตัดเมื่อพิจารณาจากสมบัติของแม่พิมพ์ตัด และลักษณะการใช้งานแม่พิมพ์ตัดในอุตสาหกรรมการตัดแผ่นโลหะซึ่งต้องมีการผลิตชิ้นงานเป็นจำนวนมากๆ แม่พิมพ์ตัดมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดการสึกหรอ 3 รูปแบบหลักๆ คือ

การสึกหรอแบบยึดหรือเชื่อมติด (Adhesive Wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการเชื่อมติดกันของผิวโลหะ 2 ชนิด เนื่องจากการเสียดสีระหว่างผิวสัมผัสและทำให้เกิดความเค้น

ณ บริเวณผิวสัมผัสที่มากกว่าค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ ทำให้มีแรงการยึดเกาะกันทางโมเลกุลร่วมด้วย เมื่อให้แรงกระทำเพื่อให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ บริเวณที่มีการยึดหรือเชื่อมติดกันจะถูกดึงให้หลุดตามออกมาด้วย ดังรูปที่ 12.13 (a)

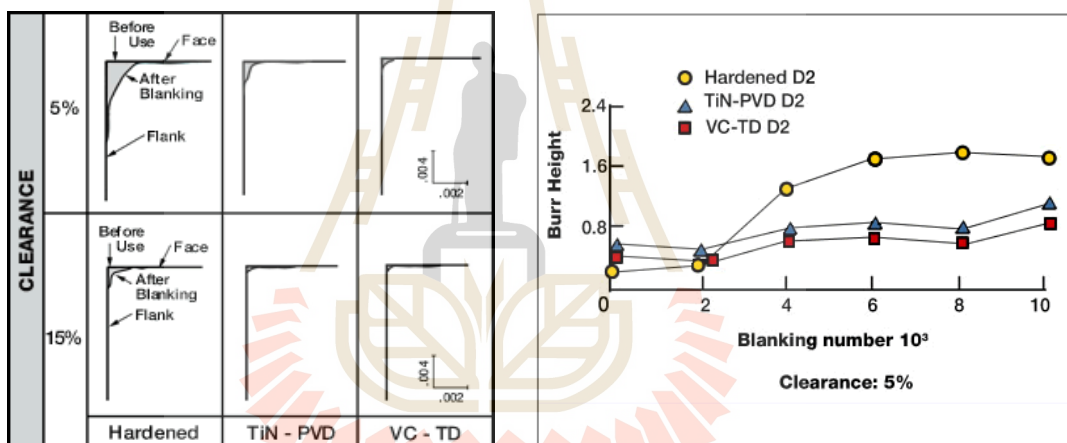
การสึกหรอแบบการขัดถูหรือเสียดสี (Abrasive Wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมกรการเสียดสีระหว่างผิวของชิ้นงานและแม่พิมพ์ตัดในระหว่างการตัดเฉือน ทำให้เนื้อวัสดุหลุดออกมาเป็นอนุภาคเล็กๆ ดังรูปที่ 12.13 (b)

การสึกหรอจากความล้า (Fatigue Wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร(Cyclic Load) ส่งผลให้เกิดความล้าขึ้นที่ผิวและทำให้เกิดความเสียหายและการสึกหรอขึ้น ณ บริเวณนั้น ดังรูปที่ 12.13 (c)



รูปที่ 2.13 รูปแบบการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัดเฉือนโลหะ

จากการศึกษาบทความที่เกี่ยวข้อง (Picklesimer, S., 2018) พบว่าตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ในกระบวนการตัดเฉือนคือ ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ โดยระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่น้อยมีผลต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดเป็นอย่างมากดังจะเห็นได้จากรูปที่ 12.14 ซึ่งแสดงรูปภาพเปรียบเทียบการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ 3 ชนิด ซึ่งถูกชุบผิวแข็งและเคลือบผิวก่อนทำการตัด พบว่าการสึกหรอที่รุนแรงเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์น้อย แม่พิมพ์ที่ทำการชุบผิวแข็งเพียงอย่างเดียวมีโอกาสในการเกิดความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ซึ่งทำการเคลือบผิวแข็งด้วย TiN-PVD และ VC-TD โดยพบการสึกหรอเพียงเล็กน้อยบริเวณขอบของคมตัด ดังแสดงในรูปที่ 12.14 การสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดส่งผลเป็นอย่างมากต่อลักษณะขอบตัดเฉือนที่ได้โดยเฉพาะบริเวณครีบริบ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 12.15

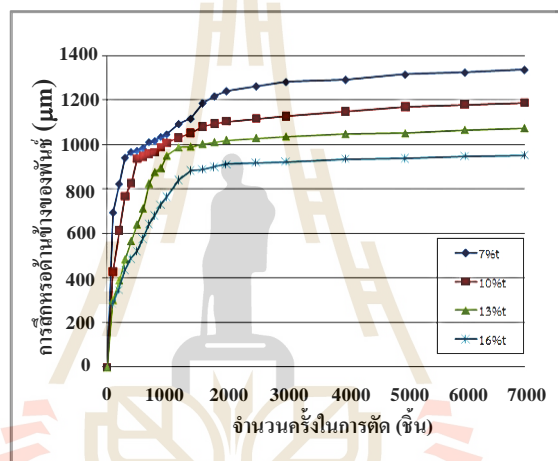


รูปที่ 2.14 การสึกหรอที่เกิดกับแม่พิมพ์ตัด (Picklesimer, S., 2018)

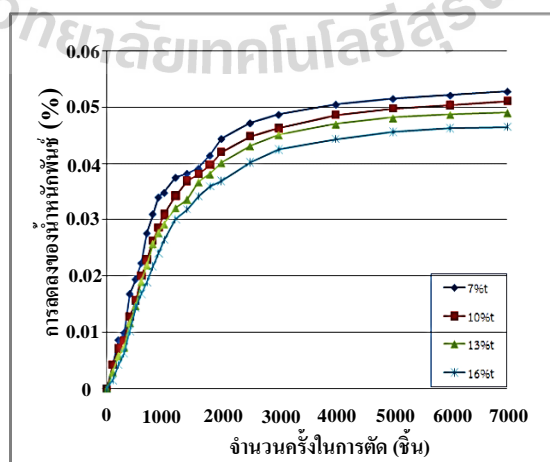
รูปที่ 2.15 ขนาดครีบริบที่พบเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ตัดแต่ละแบบ (Picklesimer, S., 2018)

และจากการศึกษาอิทธิพลของระยะช่องว่างคมตัดที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์สำหรับการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดย (เฉลิมพล คล้ายนิล และคณะ, 2560) ในการศึกษาพวกเขาได้ทำการศึกษาและตรวจสอบการสึกหรอที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างและผิวหน้าของแม่พิมพ์ เมื่อทดสอบโดยใช้โลหะแผ่นคือ JIS G3113 หนา 1.6 มิลลิเมตร แม่พิมพ์ตัดทำจากเหล็กกล้าทำงานเย็น JIS SKS3 มีค่าความแข็งประมาณ 60 HRC และใช้ค่าระยะช่องว่างคมตัดที่ 7 10 13 และ 16 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาชิ้นงาน ทำการตัดเฉือนชิ้นงานไปเป็นจำนวน 7,000 ชิ้น จากนั้นทำการตรวจสอบอัตราการสึกหรอที่เกิดกับแม่พิมพ์ด้วยการชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละ

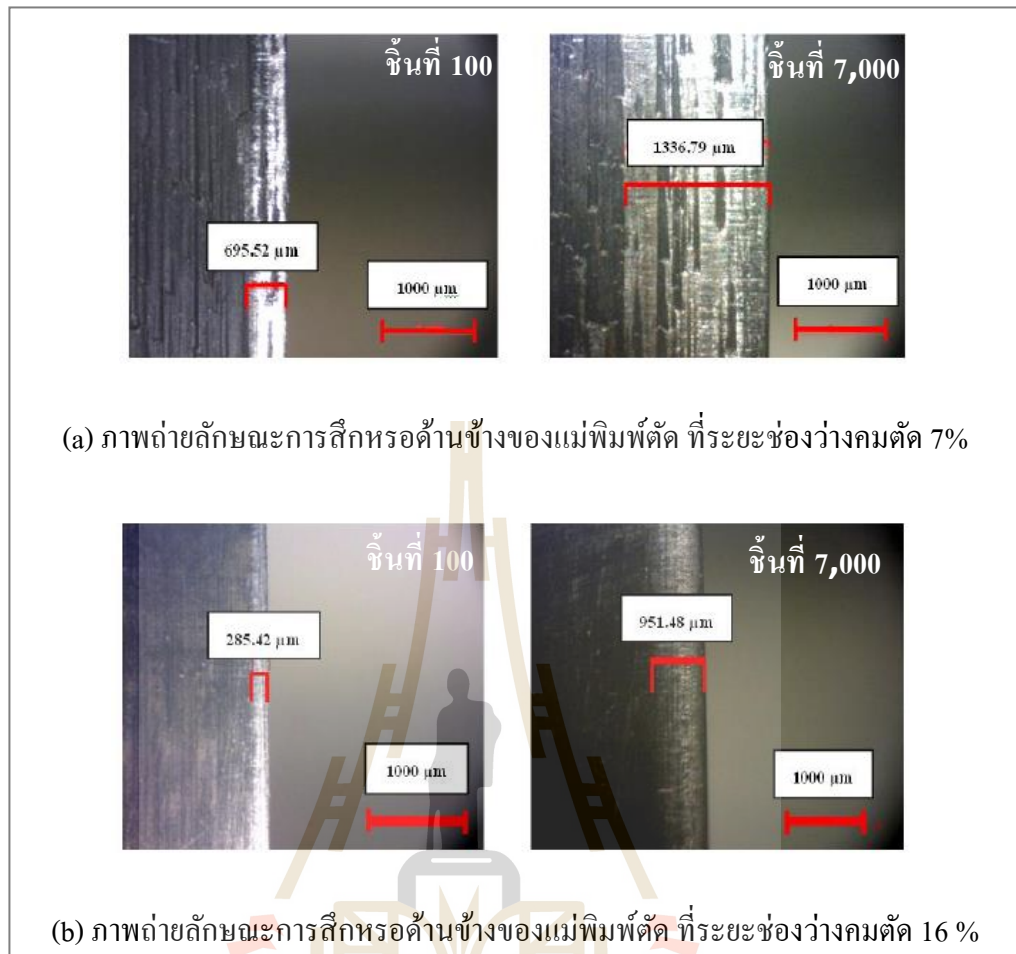
การเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการสึกหรอ และยืนยันผลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จากการศึกษา เขาพบว่า ระยะการสึกหรอของพันธมีแนวโน้มน่าเกิดขึ้นมากที่สุดและเกิดขึ้นค่อนข้างเร็วเมื่อมีการใช้ ระยะช่องคมตัดที่น้อย ซึ่งสัมพันธ์กับการลดลงของน้ำหนักพันธ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17 และรูปแบบการสึกหรอด้านข้างที่เกิดขึ้นกับพันธ ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 ลักษณะขอบตัดแต่ละ บริเวณมีแนวโน้มน่าเปลี่ยนแปลงไปตามการสึกหรอของแม่พิมพ์มีดังนี้ ขอบตัดบริเวณส่วนโค้งมน (Rollover Zone) บริเวณผิวหยาบหรือรุกรณะ (Fracture Zone) และบริเวณครีป (Burr Zone) มีแนวโน้มน่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อการสึกหรอของแม่พิมพ์เพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันบริเวณผิวตัดเรียบ (Burnish Zone) กลับมีแนวโน้มน่าที่ลดลง



รูป 2.16 การสึกหรอด้านข้างของพันธที่เปลี่ยนแปลงไป (เฉลิมพล คล้ายนิล และคณะ, 2560)



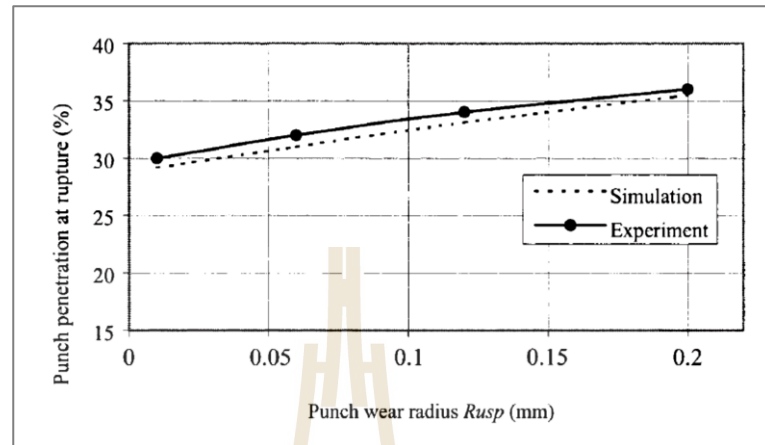
รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพันธ (เฉลิมพล คล้ายนิล และคณะ, 2560)



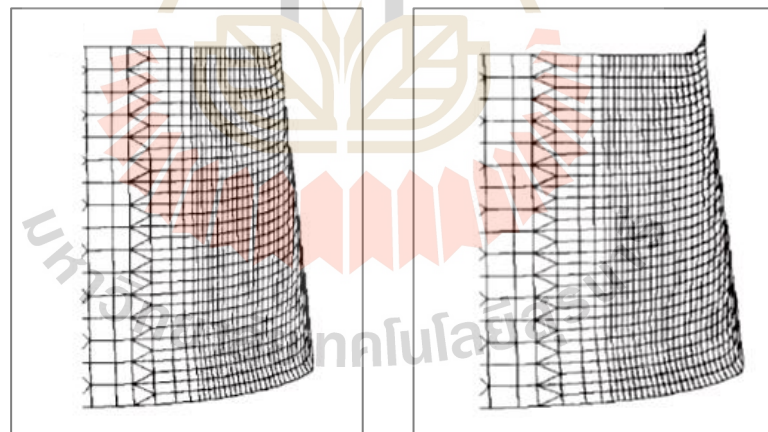
รูปที่ 2.18 การสึกหรอด้านข้างของฟันซี่ที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากทำการตัดชิ้นงาน ที่ 100 และ 7,000 ซัน (เฉลิมพล คล้ายนิล และคณะ, 2560)

จากงานวิจัยของ (Hambl, R. et al., 2003) ซึ่งทำการศึกษาอิทธิพลการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัดที่มีผลต่อลักษณะขอบตัดของชิ้นงานโดยใช้ทดลองร่วมกับการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการทดสอบพวกเขาใช้เหล็กกล้าแผ่น เกรด AISI 1060 ความหนา 3.5 มิลลิเมตร ทำการตัดเฉือนโดยใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์คือ 0.35 มิลลิเมตร จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนรัศมีขอบตัดของแม่พิมพ์ คือ 0.01 0.06 0.12 และ 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งให้แม่พิมพ์ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีรัศมีขอบแม่พิมพ์ตัดเป็น 0.01 มิลลิเมตร และให้รัศมีขอบแม่พิมพ์ที่เพิ่มมากขึ้นแทนแม่พิมพ์ซึ่งมีสึกหรอมากขึ้น จากการศึกษาเมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งระยะกดลิกของแม่พิมพ์ที่ทำให้ชิ้นงานเกิดรอยแตกเริ่มต้นขึ้นกับรัศมีของขอบแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 2.19 พบว่า ณ ตำแหน่งที่ชิ้นงานเริ่มเกิดรอยแตกเริ่มต้นกลับมีแนวโน้มที่เกิดลิกขึ้นเมื่อรัศมีขอบแม่พิมพ์มีค่ามากขึ้น การเกิดรอยแตกที่เข้าสู่ผลต่อขนาดของบริเวณส่วนโค้งมนและ

ครีบบนขอบงานตัดด้วย ดึงจะสังเกตเห็นได้จากผลการจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และขนาดของครีบที่เกิดขึ้นเมื่อรัศมีขอบแม่พิมพ์ที่ใช้ตัดมีค่าแตกต่างกันตามรูปที่ 2.21



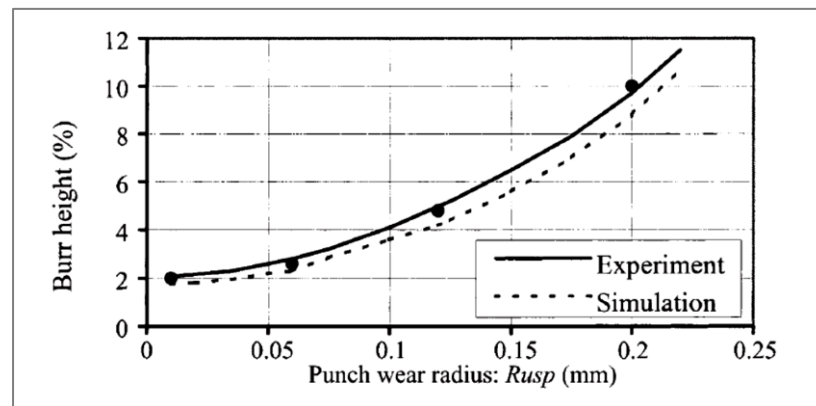
รูปที่ 2.19 ตำแหน่งที่เกิดรอยแตกเริ่มต้นขึ้นบนชิ้นงาน เมื่อใช้แม่พิมพ์ตัดมีรัศมีต่างๆ (Hambli, R. et al., 2003)



(a) รัศมีเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร

(b) รัศมี 0.2 มิลลิเมตร

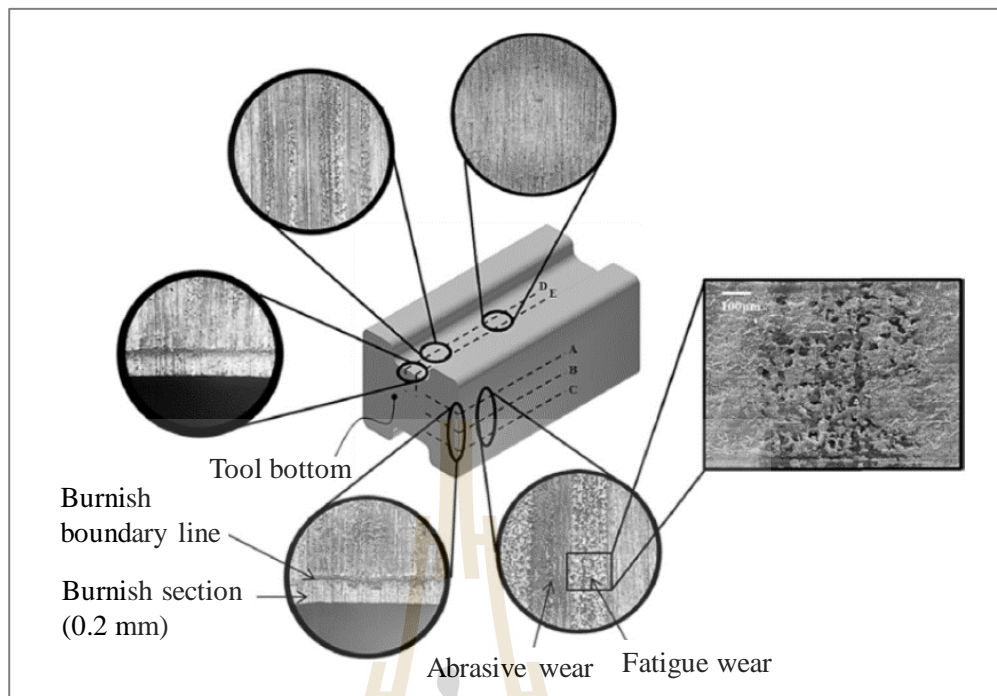
รูปที่ 2.20 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงานที่ได้จากการจำลองตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีรัศมีแตกต่างกัน (Hambli, R. et al., 2003)



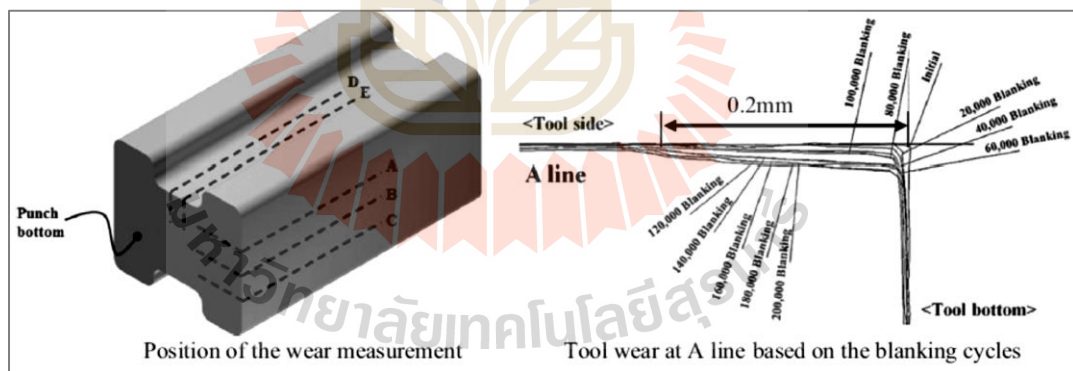
รูปที่ 2.21 ขนาดของครีบบนที่เกิดขึ้นเทียบกับความหนาชิ้นงานเมื่อรัศมีขอบแม่พิมพ์ที่ใช้ตัดมีค่าแตกต่างกัน
(Hambli, R. et al., 2003)

จากการศึกษาการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดของ (Cheon, S. et al., 2016) ซึ่งแม่พิมพ์ตัดผลิตมาจากเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น JIS SKD11 ชิ้นงานทดสอบเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS430 ซึ่งมีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยในการศึกษาแม่พิมพ์จะถูกใช้งานในการตัดต่อเนื่องถึง 200,000 รอบ พวกเขาพบว่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดมี 2 กลไกเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.22 กลไกแรกคือ การสึกหรอเนื่องจากการเสียดสีในระหว่างการตัด (Abrasive Wear) และกลไกที่สองคือ การสึกหรอจากความล้า (Fatigue Wear) เนื่องจากรูปแบบการใช้งานแบบวัฏจักร โดยการสึกหรอที่พบในการศึกษานี้จะเกิดขึ้นมากเฉพาะบริเวณด้านข้างของแม่พิมพ์ตัดและเกิดมากที่สุดที่ระยะ 0.2 มิลลิเมตรนับจากผิวหน้าแม่พิมพ์ตัดขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 2.23

จากการสำรวจงานวิจัยดังอธิบายในหัวข้อ 2.2.3 นี้แสดงให้เห็นว่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาและมีสำคัญเป็นอย่างมากต่อคุณภาพของขอบตัดที่ได้ภายหลังจากการตัดเฉือน แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีเพียงแต่การลดการเกิดครีบน้อยลงเท่านั้น ซึ่งวิธีการตัดเฉือนโดยใช้ชุดแม่พิมพ์นั้นไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดครีบได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นกระบวนการกำจัดครีบภายหลังจากการตัดเฉือนโลหะจึงเป็นกระบวนการต่อเนื่องที่มักถูกกระทำหลังการตัดเฉือนในกระบวนการผลิตโลหะ



รูปที่ 2.22 การสึกหรอที่พบบนผิวแม่พิมพ์ (Cheon, S. et al., 2016)

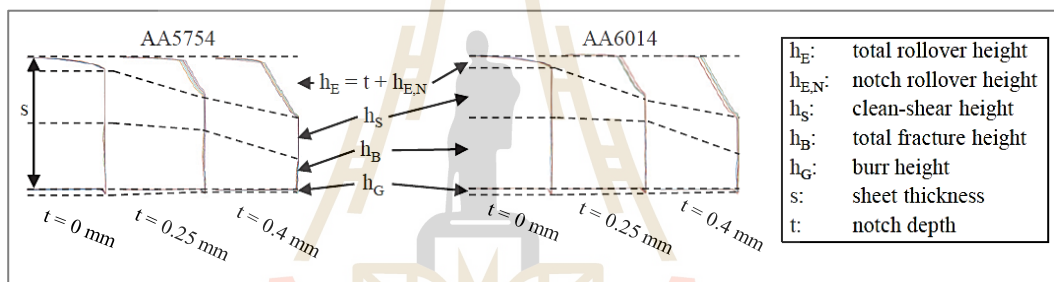


รูปที่ 2.23 ตำแหน่งที่ตรวจสอบการสึกหรอ และการสึกหรอที่พบเมื่อทำการตรวจสอบ
ที่ตำแหน่งของเส้น A (Cheon, S. et al., 2016)

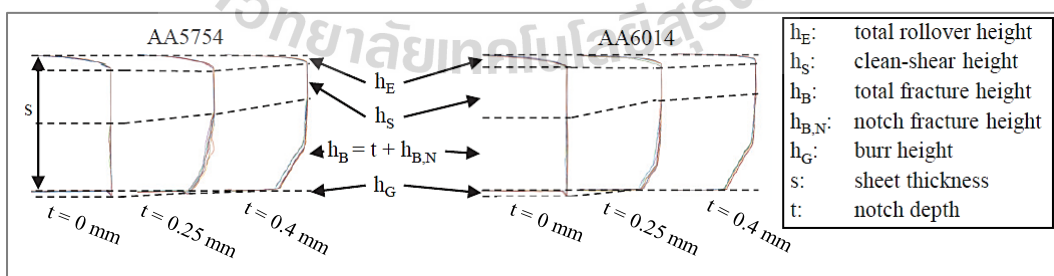
2.3 เทคนิคการปรับปรุงขอบตัดเฉือน (Techniques for Sheared Edge Improve)

นอกจากการกำจัดครีบโดยการเจียรด้วยหินเจียรหรือการขัดด้วยวัสดุขัดดังกล่าวก่อนหน้า
เมื่อไม่นานมานี้ได้มีนักวิจัยกลุ่มหนึ่งของมหาวิทยาลัย Technische Universität München, Germany
ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการลดครีบโดยใช้กระบวนการทางเลือกวิธีใหม่คือการใช้แรง

กระทำทางกลในการสร้างรอยบากลงบนชิ้นงานโลหะแผ่นก่อนที่จะนำชิ้นงานดังกล่าวนี้มาทำการตัดเฉือนเรียกกระบวนการนี้ว่า “Notching Technique” จากการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการบากร่องก่อนทำการตัดเฉือนแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมสองแบบคือ AA5754 และ AA6014 ซึ่งมีความหนา 1 มิลลิเมตร ของ (Krinningera, M. et al., 2017) ในการศึกษาได้มีการทำรอยบากบนชิ้นงานสองรูปแบบ แบบแรกเป็นการทำรอยบากเฉพาะบริเวณผิวด้านบนของชิ้นงานก่อนที่จะนำไปตัดเฉือน และแบบที่สองคือทำรอยบากเฉพาะบริเวณผิวด้านล่างของชิ้นงาน ระยะความลึกของร่องบากแบ่งออกเป็นสามความลึกคือที่ 0.00 0.25 และ 0.40 มิลลิเมตรจากการศึกษาพบว่าการบากร่องบริเวณผิวด้านบนของชิ้นงานนั้นส่งผลให้บริเวณของส่วนโค้งมนมีแนวโน้มลดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และผลจากการบากร่องทางด้านล่างมีส่วนช่วยในการลงของบริเวณครีบริบที่เกิดบนขอบตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.25

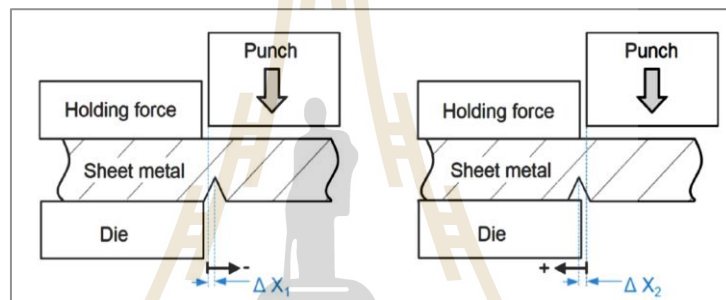


รูปที่ 2.24 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงานโลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสม AA5754 และ AA6014 เมื่อทำการบากร่องบริเวณผิวด้านบน (Krinningera, M. et al., 2017)



รูปที่ 2.25 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงานโลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสม AA5754 และ AA6014 เมื่อทำการบากร่องบริเวณผิวด้านล่าง (Krinningera, M. et al., 2017)

และจากการศึกษาของ (Sachnik, P. et al., 2017) ซึ่งทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อจากงานวิจัยของ (Krinningera, M. et al., 2017) ในครั้งนี้พวกเขาได้ทำการศึกษาโดยใช้ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการตรวจสอบเป็นโลหะแผ่น 4 ชนิด คือ DC04 1.4301 AA6014 และ CuSn6 จากการศึกษาพวกเขาพบว่าข้อกำหนดตำแหน่ง ณ บริเวณปลายของร่องบากเข้ากับอุปกรณ์หรือแม่พิมพ์ตัดดังแสดงในรูปที่ 2.26 มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกลไกหรือพฤติกรรมกรรมการตัดเฉือนของวัสดุและยังส่งผลที่รุนแรงต่อลักษณะของขอบตัด การกำหนดตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมอาจเป็นการกระทำที่ส่งผลต่อการเกิดครีบที่มากขึ้นและเสี่ยงต่อการมีลักษณะขอบตัดไม่เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ แต่ในทางกลับกันการกำหนดตำแหน่งที่มีความเหมาะสมจะเป็นการช่วยลดการเกิดของครีบได้เป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 นิยามในการกำหนดตำแหน่งของปลายร่องบากเมื่อติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ตัด (Sachnik, P. et al., 2017)

Position [mm]	- 0.4	- 0.3	- 0.2	- 0.1
Sheared edge				
Position [mm]	0	+ 0.1	+ 0.2	+ 0.3
Seared edge				

รูปที่ 2.27 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงาน โลหะแผ่นที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของปลายร่องบากที่ระยะต่างๆ (Sachnik, P. et al., 2017)

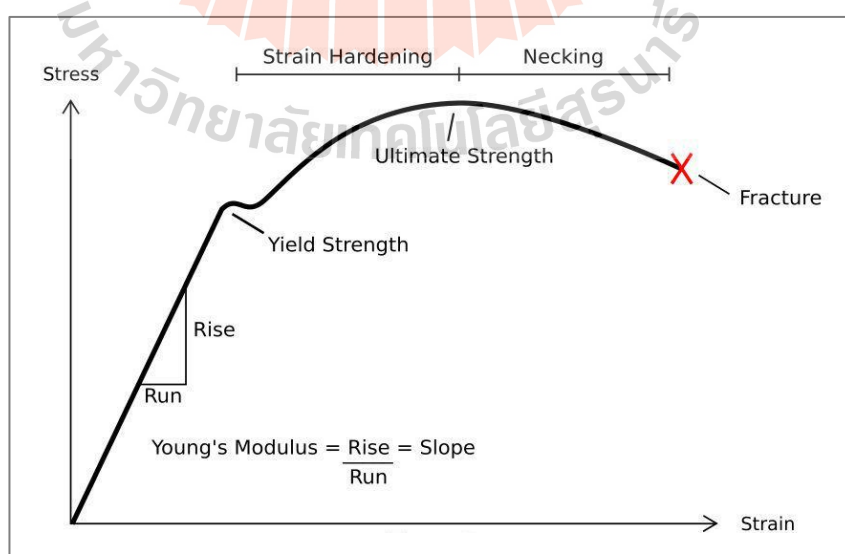
การประยุกต์ใช้เทคนิคการบากร่องเข้ากับกระบวนการตัดเฉือนเป็นกระบวนการที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากกระบวนการนี้ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ดี เมื่อพิจารณาจากลักษณะขอบตัดเฉือนซึ่งมีอัตราการเกิดส่วนโค้งมนและครีบลดลง

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องด้วยการทำวิทยานิพนธ์เรื่องการตัดเฉือน มีความเกี่ยวข้องกับการเสีรูปของโลหะซึ่งจำเป็นต้องอาศัยความรู้พื้นฐาน ด้านพฤติกรรมการเสีรูปของวัสดุรวมไปถึงความรู้เกี่ยวกับความเค้นและความเครียดด้วย ยิ่งไปกว่านั้นการศึกษาการตัดเฉือนยังทำโดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ด้วย

2.4.1 การเสีรูปของโลหะเนื่องจากแรงทางกล (Deformation of Metal due to Mechanical Load)

กระบวนการตัดเฉือนถือเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยแรงทางกลชนิดหนึ่ง โดยโลหะมีพฤติกรรมการเสีรูปดังแสดงในรูปที่ 2.28 จากรูปการทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผู้ใช้งานจำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมการเกิดจุดครากของโลหะชนิดนั้นๆก่อนนำมาทำการขึ้นรูป นอกจากนี้แล้วในงานตัดเฉือนจำเป็นที่จะต้องทราบถึงค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดอันจะทำให้โลหะเกิดการแตกหักหรือฉีกขาดออก เพื่อประเมินความสามารถในกระบวนการขึ้นรูปทางกลนั้นๆ จากความสัมพันธ์ของค่าความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) ในรูปที่ 2.28 ทำให้ทราบว่าความเค้นและความเครียดเป็นตัวกำหนดการเสีรูปของวัสดุ



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในโลหะ (Philipfigari, 2019)

2.4.2 ความเค้น ความเครียด และเกณฑ์การครากของวัสดุ (Stress Strain and Yield Criteria)

ความเค้น (Stress, σ) เกิดขึ้น ณ จุดใดๆของวัสดุซึ่งมีแรงมากระทำอยู่ โดยนิยามจากแรงกระทำบนวัสดุ (F) ต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งแรงนั้นกระทำอยู่ (A) ดังแสดงตามสมการที่ 2.1 (ภูษิต มิตรสมหวัง, 2561)

$$\sigma = \frac{dF}{dA} \quad (2.1)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้น

F คือ แรงกระทำกับวัสดุ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบ

ความเค้นที่กระทำบนวัสดุมี 2 ชนิดคือ ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) และความเค้นเฉือน (Shear Stress) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$\sigma_n = \frac{dF_n}{dA} \quad (2.2)$$

โดยที่ σ_n คือ ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress)

F_n คือ แรงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบ

$$\tau = \frac{dF_t}{dA} \quad (2.3)$$

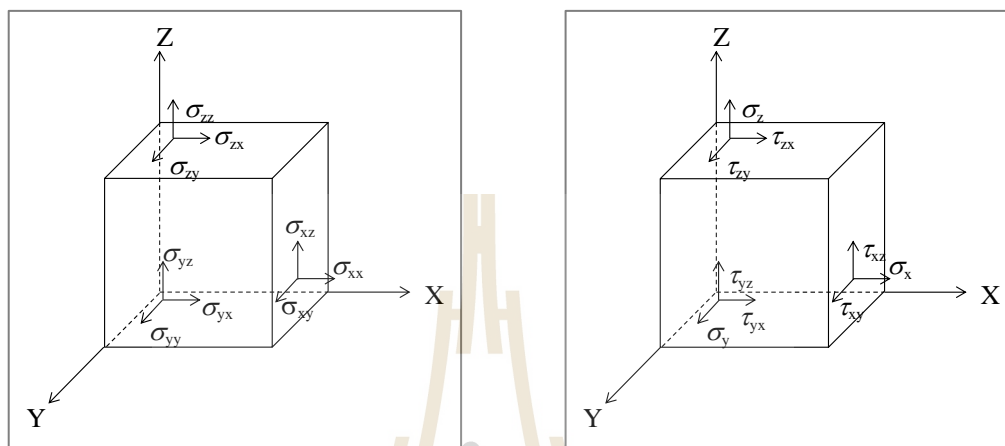
โดยที่ τ คือ ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

F_t คือ แรงที่กระทำขนานกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบ

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับวัสดุ ณ บริเวณใดๆ จะส่งผลให้เกิดความเค้นกระทำกับวัสดุ โดยแบ่งเป็นความเค้นตั้งฉากกับผิววัสดุหนึ่งส่วน และอีกสองส่วนเป็นความเค้นเฉือนตาม

แนวแกนและเมื่อพิจารณาความเค้นที่กระทำกับเอลิเมนต์ในรูปแบบสามมิติพบว่าความเค้นที่กระทำกับเอลิเมนต์นั้นประกอบไปด้วยความเค้น 9 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (a) และ (b) ซึ่งความเค้นทั้งหมดนี้สามารถที่จะเขียนออกมาในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.4 หรือ 2.5



(a) ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress)
(ภูษิต มิตรสมหวัง, 2561)

(b) ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน
(Normal Stress and Shear Stress)
(ภูษิต มิตรสมหวัง, 2561)

รูปที่ 2.29 ความเค้นที่กระทำกับเอลิเมนต์

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

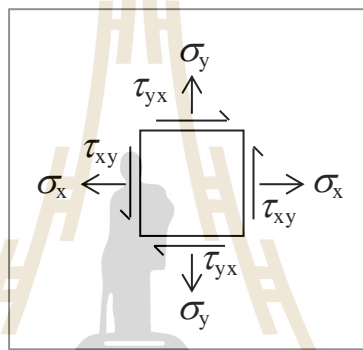
$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดยที่ σ_{xx}, σ_x คือ ความเค้นที่กระทำในแกน x
 σ_{yy}, σ_y คือ ความเค้นที่กระทำในแกน y
 σ_{zz}, σ_z คือ ความเค้นที่กระทำในแกน z
 σ_{xy}, σ_{yx} คือ ความเค้นที่กระทำในแกน x และ y

σ_{yz}, σ_{zy} คือ ความเค้นที่กระทำในแกน y และ z

σ_{zx}, σ_{xz} คือ ความเค้นที่กระทำในแกน z และ x

เมื่อพิจารณาเพียงความเค้นตั้งฉากที่กระทำกับระนาบ X และ Y ความเค้นหลักหรือความเค้นระนาบนี้แสดงดังรูปที่ 2.30 โดยความเค้นหลักนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์การขึ้นรูปของโลหะ โดยเฉพาะการวิเคราะห์การเกิดและการขยายตัวของรอยแตกอันเกิดจากความเค้นแรงดึงกล่าวคือ ณ จุดที่มีความเค้นแรงดึงสูงสุดกระทำกับเนื้อโลหะรอยแตกมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นในลักษณะตั้งฉากกับความเค้นแรงดึงสูงสุดนั้น ซึ่งอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.6



รูปที่ 2.30 ความเค้นระนาบ (ภูษิต มิตรสมหวัง, 2561)

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2]^{1/2} \quad (2.6)$$

โดยที่ σ_{\max} คือ ความเค้นสูงสุด
 σ_{\min} คือ ความเค้นต่ำสุด
 σ_x คือ ความเค้นในแนวแกน x
 σ_y คือ ความเค้นในแนวแกน y
 τ_{xy} คือ ความเค้นเฉือนในแนว xy

นอกจากความเค้นหลักที่กระทำตั้งฉากกับแนวระนาบแล้ว ความเค้นหลักที่เป็นความเค้นเฉือนก็มีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์การขึ้นรูปของโลหะด้วย โดยขนาดของความเค้นหลักที่เป็นความเค้นเฉือนสามารถหาได้จากสมการการคำนวณที่ 2.7

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2]^{1/2} \quad (2.7)$$

- โดยที่ τ_{\max} คือ ความเค้นเฉือนสูงสุด
 σ_x คือ ความเค้นในแนวแกน x
 σ_y คือ ความเค้นในแนวแกน y
 τ_{xy} คือ ความเค้นเฉือนในแนว xy

ความเครียด (Strain) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงปริมาณการเสียรูปของวัสดุ ความเครียดสามารถคำนวณหาได้จากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนใดๆ โดยไม่พิจารณาถึงตำแหน่งหรือการหมุนของชิ้นส่วนนั้นๆ ซึ่งความเครียดทางวิศวกรรมและความเครียดจริงเป็นไปตามสมการ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาความเครียดนี้ในระบบสามมิติสามารถแสดงได้ในรูปเมทริกซ์ ซึ่งความเครียดทั้งหมดมีจำนวนเท่ากับจำนวนความเค้นสามารถเขียนแสดงได้ดังสมการที่ 2.10 นอกจากนี้ความเครียดตั้งฉากหรือความเครียดหลักนั้นสามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.11 และความเครียดเฉือนสูงสุดหาได้จากสมการที่ 2.12

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.8)$$

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (2.9)$$

- โดยที่ e คือ ความเครียดทางวิศวกรรม
 ε คือ ความเครียดจริง
 l_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของวัสดุทดสอบ
 l คือ ความยาวสุดท้ายของวัสดุทดสอบ

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{yx} & e_{zx} \\ e_{xy} & e_{yy} & e_{zy} \\ e_{xz} & e_{yz} & e_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

โดยที่ e_{xx}, e_x คือ ความเครียดที่กระทำในแกน x
 e_{yy}, e_y คือ ความเครียดที่กระทำในแกน y
 e_{zz}, e_z คือ ความเครียดที่กระทำในแกน z
 e_{xy}, e_{yx} คือ ความเครียดที่กระทำในแกน x และ y
 e_{yz}, e_{zy} คือ ความเครียดที่กระทำในแกน y และ z
 e_{zx}, e_{xz} คือ ความเครียดที่กระทำในแกน z และ x

$$e_{\max}, e_{\min} = \frac{1}{2}(e_x + e_y)^2 \pm \frac{1}{2}[(e_x - e_y)^2 + 4e_{xy}^2]^{1/2} \quad (2.11)$$

โดยที่ e_{\max} คือ ความเครียดสูงสุด
 e_{\min} คือ ความเครียดต่ำสุด
 e_x คือ ความเครียดในแนวแกน x
 e_y คือ ความเครียดในแนวแกน y
 e_{xy} คือ ความเครียดในแนว xy

$$e_{\max} = \frac{1}{2} \gamma_{\max} = \frac{1}{2} [(e_x - e_y)^2 + 4e_{xy}^2]^{1/2} \quad (2.12)$$

เกณฑ์การคราก (Yield Criteria) ในกระบวนการตัด เกณฑ์การครากนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานตัด เนื่องจากโดยปกติในระหว่างกระบวนการตัดชิ้นงาน โลหะจะอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นซึ่งมีความซับซ้อน โดยค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในการทดสอบแรงดึง ด้วยเหตุนี้การระบุจุดที่โลหะเริ่มเกิดการครากหรือเริ่มเกิดการเสียรูปแบบถาวรจึงจำเป็นต้องอาศัยเกณฑ์การครากเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ สำหรับกรณีที่วัสดุมีสมบัติทางกลที่สม่ำเสมอทุกทิศทาง เกณฑ์การครากนั้นสามารถหาได้จาก เกณฑ์การครากออนมิสเชส (Von Misses' Yield Criterion) และเกณฑ์การครากเทรסקา (Tresca's Yield Criterion)

เกณฑ์การครากออนมิสเชส (Von Misses' Yield Criterion) วัสดุจะเกิดการครากเมื่อ Stress Deviator (J_2) มากกว่าค่าวิกฤติค่าหนึ่ง ดังมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.13 โดย Stress deviator สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.14

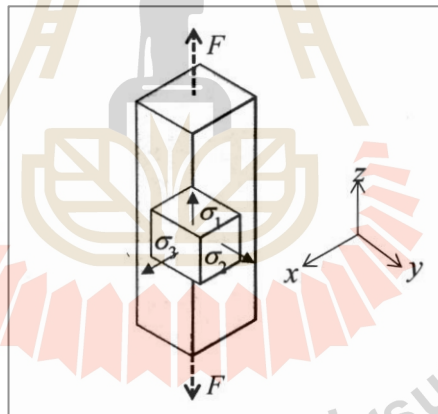
$$J_2 = k^2 \quad (2.13)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.14)$$

เพื่อคำนวณค่าคงที่ k และสร้างความสัมพันธ์กับการครากในการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ภายใต้สภาวะแรงดึงดังกล่าว ณ จุดที่วัสดุเริ่มเกิดการคราก ความเค้นหลักตั้งฉาก $\sigma_1 = \sigma_0$ (ความเค้นจุดครากของวัสดุ) ความเค้นหลักตั้งฉาก σ_2 และความเค้นหลักตั้งฉาก $\sigma_3 = 0$ จากนั้นแทนค่าความเค้นนี้ลงในสมการที่ 2.14 และจากสมการที่ 2.13 จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.15 และ 2.16

$$\sigma_0^2 + \sigma_0^2 = 6k^2 \quad (2.15)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{3}k \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.31 ความเค้นในชิ้นงานทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว (ภูษิต มิตรสมหวัง, 2561)

แทนค่า ($J_2^{1/2} = k$) ลงในสมการที่ 2.16 ได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.17 และ 2.18

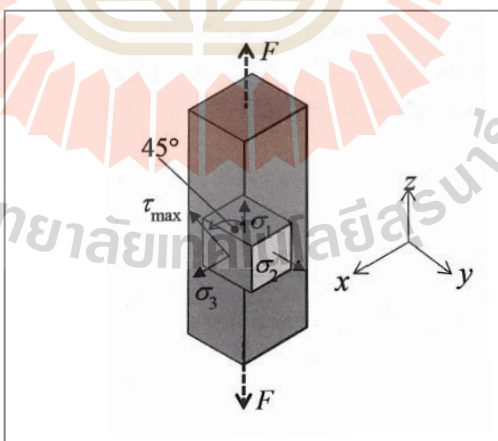
$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.17)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]^{1/2} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.17 และ 2.18 ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยการแทนความเค้นส่วนต่างๆ ทางฝั่งขวาของสมการเรียกว่า “ความเค้นสมมูล (Equivalent or Effective Stress)” สำหรับการใส่ประโยชน์ของสมการทั้งสองนี้ทำได้ด้วยการเปรียบเทียบความเค้นสมมูลกับความเค้นจุดครากจากการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียวของวัสดุ (σ_0) กล่าวคือ หากความเค้นสมมูลที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าความเค้นจุดครากของวัสดุ แสดงว่าวัสดุยังไม่เกิดการครากหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรในทางตรงกันข้ามหากความเค้นสมมูลมีค่าถึงค่าความเค้นจุดครากของวัสดุแสดงว่าวัสดุเริ่มเกิดการครากแล้ว

เกณฑ์การครากเทรสกา (Tresca's Yield Criterion) เป็นเกณฑ์การครากอีกเกณฑ์หนึ่งที่นิยมใช้ คือ เกณฑ์การครากเทรสกา เกณฑ์นี้อธิบายไว้ว่าการครากของวัสดุเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนหลักสูงสุด (τ_{max}) มีค่าสูงถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในแท่งวัสดุจากการทดสอบแรงดึงโดยค่าความเค้นเฉือนสูงสุดนี้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.19

ในการทดสอบแรงดึงวัสดุในแนวแกนเดียวตามรูปที่ 2.32 ณ จุดที่วัสดุเริ่มเกิดการครากสามารถสรุปได้ว่า ความเค้นหลักตั้งฉาก $\sigma_1 = \sigma_0$ (ความเค้นจุดครากของวัสดุ) ความเค้นหลักตั้งฉาก σ_2 และ $\sigma_3 = 0$ ความเค้นเฉือนสูงสุดเท่ากับ $\sigma_0/2$ แทนค่าความเค้นเหล่านี้ลงในสมการที่ 2.19 เป็นผลให้ได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.20 หรือ 2.21



รูปที่ 2.32 ความเค้นเฉือนในชิ้นงานทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว (ภูษิต มิตระสมหวัง, 2561)

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.19)$$

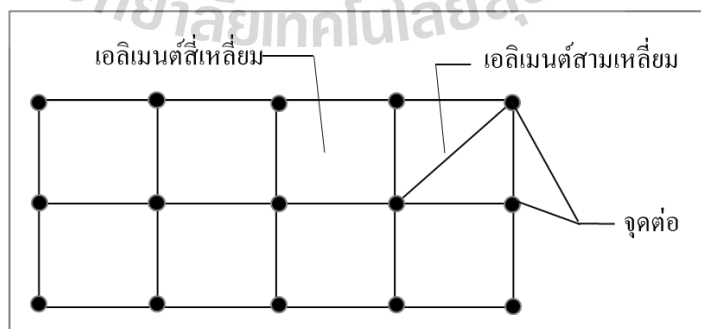
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0 = \frac{\sigma_0}{2} \quad (2.20)$$

$$\sigma_0 = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.21)$$

ผลการคำนวณจากฟังก์ชันของสมการเรียกว่า “ความเค้นสมมูล” เช่นเดียวกัน การประยุกต์ใช้ผลการคำนวณด้วยเกณฑ์การครากเทอร์สกาคล้ายคลึงกับเกณฑ์การครากอนมิสเชส กล่าวคือ หากความเค้นสมมูลที่คำนวณได้มีค่าสูงถึงความเค้นจุดครากของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในแนวแกน แสดงว่าวัสดุเริ่มเกิดการครากหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรแล้ว

2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

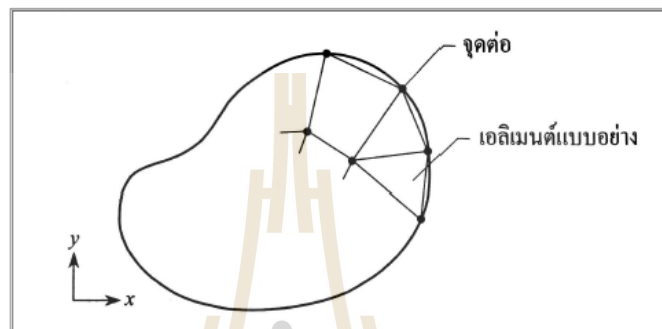
การศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหา หลักการของระเบียบวิธีนี้คือการแทนค่าอนุพันธ์ที่ปรากฏอยู่บนสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยสมการโดยประมาณทางพีชคณิตซึ่งอยู่ในรูปแบบของตัวแปรตาม ตามจุดตัดต่างๆภายในขอบเขตรูปร่างของปัญหานั้น โดยปกติวิธีการนี้มักได้รับความนิยมในการนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาทางทางวิศวกรรมให้ออกมาในรูปแบบการทำนายสำหรับวิธีการทำนายนั้นกระทำโดยแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (element) เอลิเมนต์เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (Nodes) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณหาตัวแปรตาม (Dependent Variables) ที่ต้องการ โดยรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.33 (มนต์ศักดิ์ พิมสาร, 2562) และ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)



รูปที่ 2.33 การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์แบ่งแผ่นโลหะออกเป็นเอลิเมนต์ มีรูปร่างต่างๆ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูป 2.34 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้ง ปัญหาของการไหล (Fluid Problem) เป็นต้น

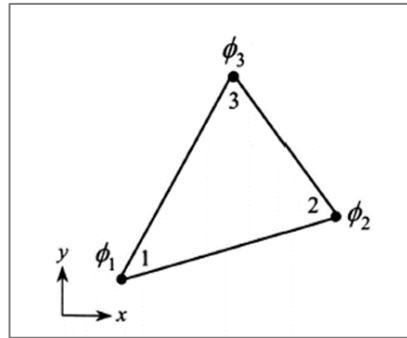


รูป 2.34 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ กัน
(ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, 2555)

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (เอลิเมนต์แบบอย่างดังแสดงในรูป 2.34 เอลิเมนต์นี้ประกอบด้วย 3 จุดต่อ ที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูป 2.35 โดยที่จุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 , และ ϕ_3 ตามลำดับ ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าของการเสียรูป (Displacement) หากเราวิเคราะห์ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าของ อุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นความเร็วของของไหลหาก เราวิเคราะห์ ปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ คือ

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.22)$$

โดย $N_i(x, y)$, $i=1,2,3$ แทนฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์



รูป 2.35 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อโดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ (ปราโมทย์ เคะระอำไพ, 2555)

สมการ (2.22) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N] \{\phi\} \end{aligned} \quad (2.23)$$

$(1 \times 3) \quad (3 \times 1)$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ แทนเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น ในตำราเล่มนี้ สัญลักษณ์ $[\]$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวนอน (Row Matrix) และ $\{ \}$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวตั้ง (Column Matrix) ที่เรียกกันว่าเวกเตอร์

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูป 2.35 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{Bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{Bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.24)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.25)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (2.24) สามารถทำได้โดย

ก. วิธีการโดยตรง (Direct Approach)

ข. วิธีการแปรผัน (Variational Approach)

ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการรวม (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\Sigma(\text{element equations}) \Leftrightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.26)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบสมการรวม (2.26) แล้วจึงแก้ระบบสมการรวมนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Nodal Unknowns) ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่อต่างๆ ของโครงสร้าง หรือเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนหรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลตามจุดต่อหากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการต่อไปได้อีก เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียรูป (Displacement) ตามจุดต่อต่างๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้หาค่าความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของของไหลที่จุดต่อก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลได้ เป็นต้น

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ (Material and Apparatus)

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา (Material)

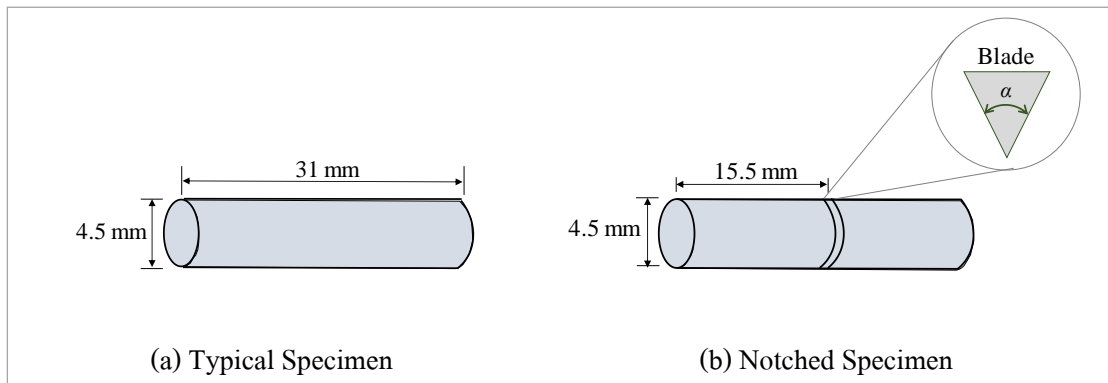
วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้มีเพียงชนิดเดียวคือ แท่งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด JIS SCM420 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.48 มิลลิเมตร ถูกตัดจากแท่งเหล็กกล้าเริ่มต้นให้มีความยาวเท่ากับ 31 มิลลิเมตร เหล็กกล้าดังกล่าวมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.1 และสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 3.2 ชิ้นงานแท่งเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ลักษณะ คือ 1) แท่งเหล็กกล้าปกติซึ่งได้จากการตัดแท่งเหล็กกล้าเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 3.1(a) ถูกใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า และใช้ในการศึกษาการสึกหรอของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า 2) แท่งเหล็กกล้าที่ทำการกรัดร่องรอบชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b) ถูกใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้การกรัดร่องในการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าสำหรับการปรับปรุงคุณภาพขอบตัด

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 (Lee, K.O. et al., 2007)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18-0.23	0.15-0.35	0.6-0.85	< 0.03	<0.03	0.9-1.2	0.9-1.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 (Lee, K.O. et al., 2007)

Properties	Metric
Young's modulus (GPa)	210
Tensile strength (MPa)	790
Yield strength (MPa)	380
Poisson's ratio	0.3



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา (Apparatus)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยแบ่งออกตามประเภทและลักษณะการใช้งานได้ดังนี้

ก) อุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานแท่งเหล็กกล้า

- เครื่องกลึงพร้อมอุปกรณ์ขั้นสูง ใช้สำหรับตัดเพื่อเตรียมชิ้นงานจากแท่งลวดเหล็กกล้าให้เป็นแท่งเหล็กที่มีความยาวและรูปร่างตามที่ระบุไว้ในข้างต้นเพื่อใช้ในการทดลอง
- เครื่องขัดผิววัสดุแบบสายพานใช้สำหรับขัดกำจัดครีปที่เกิดจากการตัดด้วยเครื่องกลึง และปรับความยาวชิ้นงานให้มีขนาดตามต้องการกรณีที่ชิ้นงานมีความยาวมากเกินไป
- ใบมีดกลึงที่มีมุมปลายใบมีด (Blade Angle, α) 40 องศา ใช้สำหรับกรัดร่องลงบนพื้นผิวของชิ้นงานให้เกิดมุมของร่องที่แตกต่างกัน

ข) อุปกรณ์สำหรับการตัดเฉือน

- แม่พิมพ์ตัด ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น JIS SKD11 ค่าความแข็งประมาณ 62 HRC ใช้สำหรับตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 ซึ่งเป็นชิ้นงานทดสอบ
- แท่นรองแม่พิมพ์ตัดทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน ใช้สำหรับพยุงและรองรับการวางตัวของแม่พิมพ์ในขณะที่ตัดเฉือน
- เครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5582 พร้อมโหลดเซลล์ขนาด 100 kN ใช้สำหรับให้แรงกดกับแม่พิมพ์ตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า

ค) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดขนาด และตรวจสอบโครงสร้าง

- เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) ใช้วัดระยะชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์อื่นๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง
- แผ่นโลหะทดสอบระยะ (Feeler Gauge) ความหนา 0.03 – 1.0 มิลลิเมตร ใช้วัดระยะช่องว่างในการปรับตั้งค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์

- ชุดอุปกรณ์ซิลิโคนสำหรับลอกลาย (Replica Technique) รุ่น Provil Novo Light ยี่ห้อ Kulzer ใช้ในการลอกลายเพื่อยืนยันตำแหน่งระหว่างขอบของพื้นที่กับปลายร่องกรีด
- เครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบแสงเงา (Profile Projector) ใช้สำหรับตรวจสอบมิติความลึกและขนาดของร่องกรีดบนชิ้นงานแท่งเหล็กกล้าหลังจากทำการกรีดร่อง
- ซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์และวัดขนาด VW 9000 ใช้วัดขนาดหรือวัดระยะจากภาพถ่ายในระดับมหภาคซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องสเตอริโอ
- ชุดการทำตัวเรือนเรซินแบบหล่อใส ใช้สำหรับการทำตัวเรือนชิ้นงานแท่งเหล็กกล้าเพื่อยืนยันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและค่าความกลมของชิ้นงาน
- เครื่องขัดแบบจานหมุน ยี่ห้อ BUEHLER ใช้ในการขัดเพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบขนาดและมิติก่อนทำการตัดเฉือน
- กระดาษทราย ผ้าสักหลาด และผงอะลูมินาสำหรับขัดหยาบและขัดละเอียด ชิ้นงานก่อนและหลังทำการตัดเฉือน
- กล้องสเตอริโอ (Stereo Microscope) ยี่ห้อ Leica รุ่น EZ4 พร้อมด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ใช้สำหรับตรวจสอบขนาด และถ่ายภาพโครงสร้างในระดับมหภาคของชิ้นงานก่อนทำการตัดเฉือนและตรวจสอบลักษณะขอบตัดรวมไปถึงพื้นผิวชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากทำการตัดเฉือน
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Zeiss AURIGA ใช้สำหรับวิเคราะห์มิติ และพื้นผิวของชิ้นงานภายหลังจากการตัดเฉือน
- กล้องดิจิทัล ใช้ในการบันทึกภาพต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง
- เครื่องสแกนด้วยเลเซอร์แบบ 3 มิติ (3D Laser Scanning Microscope) ยี่ห้อ Keyence รุ่น VK-8710 พร้อมด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ใช้สำหรับตรวจสอบขนาด และรูปร่างการสึกหรอหรือความเสียหายของแม่พิมพ์ โดยทำการตรวจสอบด้วยชิ้นงานซึ่งได้จากการตรวจสอบโดยเทคนิคการลอกลาย

ง) อุปกรณ์ในการตรวจสอบสมบัติทางกลของแท่งเหล็กกล้าสำหรับวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

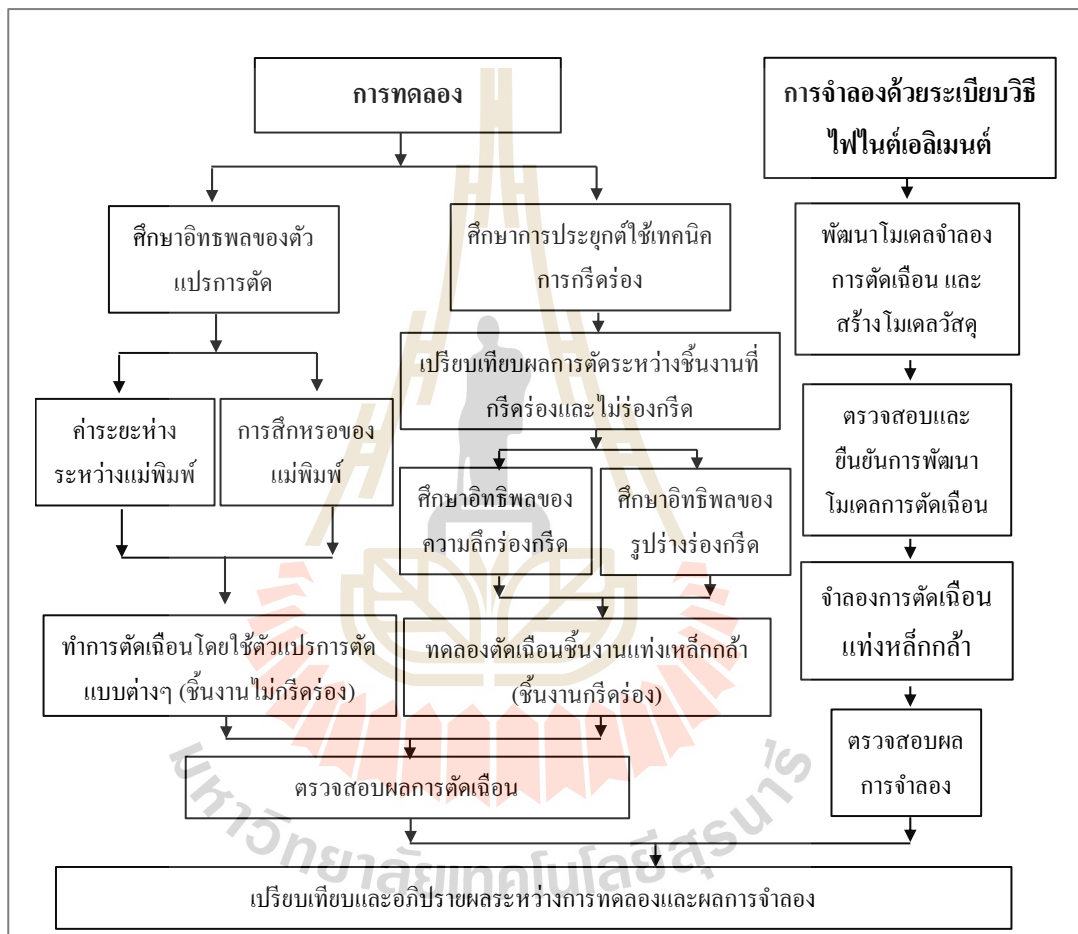
- ชุดอุปกรณ์ Three Point Bending Test ใช้สำหรับทดสอบการดัดงอของวัสดุเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาโมดูลัสของชิ้นงานแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420

จ) อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

- คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ยี่ห้อ Lenovo รุ่น Z51 ร่วมกับซอฟต์แวร์วิเคราะห์และประมวลผลการจำลอง Simufact Forming 12.0.3 สำหรับทำการจำลองการตัดเฉือน

3.2 วิธีการศึกษา (Experimental)

ในการศึกษาได้ดำเนินการศึกษาโดยเริ่มตั้งแต่การจัดเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในกระบวนการตัดเฉือน การตรวจสอบขนาดชิ้นงานและลักษณะอุปกรณ์ตัดก่อนทำการตัดเฉือน การทดลองตัดเฉือน การตรวจสอบลักษณะภายหลังการตัดเฉือน การวิเคราะห์และจำลองผล ซึ่งสามารถระบุวิธีการศึกษาเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจดังแสดงในรูปที่ 3.2

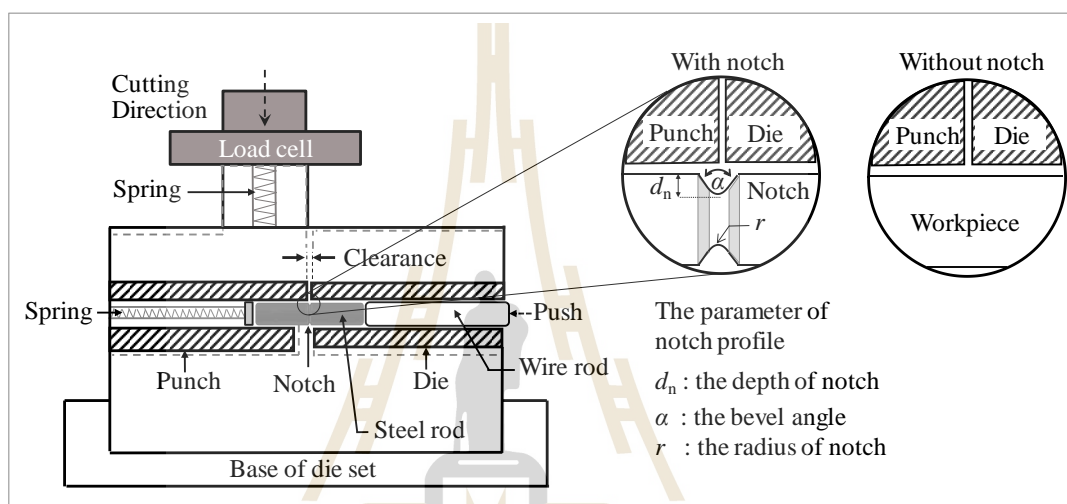


รูปที่ 3.2 วิธีการศึกษาเบื้องต้นในงานวิจัยนี้

3.2.1 การเตรียมชิ้นงาน (Preparation of Workpieces)

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ แท่งโลหะเริ่มแรกนั้นมาในลักษณะที่เป็นแท่งลวดยาวขนาดประมาณ 1 เมตร เพื่อให้สะดวกแก่การทดลองจะต้องนำชิ้นงานมาเตรียมให้มีขนาดที่สั้นลงโดยใช้เครื่องกลึงหลังจากที่ได้ชิ้นงานออกมานำชิ้นงานไปขัดลบครีบทที่เกิดขึ้นจากการตัดและปรับปรุงให้มีความยาวที่เหมาะสมด้วยเครื่องขัดกระดาษทรายแบบสายพาน

ในการกรัดร่องจะกระทำกรัดร่องลงบนผิวชิ้นงานแท่งเหล็กกล้าที่ทำการเตรียมให้มีขนาดที่สั้นพร้อมใช้มาจากขั้นตอนที่แล้ว โดยในรูปแบบร่องกรัดผู้วิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนระยะความลึกร่องกรัดโดยใช้ความลึกร่อง (d_n) ที่แตกต่างกันคือ 333 426 และ 537 ไมโครเมตร ส่วนมุมปลายใบมีด (α) ที่ใช้คือ 40 องศา ร่องกรัดมีขนาด 40 ± 2 องศา รัศมีปลายร่องมีขนาดประมาณ 63.6 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นนำชิ้นงานที่กรัดร่องแล้วไปทำการตรวจสอบขนาดมุมและความลึกที่ได้โดยใช้เครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบแสงเงา



รูปที่ 3.3 ชุดแม่พิมพ์ตัดเฉือนแท่งโลหะ

3.2.2 การตัดเฉือนชิ้นงาน (Shear Cutting)

ในการตัดเฉือนชิ้นงานจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine มาช่วยในการกดเพื่อทำให้พันธเคลื่อนที่ลงมาดังแสดงในรูปที่ 3.3 ขณะตัดเฉือนได้ทำการเก็บค่าแรงต้านการตัดโดยโหลดเซลล์ ความเร็วที่ใช้ในตัดเฉือน (v) คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการตัดเฉือน ณ อุณหภูมิห้อง ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์โดยปกติที่ใช้ในการทดสอบ คือ 40 ไมโครเมตร (อ้างอิงค่าจากโรงงาน Thai Motor Chain Co., Ltd.)

โดยในการศึกษามีเงื่อนไขในการทดลองดังนี้

- การศึกษาอิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ (Clearance, C) ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 40 100 และ 250 ไมโครเมตร

- การศึกษาอิทธิพลการสึกหรอของแม่พิมพ์ (Tools Wear) โดยในการศึกษากระทำการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วที่ 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้ง ซึ่งใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ 40 ไมโครเมตร

- การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการกรัดร่อง (Notching Technique)

- ในการศึกษาจะทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างชิ้นงานที่ไม่ทำการกรัดร่อง และชิ้นงานที่ทำการกรัดร่อง ความลึก 426 ไมโครเมตร มุมปลายใบมีดกรัดที่ใช้คือ 40 องศา และค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์คือ 40 ไมโครเมตร

- การศึกษาอิทธิพลของความลึกร่องกรัด (The Depth of Notch, d_n) ใช้ระยะความลึกร่องกรัดที่แตกต่างกันคือ 333 426 และ 537 ไมโครเมตร

3.3 การตรวจสอบลักษณะขอบตัด ลักษณะพื้นผิว ความกลมของขอบตัดและการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด

3.3.1 การตรวจสอบลักษณะขอบตัด (Shear Edge Feature)

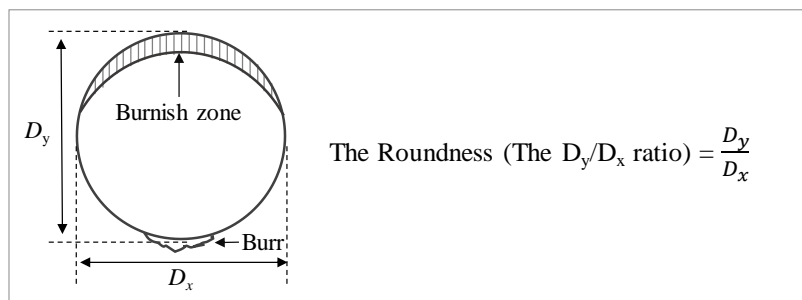
ในการตรวจสอบลักษณะของขอบตัดจะกระทำโดยนำชิ้นงานภายหลังการตัดเนื้อมาทำการตรวจสอบและบันทึกภาพด้วยกล้องสเตอริโอ Leica EZ4 เพื่อทำการหาขนาดของบริเวณส่วนโค้งมน และครีบก ที่เกิดขึ้นบนขอบตัด เมื่อทำการตัดเนื้อมด้วยแม่พิมพ์ตัดแบบดั้งเดิมและการประยุกต์ใช้การกรัดร่องเข้ามาช่วยในการตัดเนื้อม หลักจากบันทึกภาพแล้วได้มีการนำโปรแกรม Image Analysis (VW-9000) มาช่วยในการวิเคราะห์ขนาดดังกล่าว

3.3.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิว (Sheared Surface)

อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการใช้งานและการบันทึกภาพของกล้องสเตอริโอ ผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและขอบตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งในการดำเนินการตรวจสอบได้กระทำจากขั้นตอนการตรวจสอบด้วยกล้องสเตอริโอ เพื่อเป็นการตรวจสอบและยืนยันผลอีกครั้งหนึ่ง

3.3.3 การตรวจสอบความกลมของขอบตัด (The Roundness)

ในการตรวจสอบความกลมของขอบตัดกระทำโดยนำชิ้นงานภายหลังการตัดเนื้อมาทำการตรวจสอบและบันทึกภาพด้วยกล้องสเตอริโอ Leica EZ4 โดยได้ทำการตรวจสอบในบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานตัดเนื้อมเพื่อศึกษาค่าความกลมที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการตัดเนื้อมภายใต้ตัวแปรและวิธีการที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากบันทึกภาพแล้วได้มีการนำโปรแกรม Image Analysis (VW-9000) มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าของขนาดที่ได้ โดยในการตรวจสอบเพื่อหาค่าความกลมของขอบตัดกระทำโดยใช้ค่าอัตราส่วนระหว่าง ระยะเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวตั้ง (D_y) ต่อ ระยะเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวนอน (D_x) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การวัดระยะเพื่อหาค่าความกลมของขอบตัด

3.3.4 การตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด (The Investigation of Tool Damage)

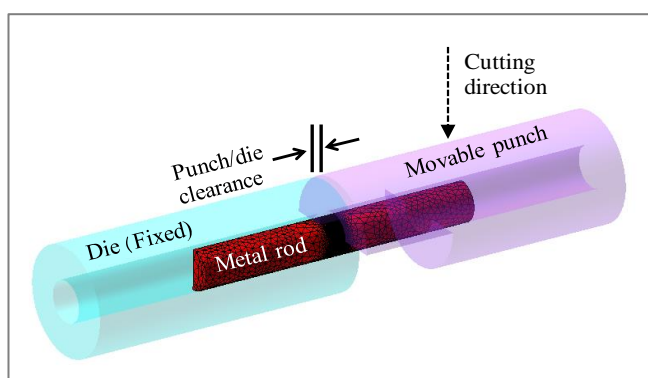
ในการตรวจสอบเพื่อหาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดนั้นทำการศึกษาโดยใช้แม่พิมพ์ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมา 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้ง ภายหลังจากการตัดเดือนผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยการตรวจสอบด้วยกล้องสเตอริโอ Leica EZ4 เพื่อหาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดในเบื้องต้น แต่เนื่องจากความเสียหายที่พบนั้นเกิดขึ้นด้านใน ส่วนโค้งของแม่พิมพ์จึงทำให้ยากต่อการตรวจสอบดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการลอกกลาย มาใช้เพื่อช่วยในการตรวจสอบ ซึ่งรายละเอียดของเทคนิคดังกล่าวถูกระบุไว้ในภาคผนวก ก. จากนั้นทำการตรวจสอบความเสียหายด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการตรวจสอบขนาดและลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์โดยละเอียดด้วยเครื่องสแกน 3 มิติโดยใช้การสแกนด้วยแสงเลเซอร์ จากการตรวจสอบโดยใช้วิธีการตรวจสอบดังกล่าวทำให้เราทราบลักษณะและตำแหน่งความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ตัดเดือนได้ โดยรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง.

3.4 การศึกษาโดยการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Simulation)

ในการศึกษานี้ได้ใช้การจำลองโดยใช้โปรแกรม Simufact Forming 12.0.3 เพื่อช่วยในการจำลองการตัดเดือนและลักษณะการเสียรูปที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานในระหว่างกระบวนการตัด รวมทั้งทำนายพฤติกรรมการตัดเดือนที่ก่อให้เกิดบริเวณของส่วนโค้งมนและครีบบนขอบตัด โดยในการจำลองนั้นโมเดลการจำลองที่ใช้เป็นโมเดล 3 มิติ แบบครึ่งหนึ่งของชิ้นงานตัดจริง

3.4.1 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับจำลองการตัดเฉือน (Finite Element Model)

โดยในกระบวนการจำลองด้วยโปรแกรม Simufact Forming 12.0.3 โมเดลการตัดเฉือนจะถูกสร้างในรูปแบบ 3 มิติ แม่พิมพ์ถูกสมมติให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ชิ้นงานถูกสมมติให้เป็นวัตถุที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ (Deformable Body) โดยชิ้นงานแท่งเหล็กกล้าที่ใช้ในการจำลอง มีลักษณะเพียงครั้งเดียวและใช้รูปแบบระนาบสมมาตรเข้ามาช่วยเนื่องจากลักษณะชิ้นงานมีความสมมาตรการจำลองโดยการสร้างโมเดลตัดเฉือนเพียงครั้งเดียว ช่วยลดจำนวนเอลิเมนต์ของโมเดลอย่างมาก ซึ่งจะส่งผลให้การจัดการโมเดลสะดวกรวมไปถึงการจำลองที่อาศัยเวลาน้อย ซึ่งในการจำลองได้ใช้สมบัติทางกลและ โมเดลวัสดุที่ทำการการปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ด้วย โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ตัดเป็นไปดังรูปที่ 3.5 โมเดลที่ใช้ในการทำนามีจำนวนเอลิเมนต์ (Element) ทั้งหมดประมาณ 17,000 เอลิเมนต์ และเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณหรือการประมวลผลของโปรแกรม จึงได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์บริเวณที่ชิ้นงานได้รับผลกระทบหรือมีการเสียรูปเนื่องจากการตัดเฉือนตัดเฉือนมากที่สุด บริเวณนี้จะกำหนดให้มีขนาดของเอลิเมนต์เล็กมากกว่าเดิมประมาณ 3 เท่า ชนิดของเมช (Mesh) ที่ใช้มีรูปทรงเป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedral) ใน 1 เอลิเมนต์ประกอบไปด้วยโหนดทั้งหมด 4 โหนด อุณหภูมิในการตัดเฉือนกำหนดให้เป็นอุณหภูมิห้องหรือ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วที่ใช้ในการตัดคือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้สเต็ปคอนโทรล (Step Control) ในการตัดทั้งหมดประมาณ 9,000 ถึง 12,000 สัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ใช้เป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.05 ในขั้นตอนการเสียรูปของชิ้นงานกำหนดให้มีการใช้เทคนิคการจัดการเอลิเมนต์แบบอัตโนมัติ (Auto-Remeshing) เมื่อเอลิเมนต์มีการเสียรูปมากระบบจะทำการปรับเปลี่ยนเอลิเมนต์นั้นให้ถูกต้อง ในส่วนโมเดลของวัสดุที่เกิดความเสียหาย จะใช้เกณฑ์ความเสียหายของ Cockcroft & Latham ดังแสดงในสมการที่ 3.1 มาใช้ในการประเมินและวิเคราะห์การเกิดรอยแตกรวมไปถึงการนิยามของเนื้อวัสดุขณะทำการจำลองกระบวนการตัดเฉือนด้วย



รูปที่ 3.5 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับจำลองการตัดเฉือนแท่งโลหะด้วยแม่พิมพ์

$$D = \int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma_1}{\sigma_{eq}} d\varepsilon \quad (3.1)$$

โดยที่ D คือ ค่าวิกฤติการแตกหัก (Damage Threshold)

ε_f คือ ค่าที่แสดงถึงความเครียด ขณะที่เกิดรอยแตกเริ่มต้น

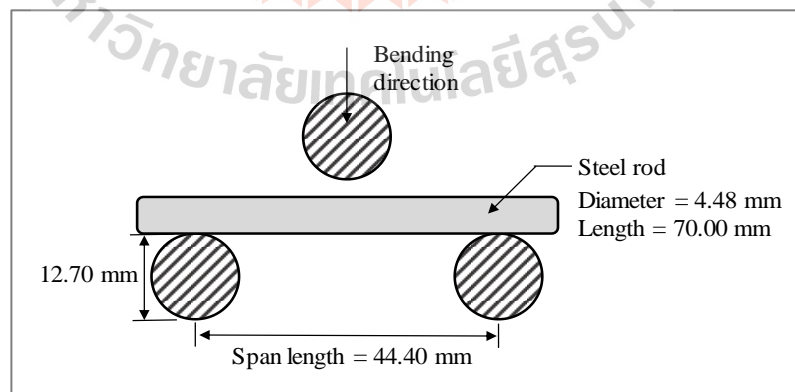
σ_1 คือ ค่าความเค้นตึงจากสูงสุดซึ่งทำให้เกิดการฉีกขาด

σ_{eq} คือ ความเค้นเทียบเท่า (Equivalent Stress)

ε คือ ความเครียด

3.4.2 การตรวจสอบโมเดลวัสดุ (Verification of Material Model)

โมเดลวัสดุเป็นหนึ่งในตัวแปรที่จำเป็นอันดับต้นๆ ที่ต้องทำการกำหนดให้กับโมเดลการจำลอง ในการจำลองผลการกำหนดตัวแปรโมเดลวัสดุที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดย่อมส่งผลให้การทำนายโดยใช้โปรแกรมการจำลองนั้นมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการหาค่าโมเดลวัสดุที่ถูกต้องจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นเป็นอย่างมาก ซึ่งการทดสอบสมบัติทางกลกับชิ้นงานที่นำมาเป็นวัสดุตัดเฉือนด้วยกระบวนการทดสอบแรงดึงนั้นสามารถกระทำได้ง่าย เนื่องจากวัสดุแท่งเหล็กกล้านั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็ก และเนื่องด้วยรูปทรงของชิ้นงานทดสอบที่เป็นทรงกระบอกทำให้การจับยึดชิ้นงานขณะดึงทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้เราจึงทำการหาสมบัติของวัสดุทางอ้อมโดยใช้การทดสอบการค้ำงอเพื่อหาค่าแรงต้านการค้ำงอ โดยชุดอุปกรณ์ค้ำงอเป็นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การทดสอบการค้ำงอแบบ 3 จุด

จากนั้นจึงทำการจำลองการตัดด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากโมเดลวัสดุของฐานข้อมูลในโปรแกรมการจำลองไม่สามารถให้ผลลัพธ์การจำลองที่คล้ายคลึงกับการทดสอบผลได้ โดยผู้วิจัยได้ทำการปรับสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความเค้นจุดคราก และพฤติกรรมวัสดุในช่วงหลังความเค้นจุดคราก (Flow Curve) เป็นต้น ไป จนกระทั่งแรงด้านการตัดเท่ากับแรงด้านจากการทดลอง หากค่าที่ได้จากการจำลองนั้นใกล้เคียงกับการทดลองแสดงว่าโมเดลวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้ว สอดคล้องกับสมบัติของแท่งเหล็กกล้าที่ใช้ทดลอง โดยขั้นตอนการตรวจสอบโมเดลวัสดุดังกล่าว นั้นถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 โมเดลวัสดุนี้จะถูกนำกลับไปใช้ในโมเดลการตัดเหมือนแทนที่โมเดลเริ่มต้นจากฐานข้อมูลของโปรแกรม Simufact Forming 12.0.3.



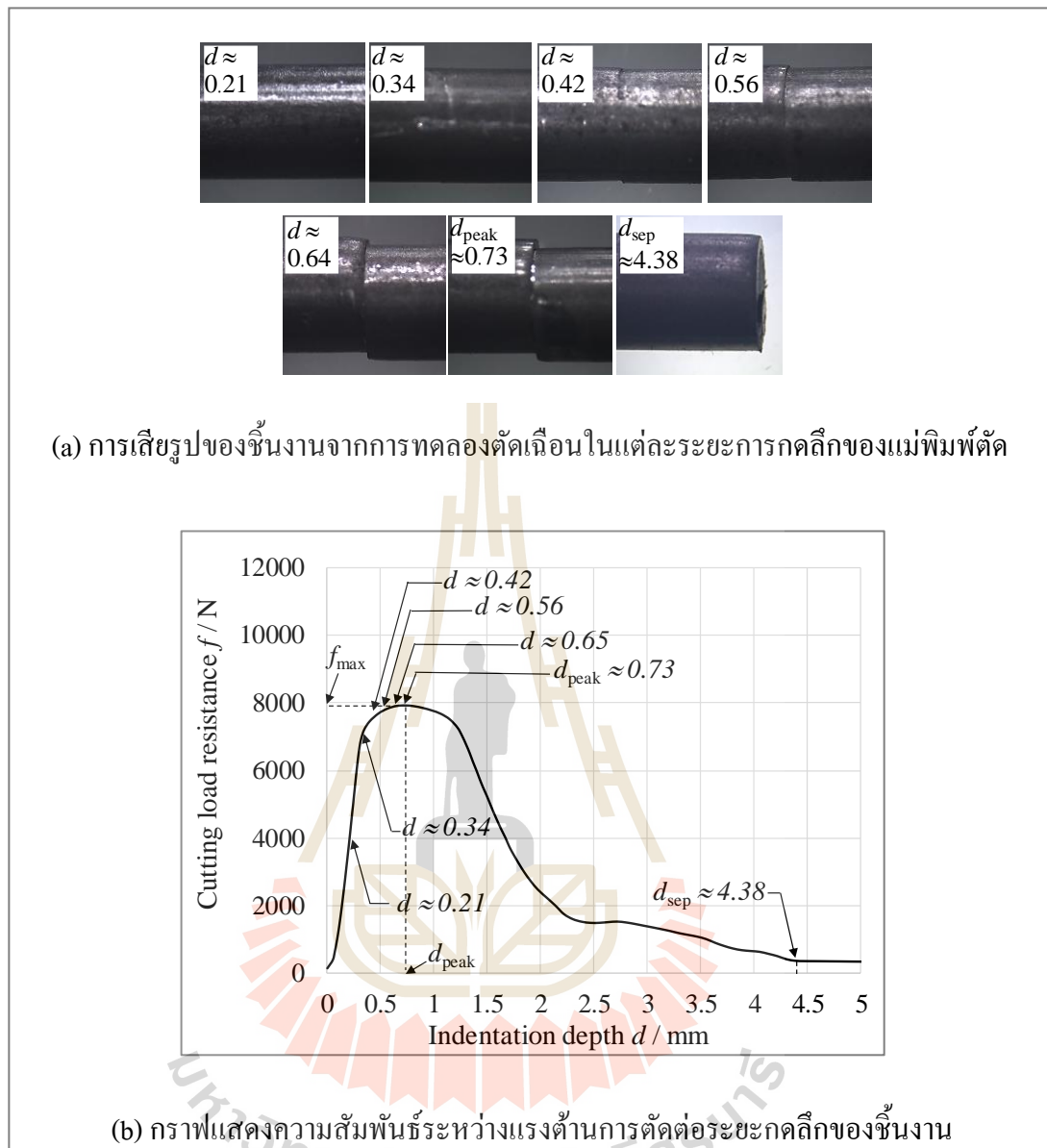
รูปที่ 3.7 กระบวนการทดสอบเพื่อหาโมเดลวัสดุที่เหมาะสม

บทที่ 4

การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์

ในขณะที่ทำการตัดเนื้อแท่งเหล็กกล้าด้วยแม่พิมพ์ตัดเนื้อนั้นเนื้อโลหะเกิดการเสียรูปแตกต่างกันตามระยะการกดลึงของแม่พิมพ์ตัด ด้วยเหตุนี้การทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปของแท่งเหล็กกล้าและแรงต้านการตัด ณ ระยะการกดลึงตั้งแต่เริ่มต้นไปจนกระทั่งแท่งเหล็กเกิดการขาดอย่างสมบูรณ์ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดเนื้อของแท่งเหล็กกล้า ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบแท่งเหล็กกล้าโดยทำการกดแม่พิมพ์ไปที่ระยะต่างๆ จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการขาดดังแสดงในรูปที่ 4.1 (a) การเสียรูปเกิดขึ้นนี้ทำให้ผู้วิจัยได้ทราบถึงระยะการก่อตัวของบริเวณต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของขอบตัด จากรูปเมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของระยะการกดลึงกับการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะที่เกิดขึ้น และกราฟแรงต้านการตัดดังแสดงในรูปที่ 4.1 (b) พบว่าในช่วงแรกที่ชิ้นงานมีการเสียรูปคือ ที่ระยะการกดลึงสั้นๆ พบว่าชิ้นงานเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) เนื้อโลหะมีการคืนรูปในลำดับถัดมา ณ จุดเปลี่ยนโค้งที่ระยะกดลึงประมาณ 0.34 มิลลิเมตร พบว่ามีการเสียรูปแบบถาวรเกิดขึ้นและที่ระยะประมาณ 0.4 มิลลิเมตร สังเกตพบรอยแตกเริ่มต้นเกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้แล้วยังสังเกตพบว่าบริเวณส่วนโค้งมน (Rollover) มีขนาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะกดลึงของพื้นที่เพิ่มมากขึ้น และ ณ จุดสูงสุดของกราฟนั้นสังเกตเห็นว่าบริเวณของส่วนโค้งมนได้หยุดการเติบโต กล่าวคือการเสียรูปแบบถาวรได้หยุดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดและการขยายตัวของรอยแตกซึ่งเรียกจุดหรือตำแหน่งนี้ว่า จุดที่การเสียรูปแบบถาวรได้หยุดลง (d_{peak}) ภายหลังที่รอยแตกมีการขยายตัวไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการขาดแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์เราเรียกจุดหรือตำแหน่งนี้ว่า จุดการแตกหัก (d_{sep})

ในกระบวนการตัดเนื้อโลหะปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดเป็นอย่างมากคือระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ในการตัดเนื้อแท่งเหล็กกล้า ในการศึกษาผู้วิจัยได้ทำการทดลองตัดเนื้อโดยใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ 3 ค่า คือ 40 100 และ 250 ไมโครเมตร ความเร็วในการเคลื่อนที่แม่พิมพ์ (v) คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้ได้ผลการทดลองออกมาในรูปของแรงต้านการตัดเนื้อและลักษณะขอบตัดเนื้อ



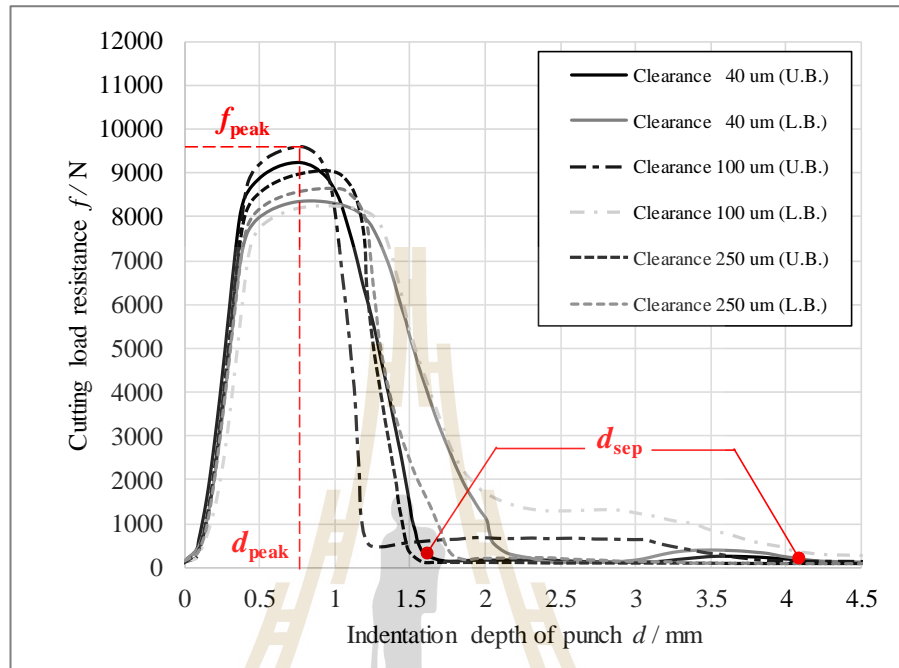
รูปที่ 4.1 การเสียรูปของชิ้นงานต่อระยะการกดลึกของแม่พิมพ์และแรงต้านการตัด

4.1 แรงต้านการตัดเฉือน (Cutting Load Resistance)

ผลแรงต้านการตัดเฉือนซึ่งได้จากการทดลองถูกจัดแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยเส้นกราฟสีดำแสดงค่าขอบเขตบนหรือแรงต้านการตัดสูงสุดที่ได้จากชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้น และเส้นสีเทาแสดงค่าของขอบเขตล่างหรือแรงต้านการตัดต่ำสุดของชิ้นงานทดสอบ โดยวิธีการตรวจสอบการตรวจสอบผลของแรงต้านการตัดจะขอกว่าถึงในภาคผนวก ก.

จากกราฟเราพบว่าพบว่ามีแรงต้านการตัดในช่วงแรกหรือช่วงที่มีการเสียรูปแบบยืดหยุ่นนั้น ชิ้นงานที่ถูกตัดในแต่ละกรณีนั้นมีความคล้ายคลึงกัน เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่าง

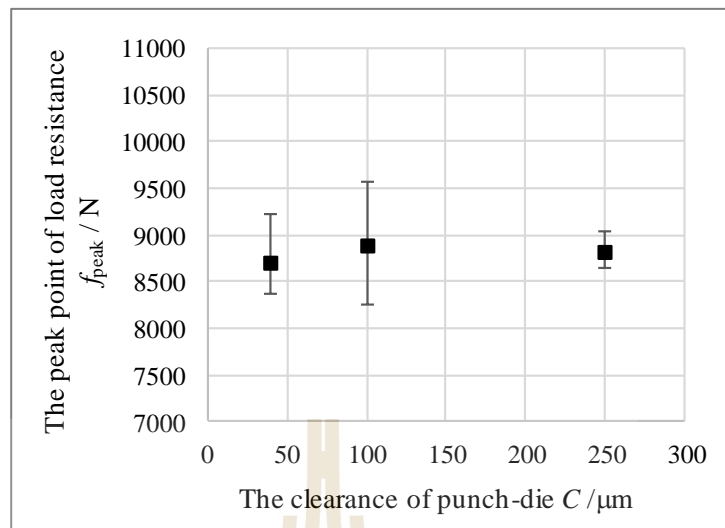
แม่พิมพ์ แต่อย่างไรก็ตามภายหลังจากเสีรูปร่างแบบยึดหยุ่นไปแล้วแรงต้านการตัดดูเหมือนว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์



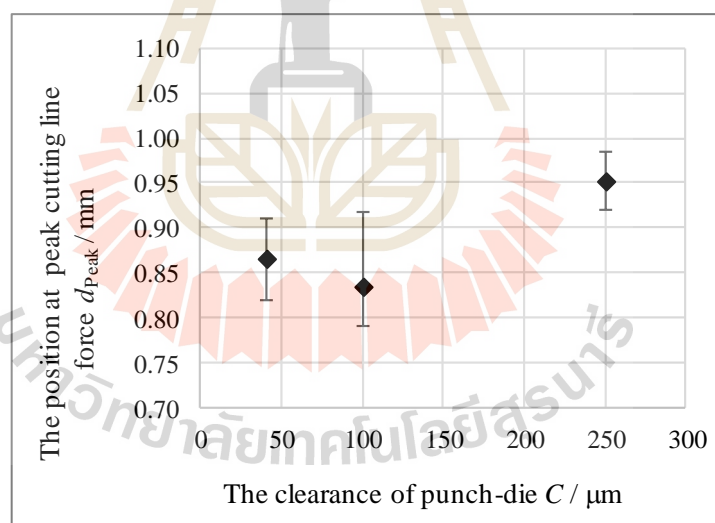
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ

จากการตรวจสอบค่า 3 ช่วงดังปรากฏในรูปที่ 4.2 อันได้แก่ 1. แรงต้านการตัดสูงสุด (f_{peak}) 2. ตำแหน่งสุดท้ายของการเสีรูปร่างถาวร (d_{peak}) และ 3. ตำแหน่งของชั้นงานที่เกิดการตัดขาด (d_{sep}) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ พบว่าจากค่าเฉลี่ยแรงต้านการตัดสูงสุดดังแสดง ในรูปที่ 4.3 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8,600 ถึง 8,800 นิวตัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์

เมื่อพิจารณาค่าแห่งของแรงต้านการตัดสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการตัดเฉือนโดยใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์น้อย กล่าวคือในกรณีที่ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 40 และ 100 ไมโครเมตร ค่าแห่งของแรงต้านการตัดสูงสุดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ในกรณีที่ใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มากกว่า หรือที่ระยะ 250 ไมโครเมตร นั้นกลับพบว่าค่าแห่งของแรงต้านการตัดสูงสุดมีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าจุดสิ้นสุดการเติบโตของส่วนโค้งมนบริเวณขอบตัดได้ถูกเลื่อนออกไปเมื่อมีการใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มากขึ้น



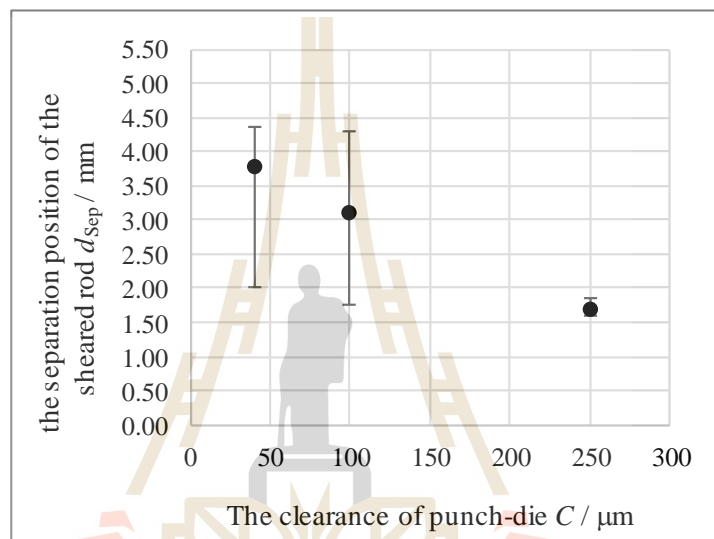
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงต้านการตัดสูงสุดกับ ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแรงต้านการตัดสูงสุดกับ ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าตำแหน่งของชิ้นงานที่เกิดการตัดขาดดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากค่าเฉลี่ยแล้ว พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงอย่างชัดเจน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ นอกจากนี้ ยังพบว่าเกิดค่าความแปรปรวนที่ค่อนข้างกว้างในกรณีที่ใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ 40 และ 100 ไมโครเมตร ดูเหมือนว่าเป็นผลมาจากรูปแบบการแตกหักแบบผสม (Mix Separation Mode)

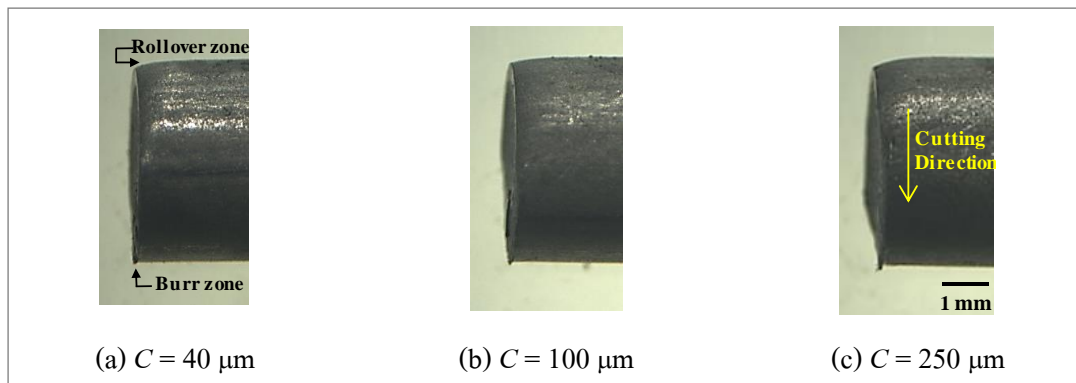
กล่าวคือมีรูปแบบการแตกหัก 2 แบบ ทั้งรูปแบบการแตกหักที่สอง Secondary Shearing Mode และรูปแบบการแตกหักแบบปกติ (Simple Shearing Mode) สำหรับในกรณีที่ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มากคือที่ 250 ไมโครเมตร พบว่าความแปรปรวนจะมีค่าต่ำมาก ซึ่งอาจเกิดจากการแตกหักเพียงรูปแบบเดียว คือรูปแบบการแตกหักแบบปกติ (Simple Shearing Mode) โดยรูปแบบการแตกหักที่พบนั้นแสดงผ่านการตรวจสอบพื้นผิวขอบตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งจะกล่าวถึงในภายหลัง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่มีการตัดขาดของชิ้นงานกับค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ

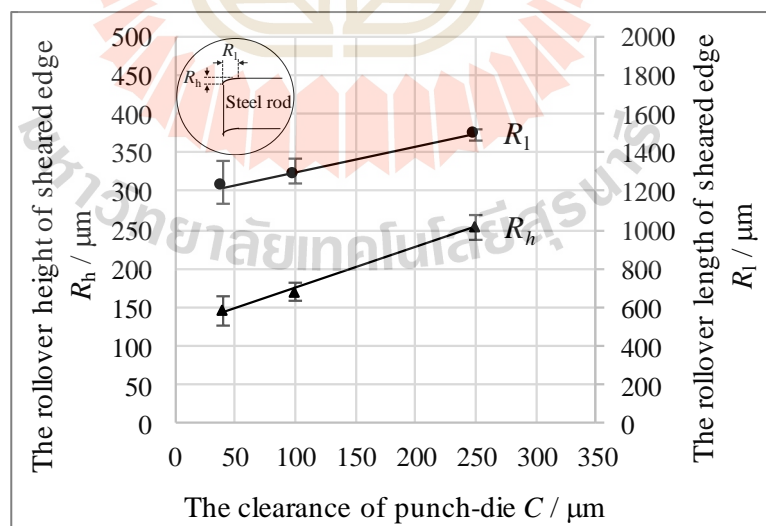
4.2 ลักษณะขอบตัดเฉือน (Shear Edge Feature)

จากผลการตรวจสอบภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัดซึ่งถูกตัดด้วยระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์คือ 40 100 และ 250 ไมครอน ตามลำดับด้วยกล้องสเตอริโอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปพบว่าความเรียบผิวของขอบตัดเฉือนที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตามค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาจากลักษณะขอบตัดแสดงให้เห็นถึงบริเวณของส่วน โค้งมนและบริเวณของครีป ซึ่งดูเหมือนจะได้รับผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากบริเวณทั้งสองเป็นบริเวณที่มีผลอย่างมากต่อการใช้งานชิ้นงานตัดเฉือน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงต้องการที่จะทำการตรวจสอบลักษณะของบริเวณส่วน โค้งมนนี้เป็นหลัก



รูปที่ 4.6 ลักษณะขอบตัดของชิ้นงานในกรณีทีระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มีค่าต่างๆ

ในการตรวจสอบบริเวณส่วนโค้งมนของขอบตัด (Rollover Zone) เทียบกับระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 4.7 ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบออกมาในรูปแบบตัวแปรสองตัวคือ ระยะความยาวของส่วนโค้งมน (R_l) และระยะความสูงของส่วนโค้งมน (R_h) ซึ่งวิธีการตรวจสอบกล่าวถึงในภาคผนวก ข จากรูปแสดงให้เห็นว่า R_l และ R_h มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ โดยความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงนั้นถูกอธิบายโดยใช้สมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของส่วนโค้งมนกับค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ทีระยะต่างๆ

$$R_l = 1.32C + 1166 \quad (4.1)$$

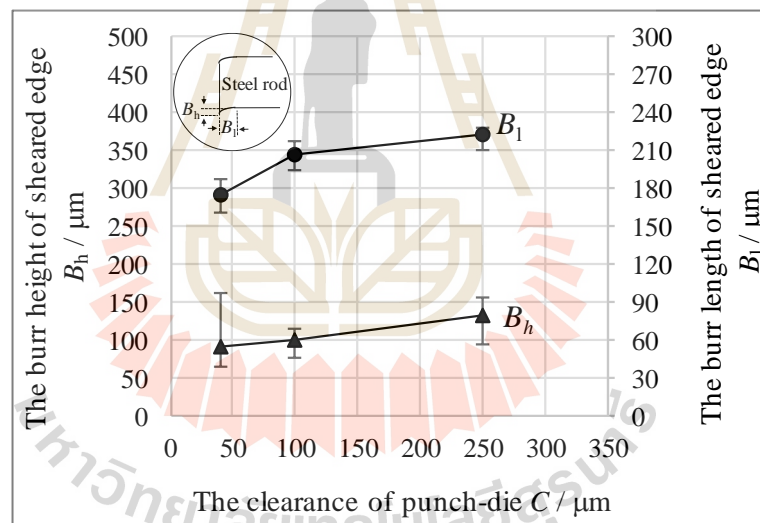
$$R_h = 0.53C + 121.98 \quad (4.2)$$

โดยที่ R_l คือ ความยาวของส่วนโค้งมน

R_h คือ ความสูงของส่วนโค้งมน

C คือ ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์

และจากการตรวจสอบส่วนของครีปในบริเวณขอบตัด ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยได้ทำการตรวจสอบในรูปแบบเป็นตัวแทนสองตัว คือ B_l และ B_h ดังแสดงในรูป จากผลการตรวจสอบพบว่า B_l และ B_h นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์

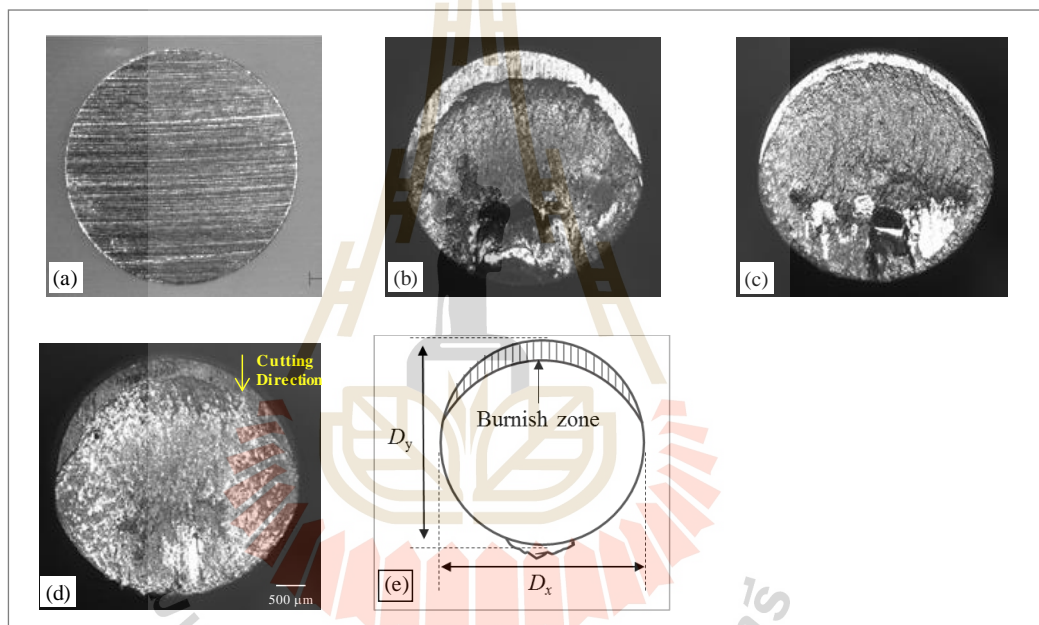


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของครีปกับค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆ

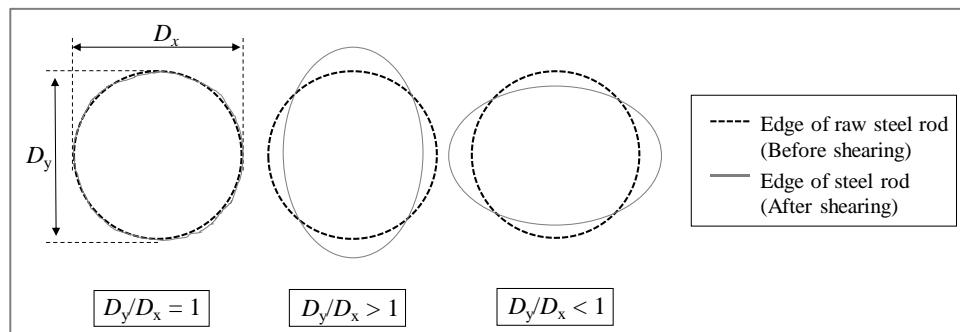
4.3 ความกลมของขอบตัด (The Roundness of Sheared Edge)

นอกจากลักษณะของขอบตัดในบริเวณของส่วนโค้งมนกับบริเวณครีปที่มีความสำคัญกับความสะอาดและคุณภาพของขอบตัดเนียนแล้ว ค่าความกลมของหน้าตัดชิ้นงานภายหลังการตัดเนียนก็เป็นตัวแทนหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อคุณภาพของขอบตัดด้วย ในการหาค่าความกลมกระทำได้โดยทำการตรวจวัดจากขนาดของขอบตัดดังแสดงในรูปที่ 4.9 (a-d) เพื่อประเมินค่า

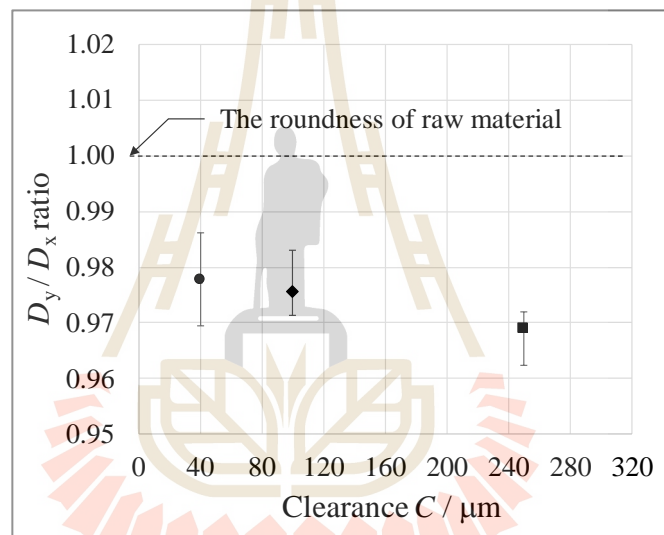
ความกลมจึงทำการวัดระยะในแนวแกนตั้งซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ (D_y) และระยะในแนวแกนนอนซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ (D_x) ตามที่ปรากฏในรูปที่ 4.9 (e) จากนั้นจึงคำนวณโดยใช้อัตราส่วน D_y/D_x ในการประเมินผล ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เมื่ออัตราส่วน D_y/D_x เท่ากับหนึ่งนั้นแสดงว่าชิ้นงานนั้นสามารถรักษาค่าความกลมไว้ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าอัตราส่วน D_y/D_x มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งแสดงว่าชิ้นงานนั้นสูญเสียค่าความกลม จากการตรวจสอบอัตราส่วนความกลมของชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนในกรณีที่ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มีค่า 40 ถึง 250 ไมโครเมตร ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อมีการเพิ่มระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ชิ้นงานมีแนวโน้มในการสูญเสียค่าความกลมมากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.9 ลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานแท่งเหล็กกล้า (a) ชิ้นงานเริ่มต้น (b) กรณีระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ 40 μm (c) กรณีระยะห่างแม่พิมพ์ 100 μm (d) กรณีระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ 250 μm และ (e) การตรวจวัดระยะในแนวแกน X และ Y



รูปที่ 4.10 การประเมินค่าความกลมของชิ้นงาน

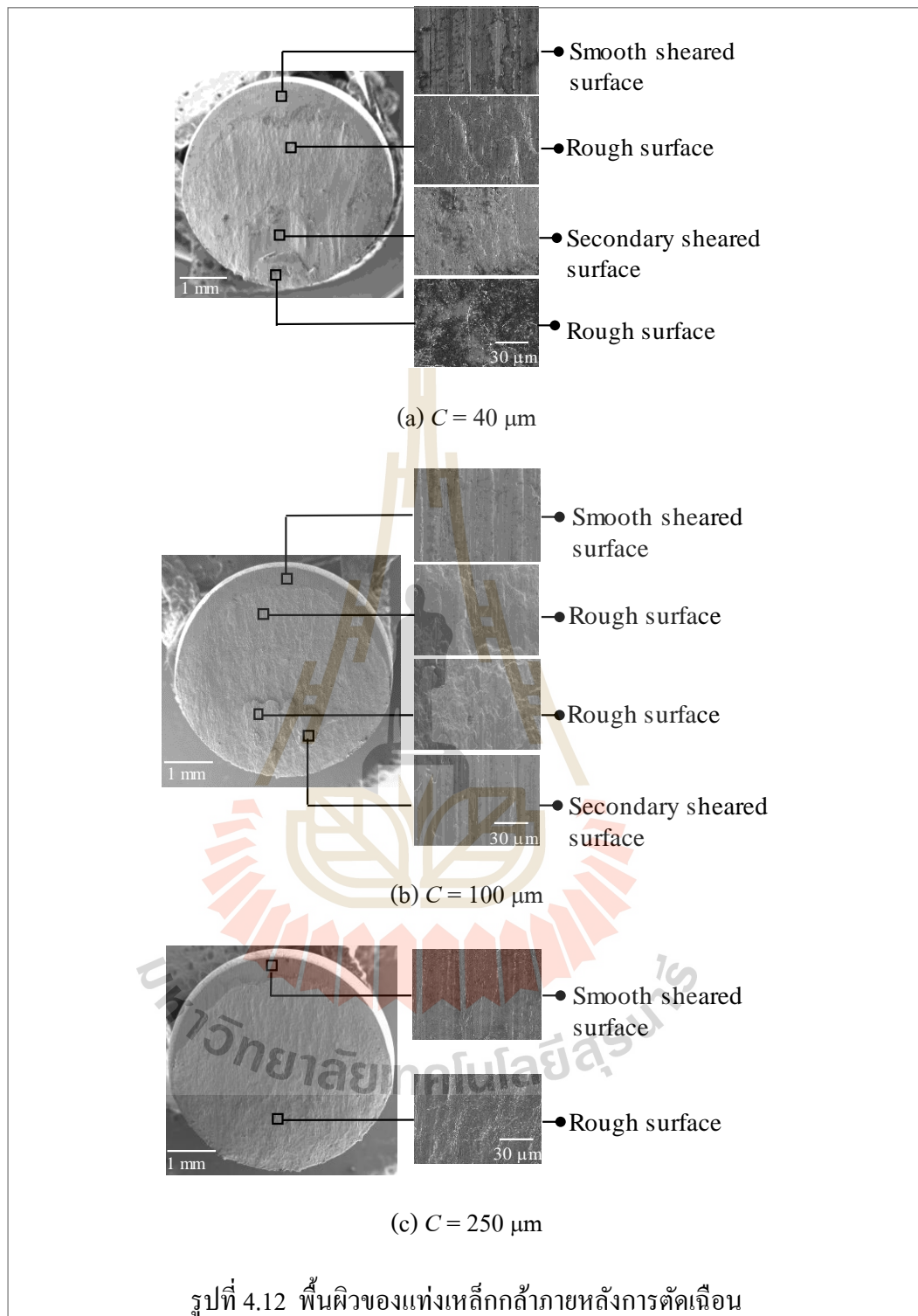


รูปที่ 4.11 ค่าความกลมของชิ้นงานเมื่อทำการตัดเฉือนโดยใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ในกรณีต่างๆ

4.4 พื้นผิวของขอบตัดเฉือน (The Sheared Surfaces)

ในการตรวจสอบพื้นผิวของขอบตัดผู้วิจัยได้กระทำการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากผลการตรวจสอบพบว่า มีรูปแบบพื้นผิวซึ่งสามารถจำแนกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 ประกอบไปด้วยพื้นผิว 4 บริเวณ คือ พื้นผิวเรียบถัดมาคือพื้นผิวที่มีความขรุขระ และพื้นผิวเรียบและสุดท้ายพบพื้นผิวที่มีความขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (a) และ 4.12 (b)

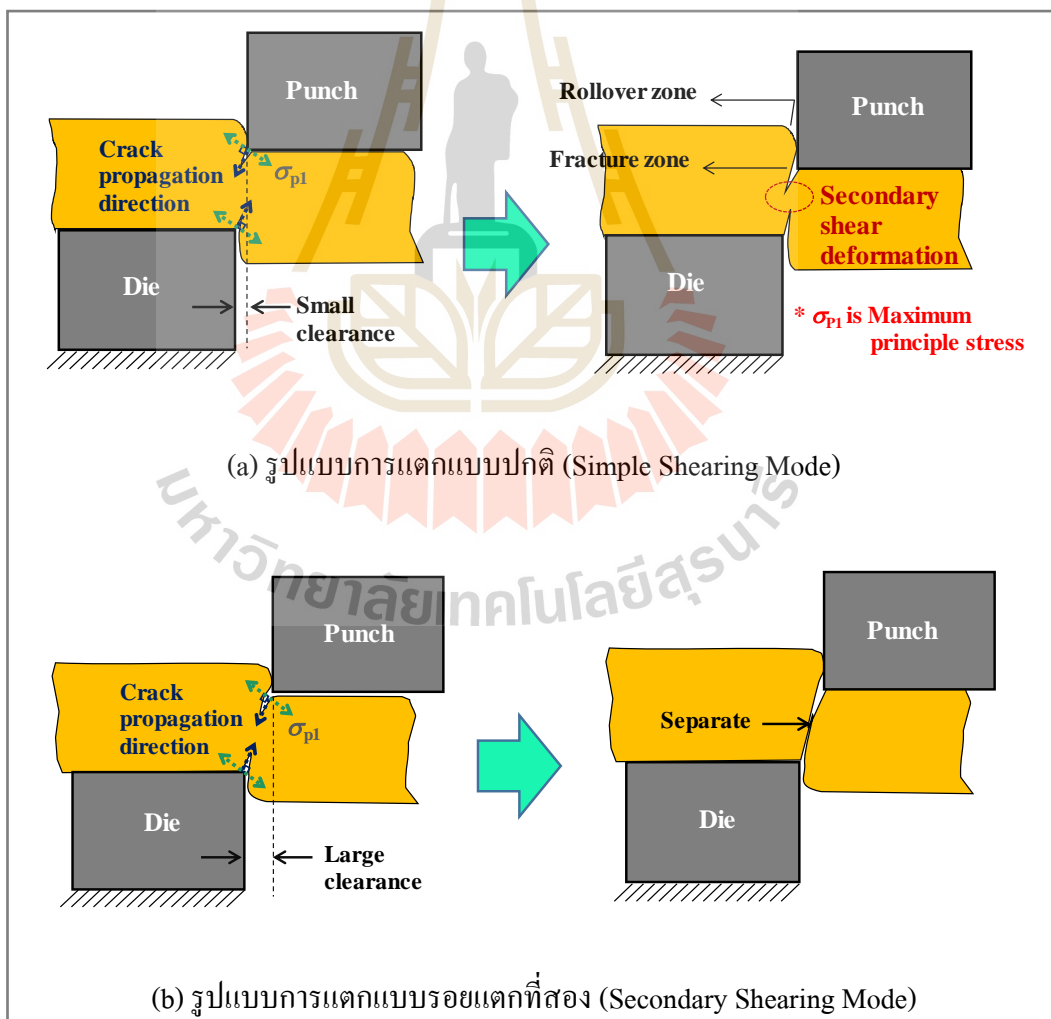


โดยพื้นผิวในลักษณะนี้เป็นผลมาจากรูปแบบการขาดด้วยรอยแตกที่สอง (Secondary Shearing Mode) เนื่องจากความเค้นหลักที่เกิดขึ้นในชิ้นงานใกล้ปลายแม่พิมพ์ขณะทำการตัดเฉือน ทำให้รอยแตกเริ่มต้นเกิดขึ้นนั้นมีแนวการขยายตัวไม่ไปในแนวเดียวกัน เมื่อรอยแตกมีการ

ขยายตัวมาพบกันจึงไม่สามารถมาบรรจบกันได้อย่างสมบูรณ์ และเกิดการตัดเฉือนที่ 2 ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (a)

สำหรับรูปแบบที่ 2 พื้นผิวประกอบไปด้วยพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระเพียงแค่ 2 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (c) ซึ่งเป็นผลมาจากรูปแบบการขาดออกจากกันแบบปกติ (Simple Shearing Mode) เนื่องจากแนวความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะทำให้รอยแตกเริ่มต้นมีทิศทางพุ่งเข้าหากันจึงทำให้รอยแตกสามารถมาบรรจบกันได้อย่างสมบูรณ์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (b)

จากผลการตรวจสอบพื้นผิวทั้งหมดพบว่าในกรณีที่ใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ ที่ 40 และ 100 ไมโครเมตร นั้นพบรูปแบบการเสียหายทั้งการแตกหักจากรอยแตกที่สอง และการแตกหักแบบปกติ แต่ในกรณีที่ 250 ไมโครเมตร กลับพบการแตกหักทั้งหมดเพียงรูปแบบเดียว คือ การแตกหักแบบปกติ



รูปที่ 4.13 รูปแบบการแตกของชิ้นงานโลหะ

จากการทดลองตัดเฉือนชิ้นงานแท่งเหล็กกล้าพบว่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มีส่งผลอย่างมากต่อลักษณะขอบตัด โดยเฉพาะขนาดของบริเวณส่วน โค้งมน ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดจากการเสียรูปของโลหะในช่วงแรกของระยะการกดคด ดังนั้นกระบวนการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการก่อตัวและการการเสียรูปของส่วน โค้งมนที่เกิดขึ้นกับแท่งโลหะซึ่งไม่สามารถสังเกตได้จากการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดของแม่พิมพ์

4.5 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method Simulation)

จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้มีการพัฒนาโมเดลวัสดุขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองเนื่องจากโมเดลวัสดุที่นำมาจากฐานข้อมูลของโปรแกรมไม่อาจสอดคล้องกับสมบัติของแท่งเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการหาโมเดลวัสดุที่เหมาะสมกับการจำลองเพื่อให้โมเดลการจำลองนั้นสามารถอธิบายผลของการตัดได้เฉือนได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการหาโมเดลวัสดุที่เหมาะสมนี้โดยกระทำการทดสอบการคดและทำการปรับสมการอธิบายสมบัติในช่วงการแข็งเนื่องจากความเครียด (Work Hardening) ไปจนกระทั่งแรงต้านการคดจากการจำลองเท่ากับแรงต้านการคดจากการทดลอง

โดยในกระบวนการหาค่าโมเดลวัสดุที่เหมาะสมนั้น ผู้วิจัยกระทำการโดยใช้การทดสอบแรงกดแบบ 3 จุด จากนั้นจึงทำการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Simufact Forming โดยในการกำหนดสมบัติทางกลของวัสดุเริ่มต้นให้กับโมเดลนั้นผู้วิจัยได้ใช้ค่าสมบัติทางกลของวัสดุ JIS SCM420 ณ อุณหภูมิห้องจากงานวิจัยของ (Lee, K.O. et al., 2007) ซึ่งจากเส้น โค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แท้จริงจากงานวิจัยทำให้ได้สมการ Polynomial เมื่อทำการปรับปรุงสมการที่นำมาใช้ในการจำลองทำให้ได้ผลการจำลองของโมเดลการคดที่สอดคล้องกับการทดลองได้ โดยสมการที่ปรับปรุงได้แสดงดังสมการที่ 4.1

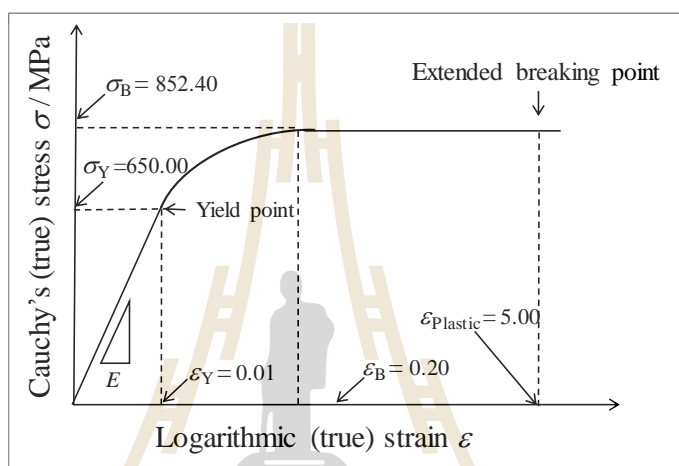
$$\sigma_f = -5562.61\varepsilon_p^2 + 2122.174\varepsilon_p + 650 \quad (4.3)$$

โดยที่ σ_f คือ ความเค้นการไหล (Flow Stress)

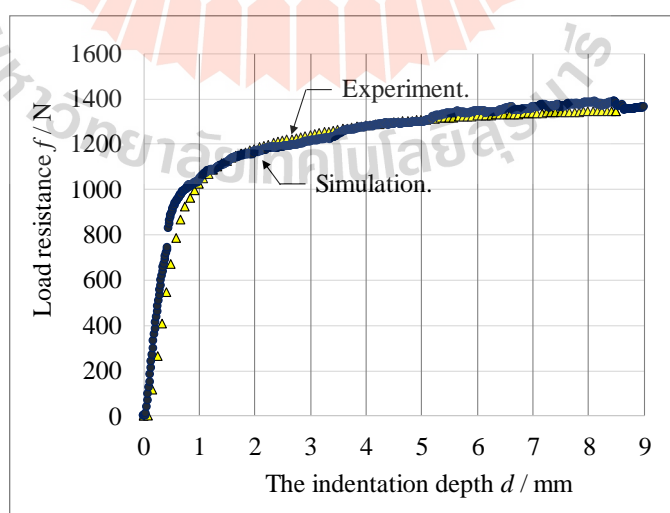
ε_p คือ ความเครียดคงรูป (Plastic Strain)

โดยสมบัติทางกลของโมเดลที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาถูกแสดงดังรูปที่ 4.14 และเพื่อเป็นการตรวจสอบรวมไปถึงการยืนยันในความเป็นไปได้ สำหรับการใชโมเดลวัสดุซึ่งได้ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้จำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการการเปรียบเทียบ

ระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองในการทดสอบการดัดงอ ในด้านการเปรียบเทียบแรงต้านการดัดแสดงในรูปที่ 4.15 จากรูปแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการดัดกับระยะกดลึกของหัวกดที่ระยะต่างๆพบว่าแรงต้านการดัดที่ได้จากการจำลองนั้นมีความใกล้เคียงและคล้ายคลึงกับกราฟแรงต้านการดัดที่ได้จากการทำการทดลองการดัดงอจริง ดังนั้นแล้วโมเดลวัสดุที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นจึงสามารถที่จะนำมาใช้เป็นโมเดลวัสดุเพื่อใช้ในการจำลองกระบวนการดัดเนื่องในแท่งเหล็กกล้าด้วยแม่พิมพ์ได้

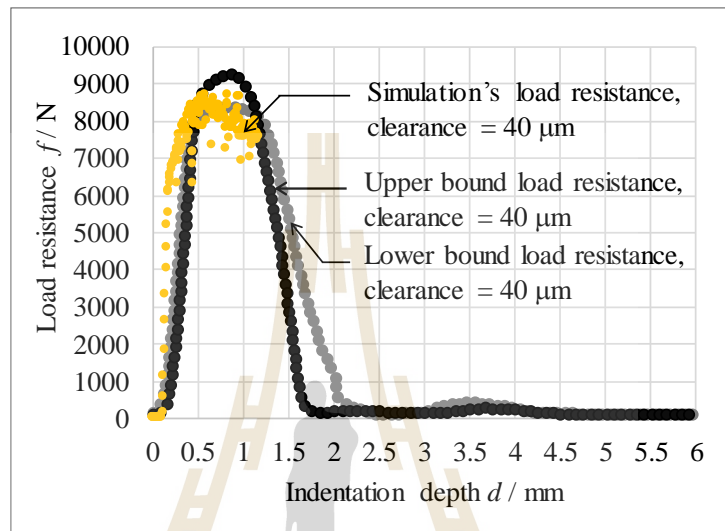


รูปที่ 4.14 สมบัติทางกลของเหล็กกล้า JIS SCM420 ที่ได้จากการปรับปรุงและพัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบผลของแรงต้านการดัดต่อระยะกดลึกของหัวกดระหว่าง การทดลองการดัดงอแบบ 3 จุด และการจำลองโดยใช้ FEM

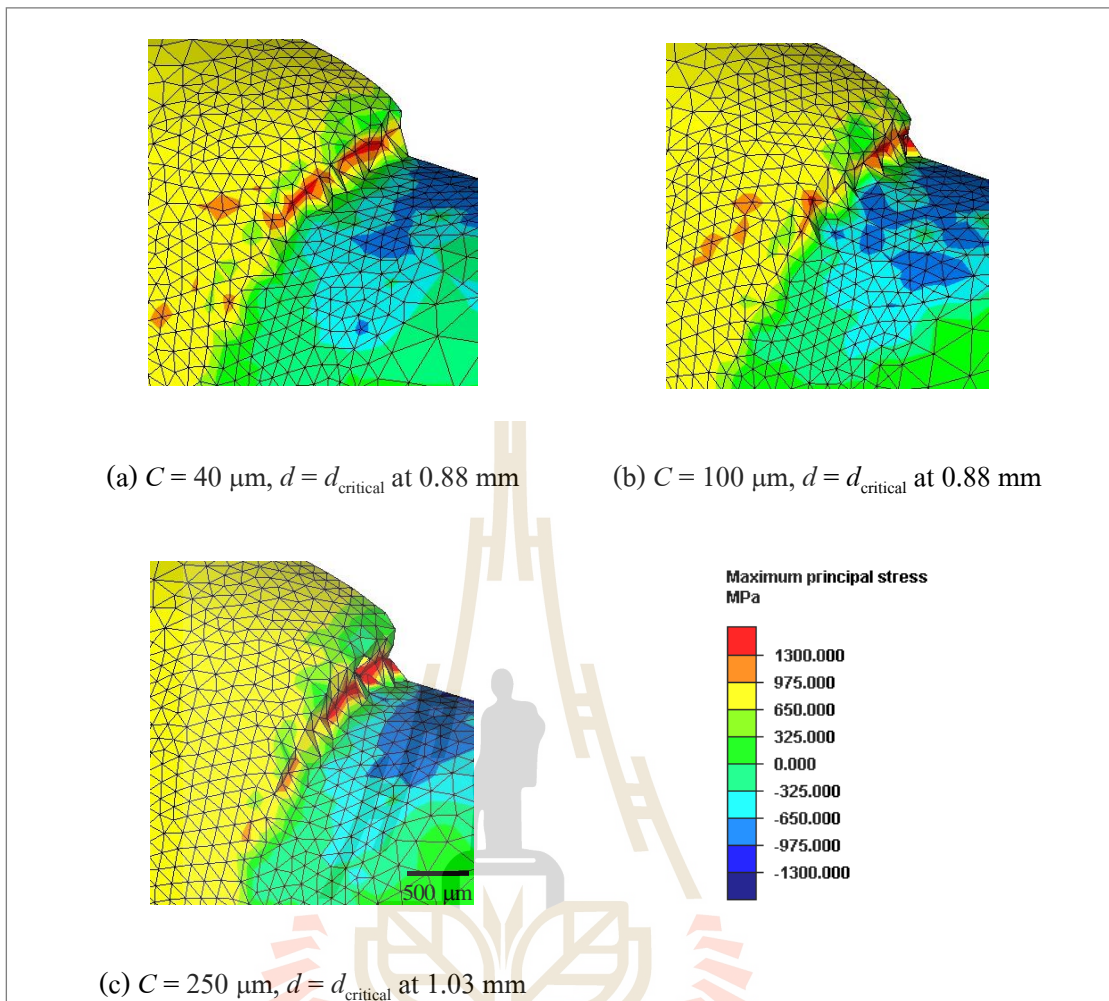
ภายหลังจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ทำการเปรียบเทียบผลแรงต้านการตัดจากการจำลองและการทดลองที่ได้ จากผลการเปรียบเทียบนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าโมเดลวัสดุที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้สามารถที่จะนำไปใช้ในการจำลองผลจากระบวนการตัดเฉือนเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของการตัดเฉือนของแท่งเหล็กกล้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบผลของแรงต้านการตัดต่อระยะกดลึกของแม่พิมพ์ระหว่างการทดลองและการจำลองโดยใช้ FEM

เนื่องด้วยการเกิดส่วนโค้งมนและการสูญเสียค่าความกลมนั้นมีความรุนแรงขึ้นตามระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้คุณภาพขอบตัดลดลงเป็นอย่างมาก ผู้วิจัยจึงได้ใช้การจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เนื่องจากปริมาณการเกิดส่วนโค้งมนและการสูญเสียค่าความกลมนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการเสีรูปร่างขอบบริเวณขอบตัด ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์ปริมาณนี้โดยทำการเปรียบเทียบระดับความเค้นหลักตั้งฉากสูงสุดที่เป็นความเค้นตั้งฉากกับความเค้นตั้งฉากสูงสุดวิกฤติ (Critical stress) ซึ่งจะหาได้จากการจำลองผลโดยการกดแม่พิมพ์ไปที่ตำแหน่ง d_{peak} แล้วเก็บค่าความเค้นหลักตั้งฉากสูงสุด ณ จุดตัดของแม่พิมพ์ออกมาโดยมีค่าประมาณ 1,300 MPa

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มากขึ้น ความเค้นหลักตั้งฉากสูงสุดนั้นจะมีค่าไปถึงความเค้นวิกฤติดังแสดงด้วยแถบสีแดงที่ระยะการกดลึกที่มากกว่าจากการจำลองนี้จึงทำให้เข้าใจได้อย่างชัดเจนถึงการเกิดส่วนโค้งมนและการสูญเสียค่าความกลมที่มากขึ้นเมื่อใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.17 การจำลองกระบวนการตัดเนื้อด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.6 สรุปการวิจัย

1. การตัดเนื้อแท่งเหล็กกล้า JIS SCM420 โดยใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์เล็กลงนั้น ไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงต้านการตัด
2. เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มากขึ้น ส่วน โกงมนและครีบบริเวณขอบตัดมีขนาดใหญ่ขึ้น
3. ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์น้อย แท่งโลหะจะถูกตัดขาดออกจากกันด้วยรูปแบบการแตกแบบปกติและรูปแบบการแตกด้วยรอยแตกที่สอง แต่ในกรณีค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มากพบว่าการแตกแบบปกติเพียงอย่างเดียว
4. จากโมเดลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าบริเวณของส่วน โกงมนที่มีขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มาก ซึ่งเกิดจากค่าความเค้นสูงสุด

ณ บริเวณที่ใกล้กับขอบของอุปกรณ์ตัดนั้นมีความโค้งงอเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่กำลังกระทำระหว่างแม่พิมพ์น้อยๆ จึงทำให้จุดสิ้นสุดการเติบโตของส่วนโค้งมนนั้นถูกเลื่อนออกไป



บทที่ 5

การศึกษาความเสียหายในแม่พิมพ์ต่อการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า

ในกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงาน โลหะนอกจากค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อลักษณะของขอบตัดแล้วมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถส่งผลกระทบต่อชิ้นงานตัดก็คือ การสึกหรอของแม่พิมพ์ เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการตัดเฉือนและกลไกการตัดขาดซึ่งต้องมีการใช้แรงตัดเฉือนที่มากพอเพื่อให้วัสดุของชิ้นงานตัดเกิดการเสียรูปจนขาดออกจากกันได้ ดังนั้นแม่พิมพ์ตัดเฉือนนี้จึงได้รับแรงต้านซึ่งเกิดจากการตัดเฉือนที่รุนแรงนี้ด้วย แม่พิมพ์ตัดที่เกิดความเสียหายหรือการสึกหรอนั้นอาจมีผลทำให้ลักษณะขอบตัดของชิ้นงานที่นำมาทำการตัดเฉือนมีการเปลี่ยนแปลงไป ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาถึงอิทธิพลของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ต่อลักษณะขอบตัดเฉือนของชิ้นงานแท่งเหล็กกล้า ในงานวิจัยนี้การศึกษาแม่พิมพ์ตัดเฉือนประกอบไปด้วย 2 ส่วน

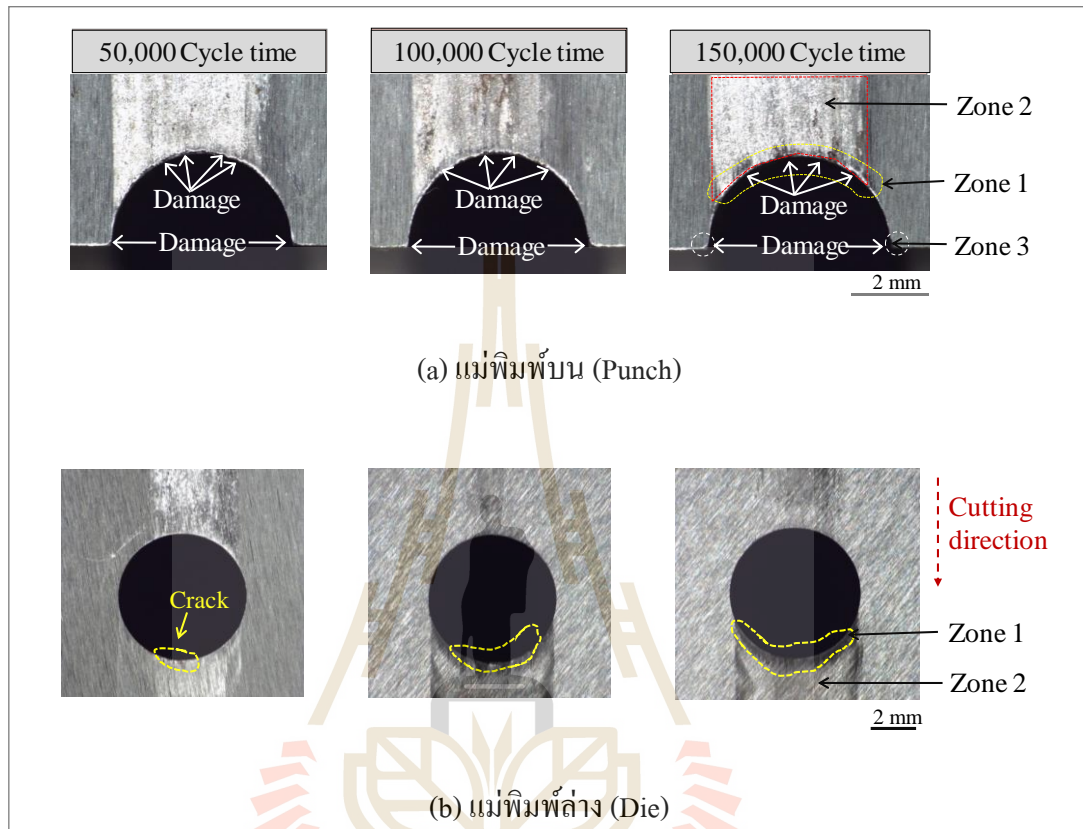
ได้แก่ การศึกษาความเสียหายของแม่พิมพ์ตามอายุการใช้งาน และการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าด้วยแม่พิมพ์ที่เกิดความเสียหาย โดยในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบด้วยใช้แม่พิมพ์ตัดซึ่งผ่านการใช้งานมาแล้วจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งผ่านการใช้งานมาแล้วที่ 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้ง และในการทดลองนี้ได้ใช้ค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์คือ 40 ไมโครเมตร และความเร็วในการเคลื่อนที่แม่พิมพ์ตัดคือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที

5.1 การศึกษาความเสียหายของแม่พิมพ์ตัดตามอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ (Study Tool Damage Characteristic)

สำหรับการศึกษาในส่วนแรกนี้จะเป็นการอธิบายถึงรูปแบบและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดเฉือนซึ่งผ่านการใช้งานในการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้ามาแล้วประมาณ 50,000 100,000 150,000 ครั้ง นอกจากนี้ได้มีการตรวจสอบความเสียหายซึ่งเกิดกับแม่พิมพ์ตัดด้วยกล้องสเตอริโอและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วย จากการตรวจสอบในระดับมหภาคด้วยกล้องสเตอริโอ นั้นพบว่าเนื้อแม่พิมพ์บนมีความเสียหายเพิ่มขึ้น 3 บริเวณดังแสดงในรูปที่ 5.1 (a)

โดยบริเวณแรกสังเกตพบรอยแตกเล็กๆ ณ บริเวณขอบโค้งของคมตัด บริเวณที่สองพบความเสียหายที่บริเวณผิวหน้าของแม่พิมพ์ตัดและ บริเวณที่สาม พบความเสียหายตรงปลายของคมตัดทั้ง 2 ด้านของแม่พิมพ์บน และจากการตรวจสอบความเสียหายแม่พิมพ์ล่างหรือคาย พบว่าความ

เสียหายโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับฝั่งด้านล่างโดยจะเกิดความเสียหายขึ้นใน 2 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (b) คือบริเวณปลายของคมตัดและบริเวณผิวหน้าของแม่พิมพ์ตัด

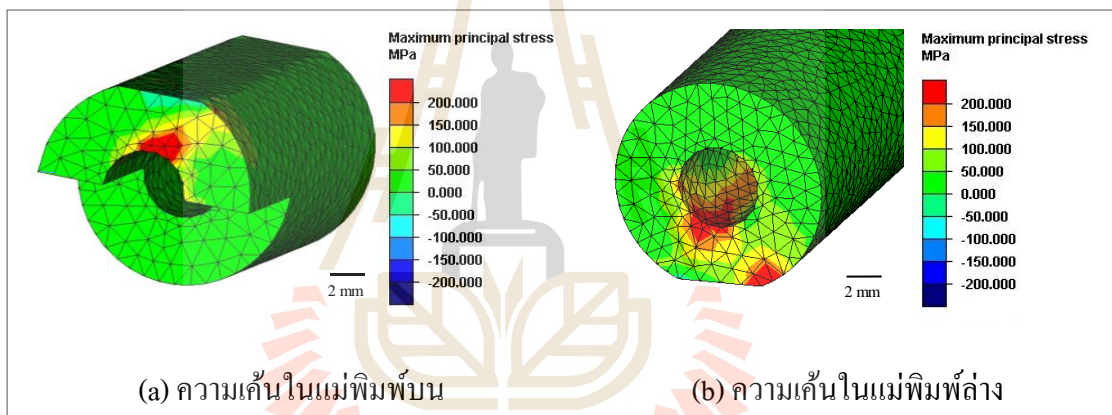


รูปที่ 5.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่ตัดเฉือน

เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมที่อาจก่อให้เกิดการเสียหายรวมไปถึงการยื่นยันถึงบริเวณที่พบความเสียหาย ผู้วิจัยจึงได้นำการจำลองผลโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาเพื่อช่วยในการทำนายผลและวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดขณะที่มีการใช้งานซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายในตัวแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 จากรูปที่ 5.2 (a) แสดงให้เห็นถึงความเค้นหลักสูงสุดที่กระทำกับแม่พิมพ์บน ดังเห็นได้จากแถบสีส้มและแดง ซึ่งความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวด้านในทางฝั่งบนของแม่พิมพ์บนเท่านั้น จากผลการคำนวณความเค้นดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่แม่พิมพ์ได้รับความเสียหายจากการตัดเฉือนนั้นมีเพียงแค่บริเวณเดียวคือ ณ บริเวณขอบโค้งสูงสุดของคมตัดเท่านั้น สำหรับความเสียหายในบริเวณที่ 2 นั้นเป็นผลมาจากการเสียดสีของเนื้อชิ้นงานกับผิวของแม่พิมพ์ตัด แต่อย่างไรก็ตามในบริเวณที่ 3 ซึ่งเกิดความเสียหายกับแม่พิมพ์นั้นกลับไม่พบค่าความเค้นเกิดขึ้นในขณะตัดและเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบหรือ

สภาพการใช้งานชุดแม่พิมพ์ที่ต้องมีการป้อนลวดเข้ามาในกระบวนการตัดเฉือน ณ บริเวณที่ 3 นั้น จึงอาจเกิดการชนหรือการขูดขีดกันของชิ้นงานแท่งเหล็กกล้ากับแม่พิมพ์ได้ซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกับผลการทำนายแล้วความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จึงเป็นความเสียหายที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดเฉือนแต่อย่างใด

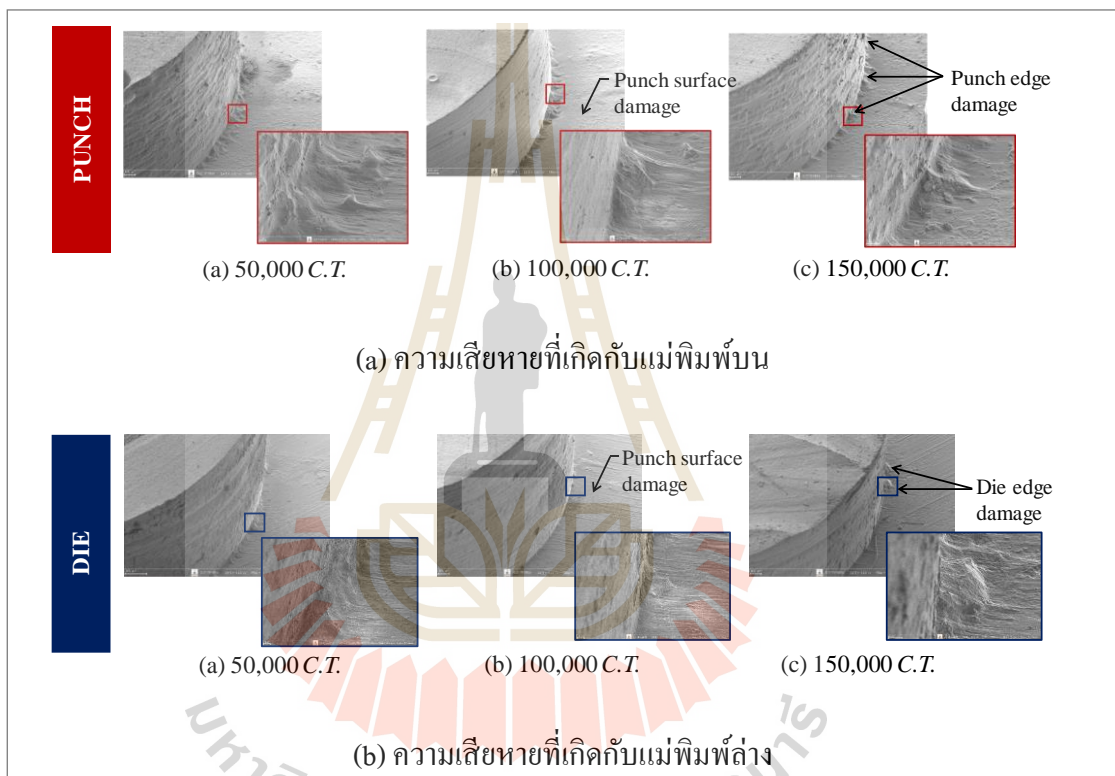
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.2 (b) เพื่อวิเคราะห์ถึงบริเวณที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายในชุดแม่พิมพ์ล่างพบว่าในการตัดเฉือนของชุดแม่พิมพ์ล่างมีเพียงบริเวณเดียวเท่านั้นที่มีโอกาสในการเกิดความเสียหายก็คือบริเวณฝั่งด้านล่างซึ่งมีการสัมผัสกันของแม่พิมพ์กับชิ้นงาน ส่วนด้านบนนั้นคมตัดของดาบไม่ได้มีการสัมผัสกันกับเนื้อชิ้นงานทำให้ไม่พบค่าความเค้นที่กระทำกับแม่พิมพ์ในบริเวณนี้ ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชุดแม่พิมพ์ดาบจึงทำการวิเคราะห์เพียงบริเวณฝั่งด้านล่างเท่านั้น



รูปที่ 5.2 ความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principle stress) ในแม่พิมพ์

จากการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นในเบื้องต้นนั้นทำให้ทราบถึงบริเวณที่เกิดความเสียหายกับแม่พิมพ์ ในลำดับถัดไปผู้วิจัยจึงต้องการนำแม่พิมพ์ไปทำการตรวจสอบอย่างละเอียดเพื่อดูลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านขนาดของแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่เกินไป และความเสียหายที่พบนั้นดูเหมือนจะเกิดลึกเข้าไปในรูของแม่พิมพ์ตัดทำให้ไม่สามารถที่จะการตรวจสอบด้วยวิธีการ SEM ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเทคนิคการตรวจสอบด้วยการลอกลายเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการตรวจสอบโดยเทคนิคนี้ในภาคผนวก ข ร่วมกับการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

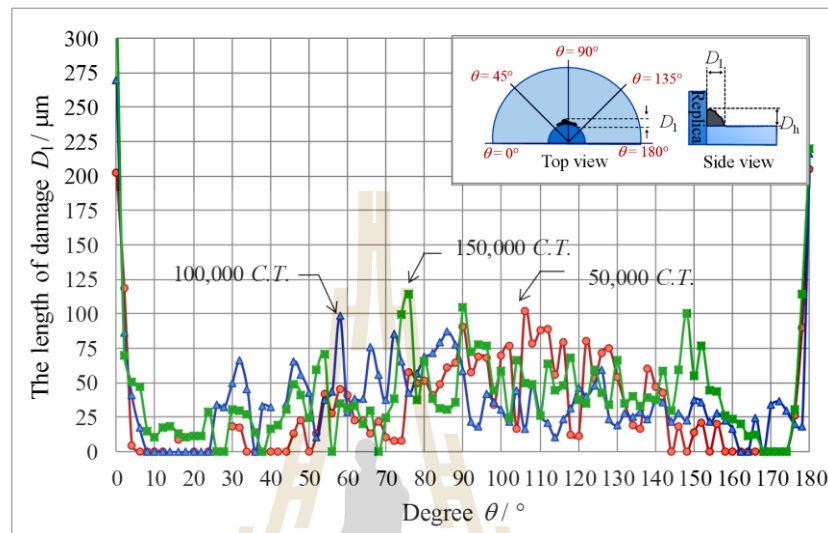
จากการตรวจสอบแม่พิมพ์บนที่ 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้งการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 5.3 (a) พบว่าแม่พิมพ์บนมีความเสียหายเกิดขึ้น โดยรอบคมตัดตลอดทั้งแนวคมตัดนอกจากนี้ยังพบว่า ณ บริเวณขอบโค้งสูงสุดของคมตัดของทั้งแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างมีการสูญเสียเนื้อแม่พิมพ์ไปจนสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน สำหรับการตรวจสอบแม่พิมพ์ล่างพบว่าแม่พิมพ์มีความเสียหายเกิดขึ้นคล้ายกับแม่พิมพ์บน แต่ความเสียหายที่พบนั้นมีลักษณะการเกิดกระจายและไม่สม่ำเสมอรอบขอบตัด ดังแสดงในรูปที่ 5.3 (b)



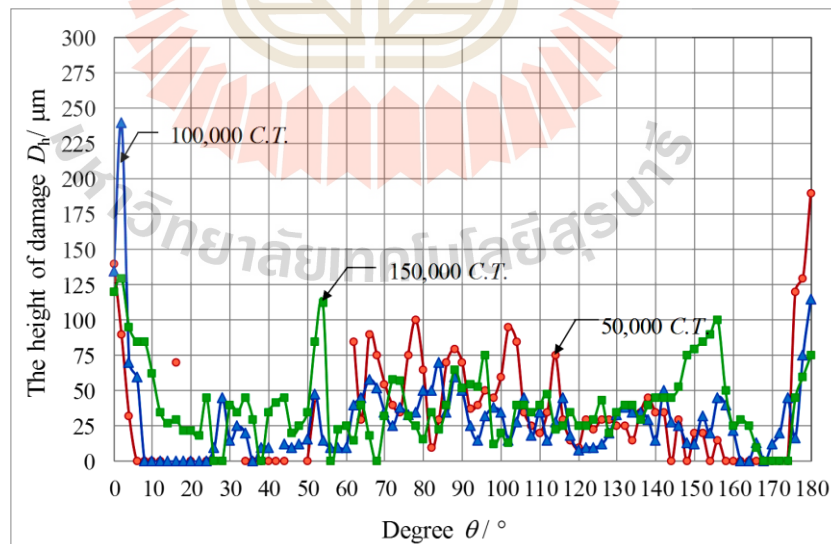
รูปที่ 5.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัดเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย SEM

รูปที่ 5.4 ถึง 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดบริเวณเนื้อแม่พิมพ์ที่แตกหักเสียหายเทียบกับมุม (θ) ที่วัดได้บนผิวหน้าแม่พิมพ์ในรูปแบบของครึ่งวงกลม ($\theta = 0^\circ$ ถึง 180°) ซึ่งทำการตรวจวัดขนาดโดยใช้เทคนิคการลอกลาย จากนั้นนำตัววัสดุลอกลายมาทำการตรวจสอบด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนแบบ 3 มิติและทำการตรวจวัดขนาดด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ โดยรายละเอียดการตรวจวัดและการวิเคราะห์ผลความเสียหายนั้นจะกล่าวถึงในภาคผนวก ก. ซึ่งจากการตรวจสอบผู้วิจัยได้กำหนดขนาดของความเสียหายออกมาในรูปแบบตัวแปรสองตัวคือ ความยาวของความเสียหาย (D) และ ความสูงของความเสียหาย (D_n)

จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 พบว่าความยาวและความสูงของรอยการเสียหายในแม่พิมพ์บนหรือพื้นชั้นนั้น พบว่ามีความเสียหายที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้ง 3 กรณีการตัด คือที่ 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้ง ของการใช้งานซึ่งจะมีการเสียหายสูงมากในช่วง 50 ถึง 120 องศา

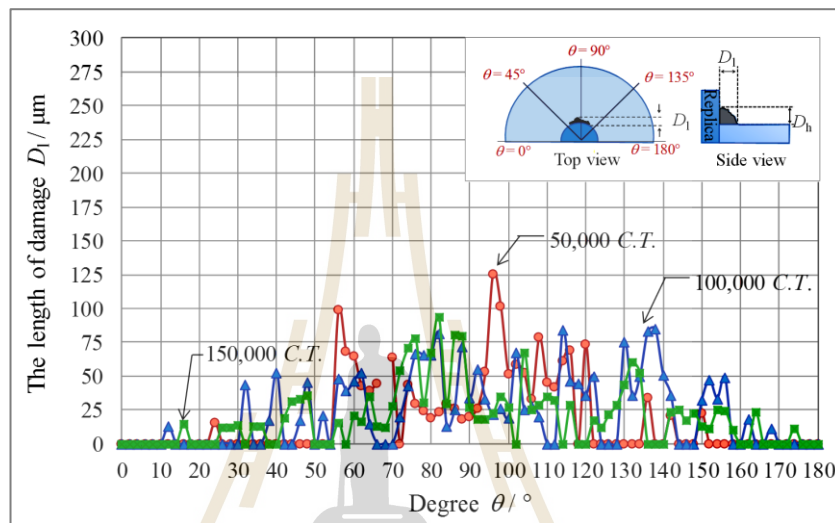


รูปที่ 5.4 ความยาวของความเสียหายในแม่พิมพ์บนเทียบกับมุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์

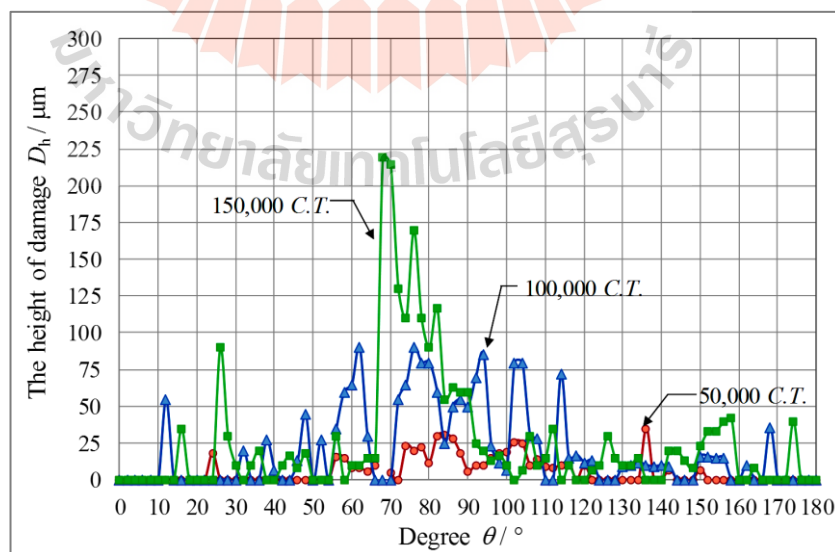


รูปที่ 5.5 ความสูงของความเสียหายในแม่พิมพ์บนเทียบกับมุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์

จากการตรวจสอบความเสียหายในแม่พิมพ์ล่างหรือคาย พบว่าระยะความยาวของความเสียหาย หรือ D_l นั้นไม่มีความแตกต่างกันในทั้ง 3 กรณี โดยช่วงที่พบความเสียหายมากที่สุดคือช่วง 50 ถึง 140 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.6 แต่อย่างไรก็ตามกลับพบว่าค่าความสูงของความเสียหาย หรือ D_h ที่เกิดขึ้นนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้แม่พิมพ์ที่มีอายุการใช้งานสูง โดยจะพบความเสียหายมากสุดในกรณีที่ใช้แม่พิมพ์ตัดที่ผ่านการใช้งานมาแล้วที่ 150,000 C.T. ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 ความยาวของความเสียหายในแม่พิมพ์ล่างเทียบกับมุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์



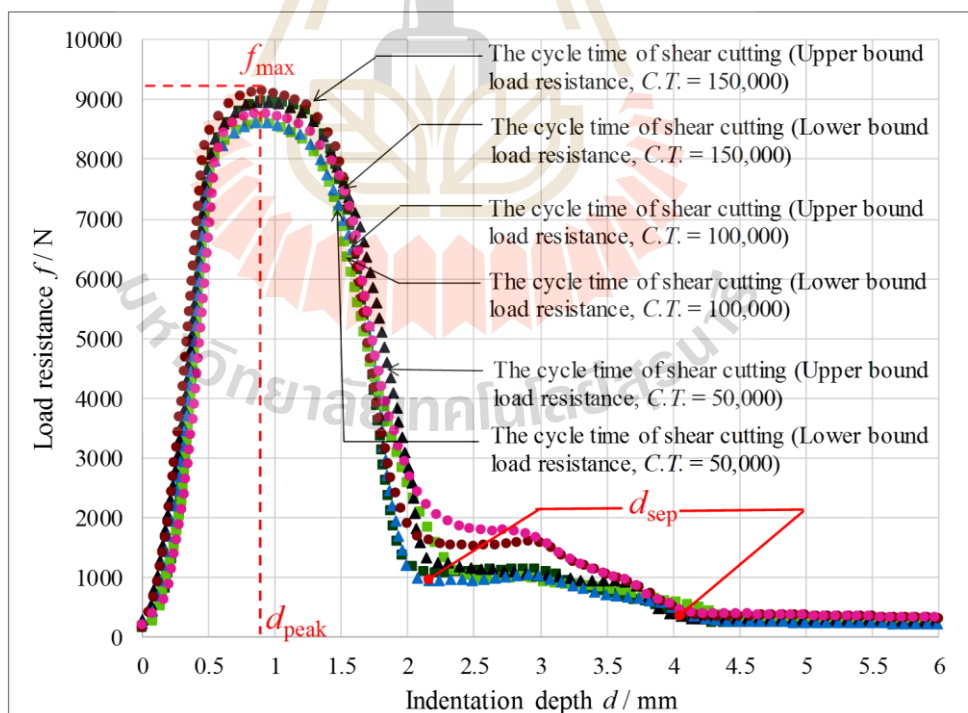
รูปที่ 5.7 ความสูงของความเสียหายในแม่พิมพ์ล่างเทียบกับมุมตามแนวเส้นรอบวงของแม่พิมพ์

5.2 การศึกษาอิทธิพลความเสียหายของแม่พิมพ์ตัดต่อผลการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า JIS SCM 420 (The Effect of Tool Damage on Punch/Die Shearing)

สำหรับการศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงผลจากการตัดเฉือนชิ้นงานแท่งเหล็กกล้าเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วประมาณ 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้ง โดยค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบคือ 40 ไมโครเมตร และความเร็วการตัดคือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที

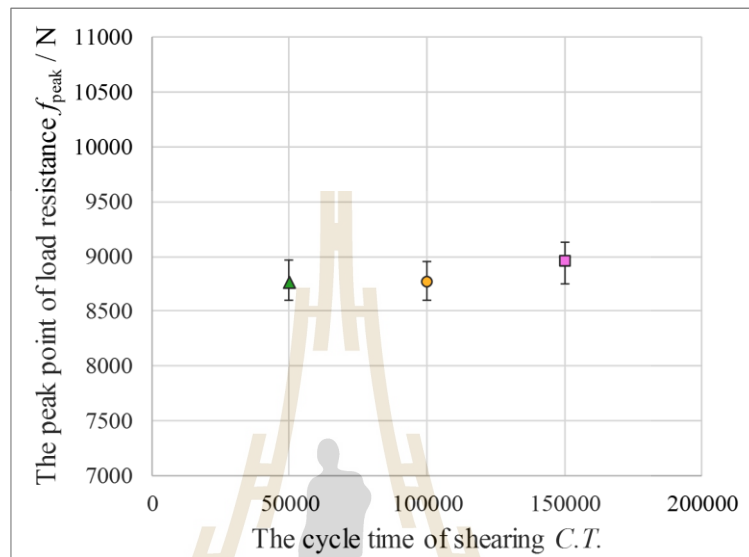
5.2.1 แรงต้านการตัดเฉือน (Cutting Load Resistance)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงต้านการตัดสูงสุดกับระยะการกดลึกของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 พบว่าแรงต้านการตัดสูงสุดนั้นไม่มีความแตกต่างกันซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 8,500 ถึง 9,100 นิวตัน เมื่อพิจารณาตำแหน่ง ณ ช่วงที่ชิ้นงานมีแรงต้านการตัดสูงสุดดูเหมือนว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกกรณี โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.76 ถึง 1.00 มิลลิเมตร ส่วนผลจากพฤติกรรมการตกของแรงต้านการตัดและตำแหน่งที่ชิ้นงานเกิดการขาดออกจากกันนั้นพบว่ายังคงมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันในกรณีแม่พิมพ์ที่เกิดความเสียหายทั้ง 3 กรณี



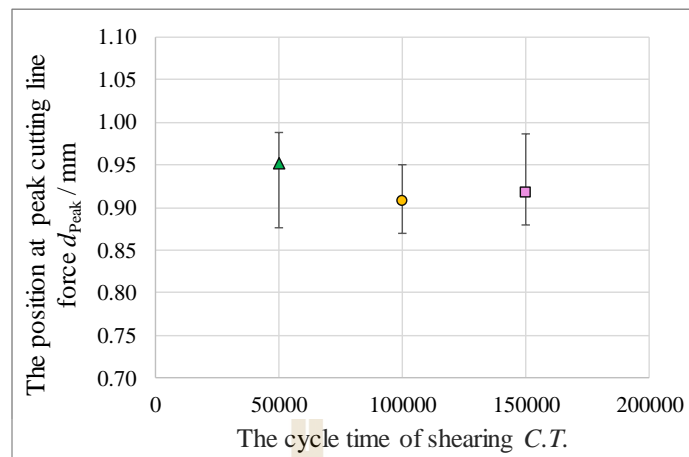
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดเฉือนกับระยะการกดลึกของแม่พิมพ์ตัดสำหรับแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 50,000 100,000 และ 150,000 ครั้ง

จากการตรวจสอบค่าแรงต้านการตัดสูงสุด (f_{peak}) พบว่าจากค่าเฉลี่ยแรงต้านการตัดสูงสุดดังแสดง ในรูปที่ 5.9 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8,700 ถึง 9,000 นิวตัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์



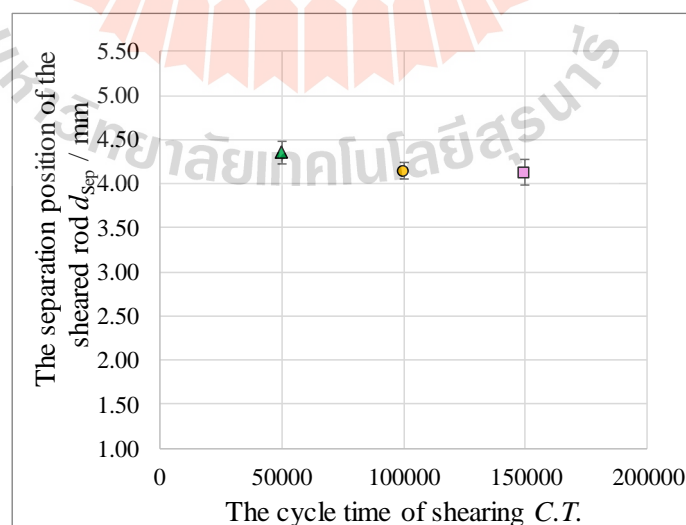
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดสูงสุดกับแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วที่จำนวนครั้งต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าแห่งของแรงต้านการตัดสูงสุดหรือตำแหน่งสุดท้ายที่ชิ้นงานเกิดการเสียรูปแบบถาวร (d_{peak}) ดังแสดงในรูปที่ 5.10 จากค่าเฉลี่ยของตำแหน่งของแรงต้านการตัดสูงสุดพบว่าทั้ง 3 กรณีนั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9 ถึง 0.95 แต่อย่างไรก็ตามกลับพบว่าค่าความแปรปรวนนั้นมีค่าค่อนข้างมากซึ่งอาจเป็นผลจากการเสียหายของแม่พิมพ์ตัดที่มีอายุการใช้งานมาก



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแรงด้านการตัดสูงสุดกับแม่พิมพ์
ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วที่จำนวนครั้งต่างๆ

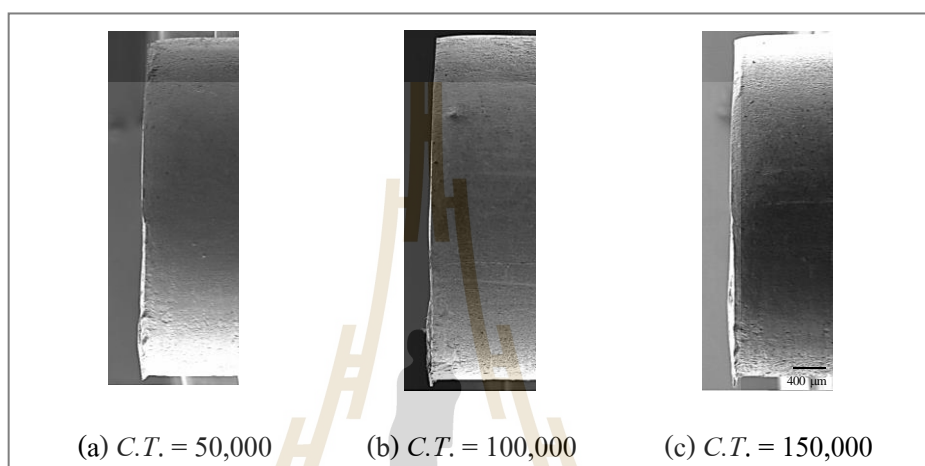
จากผลการตรวจสอบตำแหน่งของชิ้นงานที่เกิดการตัดขาด (d_{sep}) ดังแสดงในรูปที่ 5.11 พบว่าไม่มีแนวโน้มที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อแม่พิมพ์มีอายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยการตัดขาดที่ระยะ 4.1 ถึง 4.7 มิลลิเมตร และจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์ที่เกิดการสึกหรอและผ่านการใช้งานมาแล้วในช่วง 50,000 ถึง 150,000 C.T. นั้นไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจนต่อพฤติกรรมการเลี้ยวรูปของแท่งเหล็กกล้าขณะตัดเฉือน



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่มีการตัดขาดของชิ้นงานกับแม่พิมพ์
ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วที่จำนวนครั้งต่างๆ

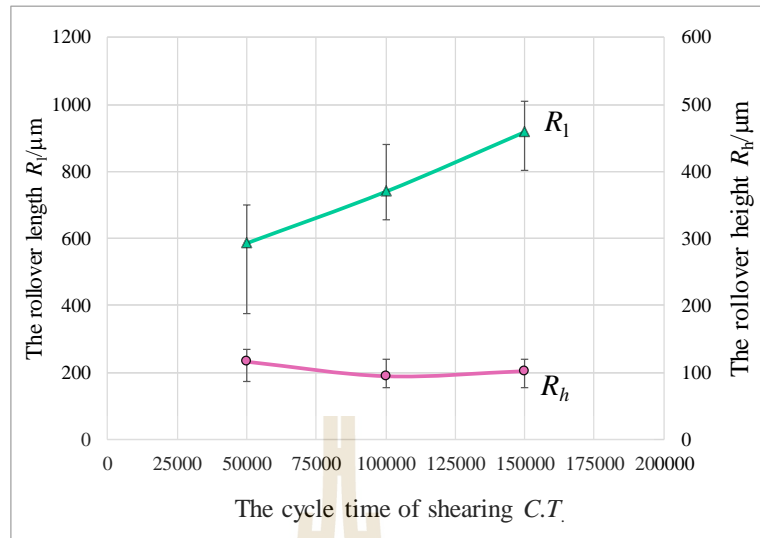
5.2.2 ลักษณะขอบตัดเฉือน (Shear Edge Feature)

จากการตรวจสอบลักษณะการเสียรูปของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.12 พบว่า บริเวณของส่วนโค้งมนนั้นมีแนวโน้มนลดลงสำหรับการตัดเฉือนซึ่งใช้แม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว โดยเฉพาะที่ 150,000 C.T. แต่บริเวณของครีบนั้นดูเหมือนจะมีแนวโน้มนเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ตัดเพิ่มมากขึ้น



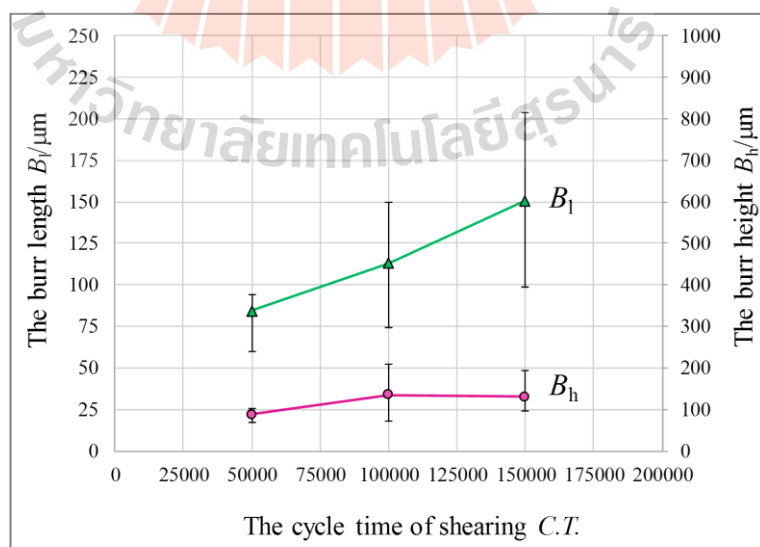
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าซึ่งถูกตัดด้วยแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานในจำนวนครั้งการตัดที่แตกต่างกัน

สำหรับการตรวจสอบบริเวณของส่วนโค้งมน โดยการวัดขนาดซึ่งถูกอธิบายด้วยตัวแปร จากการตรวจสอบบริเวณของส่วนโค้งมนดังแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่าความยาวของส่วนโค้งมน (R_1) นั้นมีแนวโน้มนเพิ่มขึ้นตามการสึกหรอของแม่พิมพ์ ขณะที่ความสูงของมัน (R_2) นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 5.13 ขนาดของส่วน โค้งมนเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ซึ่งมีจำนวนครั้งการตัดต่างๆ

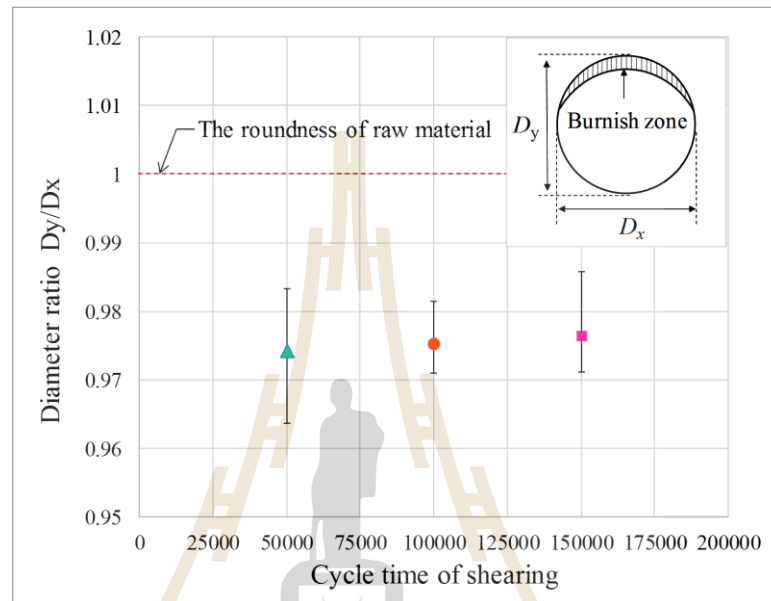
เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณของครีบดังแสดงในรูปที่ 5.14 พบว่าขนาดความสูง (B_h) และความยาว (B_l) ของครีบบมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการใช้งานแม่พิมพ์ตัดที่ผ่านการใช้งานมาแล้วหลายๆ ครั้ง ซึ่งเป็นผลมาจาก ณ ปลายแม่พิมพ์นั้นมีการสูญเสียเนื้อแม่พิมพ์ไปทำให้ในขั้นตอนสุดท้ายของกลไกการตัดขาดนั้นมีแนวโน้มในการเกิดครีบที่ยืดยาวไปตามรูปทรงของแม่พิมพ์ที่มีการสูญเสียเนื้อไป



รูปที่ 5.14 ขนาดของครีบเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ซึ่งผ่านการใช้งานมาแล้ว

5.2.3 ความกลมของขอบตัด (The Roundness of Sheared Edge)

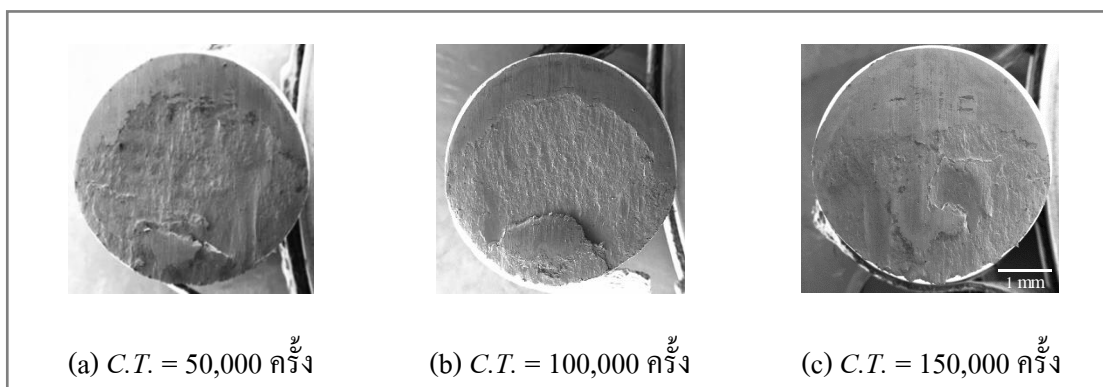
เมื่อทำการตรวจสอบค่าความกลมพบว่าชิ้นงานทุกกรณีนั้นไม่สามารถรักษาค่าความกลมไว้ได้ กล่าวคือค่าอัตราส่วนในแนวแกน D_y/D_x ที่วัดได้ในทุกกรณีนั้นมีค่าต่ำกว่า 1 ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ค่าความกลมของชิ้นงานเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ซึ่งมีจำนวนครั้งการตัดต่างๆ

5.2.4 พื้นผิวของขอบตัดเฉือน (The Sheared Surfaces)

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานซึ่งถูกตัดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 5.16 พบว่าชิ้นงานในทุกกรณีนั้นมีการการแยกขาดออกจากกัน โดยกลไกของการเกิดรอยแตกที่สอง ดังจะเห็นได้จากพื้นผิวการตัดซึ่งมี 4 บริเวณสลับกันคือ บริเวณผิวเรียบจากการตัดเฉือนครั้งแรก บริเวณขรุขระซึ่งเกิดจากการแตกของเนื้อวัสดุ บริเวณผิวเรียบจากการตัดเฉือนในครั้งที่สอง และบริเวณสุดท้ายที่มีพื้นผิวขรุขระจากการขาดกันอีกครั้งของเนื้อวัสดุ



รูปที่ 5.16 พื้นผิวของชิ้นงานเมื่อทำการตัดด้วยแม่พิมพ์ซึ่งผ่านการใช้งานที่จำนวนการตัดต่างๆ

5.3 สรุปการวิจัย

1. การเสียหายของแม่พิมพ์เนื่องจากการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณส่วนโค้งด้านบนของแม่พิมพ์บน และส่วนโค้งด้านล่างของแม่พิมพ์ล่างเท่านั้น
2. การเสียหายบนแม่พิมพ์ล่างมีแนวโน้มเกิดรุนแรงขึ้นเมื่อแม่พิมพ์ผ่านการใช้งานมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแม่พิมพ์ถูกใช้ตัดเฉือนชิ้นงานมาแล้วประมาณ 150,000 ชิ้น สำหรับการเสียหายที่แม่พิมพ์บนพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงอายุการใช้งานไม่เกินประมาณ 150,000 ครั้งการตัดเฉือน
3. อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแรงต้านการตัดเฉือน ได้แก่ แรงต้านการตัดเฉือนสูงสุด ตำแหน่งของแรงต้านการตัดเฉือนสูงสุด และตำแหน่งการตกลงของแรงต้านการตัด
4. ความยาวของส่วนโค้งมนและครีบกึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณขอบตัดมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้าด้วยแม่พิมพ์ที่มีอายุการใช้งานมากขึ้น ในขณะที่ความกลมของชิ้นงานหลังการตัดเฉือนไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อแท่งเหล็กกล้าถูกตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีอายุการใช้งานในช่วงประมาณ 50,000 ถึง 150,000 ครั้ง ของการตัดเฉือน

บทที่ 6

การประยุกต์ใช้เทคนิคการกรีดร่องก่อนทำการตัดเฉือน

จากการศึกษาอิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อลักษณะขอบตัดของชิ้นงานแท่งเหล็กกล้าในขั้นต้น พบว่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มากขึ้นมีผลเป็นอย่างมากต่อบริเวณของส่วนโค้งมนและบริเวณของครีบซึ่งส่งผลให้ทั้งสองบริเวณมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น รวมไปถึงการศึกษาความเสียหายในแม่พิมพ์ตัดทำให้ทราบว่าแม่พิมพ์ตัดที่มีอายุการใช้งานสูงและเกิดการสึกหรอมากขึ้นส่งผลทำให้ครีบ ณ บริเวณขอบตัดเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามกระบวนการตัดเฉือนโดยใช้แม่พิมพ์นั้นก็ยังไม่สามารถหลีกเลี่ยงการของครีบอันเป็นปัญหาสำคัญในกระบวนการประกอบชิ้นส่วน โลหะเข้ากับชิ้นงานอื่นๆ จากงานวิจัยของ (Krimminger, M. et al., 2017) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคเพื่อใช้ในการลดบริเวณของครีบลงโดยใช้เทคนิคการตอกรอยบากลงบนโลหะอะลูมิเนียมแผ่นก่อนการตัดเฉือน พบว่าบริเวณของส่วนโค้งมน บริเวณผิวเรียบ และบริเวณของครีบมีการลดลงเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ได้กระทำกับชิ้นงานโลหะแผ่นซึ่งมีการเสีรูปร่าง 2 มิติตามแนวแกน โดยพฤติกรรมการเสีรูปร่างของชิ้นงานโลหะแท่งซึ่งมีการเสีรูปร่าง 3 มิติที่มีความแตกต่างไปจากการเสีรูปร่างของโลหะแผ่นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการประยุกต์เทคนิคนี้ในการตัดเฉือนในแท่งเหล็กกล้า ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการกรีดร่องมาประยุกต์ใช้สำหรับการตัดเฉือนรวมถึงได้ศึกษาพฤติกรรมการตัดเฉือนและลักษณะของขอบตัดที่ได้ โดยการศึกษานี้ประกอบไปด้วยการศึกษา 2 ส่วน ได้แก่ การตัดเฉือนโดยใช้เทคนิคการกรีดร่องเปรียบเทียบกับ การตัดเฉือนแบบปกติ และ การศึกษาผลของความถี่การกรีดต่อการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า

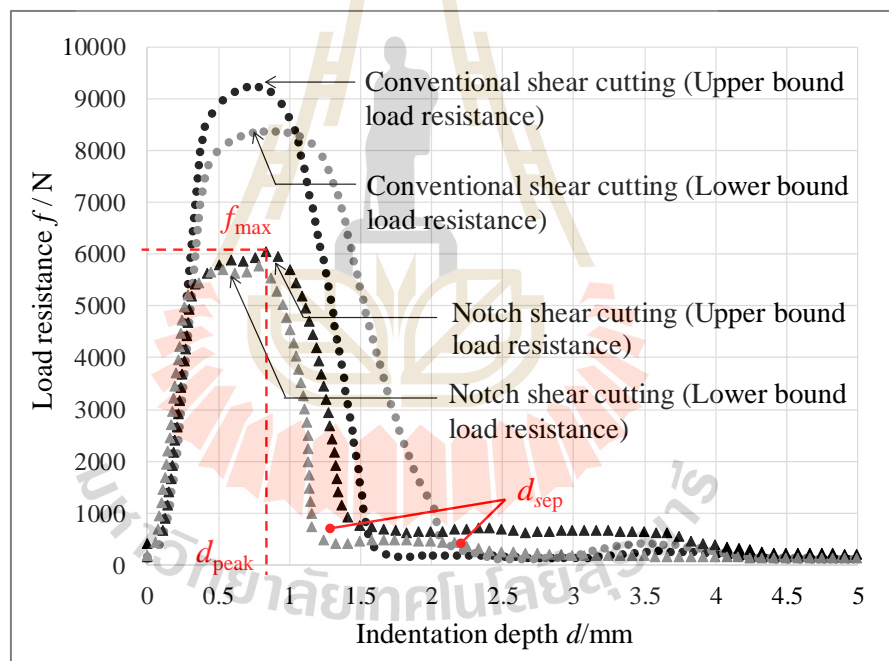
6.1 การตัดเฉือนโดยใช้เทคนิคการกรีดร่องเปรียบเทียบกับ การตัดเฉือนแบบปกติ (Comparison of Notching and Conventional Shear Cutting)

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลการตัดเฉือนระหว่างชิ้นงานที่ทำการกรีดร่องและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรีดร่อง โดยค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ใช้คือ 40 ไมโครเมตร ความเร็วในการตัดเฉือนคือ 40 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับชิ้นงานที่ทำการกรีดร่อง ร่องบนชิ้นงานมีมุม (α) ประมาณ 40 องศา รัศมีปลายร่องประมาณ 63.6 ไมโครเมตร และความถี่การกรีดบนชิ้นงานทดสอบมีค่า 426 ไมโครเมตร

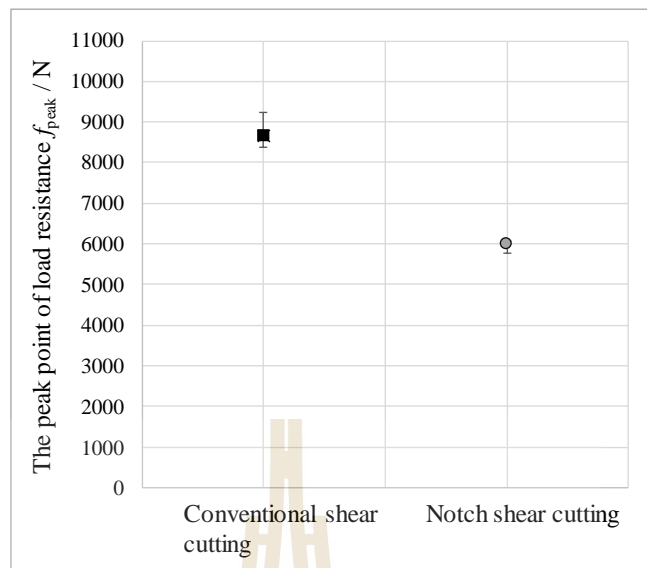
6.1.1 แรงต้านการตัดเฉือน (Cutting Load Resistance)

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในของการใช้เทคนิคการกรีดร่องแต่งเหล็กกล้าก่อนตัด ผู้วิจัยได้ทดลองตัดโดยใช้เทคนิคดังกล่าวเทียบกับการตัดเฉือนแบบปกติ ดังรูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดในระหว่างการตัดเฉือนกับระยะการกดลึกของแม่พิมพ์ตัดของชิ้นงานที่กรีดร่องและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรีดร่อง จากรูปแสดงให้เห็นว่าแรงต้านการตัดเฉือนในนั้นมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อทำการตัดเฉือนโดยใช้ชิ้นงานที่ทำการกรีดร่อง

เมื่อทำการตรวจสอบแรงต้านการตัด ณ ช่วงแรกที่ระยะการกดลึกต่างๆ แรงต้านการตัดในช่วงนี้ดูเหมือนจะมีความใกล้เคียงกันในทั้งสองกรณี เมื่อพิจารณาถึงแรงต้านการตัดสูงสุด (f_{Peak}) นั้นแสดงให้เห็นว่ากรณีของชิ้นงานที่ทำการกรีดร่องนั้นมีแรงต้านการตัดสูงสุดที่ต่ำกว่าในกรณีของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรีดร่องอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 6.2

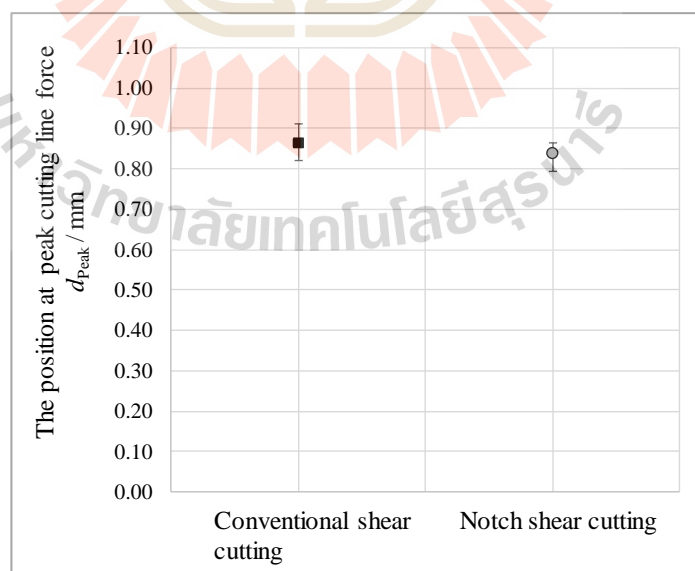


รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดเฉือนของชิ้นงานที่ใช้เทคนิคการกรีดร่อง และชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรีดร่องกับระยะการกดลึกของแม่พิมพ์



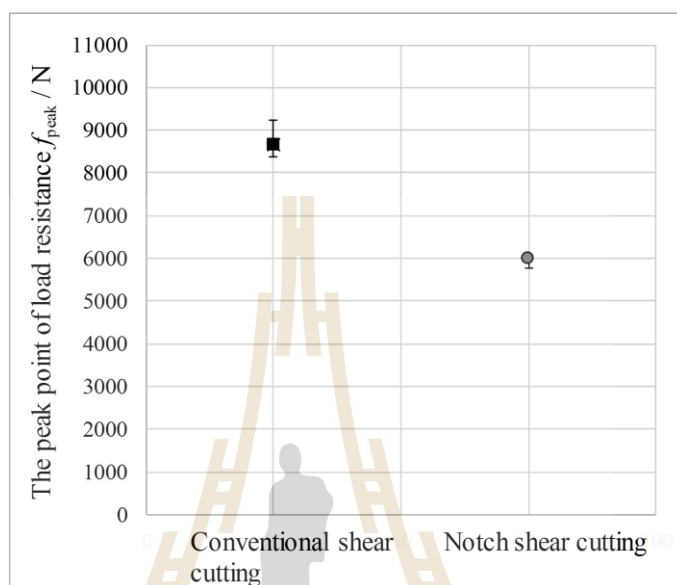
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงด้านการตัดสูงสุด (f_{Peak}) เมื่อทำการตัดเนื้อด้วย
 ชิ้นงานที่ไม่ได้กรีดร่องและชิ้นงานที่ทำการกรีดร่อง

แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่มีแรงด้านการตัดสูงสุดซึ่งถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์
 (d_{Peak}) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 นั้นกลับมีความใกล้เคียงกันในทั้งสองกรณี



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่มีแรงด้านการตัดสูงสุด (d_{Peak}) เมื่อทำการตัดเนื้อด้วย
 ชิ้นงานที่ไม่ได้กรีดร่องและชิ้นงานที่ทำการกรีดร่อง

เมื่อพิจารณาระยะการขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ของชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือน (d_{sep}) ดังแสดงในรูปที่ 6.4 นั้น พบระยะการขาดที่ต่ำกว่าในกรณีที่ชิ้นงานถูกทำการกรีดร่องก่อนทำการตัดเฉือน



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ชิ้นงานเกิดการขาดออกจากกัน (d_{sep}) เมื่อทำการตัดเฉือนด้วยชิ้นงานที่ไม่ได้กรีดร่องและชิ้นงานที่ทำการกรีดร่อง

จากพฤติกรรมการตกของแรงต้านการตัดเฉือนพบว่ามีค่าคล้ายคลึงกันทั้งสองกรณี เมื่อพิจารณาแรงต้านการตัดเฉือนหลังจากชิ้นงานเกิดการเสียรูปอย่างถาวร ในกรณีการตัดเฉือนที่ถูกรีดร่องเห็นได้ว่าลักษณะของกราฟแรงต้านการตัดไม่ได้ตกลงอย่างรวดเร็วหลังจากแรงต้านสูงถึงค่าแรงต้านการตัดสูงสุด และลักษณะของกราฟยังมีความคล้ายคลึงกับกรณีการตัดเฉือนแบบปกติ การเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าการกรีดร่องด้วยระยะลึกเท่ากับ 333 426 และ 537 ไมโครเมตร มุมร่องประมาณ 40 องศา และรัศมีของร่องประมาณ 63 ไมโครเมตร ไม่มีผลให้แก่งเหล็กกล้าเปลี่ยนพฤติกรรมไปเป็นการแตกแบบเปราะ แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคการกรีดร่องมีผลอย่างมากต่อการลดลงของแรงต้านการตัดเฉือนของชิ้นงาน

6.1.2 ลักษณะขอบตัดเฉือน (Shear Edge Feature)

เพื่อประเมินคุณภาพขอบตัดจากเทคนิคการตัดเฉือนโดยการกรีดร่องชิ้นงานก่อนทำการตัด ผู้วิจัยได้นำขอบตัดเฉือนไปทำการตรวจสอบต่อลักษณะขอบตัดของชิ้นงานนี้ ถูกแสดงดังรูปที่ 6.5 จากรูปพบข้อสังเกต 2 ประการจากการตัดทั้งสองกรณี ประการแรกพบบริเวณของส่วน

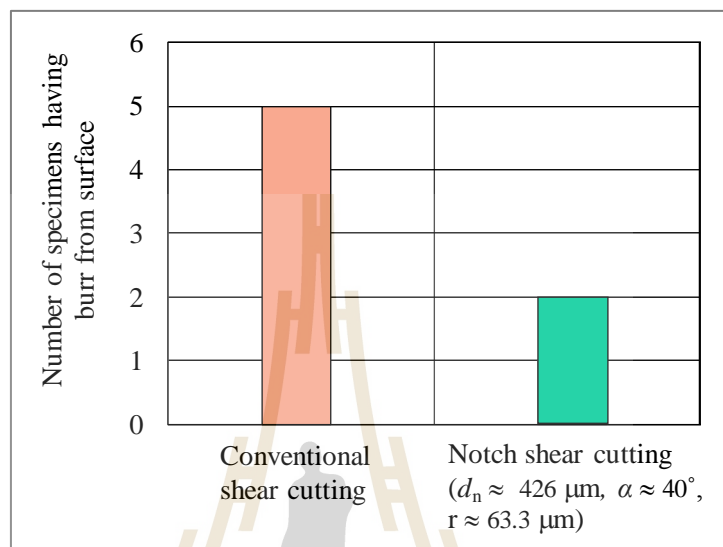
โคงมนที่มีขนาดใหญ่ในกรณีที่ชิ้นงานนั้นใช้การตัดเฉือนแบบปกติ แต่ในกรณีที่ชิ้นงานที่ถูกกรีดร่องก่อนตัดกลับไม่พบบริเวณของส่วน โคงมน ประการที่สองพบส่วนของครีบบที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ยื่นเกินออกมาจากขอบตัดในกรณีที่ทำการตัดแบบปกติดังแสดงในรูปที่ 6.5 (a) อย่างไรก็ตามในกรณีที่ทำการตัดด้วยชิ้นงานกรีดร่องยังปรากฏครีบเกิดขึ้นอยู่แต่ครีบที่เกิดขึ้น ไม่ยื่นเกินออกมาจากขอบตัดดังแสดงในรูปที่ 6.5 (b) จากลักษณะของส่วน โคงมนที่เล็กกว่าอย่างมีนัยสำคัญในกรณีการตัดเฉือน โดยกรีดร่องบนชิ้นงานก่อนแสดงให้เห็น ในเบื้องต้นว่าเทคนิคดังกล่าวดูเหมือนมีผลในการช่วยลดการสลายรูปร่างอย่างถาวรของแท่งเหล็กลักษณะตัดเฉือนเป็นอย่างมาก ผู้วิจัยได้ใช้การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการอธิบายในลำดับถัดไป



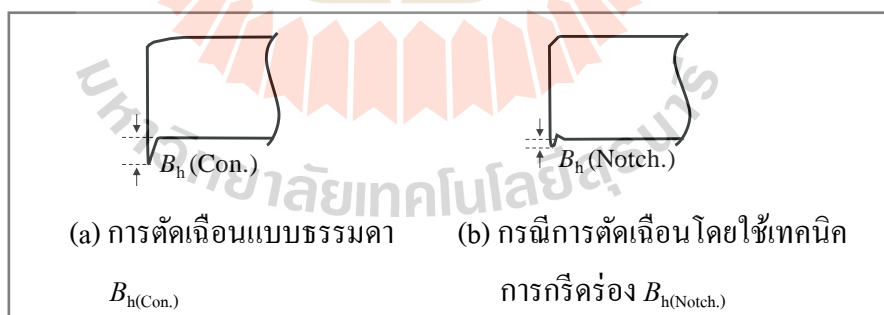
รูปที่ 6.5 ภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัด

เพื่อศึกษาลักษณะของขอบตัดอย่างละเอียดยิ่งขึ้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองตัดชิ้นงานทั้ง 2 วิธีการตัด วิธีการละ 5 ตัวอย่าง และศึกษาโอกาสในการเกิดครีบที่ยาวยื่นออกนอกขอบตัด ดังรูปที่ 6.6 จากรูปในกรณีของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรีดร่องพบว่า มีครีบขนาดใหญ่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น แต่ในกรณีที่ชิ้นงานมีการกรีดร่องมีการพบครีบบนชิ้นงานเพียงแค่สองชิ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบขนาดความสูงของครีบที่ยื่นออกมาจากขอบตัดด้วย สำหรับขนาดความสูงของครีบถูกแสดงผ่านตัวแปร B_h ดังแสดงในรูปที่ 6.7 (a) และ (b) จากผลการตรวจวัดพบว่าขนาดความ

สูงครีบของชิ้นงานในกรณีที่ใช้เทคนิคการกรัดร่อง $B_{h(\text{Notch.})}$ นั้นมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 48.46 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดที่สั้นกว่าเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีการตัดเฉือนแบบปกติซึ่ง $B_{h(\text{Con.})}$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 89.73 ไมโครเมตร



รูปที่ 6.6 จำนวนชิ้นงานที่พบครีบยื่นออกมาจากขอบตัดในกรณีการตัดเฉือนแบบธรรมดา และกรณีที่ใช้เทคนิคการกรัดร่อง

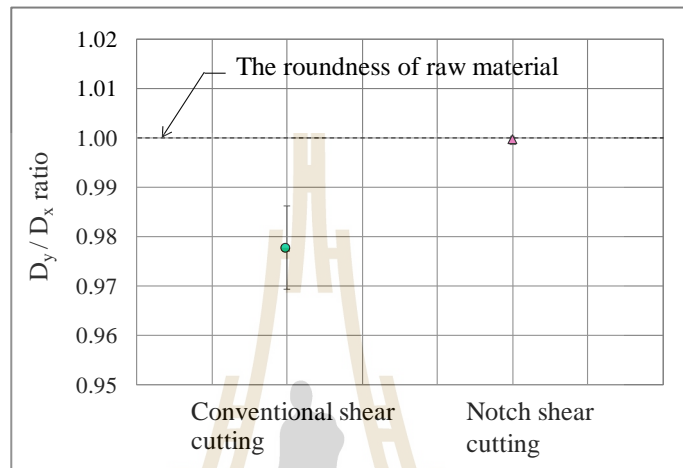


รูปที่ 6.7 ค่าจำกัดความของขนาดความสูงครีบที่พบ

6.1.3 ความกลมของขอบตัด (The Roundness of Sheared Edge)

จากการตรวจสอบค่าความกลมของชิ้นงานซึ่งถูกตัดเฉือนโดยใช้เทคนิคการกรัดร่องและการตัดเฉือนแบบธรรมดาดังแสดงในรูปที่ 6.8 ด้วยการวัดระยะในแนวแกน X และ Y นั้นพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนความกลมของชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่ารอยบากหรือการกรัด

ร่องที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานนั้นมีส่วนช่วยในการลดความต้านทานในการแยกขาดออกจากกันซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเสียรูปแบบถาวรของเนื้อโลหะในระหว่างการตัดเฉือน จึงทำให้คุณภาพขอบตัดได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อพิจารณาจากลักษณะของส่วนโค้งมน ส่วนของกริบ และส่วนของค่าความกลมที่ตรวจพบได้



รูปที่ 6.8 ความกลมของชิ้นงานที่ทำการกรัดร่องและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรัดร่อง

6.1.4 พื้นผิวของขอบตัดเฉือน (The Sheared Surfaces)

เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวพบว่ากรณีทั้งสองนี้มีพื้นผิวซึ่งมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.9 (a) และ (b)

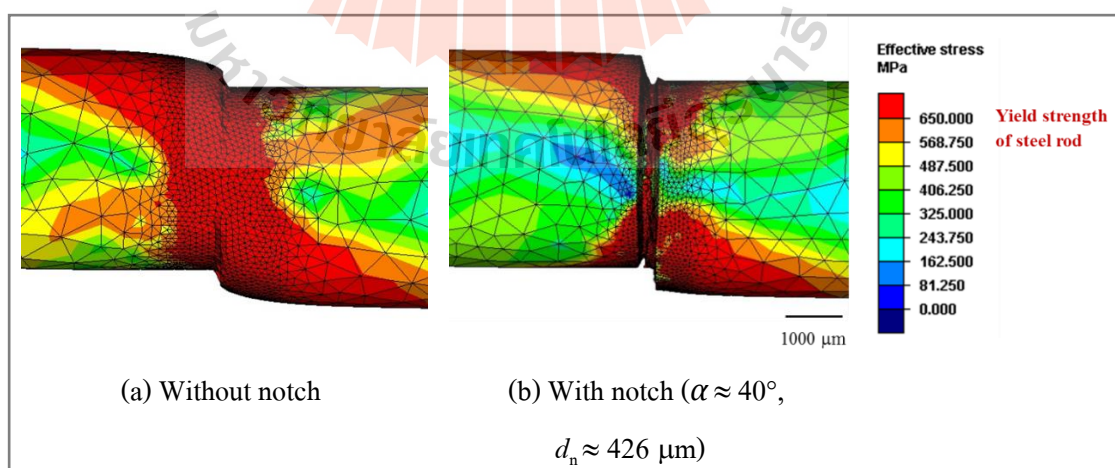


รูปที่ 6.9 ภาควัดขวางของแท่งโลหะซึ่งได้จากการตัดเฉือน

6.1.5 การวิเคราะห์ผลการตัดด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Analysis of Shear Cutting Result with Finite Element Program)

จากผลการทดลองพบว่าบริเวณของส่วนโค้งมน และค่าความกลมของชิ้นงานในกรณีที่ชิ้นงานมีการกรัดร่องนั้นให้ผลที่ดีกว่าชิ้นงานในกรณีที่ไม่กรัดร่อง เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงสาเหตุดังกล่าวที่เกิดขึ้นผู้วิจัยจึงใช้การทำนายโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการตัดเฉือน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เน้นการวิเคราะห์ไปที่การเปลี่ยนแปลงส่วนโค้งมนบนขอบตัดซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับรูปร่างของแท่งโลหะขณะตัด ฉะนั้นในผลการจำลองนี้จึงใช้การดูผลของค่า ความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) โดยค่าความเค้นประสิทธิผลนั้นเป็นตัวแปรที่แสดงบริเวณที่ชิ้นงานเกิดการเสียรูปอย่างถาวร กล่าวคือบริเวณใดที่ค่าความเค้นประสิทธิผลมีค่าสูงกว่าความเค้นจุดครากของวัสดุ ณ บริเวณนั้นพบว่าวัสดุจะเกิดการครากหรือเริ่มเกิดการเสียรูปแบบถาวร โดยในการจำลองจะทำจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการขาดออกจากกัน โดยสังเกตจากจุดที่กราฟแรงต้านการตัดซึ่งอยู่ที่ จุดหรือตำแหน่ง d_{peak} จากการทดลองมาเปรียบเทียบ

จากรูปที่ 6.10 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ทำการกรัดร่องชิ้นงานก่อนการตัดนั้น มีบริเวณที่ค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) มีค่าเกินความเค้นจุดครากก่อนที่ชิ้นงานจะเริ่มเกิดการขาด ซึ่งถูกแสดงด้วยแถบสีแดงนั้นเกิดขึ้นในบริเวณที่จำกัดและเล็กมาก จากผลการจำลองนี้จึงช่วยให้เกิดความเข้าใจอย่างลึกซึ้งถึงผลของการกรัดร่องก่อนทำการตัดเฉือนที่ส่งผลทำให้ขอบตัดมีส่วนโค้งมนน้อยมากและสามารถรักษาค่าความกลมไว้ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการตัดเฉือนทั่วไป

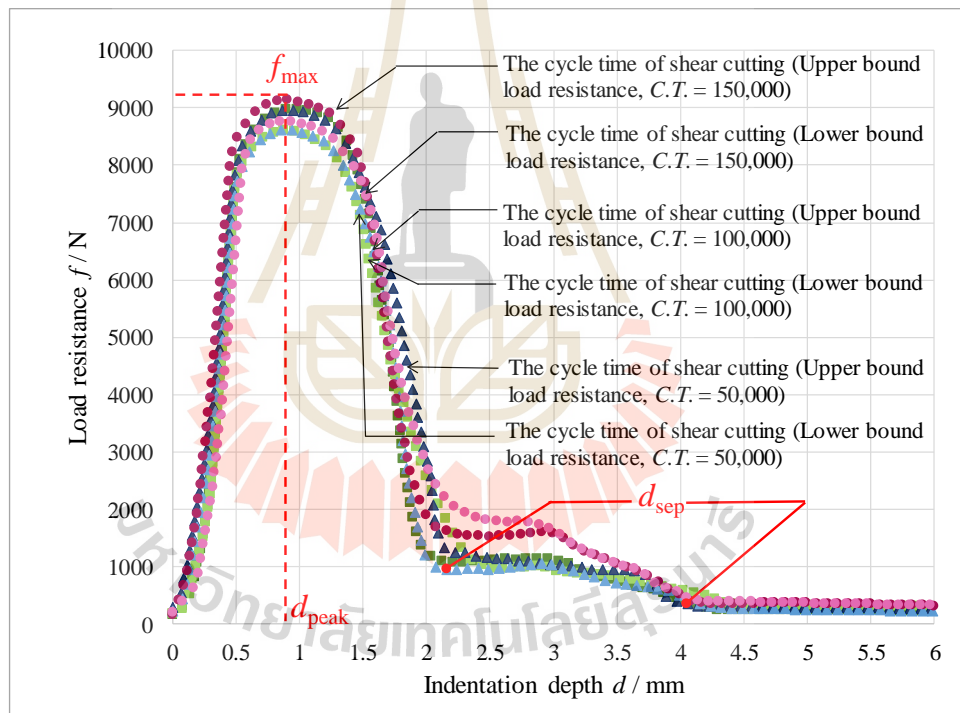


รูปที่ 6.10 ผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกรัดร่องและชิ้นงานที่ทำการกรัดร่อง

6.2 ผลของความลึกร่องกรีดต่อผลการตัดเฉือนแท่งเหล็กกล้า (Effects of Notch Depth on Shear Cutting Results)

6.2.1 แรงต้านการตัดเฉือน (Cutting Load Resistance)

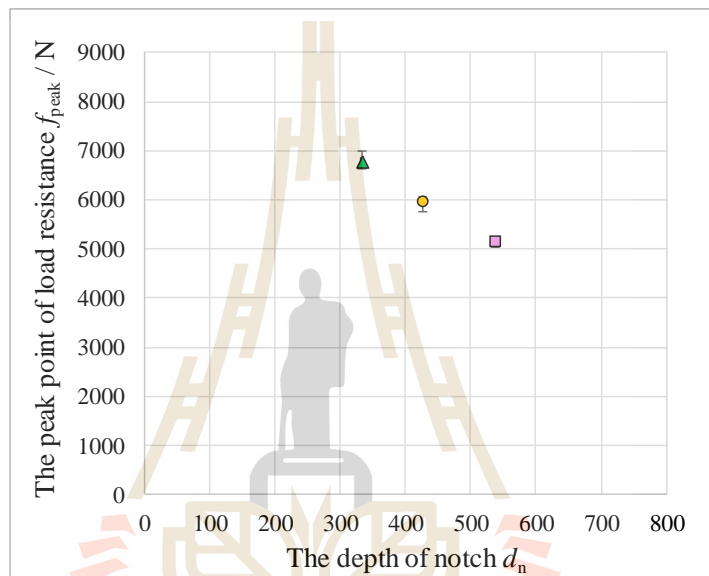
สำหรับการศึกษาในส่วนนี้ได้กระทำการศึกษาโดยเปลี่ยนความลึกของการกรีดร่องได้แก่ 333 426 และ 537 ไมโครเมตร จากความสัมพันธ์ของค่าแรงต้านการตัดสูงสุดต่อระยะความลึกของร่องกรีดดังรูปที่ 6.11 เมื่อพิจารณาจากแรงต้านการตัดเฉือนพบว่าความต้านทานการตัดขาดออกจากกันของแท่งโลหะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มความลึกของร่องกรีด แต่อย่างไรก็ตามจากลักษณะของการลดลงของกราฟ ซึ่งให้เห็นว่าพฤติกรรมการแตกหักขั้นสุดท้ายของแท่งโลหะนั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกของร่องกรีด



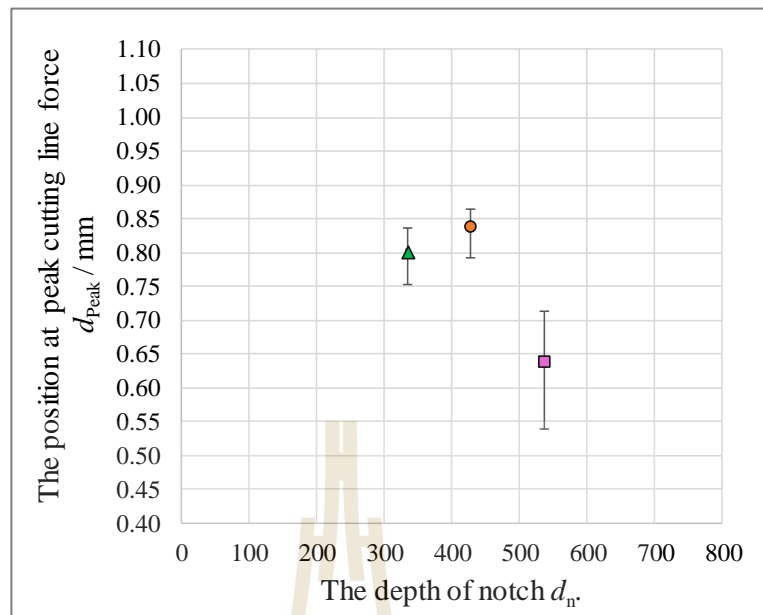
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดสูงสุดและระยะกดลึกของแม่พิมพ์บน
ในกรณีความลึกร่องกรีดเท่ากับ 333, 426 และ 537 ไมโครเมตร

และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.12 ถึง 6.14 ตามลำดับพบว่าค่าแรงต้านการตัดสูงสุด (f_{Peak}) มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มความลึกของร่องกรีด นอกจากนี้ยังพบว่าตำแหน่ง ณ แรงต้านการตัดสูงสุด (d_{Peak}) ในช่วงความลึก 333 ถึง 426 ไมโครเมตร มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งนี้จะมีค่าน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการกรีดร่องที่ลึกขึ้นในกรณี

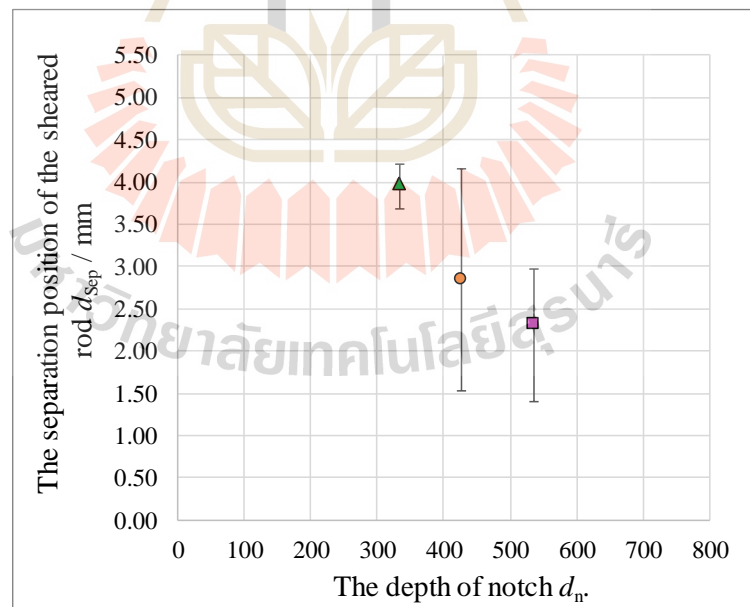
537 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงว่าการเสียรูปแบบถาวรหยุดการเติบโตได้เร็วเมื่อมีการใช้ความลึกร่องกรีดที่สูง สำหรับตำแหน่งการขาดของแท่งเหล็กกล้า (d_{sep}) นั้นจากค่าเฉลี่ยพบว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนโดยจะมีแนวโน้มการขาดที่เร็วขึ้นเมื่อระยะความลึกของร่องบากเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความแปรปรวนนั้นมีค่าที่มากเมื่อใช้ความลึกร่องกรีดที่ลึก ซึ่งเป็นผลมาจากรูปแบบการตัดขาดแบบผสม กล่าวคือชิ้นงานมีการตัดขาดออกจากกัน 2 แบบ คือ การตัดขาดแบบรอยแตกที่สอง และการตัดขาดแบบปกติ



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงต้านการตัดสูงสุดกับระยะความลึกร่องกรีดที่เปลี่ยนแปลงไป



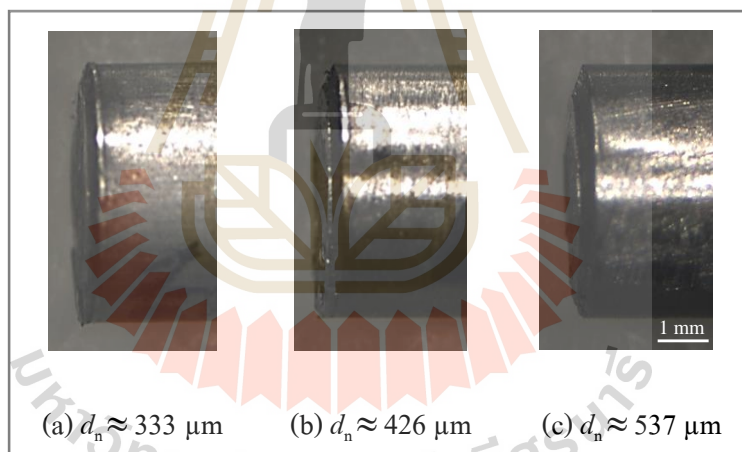
รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแรงด้านการตัดสูงสุด กับระยะความลึกร่องกรีดที่เปลี่ยนแปลงไป



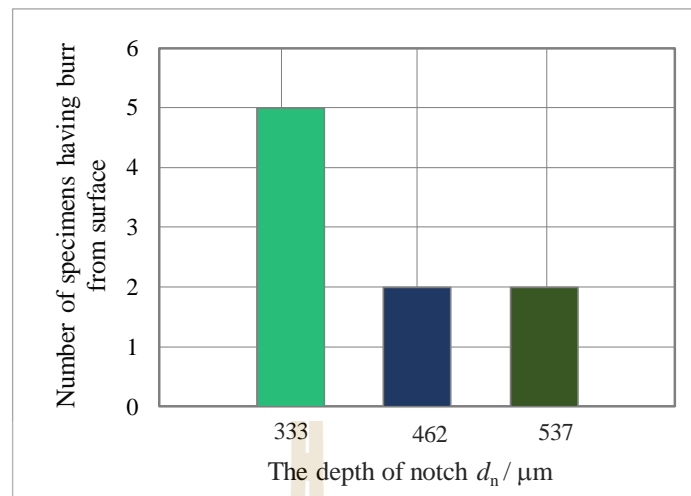
รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดการขาดออกจากกันของชิ้นงาน กับระยะความลึกร่องกรีดที่เปลี่ยนแปลงไป

6.2.2 ลักษณะขอบตัดเฉือน (Shear Edge Feature)

จากภาพถ่ายด้านข้างของลักษณะขอบตัดเฉือนเมื่อมีการใช้ระยะความลึกร่องกรีด 333 ถึง 537 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.15 นั้นไม่พบบริเวณของส่วนโค้งมนในทุกกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนค่าความลึกของร่องกรีด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในกรณีที่ความลึกมีค่าต่างๆ ได้แก่ ระยะ 333 และ 426 ไมโครเมตร ยังคงพบว่ามีส่วนของครีบบนที่ขึ้นเกินออกมาจากขอบตัด แต่ในกรณีที่ค่าความลึกมากที่สุดแทบไม่พบส่วนของครีบบนที่เกิดที่มีการขึ้นเกินออกมาจากขอบตัดเฉือน และเมื่อทำการตรวจสอบจำนวนชิ้นงานที่มีครีบบนที่ขึ้นเกินออกมานอกขอบตัดจากชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น พบว่าจำนวนที่พบนั้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มค่าความลึกร่องบากให้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.16 ภายหลังจากการวัดขนาดของครีบบนที่เกินออกมาจากขอบตัดเฉือนกลับพบว่าความยาวของครีบบน ที่ได้นั้นไม่มีส่วนสัมพันธ์กับระยะความลึกของร่องที่มีการเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือขนาดของครีบบน (B_n) ที่วัดได้มีขนาด 36.77 48.46 และ 34.33 ไมโครเมตร เมื่อมีการใช้ระยะความลึกร่องที่ 333 426 และ 537 ไมโครเมตร ตามลำดับ



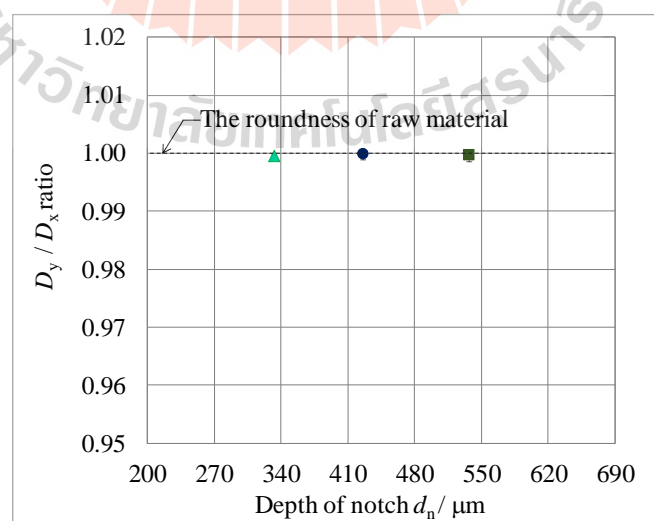
รูปที่ 6.15 ภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัดที่ความลึกร่องกรีดระยะต่างๆ



รูปที่ 6.16 จำนวนชิ้นงานที่พบครีบยื่นเกินออกมาจากขอบตัดเมื่อมีการใช้
ระยะความลึกร่องที่เปลี่ยนแปลงไป

6.2.3 ความกลมของขอบตัด (The Roundness of Sheared Edge)

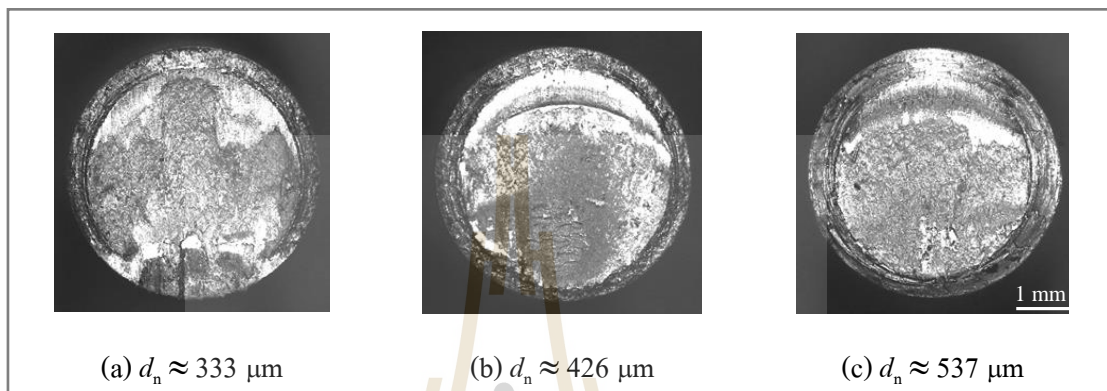
จากผลการตรวจสอบค่าความกลมของขอบตัด พบว่าชิ้นงานในทุกกรณีนั้นสามารถรักษาค่าความกลมไว้ได้ ดังจะเห็นได้จากค่าอัตราส่วน D_y/D_x ที่วัดได้นั้นมีค่าใกล้เคียง 1 ดังแสดงในรูปที่ 6.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานในทุกกรณีที่ทำกรเปลี่ยนค่าความลึกร่องกรีดนั้นยังคงสามารถรักษาค่าความกลมไว้ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6.17 ความกลมของชิ้นงานที่ทำกรกรีดร่องด้วยค่าความลึกที่มีระยะแตกต่างกัน

6.2.4 พื้นผิวของขอบตัดเฉือน (The Sheared Surfaces)

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานซึ่งถูกตัดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 6.18 พบว่าชิ้นงานเกือบทั้งหมดนั้นมีรูปแบบการตัดขาดแบบปกติ (Simple shearing mode) แต่มีชิ้นงานเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ยังพบรูปแบบการตัดขาดด้วยรอยแตกที่สอง (Secondary shearing mode)



รูปที่ 6.18 ภาพถ่ายพื้นผิวของชิ้นงาน

6.3 สรุปการวิจัย

1. การกรัดร่องลงบนผิวแท่งเหล็กกล้าก่อนตัดนั้นจะทำให้แรงต้านการตัดเฉือนสูงสุดลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับการตัดเฉือนแบบปกติ และแรงต้านการตัดสูงสุดนี้จะมีค่าลดลงเมื่อความลึกร่องกรัดมีมากขึ้น

2. จากการเปรียบเทียบลักษณะของแรงต้านการตัดเฉือน พบว่าการกรัดร่องตามลักษณะที่ระบุไว้ในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลให้แท่งเหล็กกล้ามีพฤติกรรมการแตกหักขณะตัดเฉือนเปลี่ยนแปลงไป

3. เทคนิคการกรัดร่องสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพขอบตัดได้อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเทคนิคนี้สามารถช่วยลดโอกาสการเกิดครีบที่ยื่นออกนอกขอบตัดอีกทั้งยังช่วยป้องกันการเกิดส่วนโค้งมนบริเวณขอบตัดและช่วยรักษาความกลมของแท่งเหล็กกล้าบริเวณขอบตัดไว้ด้วย

4. ผลการจำลองค่า Effective stress ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้เกิดความเข้าใจได้ว่า การกรัดร่องส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรก่อนการตัดขาดในปริมาณที่น้อยและเกิดในบริเวณที่จำกัดใกล้ๆ ขอบตัดเท่านั้น ด้วยเหตุนี้การเกิดส่วนโค้งมน ณ บริเวณขอบตัดจึงน้อยมากและแท่งเหล็กกล้ายังคงรักษาความกลมไว้ได้ดีภายหลังการตัดเฉือน

5. เมื่อความลึกของร่องกรัดมีระยะเพิ่มมากขึ้น โอกาสในการเกิดครีบยาวที่ยื่นออกนอกขอบตัดนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง

6. พบว่าร่องกริดที่มีความลึกแตกต่างกันนั้นช่วยรักษาความกลมของแท่งเหล็กกล้าบริเวณขอบตัดไว้ได้อย่างสมบูรณ์และมีค่าใกล้เคียงกัน



บทที่ 7

สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อลักษณะของขอบตัดเฉือน พบว่าค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มีผลกระทบโดยตรงต่อบริเวณของส่วนโค้งมนและบริเวณของครีป กล่าวคือเมื่อค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มีค่ามาก จะส่งผลให้ขนาดของบริเวณทั้งสองของขอบตัดนั้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเสียรูปแบบถาวรก่อนการตัดขาดที่มากกว่าในกรณีที่ใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่น้อย และจากผลการจำลองทำให้ทราบว่าในกรณีที่ใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มาก ระยะการกดลึกของแม่พิมพ์ตัดซึ่งส่งผลให้ความเค้นหลักสูงสุดที่ในการตัดเฉือนมีค่าถึงค่าความเค้นวิกฤตได้ช้าดังนั้นขยายตัวของรอยแตกจึงสิ้นสุดได้ช้าส่งผลให้บริเวณส่วนโค้งมนที่ได้ในกรณีที่ใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์มากนั้นมีแนวโน้มสูงกว่ากรณีที่ใช้ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์น้อย นอกจากนี้การเสียรูปแบบถาวรที่เกิดขึ้นยังส่งผลให้แท่งเหล็กกล้าสูญเสียค่าความกลมในบริเวณขอบตัดด้วย

จากการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด พบว่าความเสียหายที่เกิดกับแม่พิมพ์บน ๓ บริเวณคมตัดในส่วนที่ติดกับของผิวหน้าแม่พิมพ์มีการสึกหรอที่มากขึ้นเมื่อแม่พิมพ์มีอายุการใช้งานสูงขึ้น และยังพบว่าค่าความลึกของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์บนนั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนความเสียหายในแม่พิมพ์ล่าง พบว่าความเสียหายในบริเวณที่ใกล้กับผิวหน้าของคมตัด เฉพาะฝั่งด้านล่างและเมื่อพิจารณาจากค่าความยาวนั้นมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ความลึกในความเสียหายของแม่พิมพ์ฝั่งล่างกลับมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อมีการใช้งานแม่พิมพ์ไปนานๆ และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลการสึกหรอที่ส่งผลกับขอบตัดพบว่าความยาวของส่วนโค้งมนและครีป รวมถึงความสูงของของครีปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจำนวนครั้งการตัดที่เพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้ในการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการกรีตร่องบนแท่งเหล็กกล้าก่อนทำการตัดเฉือนพบว่า ร่องกรีตหรือรอยบากที่เกิดบนพื้นผิวของเนื้อโลหะนั้นมีส่วนช่วยในการ ลดความต้านทานการแยกขาดออกจากกัน ช่วยรักษาค่าความกลมของขอบตัด และลดการเกิดครีปยื่นยาวออกนอกขอบตัด โดยจากผลการคำนวณค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) ณ บริเวณขอบตัด ซึ่งให้เห็นว่าการเสียรูปแบบถาวรของชิ้นงานที่กรีตร่องก่อนการตัดเฉือนนั้น เกิดขึ้นในบริเวณแคบๆ ใกล้รอยตัดเท่านั้นจึงเป็นผลให้ขอบตัดที่ได้มีค่าความกลมที่ดี และจากการศึกษาการตัดเฉือนชิ้นงานที่ทำการกรีตร่องโดยการเปลี่ยนแปลงความลึกของร่องกรีต พบว่าร่องกรีตที่ลึกขึ้นช่วยลดแรงต้านการตัดเฉือนสูงสุดและยังลดโอกาสในการเกิดครีปที่ยาวออกจากขอบตัด

รายการอ้างอิง

- เฉลิมพล คล้ายนิล. (2557). การศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบ Abrasive ของแม่พิมพ์ตัดสำหรับ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์).
- เฉลิมพล คล้ายนิล, จิณกมล ลุยจันทร์ และพงศกร หลีตระกูล. (2560). การศึกษาอิทธิพลของระยะ ช่องว่างคมตัดที่มีผลต่อพฤติกรรม การสึกหรอของแม่พิมพ์สำหรับการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Vol. 24, pp. 1 - 12.
- ชาญชัย ทรัพย์ากร, ประสิทธิ์ สวัสดิศรร์ และวิรุฬ ประเสริฐวรนนท์. (2551). การออกแบบ แม่พิมพ์. พิมพ์ครั้งที่ 21. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- นิรนาม. (2561). ทฤษฎีการตัดโลหะแผ่น [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/TEN437/main/e-learning/lessen/01/main.htm>.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555
- ภูมิต มิตรสุมหวัง. การขึ้นรูปโลหะ Metal Forming. นครราชสีมา, 2561.
- มนต์ศักดิ์ พิมพ์สาร. (2562). ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [ออนไลน์]. ได้จาก: http://eng.sut.ac.th/me/box/2_54/435301/IntroductionFEM.pdf
- วิวัฒน์ ดันติขจร โกศล. (2535). แม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปโลหะแผ่น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ศิริชัย ต่อสกุล และอนุชา วัฒนาภา. (2554). พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.
- Cheon, S. and Kim, N. (2016). Prediction of tool wear in the blanking process using updated geometry. *Wear*, Vol. 352-353, pp. 160 - 170.
- Fang, G., Zeng, P. and Lou, L. (2002). Finite element simulation of the effect of clearance on the forming quality in the blanking process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, pp. 249 - 254.
- Klocke, F. (2013). *Manufacturing Processes 4*. New York: Springer.

- Hambli, R. and Guerin, F. (2003). Application of a neural network for optimum clearance prediction in sheet metal blanking processes. *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 39, pp. 1039 - 1052.
- Hambli, R., Guerin, F. and Dumon, B. (2003). Numerical Evaluation of the Tool Wear Influence on Metal-Punching Processes. *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 483 - 493.
- Hans Weber Maschinenfabrik GmbH. (2019). Fine-blanking part machining. [On-line]. Available: <https://www.metallschleifmaschine.de/en/applications/weber-fine-blanking-part-machining/>
- Hatanaka, N., Yamaguchi, K. and Takakura, N. (2003). Finite element simulation of the shearing mechanism in the blanking of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, pp. 64-70.
- Hatanaka, N., Yamaguchi, K., Takakura, N. and Iizuka, T. (2003). Simulation of sheared edge formation process in blanking of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 628 - 634.
- Hilditch, T.B. and Hodgson, P.D. (2005). Development of the sheared edge in the trimming of steel and light metal sheet Part 1—Experimental observations. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, pp. 184- 191.
- Krinningera, M., Feistlea, M., Gollea, R. and Volk, W. (2017). Notch Shear Cutting of Aluminum Alloys. *Procedia Engineering*, Vol. 183, pp. 53 - 58.
- New Swan Pvt. Ltd. (2019). Fine Blanking Parts. [Online]. Available: <http://newswan.in/fine %20blank.htm>.
- Philipfigari. (2019). Steps to Analyzing a Material's Properties from Its Stress / Strain Curve [On-line]. Available: [https://www.instructables.com/id/Steps-to-Analyzing-a-Materials Properties-from-its/](https://www.instructables.com/id/Steps-to-Analyzing-a-Materials-Properties-from-its/).
- Picklesimer, S. (2018). It Keeps Going for a Long Time. [On-line]. Available: <http://www.tool-dynamics.com/literature/articles/005.php>.
- Quazi, T.Z. and Shaik, R.S. (2012). An Overview of Clearance Optimization in Sheet Metal Blanking Process. *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 2, pp. 4547-4558.

- Sachnik, P., Hoque, S.E. and Volk, W. (2017). Burr-free cutting edges by notch-shear cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 249, pp. 229 - 245.
- Tafmet Tadeusz Fita.(2019). EGR valve blanking plate with gaskets for Peugeot Citroen Ford Volvo Mazda 1.4 1.6 HDI TDCi CiTD. [On-line]. Available: <https://tafmet.pl/english/egr-valve-blanking-plates-with-gaskets/319-egr-valve-blanking-plate-with-gaskets-for-citroen-ford-volvo-mazda-1-4-16-hdi-tdci-citd-5902553475197.html>
- Tekiner, Z., Nalbant, M. and Gürün, H. (2006). An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal. *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 1134–1138.
- Totre1, A., Nishad, R. and Bodke, S. (2013). An Overview of Factors Affecting In Blanking.Processes. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, pp. 390 - 395.





วิธีการหาค่าแรงต้านการการตัดเฉือน (Cutting Load Resistance)

โดยทั่วไปแรงที่ใช้ในการตัดเฉือนนั้นสามารถวัดได้จากโพลดเซลล์ที่ติดอยู่กับเครื่อง Universal testing machine ซึ่งภายหลังการทดสอบนั้นจะได้ค่าแรงต้านการตัดเฉือนออกมา แต่ในกระบวนการตัดเฉือนโดยใช้แม่พิมพ์นั้นแรงที่วัดได้วัดจากอุปกรณ์วัดม็อมงค์ประกอบส่วนหนึ่งเป็นแรงของสปริงซึ่งมาจากสปริงที่ประกอบอยู่ในชุดแม่พิมพ์ตัด ดังนั้นการที่นำเฉพาะแรงต้านการตัดเฉือนมาใช้ในการวิเคราะห์นั้นผู้วิจัยได้กระทำโดยนำเอาค่าผลต่างของแรงต้านการตัดที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดกับแรงสปริงมาใช้ โดยแสดงการคำนวณดังนี้

$$(\text{ค่าแรงต้านการตัดเฉือนที่วัดได้จากอุปกรณ์}) - (\text{แรงสปริง}) = \text{แรงต้านการตัดเฉือน}$$

แรงสปริงสามารถหาได้จากค่าคงที่ของสปริงมาคูณกับระยะทางหรือระยะกดลึกลงของแม่พิมพ์ตัด เป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's Law) ดังนี้

$$(\text{แรงสปริง}, F_s) = (\text{ค่าคงที่ของสปริง}, K)(\text{ระยะการกดลึกลงของแม่พิมพ์ตัด}, S)$$

โดยค่าคงที่สปริงที่ใช้ในการทดสอบนี้หาค่าจากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการตัดกับระยะกดลึกลงในกรณีที่ทำกรตัดเฉือนโดยไม่ใส่ชิ้นงานในการทดสอบซึ่งมีค่าอยู่ที่ $K = 22.7$



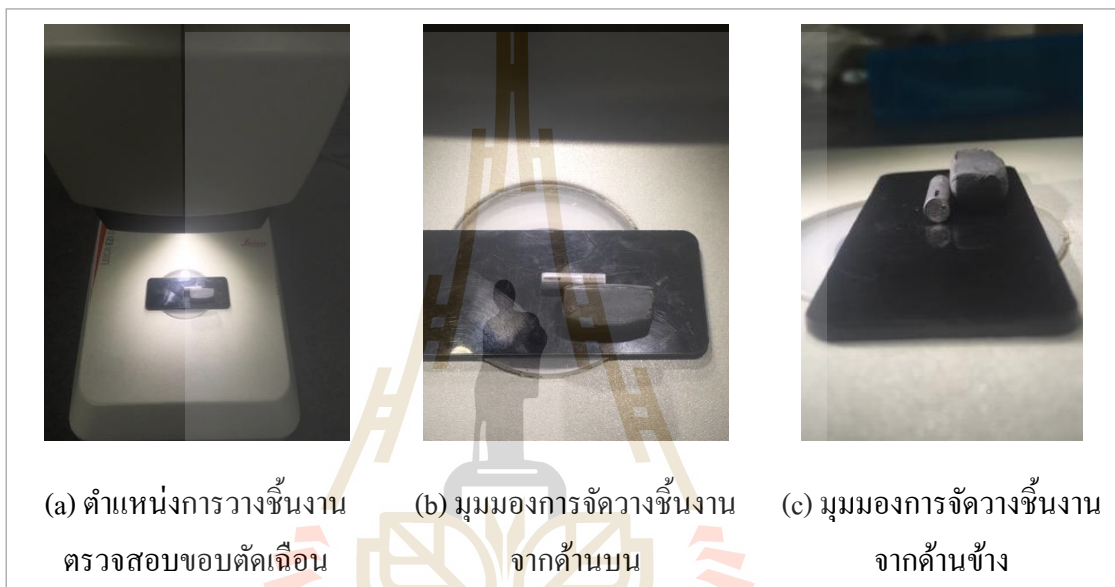
ภาคผนวก ข

การตรวจสอบขอบตัดเฉือนของชิ้นงาน (Investigation of Shear Edge)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การตรวจสอบขอบตัดเฉือนของชิ้นงาน (Investigation of Shear Edge)

ในการตรวจสอบขอบตัดเฉือนของชิ้นงานผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบโดยใช้ภาพถ่ายด้านข้างของชิ้นงานซึ่งมีการจัดวางตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ ข.1 (a-c) และตรวจสอบภาคตัดขวางดังรูป ข.2



รูปที่ ข.1 การตรวจสอบขอบตัดเฉือนของชิ้นงาน



รูปที่ ข.2 การตรวจสอบภาคตัดขวางของชิ้นงาน

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular base with a scalloped edge. Above the figure are several horizontal bars, resembling a ladder or a set of steps, arranged in a triangular pattern. The entire logo is rendered in a light, semi-transparent gold or beige color.

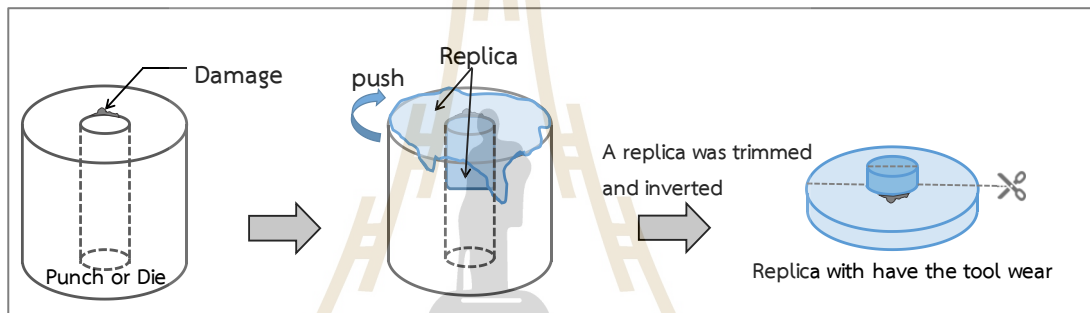
ภาคผนวก ค

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคการลอกลาย (Replica technique)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคการลอกลาย (Replica technique)

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคการลอกลายนั้นเป็นการตรวจสอบโดยอาศัยการลอกลายหรือการพิมพ์แบบออกมาจากชิ้นงานหรือวัสดุที่ต้องการตรวจสอบ โดยที่ชิ้นงานนั้นมีข้อจำกัดบางประการทำให้ไม่สามารถที่จะทำการตรวจสอบหรือวิเคราะห์จากชิ้นงานดั้งเดิมได้ เช่น กรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ไม่สามารถทำลายหรือตัดชิ้นส่วนไปวิเคราะห์ได้ หรือเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะที่ซับซ้อนมากเกินไปทำให้ไม่สามารถนำมาตรวจวิเคราะห์กับเครื่องมือวิเคราะห์ได้ ในขั้นตอนการลอกลายโดยใช้เทคนิคดังกล่าวถูกแสดงไว้ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ขั้นตอนการลอกลายโดยใช้เทคนิคการลอกลาย (Replica technique)

ขั้นตอนทำการลอกลาย

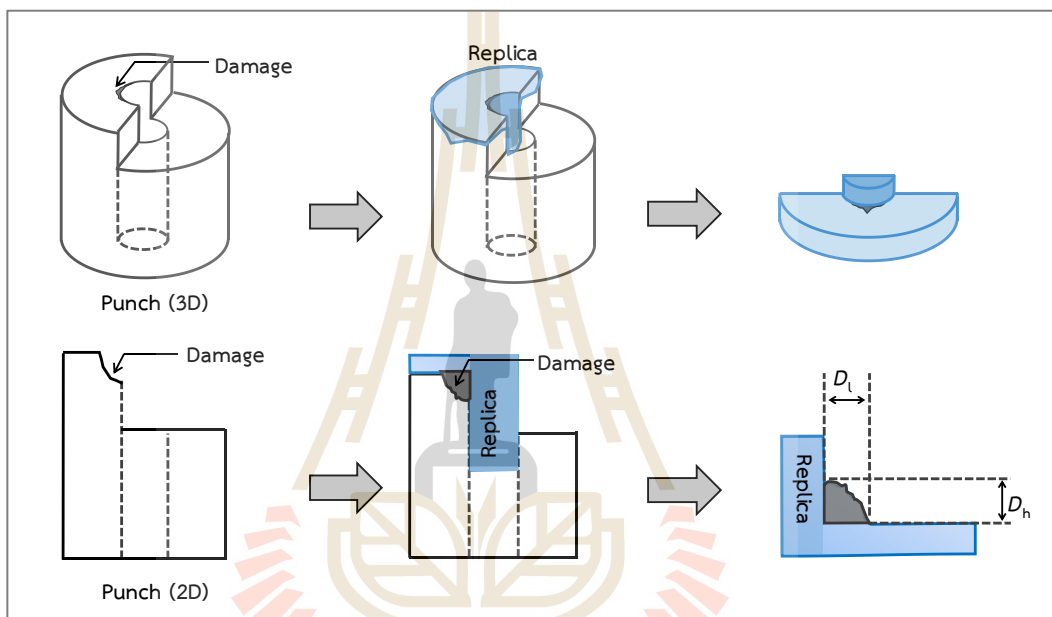
ขั้นแรก ทำความสะอาดชิ้นงานโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้ชิ้นงานปราศจากคราบน้ำมันและฝุ่นละออง

ขั้นที่สอง ฉีดเรพพลิกันบนพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ จากนั้นทิ้งไว้สักครู่ จนเรพพลิกันเริ่มแข็งตัว

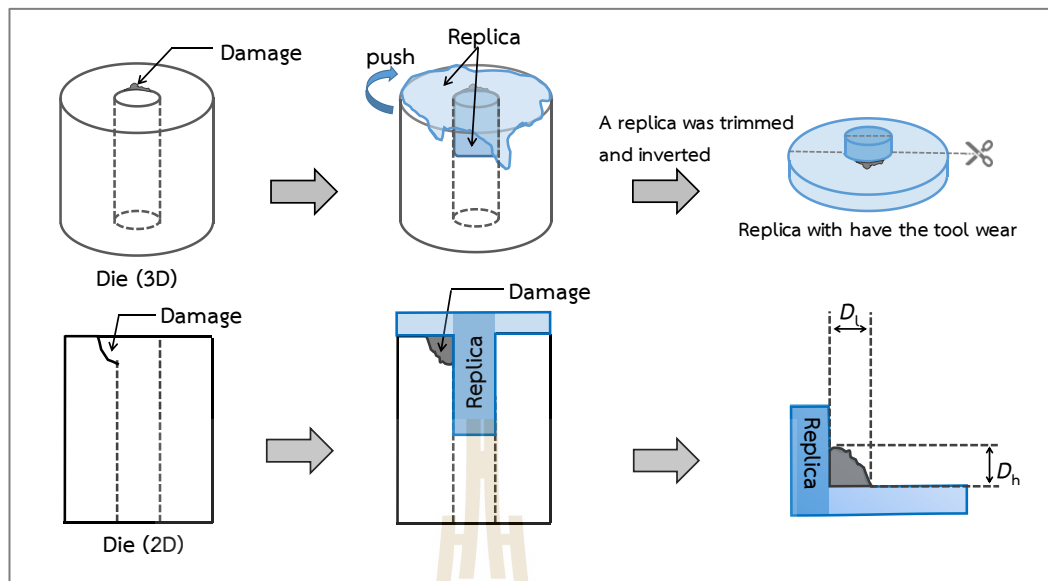
ขั้นสุดท้าย ทำการลอกเรพพลิกันออกอย่างระมัดระวัง ไม่ให้ขาด จากนั้นตัดแต่งชิ้นงานส่วนเกินออกไปเพื่อให้ชิ้นงานพร้อมสำหรับการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบการสึกหรอ

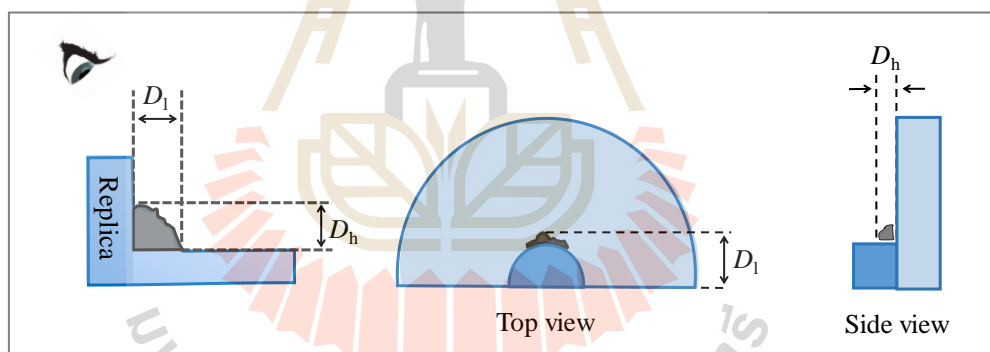
จากการใช้เทคนิคการลอกด้วยแม่พิมพ์ฝังพันซ์ดังแสดงในรูปที่ ค.2 และแม่พิมพ์ฝังตาย ดังแสดงในรูปที่ ค.3 ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบรูปแบบการสึกหรอออกมาในรูปแบบตัวแปรสองตัวคือ ความยาวการสึกหรอ (D_l) และความสูงของการสึกหรอ (D_h) โดยมุมมองการวิเคราะห์ค่าการสึกหรอจากตัวแปรนั้นใช้มุมมองด้านบน (Top view) และมุมมองด้านข้าง (Side view) เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.2 การลอกตายจากแม่พิมพ์ (พันซ์)



รูปที่ ค.3 การลอกฉายจากแม่พิมพ์ล่าง (ตาย)



รูปที่ ค.4 มุมมองการวิเคราะห์ห้ด้านบน (Top view) และมุมมองด้านข้าง (Side view)



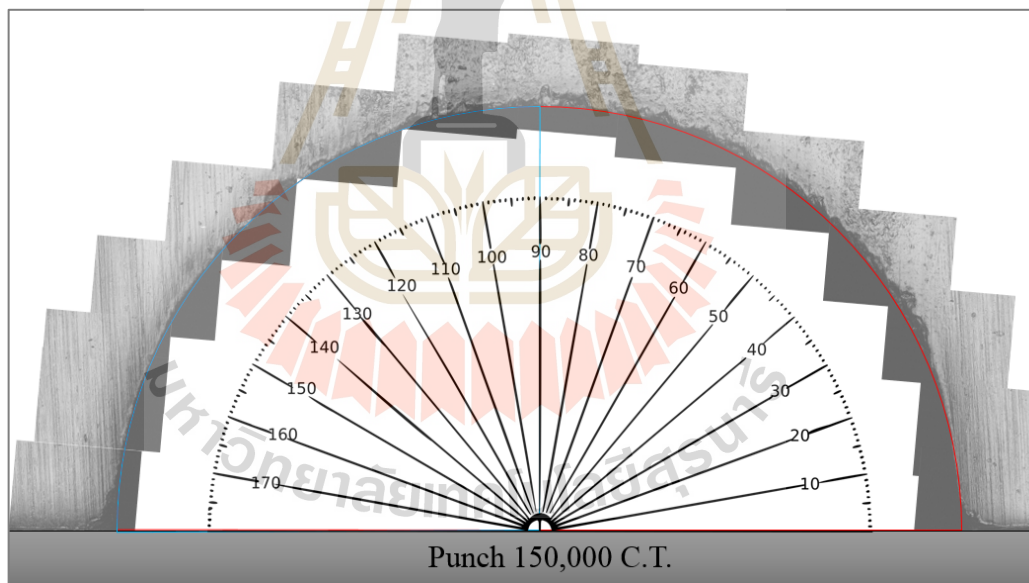
ภาคผนวก ง

การตรวจวัดและวิเคราะห์ผลความเสียหายของแม่พิมพ์

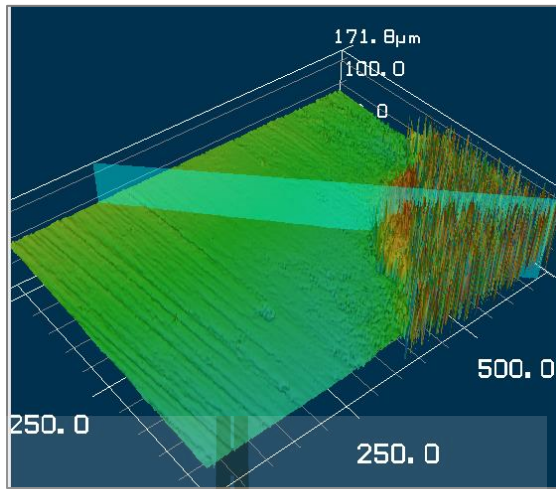
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การตรวจวัดและวิเคราะห์ความเสียหายของแม่พิมพ์

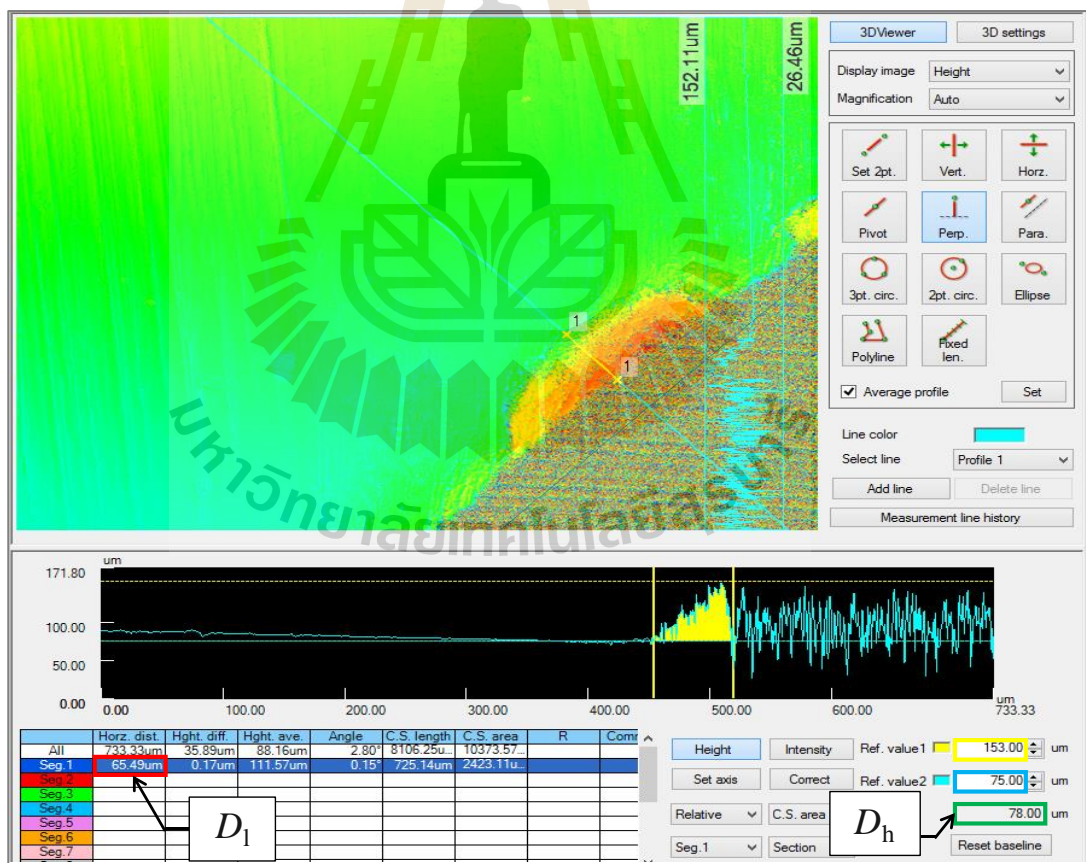
ในขั้นตอนการตรวจวัดความเสียหายจากแม่พิมพ์โดยใช้การสแกน 3 มิติด้วยเลเซอร์ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดความเสียหายที่เกิดกับแม่พิมพ์ตัดทั้งพื้นที่และคายจากชิ้นงานลอกตาย เนื่องจากแม่พิมพ์ตัดนั้นมีขนาดที่ใหญ่เกินกว่าจะทำการตรวจสอบได้ จากการตรวจวัดผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดโดยใช้การระบุตำแหน่งความเสียหายเทียบกับการใช้พิกัดของเครื่องวงกลมดังแสดงในรูปที่ ข.1 จากนั้นจึงทำการวัดขนาดของความเสียหายโดยใช้ซอฟต์แวร์ VK Analyzer ซึ่งมีการวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานที่ตรวจสอบในรูปแบบ 2 และ 3 มิติ จากการใช้เครื่องมือระนาบตั้งฉากจากโปรแกรมมาช่วยในการระบุตำแหน่งประกอบกับการวิเคราะห์ตำแหน่งจากรูปถ่าย 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ ข.2 ทำให้สามารถวิเคราะห์ขนาดของความเสียหายทั้งความยาว (D_v) และความสูง (D_h) ของความเสียหาย ที่เกิดกับแม่พิมพ์ตัดได้ดังแสดงในรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.1 การระบุตำแหน่งความเสียหายเทียบกับการใช้พิกัดของเครื่องวงกลมของแม่พิมพ์ตัดซึ่งผ่านการใช้งานที่ 150,000 ครั้ง



รูปที่ ๓.2 ภาพพื้นผิวแม่พิมพ์แบบ 3 มิติ



รูปที่ ๓.3 การวิเคราะห์ความเสียหายในแม่พิมพ์โดยใช้ซอฟต์แวร์ VK Analyzer



ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- Natpukkana, P., Pakinsee, S., Boonmapat, S., Mitsomwang, P., Borrisutthekul, R., Panuwannakorn, R. and Khoa-phong, L., (2018), **Investigation of Notch Shear Cutting for JIS SCM420 Steel Wire Rod**, 3rd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies (AMRMT 2018), The Ramada Shanghai Wujiaochang, Shanghai, China, August 10-13, 2018, pp. 1-7.
- Natpukkana, P., Mitsomwang, P., Borrisutthekul, R., Panuwannakorn, R. and Khoa-phong, L., (2018), **Effects of Cutting Parameter on Edge Feature of Steel Rod Cut by Punch/Die Shearing**, 343rd International Conferences on Metallurgy Technology and Materials (ICMTM), Baiyoke Boutique, Bangkok, Thailand, March 11-12, 2018, pp.39-45.
- Mitsomwang, P., Natpukkana, P., Borrisutthekul, R. and Nagasawa, S., (2017), **Effects of Blade Tip Geometry on Cutting Characteristics of Lead Alloy Sheet Subjected to Wedge Indentation**, Key Engineering Materials, Vol. 719, pp. 137-141.

Investigation of Notch Shear Cutting for JIS SCM420 Steel Wire Rod

P Natpukkana^{1,*}, S Pakinsee¹, S Boonmapat¹, P Mitsomwang¹, R Borrisutthekul¹, R Panuwannakorn² and L Khoa-phong²

¹School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University avenue, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²Thai Motor Chain Co., Ltd., 7/138 M.4, Amata City Industrial Estate, Pluakdaeng, Rayong, 21140, Thailand

*pusit@sut.ac.th

Abstract. This paper aims to study the notch shear cutting of JIS SCM420 steel wire rod. In the notch shear cutting experiment, the wire rod specimens were initially notched on the surfaces using a sharp insert installed at a lathe turning machine. Then, the specimens were cut off using the punch/die shearing tool. After the shear cutting, the sheared edge features of the wire rod were investigated and compared with the results obtained from the conventional shear cutting. In addition, the geometry of the notch, the notch depth, was varied ranging from approximately 333 to 537 μm and studied. The experimental results revealed that the cutting load resistance significantly decreased with the notch shear cutting technique. The roll over and the size of the burr zones also decreased, compared to the conventional shear cutting. This technique also improved the quality of the sheared edge in term of the roundness of the wire rod. Concerning the notch depth, it was a primary factor affecting the cutting results, especially the cutting load resistance and the occurrence of the long burr protruded from the surface of the wire rod. The improvement of the sheared edge quality by the notch shear cutting seemed to be caused by the suppression of the plastic deformation of the wire rod during shearing.

1. Introduction

Metal wire rods, especially steel wire rods, are important raw materials for large numbers manufacturing such as the production of roller chains, needle roller bearings, screws, bolts, etc. The steel wire rods are typically available in the form of long products (wire rod coils) and subjected to the punch/die shear cutting in order to cut off into designed length for their subsequent manufacturing. Normally, the edge of sheared product consists of different four zones, i.e. the roll over, the burnish, the angular fracture and the burr zones [1]. Among these, the features of the roll over and the burr zones which are resulted by the plastic deformation of the sheared rod during shearing seem to strongly affect the applications of the sheared products. For example, in the assembly of the roller chain using the steel sheared pin, when a large burr forms at the sheared edge of the pin, it cannot be assembled with the link plate of the chain.

There are researchers concentrating their studies on the features of the roll over and the burr zones with respect to the mechanical conditions of the shear cutting process. G Fang and N Hatanaga studied the effects of punch/die clearance on the sheared edge features of aluminum alloy and mild steel sheets. They showed that the roll over and the burr zones tended to be larger when increasing the

punch/die clearance [2-3]. Z Tekiner studied the effects of the punch/die clearance on the cutting results of the aluminum alloy sheet. They revealed that the clearance affected the roll over, the burnish and burr zones. Namely, when the clearance increased, the roll over depth and burr length increased, while the burnish zone decreased [4]. T Kwak applied a finite element analysis to study the effects of the die clearance on the shear cutting results. From the simulation, the width and the depth of the roll over increased with the die clearance, while the burnish zone decreased with the shearing parameter [5].

In order to improve the sheared edge quality of sheet metals, especially to suppress the formation of the burr zone, the shear cutting of pre-notched sheets was carried out by some researchers. M Kringinger studied the notch shear cutting of an aluminum alloy sheet. In this study, the notches were prepared on the aluminum alloy surfaces before subjecting it to the punch/die shearing tool. From the results, the cutting load resistance and the size of the burr zone decreased when increasing the depth of the notch [6]. P Sachnik carried out the notch shear cutting of DC04 steel, 1.4301 steel, AA6014 aluminum alloy and CuSn6 alloy sheets and investigated. The experimental and simulation results revealed that the possibility of the burr formation and the burr geometries depended on the mechanical properties of the sheared sheets, the position of the notch tip and the depth of the notch [7].

From the above literature, the notch shear cutting seems to be an effective method for improving the quality of the sheared edge in term of the burr reduction. However, those research results are based on the metal sheet shearing (two-dimensional deformation) and not sufficient for understanding the features of the sheared edge of the wire rods which are deformed in three-dimension during the shear cutting. In this work, the authors aim to investigate the notch shear cutting of a wire rod. The JIS SCM420 steel wire rod was chosen as the investigation material. The features of the sheared edge were examined and compared with those obtained by the conventional shear cutting. In addition, the effects of the notch depth on the notch shear cutting results were studied.

2. Material and experimental conditions

For the shear cutting experiment, a JIS SCM420 steel wire rod which had a diameter of 4.48 mm was chosen. The mechanical properties of the JIS SCM420 steel are reported in Table 1. The shear cutting specimens were prepared to have a length of 31 mm. To investigate the notch shear cutting of the wire rod, the specimens were notched in the circumference with a sharp insert installed at a lathe turning machine.

Table 1. Mechanical properties of JIS SCM420 steel rod [8].

Properties	Metric
Young's modulus (GPa)	210
Tensile strength (MPa)	790
Yield strength (MPa)	380
Poisson's ratio	0.3

Figure 1 represents the punch/die shearing tool and the specimen configuration for the shear cutting experiment. During cutting, the punch was moved downward by the pushing head of an universal testing machine. The load cell (Capacity: ± 100 kN) was installed at the machine for measuring the cutting load resistance. The main cutting tools, the punch and the die were made of a high-speed tool steel which had a hardness of approximately 62 HRC. The cutting tools were hold in the die jacket made from a plain carbon steel. The clearance between the edges of the punch and the die was adjusted to be 40 μm . The movement velocity of the punch (the cutting speed) was fixed as 5 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

The geometry of the notch, its depth, was varied ranging from 333 to 537 μm . The variation of the notch depth was obtained by altering the feed distance of the insert into the surface of the wire rod in the notching step. Apart from the notch shear cutting, the conventional shear cutting of the wire rods

was also carried out in order to examine the differences between the two cutting techniques. To do the conventional shear cutting, the wire rod specimen without notch was subjected to the same punch/die shearing tool. Other shearing parameters were the same as those explained above. The shear cutting was performed five times for each condition. After cutting, the features of the sheared edge were investigated using an optical microscope and an image analysis software, VW-9000. In addition, to evaluate the change in the sectional profile of the wire rod due to the shear cutting, the roundness at the sheared edge of the wire rod was measured.

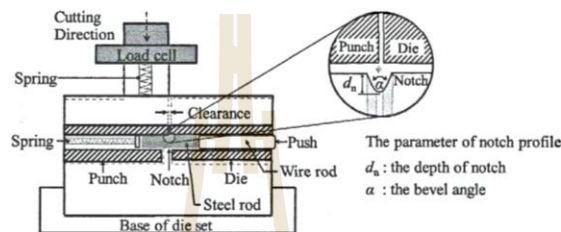


Figure 1. Experimental setup of notch shear cutting.

3. Cutting results of JIS SCM420 wire rod

3.1 Notch punch/die shear cutting versus conventional shear cutting

To investigate the notch shear cutting of the steel wire rod, the notch, which had a depth d_n and a bevel angle α of 426 μm and 50° was made on the surface of the wire rod before shearing.

3.1.1 Cutting load resistance of wire rod Figure 2 shows the relationship between the cutting load resistance (f) and the indentation depth of the punch (d) for the notch and the conventional shear cutting. Here, the indentation depth d was defined to be zero, when the surface of the punch touched the upper surface of the specimen during the shear cutting. As seen in this figure, the cutting load resistance at the shallow indentation depth, $0 < d < 0.4$, was similar for the two cutting cases. Seeing the peak load resistance, the maximum load resistance (f_{Max}) in the case of the notch shear cutting was significantly lower than that of the conventional shear cutting case. However, the peak position (d_{Peak}) of the cutting load resistance was similar for both cutting cases. Considering the position where the wire rod separated (d_{sep}), it was seen that the separation position was earlier when applying the notch shear cutting technique. In addition, from the characteristic of the cutting load, the drop of the load resistance from the peak point for the two shearing cases was fairly similar. This seemed to indicate that the notch on the wire rod surface did not completely change the fracture behavior of the sheared wire rod. However, the notch resulted in the reduction of separation resistance, remarkably.

3.1.2 Sheared edge features of wire rod Figure 3 shows the side-view images of the sheared rods from the conventional and the notch shear cutting. As seen in this figure, the large roll over zone was observed in the case of the conventional shear cutting, while this zone did not form in the case of the notch shear cutting. Typically, the roll over is caused by the plastic deformation of the rod before its separation. Since the notch made on the wire rod surface reduced the separation resistance of the rod, the plastic deformation during shearing reduced. The reduction of the plastic deformation seemed to remarkably suppress the formation of the roll over.

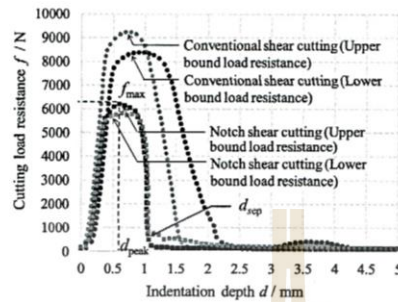


Figure 2. Load resistance of steel rod for conventional and notch shear cutting.

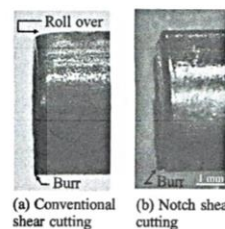


Figure 3. Side-view images of sheared wire rods cut by conventional and notch shear cutting.

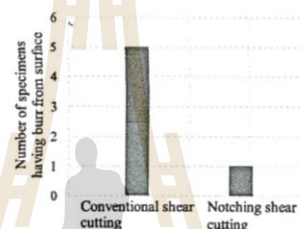


Figure 4. Number of specimens having burr protruded from surface of wire rod for conventional and notch shear cutting.

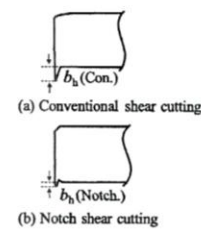


Figure 5. Definition of $b_h(\text{Con.})$ and $b_h(\text{Notch.})$.

Apart from the difference of the roll over zone, seeing the burr at the sheared edge, it was found that, in the case of the conventional shear cutting, the long burr protruded from the surface of the wire rod formed, as seen in figure 3 (a). In the case of the notch shear cutting, as seen in figure 3 (b), the burr at the sheared edge seemed to still generate, but it was shorter than the depth of the notch and did not protrude from the surface of the wire rod.

Next, the authors furthermore investigated the occurrence of the burr protruded from the surface of the wire rod. Figure 4 shows the number of the specimens having the burr protruded from the surface of the wire rod for the conventional and the notch shear cutting. As shown in this figure, the protruded burr was observed in all the wire rods sheared with the conventional shear cutting, while it was observed at only one wire rod cut using the notch shear cutting technique.

The geometry of the burr was furthermore investigated. Here, the length of the burr for both shear cutting cases ($b_h(\text{Con.})$ and $b_h(\text{Notch.})$, as defined in figure 5) were measured. In the case of the conventional shear cutting, the length of the burr protruded from the surface of the wire rod $b_h(\text{Con.})$ was measured as $89.73 \mu\text{m}$ ($160.05 \sim 63.22 \mu\text{m}$), while the length of the protruded burr $b_h(\text{Notch.})$ for the case of the notch shear cutting was significantly shorter. Namely, it was approximately $26.70 \mu\text{m}$.

From figures 3 and 4, the notch shear cutting technique was confirmed to be an effective technique for improving the quality of the sheared edge, especially in terms of the reductions of the roll over size, the possibility of the long burr formation, and the length of the burr protruded from the surface of the sheared wire rod.

3.1.3 Roundness of sheared wire rod The roundness at the sheared zone is an important property of the sheared wire rod. It is always considered, when the sheared rods are assembled with small holes or other components. Therefore, in this study, the authors investigated the roundness of the sheared wire

rod when applying the notch shear cutting technique. To evaluate the roundness of the sheared edge, the images of the sheared surfaces from both shearing cases, as shown in figures 6 (a) and (b), were prepared. Then, the vertical and the horizontal distances of the sheared edge, D_y and D_x shown in figure 6 (c), were measured. After that, the D_y/D_x ratio was calculated. In the case of the sheared specimens having the burr protruded from the surface of the wire rod, the length of the protruded burr was excluded from the distance D_y before calculating the D_y/D_x ratio.

Figure 7 shows the roundness at the sheared zone of the wire rod, compared to the roundness of the steel wire rod before shear cutting. From this figure, it was found that, in the case of the conventional shear cutting, the average D_y/D_x ratio was 0.977. This value indicated that the wire rod tended to be laterally deformed during shearing. In this shearing case, the lateral deformation deteriorated the roundness of the sheared wire rod. Considering the case of the notch shear cutting, the average D_y/D_x ratio was nearly 1.00 and equal to that of the raw wire rod. It was indicated that the wire rod almost did not deform in the both directions. Then, the roundness of the sheared wire rod could be kept to be the same as that of the raw material.

For the case of the conventional shear cutting, since the separation resistance of the wire rod was higher, the sheared zone of the wire rod underwent the large amount of the plastic deformation before the separation. This seemed to be a mainly cause of the poor roundness. On the other hand, in the notch shear cutting case, the notch made on the steel wire rod reduced the separation resistance. Then, the plastic deformation at the sheared zone during the shearing reduced. As a result, the roundness of the sheared zone was kept and superior, compared to that of the conventional shear cutting case.

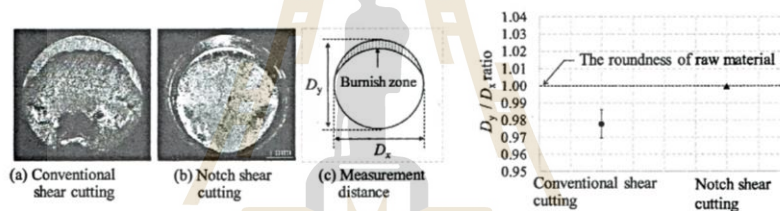


Figure 6. Sheared surface of wire rod and measurement distances for roundness.

Figure 7. Roundness at sheared edge of wire rod for conventional and notch shear

3.2 Effects of notch depth on notch shear cutting results of wire rod

After knowing the effectiveness of the notch shear cutting for the wire rod, the effects of the notch geometry, the depth of the notch was varied and investigated. To vary the depth, the feed distance of the insert into the wire rod was altered as 750, 950 and 1000 μm . However, since the wire rod elastically deformed during making the notch, the actual depth of the notch was slightly lower than the feed distance. Namely, the actual depths d_n of 333, 426 and 537 μm were obtained from the applied feed distances. For this investigation, the bevel angle of the notch was fixed to be 40°.

3.2.1 Effects of notch depth on cutting load resistance of wire rod Figure 8 shows the cutting load resistance when varying the notch depth of 333, 426 and 537 μm . It was seen that the f_{Max} was significantly decreased with increasing the depth of the notch. For the position d_{Peak} , it occurred at a shallower indentation depth when increasing the notch depth. Seeing the separation position of the wire rod, it appeared to be invariant when varying the depth of the notch. From this cutting load resistance, it was indicated that the separation resistance of the wire rod significantly decreased with increasing the notch depth. However, from the characteristic of the load drop, the final fracture of the wire rod did not change with the notch depth.

3.2.2. *Effects of notch depth on sheared edge features of wire rod* Figure 9 shows the representative side-view photographs of the sheared edges for the cases of $d_n = 333, 426$ and $537 \mu\text{m}$. As seen in this figure, the roll over was not observed for all notch depths. Next, seeing the lower side of the sheared edge, for the shallow notch, $d_n = 333$ and $426 \mu\text{m}$, the burr protruded from the wire rod surface seemed to be observed. However, when the notch depths increased to $537 \mu\text{m}$, the protruded burr tended to be absent.

Figure 10 represents the possibility of the protruded burr occurrence when varying the notch depth. From this figure, it was found that the possibility of the protruded burr formation decreased remarkably, when the notch depth increased from $333 \mu\text{m}$ to 426 and $537 \mu\text{m}$. From the protruded burr length measurement, the tendency of the length with respect to the notch depth was not observed. Here, the average length $b_{\text{Burr(Notch)}}$ was $36.77 \mu\text{m}$ ($50.73 \sim 22.48 \mu\text{m}$), $48.46 \mu\text{m}$ ($63.45 \sim 33.48 \mu\text{m}$) and $34.33 \mu\text{m}$ ($40.43 \sim 28.23 \mu\text{m}$) for the notch depths of $333, 426$ and $537 \mu\text{m}$, respectively. From the non-monotonic tendency of the protruded burr length, it indicated that there was a large variation of the protruded burr length, when varying the notch depth.

3.2.3. *Effects of notch depth on the roundness of wire rod* Figure 11 shows the sheared surface of the wire rod for the difference notch depth, while figure 12 represents the plot of the D_y/D_x ratio for various notch depths. From figure 12, the ratio was almost equal to one for all notch depth conditions. It was indicated that the roundness of wire rod could be kept and was not deteriorated due to the shear cutting, when varying the notch depth.

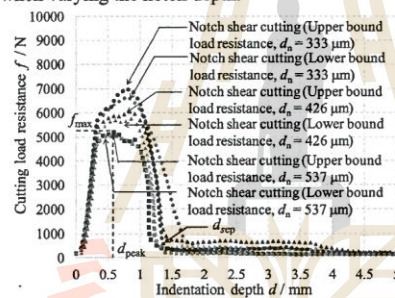


Figure 8. Load resistance of steel rod cut by various depths of notch ($\alpha \approx 40^\circ$).

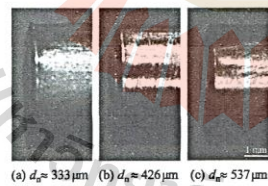


Figure 9. The Side-view photographs of sheared wire rods for depth of notch ($\alpha \approx 40^\circ$).

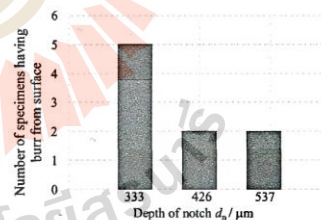


Figure 10. Number of specimens having burr protruded from surface of wire rod for notch depth.

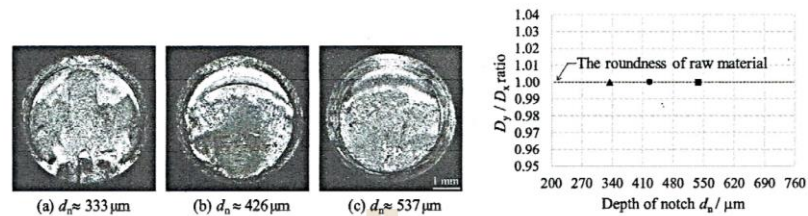


Figure 11. Sheared surface of wire rod for notch depth.

Figure 12. Roundness at sheared edge of wire rod for notch depth.

4. Conclusions

- 1) The notch shear cutting remarkably improved the quality of the sheared wire rod in terms of the roll over, the protruded burr length reductions and the keep of the roundness of the wire rod. Also, the possibility of the protruded burr formation decreased by the technique.
- 2) The sheared edge improvement of the notch shear cutting seemed to be resulted by the small plastic deformation of the wire rod during shearing. The plastic deformation remarkably suppressed due to the low separation resistance of the pre-notched wire rod.
- 3) The roll over at the sheared edge of the wire rod did not occur for all notch depths.
- 4) When the notch depth was varied, the possibility of the protruded burr formation tended to decrease. However, the tendency of the burr length with respect to the notch depth was not observed.
- 5) The roundness of the sheared wire rod could be kept and was similar when varying the notch depth.

References

- [1] Natpukkana P, Mitsomwang P, Borrisutthekul R, Panuwannakorn R and Khoa-phong L 2018 *Proc. Int. Conf. (Bangkok)* pp 20–26
- [2] Fang G, Zeng P and Lou L 2002 *J. Mat. Pro.Tech.* **122** pp 249–54
- [3] Hatanaka N, Yamaguchi K and Takakura N 2003 *J. Mat. Pro.Tech.* **139** pp 64–67
- [4] Tekiner Z, Nalbant M and Gür ün H 2006 *Mat. Design.* **27** pp 1134–38
- [5] Kwak T.S., Kim Y.J. and Bae W.B. 2002 *J. Mat. Pro.Tech.* pp 462–68
- [6] Kringnera M, Feistlea M, Gollea R and Volka W 2017 *Procedia Eng.* **183** pp 53–58
- [7] Sachnik P, Hoque S and Volk W 2017 *J. Mat. Pro.Tech.* **249** pp 229–45
- [8] Lee K.O., Kima J.M., Chin M.H. and Kang S.S. 2007 *J. Mat. Pro.Tech.* **182** pp 65–72

EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON EDGE FEATURES OF STEEL ROD CUT BY PUNCH/DIESHEARING

¹PIRAPA NATPUKKANA, ²PUSIT MITSOMWANG, ³RATTANA BORRISUTTHEKUL,
⁴RUNGNAPA PANUWANNAKORN, ⁵LERTCHAI KHAO-PHONG

^{1,2,3}School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University
avenue, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

^{4,5}Thai Motor Chain Co., Ltd., 7/138 M.4, Amata City Industrial Estate, Pluakdaeng, Rayong,
21140, Thailand

E-mail: ¹pirapa_nat@outlook.com, ²pusit@sut.ac.th, ³rattana@g.sut.ac.th, ⁴jimmy@tmcchain.com,
⁵lertchai@tmcchain.com

Abstract - Typically, the edge features of steel rod cut by punch/die shearing determine the quality and the application of the sheared products. In this study, the authors aim to investigate the effects of a shearing parameter, punch/die clearance, on the cutting load resistance and the edge features of sheared rod. A JIS SCM420 steel rod was chosen as the material for the investigation. The punch/die clearance was experimentally varied from 40 to 250 μm . Cutting results, the cutting load resistance, the features of sheared edges, were examined. In addition, the finite element method (FEM) analysis was conducted to simulate the stress distribution in the sheared rod. From the investigation results, it was found that the sizes of rollover and the burr zones formed at the sheared edge significantly increased with the clearance. Also, from the shearing simulation, the variation of the rollover zone size seemed to be explained by the maximum principal tensile stress near the edge of the cutting tools.

Index Terms - Three-Dim. Cutting, Rod, Shearing, Burr, Wear

I. INTRODUCTION

The punch/die shearing process is widely used to cut off raw materials to semi-finished and net-shape products in many material forming industries. This process has various advantages such as high stability, high productivity, low operation cost and low environmental pollutions. Generally, the quality of sheared products strongly depends on the features of the sheared edge which consists of four different zones, i.e. rollover, burnished surface, angular fracture and burr zones. During these several decades, there were many researchers studying the effects of cutting parameters on the sheared edge features of metallic materials. G. Fang [1] investigated the blanking process of an aluminum alloy sheet based on both experiment and numerical analysis. The studies showed that the punch/die clearance strongly influenced the cutting load resistance, shear edge feature, especially the rollover and burr zones. Namely, the sizes of both zones tended to be increased when increasing the clearance. N. Hatanaka [2], [3] conducted the blanking experiment and its FEM simulation for a mild steel sheet. In this work, the crack initiation in the worksheet near the tool corners was found to occur at a shallower indentation when using smaller punch/die clearance. Similar to the case of the aluminum alloy sheet shearing, as explained previously, they also found that the increase of the clearance resulted in the increase of the rollover and burr sizes. Z. Tekiner et al. [4] studied the effects of clearance and thickness of the aluminum alloy sheet on blanking force, and sheared

surface. They revealed that the application of the small clearance generated the large smooth-sheared surface and small burr. However, the cutting with the small clearance required higher shearing force. T. B. Hilditch [5] subjected different metallic sheet materials, aluminum and magnesium alloy sheets, to the punch/die trimming and investigated their cut edges. They found that the mechanical properties of the sheet material strongly affected the features of the sheared edge. The zig-zag fracture was observed at the sheared edge in the case of magnesium alloy sheet shearing. The mentioned research results confirmed that the shear cutting parameters, especially the punch/die clearance strongly affected the feature of sheared edges of materials.

Anyway, the above results are based on the shearing of sheet materials which their deformation during cutting mainly occurs in a plane (Two-dimensional deformation). However, in many industries, e.g. chain, rod-like bearing and metal forging manufacturing, long metal rods are needed to be cut into parts using the punch/die shearing process. Due to the geometry of the rods, the three-dimensional deformation occurs when they are subjected to the punch/die shearing. From a literature survey, the authors found that there are almost no reports explaining the effects of shearing parameters on the cutting characteristics for the rod-type materials.

Thus, in this research work, the authors aim to investigate the effects of shearing parameter on the

cutting characteristic of rod specimen. A steel rod was chosen as the specimen. The cutting load resistance and the features of the sheared edges were investigated when varying the punch/die clearance. Moreover, to further discuss about the effects of the clearance on the sheared edge features, a three-dimensional FEM model was developed and used to simulate the steel rod shearing.

II. EXPERIMENTAL INVESTIGATION

Material, shearing tools and experimental conditions
 In the shearing experiment, a JIS SCM420 steel rod which had a diameter D_0 of 4.48mm was chosen. The mechanical properties of the steel rod are shown in Table 1. To obtain the shearing specimens, the raw steel rod was cut to have a length L_s of 31 mm.

Properties	Metric
Young's modulus (GPa)	210
Tensile strength (MPa)	517
Yield strength (MPa)	365
Poisson's ratio	0.30
Elongation at break (in 50 mm)	33%

Table 1 Mechanical properties of JIS SCM420 steel [6]

In order to cut off the rod specimens, the punch/die shearing apparatus shown in Fig. 1 was used. During the shearing, the punch was moved downward by the pushing head of an universal testing machine. The load cell (Capacity:100 kN) was installed for measuring the cutting load resistance. The cutting tools, punch and die, as shown in the figure, were made of a high-speed tool steel (JIS SKH51) which had a hardness of approximately 62 HRC. These tools were installed in the die case made from a plain carbon steel. There were springs used to lift up the punch when the specimen was completely cut. The stiffness of the springs was $22.7 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$. The cutting speed was fixed as $5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

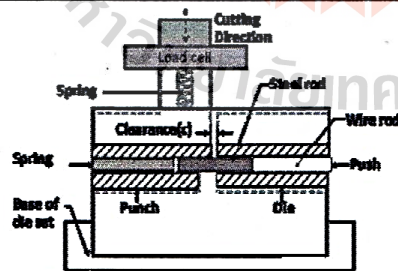


Fig.1 Experimental setup for shearing of steel rod

For the experimental investigation, the punch/die clearance was varied to be 40, 100 and 250 μm . For each clearance case, the shear cutting was carried out five times (using five specimens). After cutting, the sheared profile parameters illustrated in Fig. 2 were measured using an optical microscope and a scanning electron microscope (SEM). In the figure, R_h and R_l were the rollover height and length, while B_h and B_l were burr height and burr length.

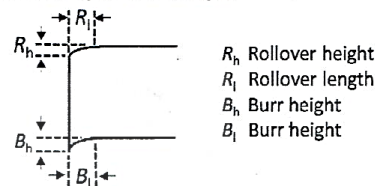


Fig. 2 Sheared profile parameters of steel rod

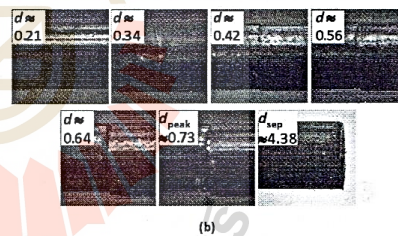
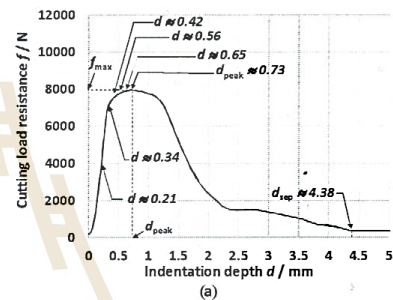


Fig.3 Relationship between deformation of steel rod and distance (a) Load resistance of steel rod and (b) The deformation of steel rod

A. Cutting load resistance and deformation of sheared rod

In order to understand the relationship between the cutting load resistance and the deformation of the sheared rod, the experiment of partial indentation cutting was conducted. Here, the punch/die clearance C was chosen as 40 μm . Fig.3(a) shows the relationship between the cutting load resistance and the indentation depth of punch. As represented in this figure, the indentation depth of zero indicated the

position where the lower surface of the punch touched the upper surface of the specimen. Fig. 3(b) shows the side-view photographs of the sheared rods at various indentation depths. From these figures, it was found that at a shallow indentation, $0 < d < 0.34$, the specimen deformed elastically. There were not any cracks on the sheared rod, as shown in Fig. 3(b) at $d \approx 0.21$. When the indentation depth increased to $d \approx 0.34$, the plastic deformation of the sheared rod which was observed from the rollover zone occurred. Then, at $d \approx 0.42$, the crack initiation was observed on the upper and lower surfaces of the sheared rod. When increasing the indentation depth from $d \approx 0.42$ to 0.64 , the surface separation of the rod by shearing mechanism seemed to be occurred. As the indentation depth increased in this range, the size of the roll over zone increased, continuously. At the peak point of the cutting load resistance f_{peak} , the growth of the rollover zone tended to be stopped, as seen in Fig. 3(b) at $d \approx 0.73$. Also, at this indentation depth, the propagation of the cracks on the surfaces started. At the final shearing stage, the propagation proceeded until the sheared rod completely separated at d_{sep} . After reaching this position, the sheared edge had the feature shown in Fig. 3(b) at d_{sep} .

B. Effects of punch/die clearance on cutting load resistance

Fig. 4 shows the relationship between the cutting load resistance and indentation depth of punch d when varying the punch/die clearance. From this figure, it was found that the cutting load resistance in the elastic deformation stage did not vary with the clearance. However, the cutting load resistance after the elastic deformation stage until the final separation appeared to be remarkably affected by the clearance. Then, the authors furthermore compared the characteristics of the cutting load resistance when changing the shearing parameter. First, considering the peak point of cutting load resistance, as shown in Fig. 5, the average peak point of cutting load resistance f_{peak} was varied ranging from 8689 to 8867 N and seemed to have no monotonic tendency when varying the clearance. Next, seeing the position where the peak point of cutting load resistance occurred, d_{peak} , as plotted in Fig. 6, its average value seemed to be not much varied for the clearance ranging from 40 to 100 μm . However, when increasing C to 250 μm , d_{peak} significantly increased, compared to that of the smaller clearance. This result indicated that the position at which the growth of the rollover zone stopped were significantly postponed when the shear cutting was conducted with the large punch/die clearance.

Fig. 7 represents the relationship between the separation position of the sheared rod and the

punch/die clearance. From this figure, the average d_{sep} appeared to be decreased when increasing the clearance. In addition, in the cases of $C = 40$ and 100 μm , it was found that the variation of the d_{sep} was remarkably large, compared to the shearing with the largest clearance. This seemed to be caused by the mix of these separation modes of the sheared workpiece which had different d_{sep} . It was discussed furthermore with the SEM photographs of the sheared surfaces, in section II D.

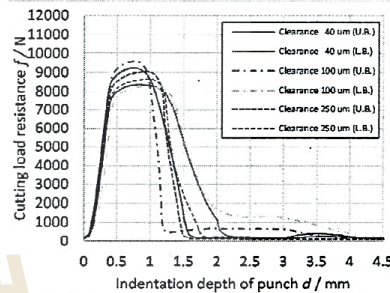


Fig. 4 Load resistance (N) of steel rod

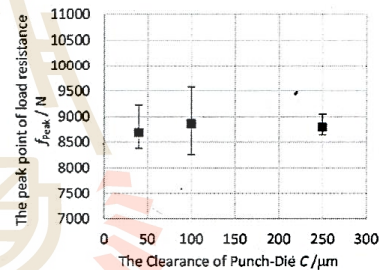


Fig. 5 The maximum of load resistance f_{peak}/N

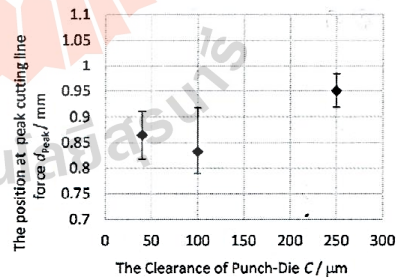


Fig. 6 The position of maximum load resistance, d_{peak}/mm

C. Sheared edge features

Fig. 8 shows the side-view photographs of sheared edges for the punch/die clearances of 40, 100 and 250

μm . This figure revealed that the flatness of the sheared edge tended to be deteriorated when shearing using larger clearance.

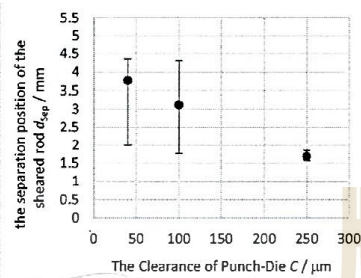


Fig.7 The position of maximum load resistance, /mm

Moreover, seeing the features of the rollover and the burr zones, they seemed to be remarkably affected by the clearance. Fig. 9 shows the relationship between the rollover height and length when varying the clearance. This result showed that the height and the width appeared to linearly increase with the clearance. Their relationships were expressed by equations 1 and 2, respectively.

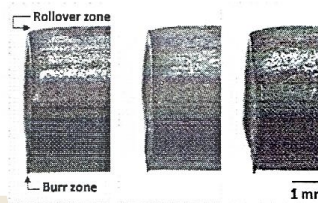
$$R_l = 1.32C + 1166 \quad (1)$$

$$R_h = 0.53C + 121.98 \quad (2)$$

Also, the burr zone occurred at the sheared edge was investigated. Fig. 10 shows the relationship between the burr height (B_h) and length (B_l). As seen in this figure, the burr size represented by B_h and B_l appeared to be increased with the punch/die clearance. From Figs. 9 and 10, it was confirmed that under the condition of the three-dimensional deformation, as in the rod shearing, the sheared edges features were strongly affected by the punch/die clearance.

Fig. 11 shows the SEM photographs of the sheared surfaces when varying the punch/die clearance. Based on the SEM investigation result, the authors found that there were two different separation modes of the sheared rod when varying the clearance from 40 to 100 μm . The first one was the separation mode of the rod with the secondary shearing. For this separation mode, the sheared surface had the feature represented in Fig. 11(a). At the upper side of the sheared edge, its high magnification photograph shows a fairly smooth surface. This seemed to be occurred by the shearing of the surface areas of the rod when the punch indented into the sheared rod at the initial cutting stage, as explained in section II B. The lower zone, next to the smooth surface, was quite rough. This surface seemed to be caused by the cracks propagation when the indentation depth of the punch increased. Then, at the position below the rough surface, a small area of the smooth sheared surface

was observed, again. This revealed that there was a portion near the center of the rod which was separated by the shearing near the final cutting stage of the rod. This material separation is called "Secondary shearing". At the lowest zone of the sheared surface, the rough surface resulted by the crack propagation was detected. The separation with the secondary sheared mode occurs when the surface cracks propagate but, they do not meet each other when increasing the indentation depth of punch. Consequently, there is a remaining portion of the material near the center of sheared zone which is cut off by shearing in the final cutting stage.



(a) $C=40 \mu\text{m}$ (b) $C=100 \mu\text{m}$ (c) $C=250 \mu\text{m}$

Fig. 8 Side-view of steel rod deformation profile

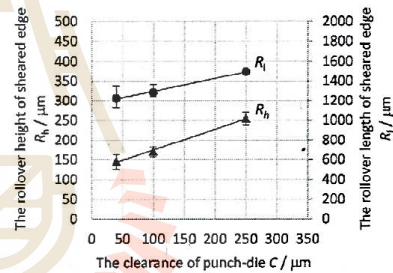


Fig. 9 Relationship between clearance and Rollover height, R_h , and Rollover length, R_l

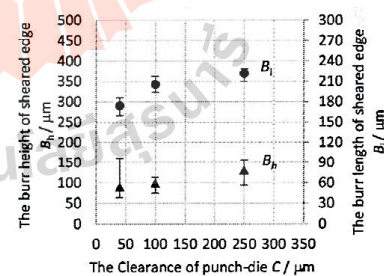


Fig. 10 Relationship between clearance and Burr length, Burr height, B_h

The second separation mode was the simple shearing. When the rod was cut off with this separation mode,

the sheared surface had simpler feature, as shown in Fig. 11 (c). Seeing the high magnification photographs taken from the upper side of the sheared surface, the smooth surface resulted by the shearing at the initial cutting stage was detected. Next to the smooth sheared zone, the rough surface caused by the crack propagation was observed. This zone appeared until the lowest side of the sheared surface. In the simple shearing mode, it is occurred when the initiated surface cracks propagate and meet each other at the final cutting stage.

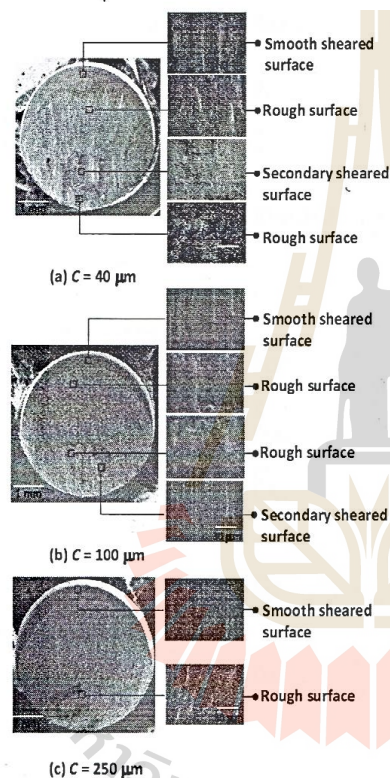


Fig.11 Cross-section view of steel rod deformation

From the shearing experiment, in the cases of $C = 40$ and $100 \mu\text{m}$, both separation modes were observed. Namely, 60% of the shearing samples was cut off by the separation with the secondary shearing, while 40% of the samples was cut off by the simple shearing mode. However, when the clearance of $250 \mu\text{m}$ was applied, all the samples were cut off by the simple shearing mode.

Apart from the features of the sheared edge, the separation modes seemed to affect the characteristic of the cutting load resistance at the final cutting stage. Namely, in the separation with the secondary shearing, since a sufficiently high cutting force is needed for the secondary shearing at the final cutting stage, a prolonged cutting load resistance occurred after the large load drop from the d_{Peak} . This resulted in the postponement of separation position d_{Sep} . For the simple shearing mode, the cutting load resistance tended to suddenly drop from d_{Peak} to d_{Sep} without the prolonged load resistance. From the dependence of d_{Sep} with respect to the separation modes, the large variation of d_{Sep} in the cases of $C = 40$ and $100 \mu\text{m}$, as shown in Fig. 7 seemed to be understood. In these two clearance cases, the separation with the secondary shearing resulted the upper bars of d_{Sep} , while the lower bars of d_{Sep} were caused by the separation by simple shearing. In the case of $C = 250 \mu\text{m}$, since all samples were cut off with the simple shearing mode, the variation of d_{Sep} was diminished.

III. FINITE ELEMENT SIMULATION INVESTIGATION

A. FEM modelling conditions

To simulate the shearing of the steel rod by the FEM analysis, the Simufact forming software version 12.0.3 was employed. A half-three-dimensional FEM model for the steel rod shearing was developed, as showing in Fig. 12. For this analysis, the 4.48 mm (rod diameter) of the steel rod was assumed to be deformable body and was constructed using tetrahedral element. The total numbers of the elements were 21000. The cutting tools, the punch and the die, were assumed to be rigid bodies. The material properties of the steel rod were assumed to be isotropic elasto-plastic with work hardening. Such data was obtained from the material database of the simulation software used. During shearing simulation, typically, elements in the sheared zone were highly distorted. This caused the unstable and stop of the calculation. To overcome, the automatic remeshing function was used to regenerate new normal elements. To describe the touching contact at the interfaces between the workpiece and the cutting tools, the coulomb friction model with the friction coefficient of 0.03 was assumed. No damage model was considered. The punch/die clearance was varied to be 40, 100 and 250 μm .

B. Simulation for analyzing rollover zone size

The rollover formed at the sheared is one of the important edge features affecting the application of the sheared products. Therefore, in this research work, the FEM simulation was conducted focusing of the discussion with the variation of the rollover zone size.

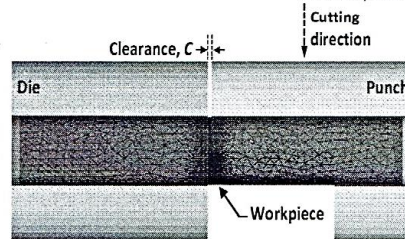


Fig.12 Three-dimensional FEM model for steel rod shearing

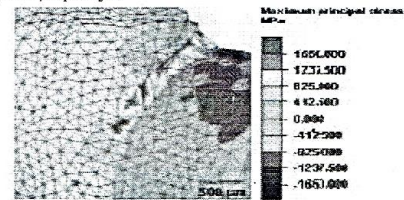
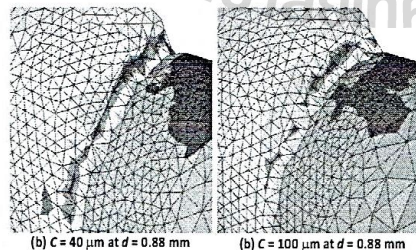


Fig.13 FEM result of steel rod

From the rollover measurement result shown in Fig. 9, the size of the rollover represented by the parameters, B_h and B_l , significantly increased with the clearance. As explained using the partial indentation cutting result, the growth of the rollover zone seemed to be stopped when the propagation of the initiated surface cracks started. Thus, to study the effects of the clearance on the size of the rollover zone, the maximum principal tensile stress at the edge of the punch was investigated at the positions where the surface cracks started to propagate, at d_{Peak} .

Fig.13 represents the contour band diagrams of the maximum principal stress for each clearance case.

From this figure, it was found that the maximum principal tensile stress for the crack propagation for all clearance cases, was in the range of 825~1237MPa. This stress range was represented by red bands in the figure and was called "the critical stress". In addition, this result revealed that the maximum tensile stress seemed to be reached the critical stress earlier when the smaller clearance was applied. This result seemed to explain the variation of the rollover size with respect to the clearance. Namely, in the case of the small clearance, $C = 40 \mu\text{m}$. The critical stress was reached at the shallower indentation depth of punch. Then, the growth of the rollover zone stopped earlier. Consequently, the rollover zone appeared to be smaller. Under the condition of large clearance, i.e. $C = 250 \mu\text{m}$, since the stress reached the critical range late, compared to the case of the small clearances, the growth of the rollover zone prolonged. This seemed to result in the larger rollover zone.



(a) $C = 40 \mu\text{m}$ at $d = 0.88 \text{ mm}$

(b) $C = 100 \mu\text{m}$ at $d = 0.88 \text{ mm}$

CONCLUSION

This research work was carried out in order to investigate the effects of the punch/die clearance on the cutting characteristics of the steel rod subjected to the punch/die shearing. From the experiment and the FEM simulation, the following conclusions were obtained:

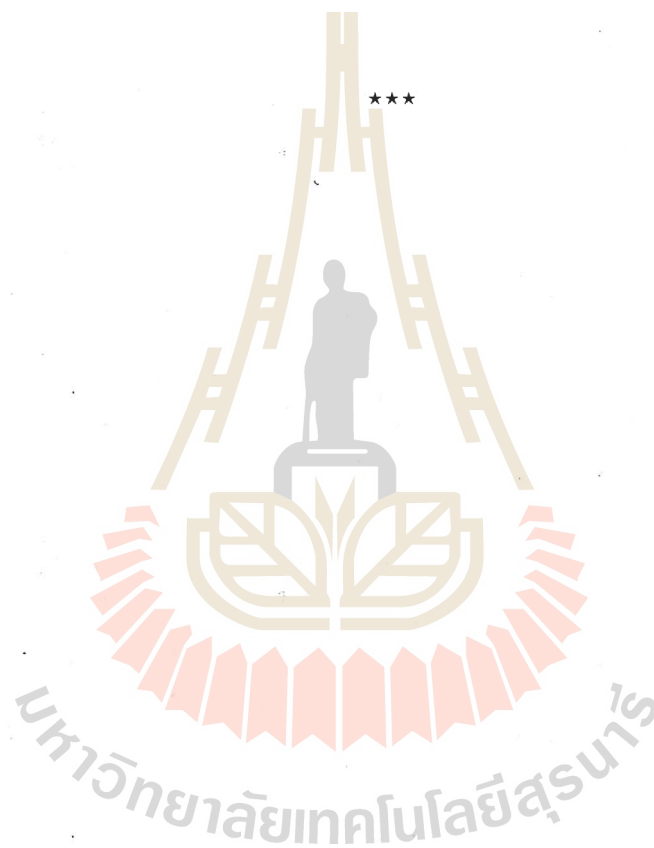
- I) The cutting load resistance appeared to be affected by the clearance, especially the peak and the separation position of the cutting load resistance.
- II) The rollover height and length increased with the clearance. Also, the burr height and length were found to be increased when employing the larger clearance.
- III) The punch/die clearance was a factor determining the separation mode of the sheared rod. Under the small clearance condition, the rod was cut off by the simple shearing mode and the separation with the secondary shearing mode. When the clearance increased, only the simple shearing mode was observed. Also, it was found that the cutting load resistance at the final cutting stage and the sheared surface of the steel strongly depended on the separation mode.
- IV) The FEM simulation revealed that the large rollover zone in the case of the large clearance occurred because the maximum principal stress near the tool edges reached the critical tensile stress late, compared to the case of small clearance. As a result, the growth of the rollover zone prolonged.

REFERENCES

- [1] G. Fang, P. zeng and L. Lou, "Finite element simulation of the effect of clearance on the forming quality in the blanking process," *Journal of material processing technology*, vol. 122, pp. 249-254, 2002.
- [2] N. Hatanaka, K. Yamaguchi and N. Takakura, "Finite element simulation of the shearing mechanism in the blanking of sheet metal," *Journal of material processing technology*, vol.139, pp. 64-67, 2003.
- [3] N. Hatanaka, K. Yamaguchi, N. Takakura and T. Iizuka, "Simulation of sheared edge formation process in blanking of sheet metals," *Journal of material processing technology*, vol.140, pp. 628-634, 2003.

International Journal of Mechanical and Production Engineering, ISSN(p): 2320-2092, ISSN(e): 2321-2071
Volume- 6, Issue-5, May-2018, <http://iraj.in>

- [4] Z. Tekiner, M. Nalbant and H. Gürün, "An experiment study for the effect of different clearance on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal," *Material and design*, vol. 27, pp. 1134-1138, 2006.
- [5] T.B. Hilditch and P.D. Hodgson, "Development of the sheared edge in the trimming of steel and light metal sheet Part 1-Experimental observation," *Journal of material processing technology*, vol. 169, pp. 184-191, 2005.
- [6] Otai special steel, "ASTM A29 4118 Steel-SCM420-18CrMo4-1. 7243," Available from : <http://www.astm steel.com> [2017, Dec 20]



Effects of Blade Tip Geometry on Cutting Characteristics of Lead Alloy Sheet Subjected to Wedge Indentation

Pusit Mitsomwang^{1,a}, Pirapa Natpukkana^{1,b}, Rattana Borrisutthekul^{1,c}
 and Shigeru Nagasawa^{2,d}

¹School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology,
 111 University avenue, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,
 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188, Japan

^apusit@sut.ac.th, ^bpipara_nat@outlook.com, ^crattana@sut.ac.th, ^dsnaga@mech.nagaokaut.ac.jp

Keywords: Wedge indentation, Cutting, Shearing, Sheet forming, Finite element analysis

Abstract. This research work was carried out aiming to investigate the cutting characteristics of a soft metallic sheet subjected to the wedge blade indentation. The indentation of a lead alloy worksheet was conducted, experimentally using a center bevel blade in order to reveal the experimental background of the indentation. In addition, to investigate the effects of the blade tip geometry, the bevel angle of the wedge blade, on the cutting characteristics of the worksheet, the finite element method (FEM) analysis was conducted. By varying the bevel angle, the critical levels of stresses for the necking of the worksheet were detected. Also, it was found that the bevel angle affected the cutting load resistance, the necking of the worksheet and the final feature of the wedged edge.

Introduction

The wedge indentation process is widely used for cutting sheet materials such as paperboards, resin sheets, protective films, etc. into design shapes. This method possessed various advantages such as high productivity, low operation cost and so on. However, the cutting characteristics of worksheets including the feature of cut edges are strongly sensitive to the mechanical parameters of the process. Thus, to obtain the flawless cut, the understanding of the effects of the parameters is crucial.

There are many researchers focusing their studies on the wedge indentation cutting of laminate paperboards. Murayama et al. investigate the indentation of paperboard by varying the tip thickness of the wedge blade. They found that the initial breaking of the indented surface related to the first peak point of the cutting load resistance measured during cutting and postponed when using the blade which had larger tip thickness [1]. Also, the final wedged edge of the paperboard was revealed to be affected by the bevel angle of the blade, namely the incline angle of the edge and the size of the wear zone increased with the bevel angle [2].

Apart from the fragile-laminate paperboard, the wedge indentation has also been applied for cutting off resin and metallic sheet materials. McCarthy et al. numerically analyzed the wedge indentation of a polyurethane sheet. By varying the blade geometries, they reported that the cutting load resistance at the initial cutting position increased with the blade tip radius and the bevel angle of the wedge blade [3]. Murayama et al. investigated the cutting mechanism of an aluminum alloy sheet subjected to the indentation process. The necking of the worksheet was remarkably affected by the tip thickness of the blade [4]. Hatanaka et al. detected the different fracture modes of an aluminum alloy sheet cut by the wedge shape tool. The ductile fracture due to the in-plane tensile force changed to the brittle fracture when the wedge angle increased to a certain value [5]. The increase of the bevel angle in the aluminum alloy cutting also resulted in the increase of the incline angle of the wedged edge [6].

The above research results are useful for understanding the cutting characteristics of various sheet materials. However, they seem to be insufficient for explaining the cutting characteristics of very soft metallic materials due to the difference in their mechanical properties and deformation behaviors. To date, there are almost no research works investigating the indentation cutting of very soft metallic

materials. Thus, in this work, the authors intend to investigate the wedge indentation cutting of a soft metallic material, a lead alloy sheet. The wedge indentation experiment was conducted. Moreover, in order to investigate the effects of the blade tip geometry, i.e. the bevel angle of the wedge blade on the cutting characteristics of the worksheet, a FEM analysis for the indentation cutting was conducted.

Wedge indentation experiment of lead alloy sheet

In the experiment, a lead alloy sheet which had a 0.6 mm of thickness was used as the specimen. The in-plane mechanical properties of the worksheet are listed in Table 1. Before cutting, the worksheet was prepared to have a width and a length of 20 and 70 mm, respectively. A center bevel wedge blade which had a bevel angle of 42° was employed. Fig. 1 represents the experimental set-up and the geometry of the blade tip. The cutting speed of the movable cross head was fixed to be $0.05 \text{ mm}\cdot\text{sec}^{-1}$. The cutting load resistance and the side-view deformation of the worksheet were recorded by a load cell and a high speed camera. The cutting test was carried out using 10 specimens. After cutting, the feature of the wedged edge was examined by a scanning electron microscope (SEM).

Table 1 In-plane tensile properties of lead worksheet.

Young's modulus E [MPa]	Yield strength (0.2% offset) σ_{YS} [MPa]	Tensile strength σ_{TS} [MPa]	Breaking Strain ϵ_{Break}
2456	5.31	17.26	0.224

Remarks: (i) Speed of moving cross head: $1.00 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
(ii) Standard of testing: Based on JIS-K7127

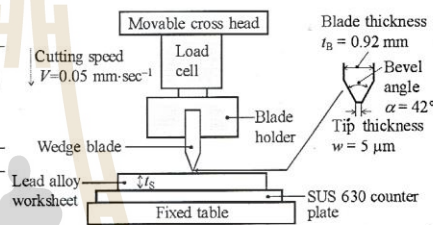


Fig. 1 Experimental set-up for cutting and wedge blade geometry.

Fig. 2 shows the cutting load resistance of the worksheet. Here, the normalized indentation depth $d/t_s = 0$ was defined as the position where the blade tip touched the upper surface of the worksheet. In order to investigate the deformation of the worksheet relating to the load resistance, the side-view photographs of the worksheet at some indentation depths of the blade, as shown in Fig. 3, were extracted from the recorded video. From Figs 2 and 3, the deformation behavior of the worksheet was revealed as follows: (i) at the initial indentation, $0 < d/t_s < 0.06$, the blade tip did not indent into the worksheet. However, the first gradient of the load resistance was detected. This seemed to be caused by the out-of-plane deformation of the mounds on the uneven worksheet surface. (ii) For $0.06 \leq d/t_s \leq 0.88$, the blade indented into the worksheet and the small crack occurred near the blade tip, as seen in Fig. 3 (c). The load resistance linearly appeared to increase with the indentation depth. In this range of indentation depth, the second gradient of the load resistance was observed. (iii) As the indentation depth increased to $d/t_s \approx 0.89$, the peak point of the cutting load resistance f_{Max} occurred. Seeing Fig. 3 (d), at this indentation position, the necking of the worksheet was observed near the lower surface of the worksheet. The position where the necking of the worksheet occurred was specified by d_{Neck}/t_s . (iv) After passing through the f_{Max} , the necking of the worksheet enlarged until the worksheet completely separated, as seen in Fig. 3 (f). The breaking position was denoted by d_{Break}/t_s .

After cutting, a wedged portion of the worksheet was subjected to the SEM to investigate the feature of the wedged edge. In order to discuss about the effect of the mechanical parameters on the wedged edge, the profile parameters, i.e. the incline angle (β), the height (h_n) and the length (l_n) of the necking zone were measured using an image analyzer. Figs 4 (a) and (b) show the SEM image of the wedge edge and the definitions of the profile parameters. Here, the average β was 23.5° (varying from 18.2 to 27.2°), while the parameters h_n and l_n were measured as $65.2 \mu\text{m}$ (varying from 21.2 to $102.3 \mu\text{m}$) and 0.88 mm (varying from 0.62 to 1.5 mm), respectively.

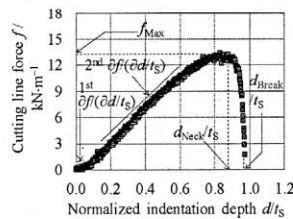


Fig. 2 Relationship between cutting line force and indentation depth of wedge blade.

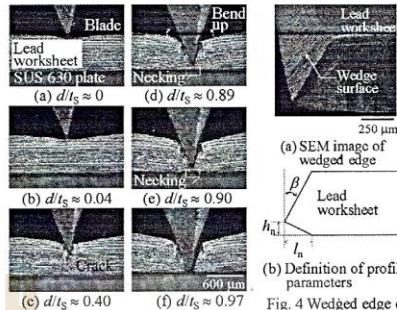
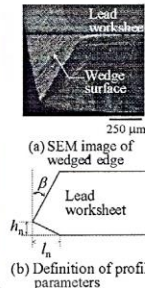
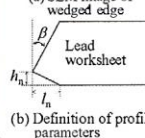


Fig. 3 Side-view photographs of worksheet.



(a) SEM image of wedged edge



(b) Definition of profile parameters

FEM analysis of indentation cutting

Modelling conditions. In this work, the authors aimed to investigate the effects of the bevel angle of the blade on the cutting characteristics of the worksheet. To do so, the FEM analysis was performed using the MARC/MENTAT version 2012.1.0. A symmetry two-dimensional FEM model shown in Fig. 5 was developed to simulate the indentation of the worksheet. The worksheet was assumed to be deformable body and was modeled using the four-node plane strain quadrilateral element. The indented zone of the worksheet was constructed using fine elements. They had a side length of 10 μm. The far zone of the worksheet was constructed using coarser elements. The fine and the coarse element zones were connected each other using a glue contact function. The deformable worksheet was assumed to be isotropic elasto-plastic with work hardening, as shown in Fig. 6. This constitutive equation was determined based on the uni-axial tensile testing result of the worksheet. For the wedge blade and the counter plate, they were assumed to be rigid body.

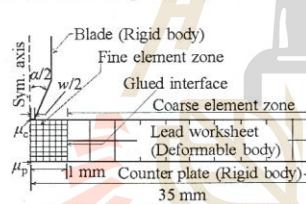


Fig. 5 Two-dimensional FEM model for indentation cutting.

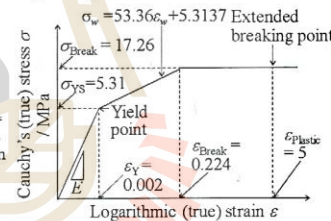


Fig. 6 Material model for lead alloy worksheet.

During the indentation, a large number of elements in the wedged zone deformed, largely. As a result, the calculation tended to be fault due to the crushing of elements. To overcome the problem, an automatic meshing function was used to re-generate new faultless elements. To consider the friction at the contacting interfaces including the blade/worksheet (μ_c) and the worksheet/counter plate (μ_p) interfaces, the coulomb \tan^{-1} friction model with the relative-slipping velocity threshold of 0.01 was assumed. The friction coefficients μ_c and μ_p were assumed to be 0.5 and 0.6, respectively. These values were assumed based on the typical range of the friction coefficient between lead alloys and steels [7]. In the indentation simulation, no damage model was considered.

Verification of developed FEM model. The verification of the developed FEM model was performed by comparing the simulation results, as shown in Fig. 7. Seeing Fig. 7 (a), the simulated load resistance was similar with the experiment, except for the initial gradient of the cutting load resistance. This mismatch occurred because the out-of-plane deformation of the mounds on the

worksheet surface was not considered in the FEM simulation. Also, as seen in Fig. 7 (b), the profile parameters simulated by FEM was in good agreement with the experimental results. This comparison confirmed that the FEM model was applicable for simulating the indentation cutting of the worksheet.

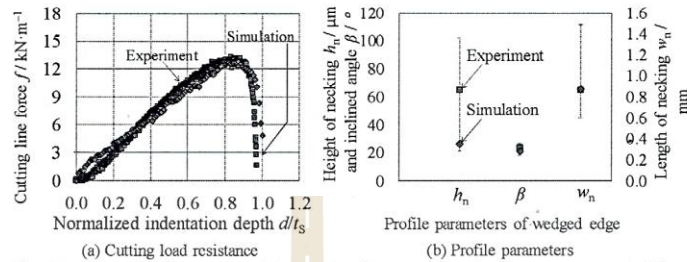


Fig. 7 Cutting load resistance of worksheet and profile parameters of wedged edge (Exp. conditions: $\alpha = 42^\circ$, $V = 0.05 \text{ mm}\cdot\text{sec}^{-1}$, Sim. conditions: $\alpha = 42^\circ$, $\mu_c = 0.5$, $\mu_p = 0.6$).

Effects of bevel angle of wedge blade. After the verification, the model was used to simulate the indentation of the worksheet when varying the bevel angle. The angle was varied as 30° , 42° and 60° , while the friction coefficients μ_c and μ_p were fixed to be 0.5 and 0.6, respectively. Figs. 8 and 9 show the load resistance and the profile parameters of the worksheet with respect to the bevel angle of the blade. From these figures, the cutting characteristics were revealed as follows: (i) the gradient of the load resistance for $0 < d/l_s < d_{\text{neck}}/l_s$ increased with the bevel angle. (ii) When increasing the bevel angle, the peak point of the load resistance increased. (iii) The necking position of the worksheet was postponed when increasing the bevel angle. For $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, the relationship between d_{Neck}/l_s and α was expressed by Eq. (1). (iv) The bevel angle did not affect the breaking position of the worksheet.

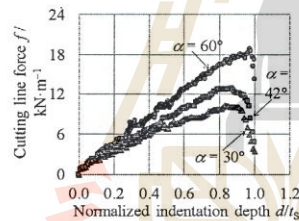


Fig. 8 Simulated cutting line force for bevel angle of blade.

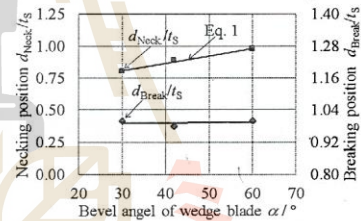


Fig. 9 Simulated necking and breaking positions for bevel angle of blade.

$$d_{\text{Neck}}/l_s = 0.006\alpha + 0.63 \tag{1}$$

For the indentation cutting, since the necking plays an important role on the feature of the wedged edged, the authors furthermore analyzed the necking of the worksheet. To do so, the vector diagrams of the 1st maximum σ_{p1} (circle-end vector) and 2nd minimum σ_{p2} (diamond-end vector) principal stresses were plotted at d_{Neck}/l_s for each bevel angle case, as shown in Fig. 10. The red and the blue vectors drawn in the figure represent the tensile and compressive stresses, respectively. Investigating the magnitude of the stresses near the necking zone, the critical stress levels for the necking were found to be $\sigma_{p1} = 30.7 \sim 33.8 \text{ MPa}$ and $\sigma_{p2} = 11.1 \sim 14.1 \text{ MPa}$. From the calculated stresses in all bevel angle cases, it was understood that the necking of the worksheet delayed when increasing the bevel angle because the stresses in the worksheet reached the critical levels for the necking lately.

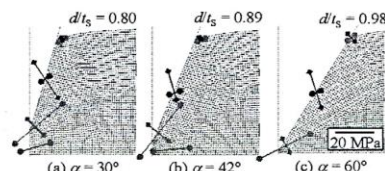


Fig. 10 Vector diagrams of σ_{p1} and σ_{p2} stresses at d_{neck}/t_s for bevel angle of blade.

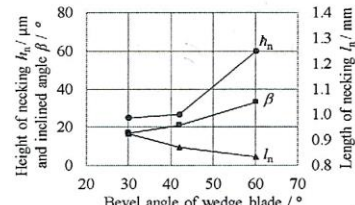


Fig. 11 Simulated profile parameters for bevel angle.

Fig. 11 represents the simulated profile parameters measured at the breaking position of the worksheet. It was revealed that the incline angle of the wedged edge remarkably increased with the bevel angle. In addition, the increase of the bevel angle resulted in the decrease of the necking length, while it seemed to affect the necking height, slightly. Namely, the necking height was measured only up to 10% of the worksheet thickness when varying the bevel angle from 30 to 60°.

Summary

Through the investigation of the indentation cutting, the authors drawn the conclusions as follows: (i) the gradient of the load resistance before the necking and the peak point of the load resistance increased with the bevel angle of the wedge blade. (ii) The peak position of the load resistance appeared to correspond to the necking position of the worksheet. (iii) The critical stress levels for the necking were detected. (iv) When increasing the bevel angle, the stresses reached the critical levels, lately. Consequently, the occurrence of the necking delayed. (v) The incline angle of the worksheet increased with the bevel angle of the blade. (vi) The length of the necking tended to decreased when increasing the bevel angle, while the height of the necking was affected by the bevel angle, slightly.

References

- [1] M. Murayama, S. Nagasawa, Y. Fukuzawa, T. Yamaguchi and I. Katayama, Orthotropic effect and strain dependency of paperboard on load characteristic of center bevel cutter indented on paperboard, *J. of Materials Processing Technology*, 159 (2005) 199-205.
- [2] S. Nagasawa, M. Karasawa and Y. Jukuzawa, Cutting characteristics of piled-up cardboards subjected to wedge indentation, *J. of JSTP*, 50 no. 585 (2009) 946-950.
- [3] C.T. McCarthy, A.N. Annaidh and M.D. Gilchrist, On the sharpness of straight blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry, *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (2010) 437-451.
- [4] M. Murayama, S. Nagasawa, Y. Fukuzawa and I. Katayama, Cutting mechanism and load characteristic of trapezoidal center bevel cutting indented on aluminum sheet, *JSME International J.*, 47 no. 1 (2004) 21-28.
- [5] N. Hatanaka, K. Yamaguchi, N. Takakura and T. Iizuka, Fracture mode in cutting of aluminum sheets by indentation of wedge shape punches, *J. of JILM*, 52 no. 3 (2002) 108-114.
- [6] N. Hatanaka, K. Yamaguchi, N. Takakura, T. Iizuka and K. Narita, FEM simulation of cutting process of circular aluminum sheet with wedge shape punch, *J. of JILM*, 54 no. 9 (2004) 361-366.
- [7] P. J. Blau, *Friction Science and Technology*, Second ed., CRC Press, New York, 2009.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพีรภา เนตรพุกคณะ เกิดเมื่อวันที่ 30 มีนาคม พุทธศักราช 2537 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี 2 จังหวัดสุราษฎร์ธานี เมื่อปีพุทธศักราช 2555 และ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2559 หลังจากสำเร็จ การศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมวัสดุ สังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2559 โดยขณะศึกษาได้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และใน ระหว่างการศึกษาได้รับมอบหมายหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาดังต่อไปนี้

- โลหการกายภาพ 1 (Physical Metallurgy I)
- โลหการกายภาพ 3 (Physical Metallurgy III)
- ปฏิบัติการขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming Laboratory)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี