

การศึกษาการเกิดเศษโลหะของเหล็กกล้าไร้สนิม ในกระบวนการผลิตวาล์วควบคุมแรงดัน สำหรับ  
อุตสาหกรรมยานยนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF CHIP FORMATION IN STAINLESS STEEL IN PRESSURE CONTROL VALVE  
PROCESS FOR AUTO PART MANUFACTURING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการเกิดเศษโลหะของเหล็กกล้าไร้สนิม ในกระบวนการผลิตวาล์วควบคุมแรงดัน สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์
โดย	นายพยุห์ เกิดจรงค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์จිරพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

พยูท์ เกิดจรงค์ : การศึกษาการเกิดเศษโลหะของเหล็กกล้าไร้สนิม ในกระบวนการผลิต วาล์วควบคุมแรงดัน สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์. ( STUDY OF CHIP FORMATION IN STAINLESS STEEL IN PRESSURE CONTROL VALVE PROCESS FOR AUTO PART MANUFACTURING) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเกิดเศษโลหะของเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากพบปัญหาเศษโลหะติดอยู่ในรูของชิ้นงาน จากการเก็บข้อมูลของเสียระหว่างเดือนสิงหาคม-ตุลาคม พ.ศ.2562 ในไลน์การผลิตที่ 1 และไลน์การผลิตที่ 2 พบว่าทั้งสองไลน์การผลิตมีส่วนของเสียเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 0.11 หรือคิดเป็น 1,130 PPM ต่อเดือน ในการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ระยะ โดยในระยะที่ 1 ทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา พบว่าปัญหาเศษโลหะติดอยู่ในรูชิ้นงานเกิดในกระบวนการกลึงปาดหน้าด้วยมีดตัดหยาบเนื่องจากลักษณะของเศษโลหะที่เกิดปัญหากับเศษโลหะในกระบวนการมีความใกล้เคียงกันทั้งขนาดและรูปร่าง ระยะที่ 2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเศษโลหะ โดยพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแตกหักและทิศทางของเศษโลหะคือเงื่อนไขการตัด ที่ประกอบด้วย ความลึกตัด อัตราป้อนตัดและความเร็วรอบสปินเดิล ระยะที่ 3 กำหนดขั้นตอนในวิธีดำเนินการวิจัย ระยะที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ปัจจุบันเศษโลหะมีโอกาสตกลงไปในรูของชิ้นงานทุกระยะตัด จากผลการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมคือเงื่อนไขที่ 1 คือการเพิ่มความลึกตัดให้มากที่สุดที่ไม่ส่งผลต่อขนาดของชิ้นงาน เนื่องจากเศษโลหะจะมีความหนาเพิ่มขึ้นทำให้แตกหักง่าย มีความโค้งงอที่ลดลง จาก 2.04-3.12 มิลลิเมตร เป็น 0.56-1.48 มิลลิเมตร ทิศทางการแตกหักจะชนกับชิ้นงานทำให้กระเด็นไปทางอื่น ผลทดลองกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 20 ข้อมูล ไม่พบปัญหาเศษโลหะติดอยู่ในรูชิ้นงานเนื่องจากขนาดของเศษโลหะที่เล็กลง สรุปได้ว่าเงื่อนไขการตัดหลังปรับปรุงมีความเหมาะสมในการลดโอกาสที่ทำให้เศษโลหะติดค้างในรูชิ้นงานได้ และระยะที่ 5 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะและอุปสรรคในการทดลอง

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6070943021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Orthogonal cutting Chip formation Turning process

Phayu Kerdchongrak : STUDY OF CHIP FORMATION IN STAINLESS STEEL IN  
PRESSURE CONTROL VALVE PROCESS FOR AUTO PART MANUFACTURING.

Advisor: Assoc. Prof. Somkiat Tangjitsitcharoen, D.Eng.

The thesis's purpose is learning chip formation, due to the problem chip stuck inside hole. Data between August - October in 2019 of production line no.1-2 reveal the average of defect proportion is between 0.11 percentage, or 1,130 PPM per month. Implement categories have 5 steps, the first step is root cause analysis found chip stuck inside hole in rough cutting process because shape and dimension of chip between part in process and claim part are similar. Second step is study theory relate to chip formation. It's revealed that influence factor of chip formation is cutting condition, consist by depth of cut, feed, and spindle speed. Third step. to define how to implement. Forth step is analysis result, from current cutting condition, have a chance to drop inside hole for all cutting phase. The suitable to prevent chip stuck inside hole comes from condition no.1 which adding depth of cut as much as possible with no effect to dimension of part. It can be explained as the more depth of cut, the more chip thickness increase, the more easier chip breakability. Chip curling decreased from 2.04-3.12 mm. to 0.56-1.48 mm. Chip flow direction is flow away from part. Refer to 20 pcs sample not found chip stuck in hole because smaller chip size. Conclude whether cutting condition after adjustment is suitable to decrease a chance of chip stuck inside hole. The fifth step, conclusion suggestion and an obstable of thesis.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากรศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ ที่รับเป็นที่ปรึกษา รวมถึงในการให้ความรู้จากวิชาการผลิตขั้นสูงและการเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งสำเร็จตามวัตถุประสงค์ จึงถือโอกาสนี้ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง พร้อมกันนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณในความกรุณาของรศ.จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบ รศ.ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ กรรมการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้เขียนในการสอบ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านทั้งอาจารย์มหาวิทยาลัยขอนแก่นและมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่ถ่ายทอดความรู้ให้ข้าพเจ้า แรงกดดันต่างๆล้วนทำให้ข้าพเจ้าแข็งแกร่งและไม่ยอมแพ้ จนประสบความสำเร็จในวันนี้

ขอขอบคุณบริษัทสยามซีเมนต์ไทย (SCG) ม่วงน้อย เขาวง จังหวัดสระบุรี ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าในการฝึกงานและได้พบกับเพื่อนๆที่เป็นจุดเปลี่ยนครั้งหนึ่งในชีวิตของข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าอยากประสบความสำเร็จแบบพวกเขา

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่อาศัยอยู่ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา พวกเขานั้นทำให้ข้าพเจ้ามีความคิดที่เติบโตไปอีกขั้น

ขอขอบคุณครอบครัว ทั้งพ่อแม่พี่และคนที่ข้าพเจ้ารัก ในการอดทนต่อความไม่ยอมแพ้ และเชื่อมั่นในตัว of ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบริษัทที่ข้าพเจ้าทำงานอยู่ ทั้งหัวหน้างานและเพื่อนร่วมงาน ที่ช่วยเพิ่มพูนความสามารถในความคิดและกระบวนการ ทำให้การเรียนปริญญาโทนั้น สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ทำการศึกษา หากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

พยุห์ เกิดจรงค์

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	1
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 รายละเอียดของโรงงานกรณีศึกษา.....	1
1.2 สภาพปัญหาและความสำคัญของปัญหาในปัจจุบัน .....	1
1.3 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา.....	3
1.3.1 วิเคราะห์ชิ้นงาน .....	3
1.3.2 วิเคราะห์กระบวนการผลิต.....	3
1.4 วัตถุประสงค์งานวิจัย .....	6
1.5 ขอบเขตงานวิจัย .....	6
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	7
1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 .....	9
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	9

2.1	ทฤษฎีการกัด .....	9
2.2	ประเภทของกระบวนการกัด .....	10
2.2.1	การกลึง (Turning).....	10
2.2.2	การเจาะ (Drilling).....	10
2.2.3	การกัดขึ้นรูป (Milling): .....	10
2.3	ประเภทของมีดตัด (Types of cutting tools).....	10
2.4	วัสดุมีดตัด (Cutting tools material).....	11
2.4.1	คุณสมบัติในการพิจารณามีดตัด.....	11
2.4.2	วัสดุมีดตัด.....	11
2.5	เครื่องมือตัด (Tools holder).....	13
2.6	เรขาคณิตมีดตัด (Tools geometry).....	14
2.6.1	ส่วนประกอบของมีดตัดคมเดียว (8 tools geometry of single cutting tools).....	14
2.6.2	มุมของมีดตัดคมเดียว (Angle of single point cutting tools).....	15
2.7	เงื่อนไขการกัด (Cutting condition).....	15
2.8	การเกิดเศษโลหะ (Chip formation) .....	16
2.9	กลไกของกระบวนการกัดแบบมุมฉาก (Orthogonal cutting).....	17
2.10	ระนาบเฉือน (Shear zone) .....	20
2.10.1	ระนาบเฉือนต้น (Primary shear zone).....	20
2.10.2	ระนาบเฉือนปลาย (Secondary Shear zone).....	21
2.11	คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ .....	22
2.11.1	ความเค้น (Stress).....	22
2.11.2	ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress).....	22
2.11.3	ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) .....	22
2.11.4	ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress).....	22



2.11.5 ความเครียด (Strain).....	23
2.11.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship) .....	24
2.11.7 การทดสอบแรงดึง (Tension Test).....	24
2.12 การเกิดขึ้นของเศษตัด (Formation of the chip).....	26
2.12.1 เศษตัดแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous chip).....	26
2.12.2 เศษตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous chip): .....	26
2.12.3 เศษตัดต่อเนื่องที่มีการเยื้องที่คมตัด (Continuous chip with built-up edge):.	26
2.13 แรงในการตัด (Force in metal cutting).....	27
2.13.1 Friction force (F).....	27
2.13.2 Normal force to friction (N) .....	27
2.13.3 Shear force (Fs) .....	28
2.13.4 Normal force to shear (Fn) .....	28
2.14 The merchant equation.....	30
2.15 การแปลงหน่วยความเร็วสปินเดิลเป็นความเร็วในการตัด.....	32
2.16 การคำนวณเวลาในการตัดชิ้นงาน .....	32
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีการกัด.....	33
บทที่ 3 .....	44
วิธีดำเนินการวิจัย .....	44
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	44
3.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.3 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง .....	44
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล .....	48
3.6 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง.....	48

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลก่อน-หลังปรับปรุงกระบวนการ.....	50
บทที่ 4 .....	51
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	51
4.1 วิเคราะห์ก่อนปรับปรุงกระบวนการ .....	51
4.1.1 วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะ .....	51
4.1.2 วิเคราะห์เศษโลหะ:.....	53
4.1.3 วิเคราะห์มีดตัด:.....	54
4.2 วิเคราะห์หลังปรับปรุงกระบวนการ: ข้อเสนอแนะเงื่อนไขการตัดที่ 1.....	55
4.2.1 วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะ:.....	56
4.2.2 วิเคราะห์เศษโลหะ:.....	59
4.2.3 วิเคราะห์มีดตัด:.....	60
4.3 วิเคราะห์หลังปรับปรุงกระบวนการ: ข้อเสนอแนะเงื่อนไขการตัดที่ 2.....	60
4.3.1 วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะ:.....	62
4.3.2 วิเคราะห์เศษโลหะ:.....	64
4.3.3 วิเคราะห์มีดตัด:.....	64
4.4 วิเคราะห์หลังปรับปรุงกระบวนการ: ข้อเสนอแนะเงื่อนไขการตัดที่ 3.....	65
4.4.1 วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะ:.....	66
4.4.2 วิเคราะห์เศษโลหะ:.....	68
4.4.3 วิเคราะห์มีดตัด:.....	69
4.5 เปรียบเทียบคุณภาพชิ้นงานหลังการปรับปรุง.....	69
4.6 เปรียบเทียบสัดส่วนของเสียเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน ก่อน-หลังการปรับปรุง .....	70
บทที่ 5 .....	72
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	74
5.3 อุปสรรคในการวิจัย.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	79



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลจำนวนของเสียเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน ต่อปริมาณการผลิตของแต่ละไลน์.....	2
ตารางที่ 2 เงื่อนไขการตัดกระบวนการกลึงปาดหน้า .....	5
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเศษโลหะงานที่มีปัญหากับเศษโลหะในกระบวนการ .....	5
ตารางที่ 4 เงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน .....	45
ตารางที่ 5 เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 1 .....	45
ตารางที่ 6 เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 2.....	45
ตารางที่ 7 เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 3.....	46
ตารางที่ 8 เงื่อนไขการตัดปัจจุบันเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการตัดที่ 1 .....	55
ตารางที่ 9 เงื่อนไขการตัดที่1 เปรียบเทียบกับเงื่อนไขการตัดที่ 2 .....	61
ตารางที่ 10 เงื่อนไขการตัดที่3 เปรียบเทียบกับเงื่อนไขการตัดปัจจุบัน .....	65
ตารางที่ 11 เปรียบเทียบคุณภาพผิวชิ้นงานระหว่างเงื่อนไขปัจจุบันกับเงื่อนไขหลังการปรับปรุง .....	70
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบสัดส่วนของเสียระหว่างเงื่อนไขปัจจุบันกับเงื่อนไขหลังการปรับปรุง.....	71
ตารางที่ 13 สรุปความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน.....	72
ตารางที่ 14 สรุปความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดที่ 1 .....	73
ตารางที่ 15 สรุปความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดที่ 2 .....	73
ตารางที่ 16 สรุปความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดที่ 3.....	73

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 กราฟแสดงข้อมูลจำนวนของเสียเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน ต่อปริมาณการผลิตของแต่ละไลน์ .	2
รูปที่ 2 แสดงชิ้นงานวาล์วควบคุมแรงดัน (a), เศษโลหะติดอยู่ในรูด้านข้าง (b), จำลองการเกิดเศษโลหะติดอยู่ในรูของชิ้นงานด้วยขนาดของภาพตัด (c).....	3
รูปที่ 3 แผนผังในกระบวนการผลิตวาล์วควบคุมแรงดัน.....	4
รูปที่ 4 การกลึง (a), การเจาะ (b) และ การกัดขึ้นรูป (c).....	10
รูปที่ 5 มีดตัดคมเดี่ยว (Single point cutting tools) (a) .....	11

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของมีดตัด อุณหภูมิมีด และวัสดุของมีดตัด .....	12
รูปที่ 7 7 Solid Type (a), Tipped Type: Brazed (b), Tipped Type: Clamped Insert (c)....	13
รูปที่ 8 Tool geometry of single cutting tools (a), Angle of single point cutting tools (b) .....	14
รูปที่ 9 ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกในการป้อนมีด.....	16
รูปที่ 10 Orthogonal cutting: Three-dimensional process (a) and how it reduce to two dimension in the side view (b).....	18
รูปที่ 11 Shear strain during chip formation (a), one of the plates isolate to illustrate the definition of shear strain based on this parallel plate model (b), and shear strength (c).....	19
รูปที่ 12 โซนเฉือนแสดง Primary shear และ secondary .....	21
รูปที่ 13 higher shear angle, lower shear plan (a), smaller shear angle, larger shear plan .....	21
รูปที่ 14 แรงดึง (Tension) (a), แรงกด (Compression)(b) และแรงเฉือน (Shear) (c).....	22
รูปที่ 15 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) .....	24
รูปที่ 16 Discontinuous chip (a), Continue chip (b) and Continuous chip with built- up edge(c).....	27
รูปที่ 17 Forces in metal cutting: (a) forces acting on the chip in orthogonal cutting and (b) forces action on the tool that can be measure .....	27
รูปที่ 18 Force diagram showing geometric relationships among $F_s$ , $N$ , $F_n$ , $F_c$ , $F_t$ .....	30
รูปที่ 19 3D cutting force .....	31
รูปที่ 20 Chip flow with side curling (a) และ Chip flow with up curling .....	40
รูปที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการเกิดเศษโลหะต่ออัตราป้อนตัดและความลึกตัด .....	41
รูปที่ 22 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด .....	42

รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและทิศทางการเกิดเศษโลหะ ที่ side cutting edge angle = $90^\circ$ .....	42
รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและทิศทางการเกิดเศษโลหะที่ side cutting edge angle = $45^\circ$ .....	43
รูปที่ 25 ชิ้นงานวาล์วควบคุมแรงดันและขนาดของชิ้นงาน, Side view (a), Top view (b), Side view Dimension (c) .....	47
รูปที่ 26 เม็ดมีดตัด CBN ชนิด 6 มุมมีด .....	47
รูปที่ 27 ด้ามมีดตัด .....	47
รูปที่ 28 เครื่องกลึงซีเอ็นซี.....	48
รูปที่ 29 ISO 3685-197: Chip formation zone.....	50
รูปที่ 30 สภาพปัจจุบัน ช่วงมีดตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงาน (a), มีดตัดสิ้นสุดช่วยสัมผัสชิ้นงานเข้าสู่ระยะต้น (b).....	51
รูปที่ 31 สภาพปัจจุบัน ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้น (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะต้น เข้าสู่ระยะกลาง (b). 52	
รูปที่ 32 สภาพปัจจุบัน ช่วงมีดตัดเริ่มระยะกลาง (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะกลาง เข้าสู่ระยะท้าย (b) .....	52
รูปที่ 33 สภาพปัจจุบัน ช่วงมีดตัดเริ่มระยะท้าย (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะท้าย (b) .....	53
รูปที่ 34 เศษโลหะหลังเงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน (a) ,ประเภทเศษโลหะตามมาตรฐานISO3685-1977-E (b) .....	53
รูปที่ 35 เงื่อนไขการตัดปัจจุบัน มีดตัดสึกหรอบริเวณมุมมีดตัด = 189.9 ไมครอน (a), องศาการเกิดเศษโลหะประมาณ $58^\circ$ (b) .....	54
รูปที่ 36 เงื่อนไขที่ 1 ช่วงมีดตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงาน (a), มีดตัดสิ้นสุดช่วยสัมผัสชิ้นงาน เข้าสู่ระยะต้น (b).....	57
รูปที่ 37 เงื่อนไขที่ 1 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้น (a), ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้นหลังเศษโลหะต่อเนื่องแตกหัก (b), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะต้นเข้าสู่ระยะกลาง (c).....	57
รูปที่ 38 เงื่อนไขที่ 1 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะกลาง (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะกลาง เข้าสู่ระยะท้าย (b) 58	
รูปที่ 39 เงื่อนไขที่ 1 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะท้าย (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะท้าย (b) .....	59

รูปที่ 40 เศษโลหะหลังเงื่อนไขการตัดที่ 1 (a), เงื่อนไขการตัดที่1 มีดตัดสี่กรอบริเวณจมูกมีดตัด = 171.43 ไมครอน (b) .....	60
รูปที่ 41 เงื่อนไขที่ 2 ช่วงมีดตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงาน (a), มีดตัดสิ้นสุดช่วยสัมผัสชิ้นงาน เข้าสู่ระยะต้น (b).....	62
รูปที่ 42 เงื่อนไขที่ 2 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้น (a), มีดตัดสิ้นสุดระยะต้น เข้าสู่ระยะกลาง (b).....	63
รูปที่ 43 เงื่อนไขที่ 2 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะกลาง (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะกลาง (b).....	63
รูปที่ 44 เงื่อนไขที่ 2 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะท้าย (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะท้าย (b) .....	64
รูปที่ 45 เศษโลหะหลังเงื่อนไขการตัดที่ 2 (a), เงื่อนไขการตัดที่2 มีดตัดสี่กรอบริเวณจมูกมีดตัด = 295.5 ไมครอน (b) .....	65
รูปที่ 46 เงื่อนไขที่ 3 เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัดช่วงต้น .....	67
รูปที่ 47 เงื่อนไขที่ 3 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้นและเข้าสู่ระยะกลาง .....	67
รูปที่ 48 เงื่อนไขที่ 3 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะกลางจนสิ้นสุดระยะกลาง .....	68
รูปที่ 49 เงื่อนไขที่ 3 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะท้ายจนสิ้นสุดระยะท้าย .....	68
รูปที่ 50 เศษโลหะหลังเงื่อนไขการตัดที่ 3 (a), มีดตัดเงื่อนไขที่ 3 เกิดการแตกหัก (b).....	69
รูปที่ 51 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียก่อนปรับปรุง สิงหาคม-ตุลาคม พ.ศ.2562 เปรียบเทียบกับ สัดส่วนของเสียหลังปรับปรุงเงื่อนไขที่ 1 2 และ 3 .....	71

# บทที่ 1

## บทนำ

จากข้อมูลของกระทรวงอุตสาหกรรมเกี่ยวกับสถานการณ์ภาคการผลิตของอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ มีแนวโน้มขยายตัวเป็นบวกอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ พฤษภาคม 2560 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขีดความสามารถของไทยแข็งแกร่งเมื่อเทียบกับคู่แข่ง โดยมีอุตสาหกรรมสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์คือ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ เนื่องจากมีการเปิดตัวรถยนต์รุ่นใหม่จากค่ายรถต่างๆอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการขยายตัวของภาคเศรษฐกิจทั่วโลก ทำให้อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์โตตามไปด้วย โดยมีการใช้ตัวชี้วัดด้วยดัชนีผลผลิตอุตสาหกรรม (MPI) พบว่ามีการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ถึง 15.6% ในปี 2561

### 1.1 รายละเอียดของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานที่ได้ทำการศึกษา เป็นโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ก่อตั้งในประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ. 2545 โรงงานแห่งนี้ตั้งขึ้นในบริเวณอุตสาหกรรมอมตะซิตี้ จังหวัดชลบุรี โดยเป็นผู้ผลิตระบบคอมมอนเรล (Common Rail System) ที่เป็นอุปกรณ์หัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงแรงดันสูง และผลิตหัวฉีดแก๊สโซลีน (Gasoline Injector) ซึ่งเป็นฐานการผลิตลำดับที่ 3 ของกลุ่มบริษัทเดียวกันทั่วโลก และเป็นผู้ผลิตรายแรกของประเทศไทย

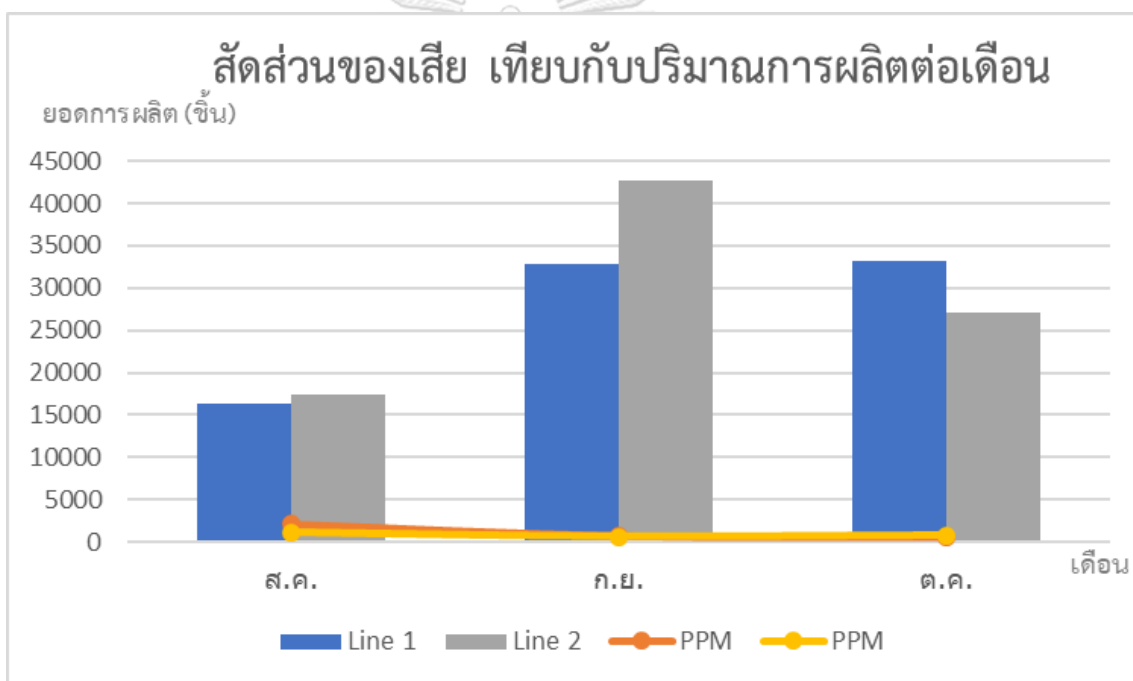
### 1.2 สภาพปัญหาและความสำคัญของปัญหาในปัจจุบัน

เนื่องจากในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในโรงงาน พบปัญหาคุณภาพในผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า Seat suction valve ซึ่งชิ้นส่วนนี้หลังจากผ่านกระบวนการต่างๆจนครบกระบวนการ จะถูกนำไปประกอบกับชิ้นส่วนที่เรียกว่า Pressure control valve และสุดท้ายนำไปประกอบกับ Common rail ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า หากเกิดของเสียตั้งแต่ต้นกระบวนการ เมื่อสิ้นกระบวนการจะส่งผลให้ชิ้นงานที่นำไปประกอบเข้าด้วยกัน กลายเป็นของเสียตามไปด้วย ผลลัพธ์ที่ตามมาคือต้องทำการค้นหาของเสียเพิ่มเติม (Sorting) ทำให้เสียเวลาและเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ โดยของเสียที่พบคือเศษโลหะที่มีขนาดใหญ่ในกระบวนการกัด ติดแน่นอยู่ในรูของชิ้นงาน ทำให้กระบวนการถัดไปคือการล้างชิ้นงาน ไม่สามารถนำเศษโลหะออกจากรูได้ โดยเมื่อครั้งที่เกิดปัญหา บริษัทต้องทำการค้นหาของเสียเพิ่มเติมเป็นจำนวน 5,376 ชิ้น อย่างไรก็ตาม หากตรวจสอบพบที่ต้นกระบวนการ ชิ้นงานสามารถแก้ไข (Rework) ได้ ดังนั้นจึงไม่ได้มีการคำนวณค่าใช้จ่ายการทิ้งงาน แต่จะมีค่าใช้จ่ายจากค่าแรงในการค้นหาของเสียเพิ่มเติม นอกจากนี้มีสัดส่วนของเสียโดยแบ่งตามไลน์การผลิต ตามตารางที่ 1 และรูปที่ 1 ดังนี้



ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลจำนวนของเสียเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน ต่อปริมาณการผลิตของแต่ละไลน์

	Line	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
ยอดการผลิต (ชิ้น)	1	16,316	32,808	33,194
	2	17,396	42,780	27,069
สัดส่วนของเสีย (%)	1	0.21%	0.07%	0.05%
	2	0.11%	0.06%	0.08%
PPM (ชิ้น)	1	2,145	701	542
	2	1,150	608	776



รูปที่ 1 กราฟแสดงข้อมูลจำนวนของเสียเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน ต่อปริมาณการผลิตของแต่ละไลน์

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 1 พบว่าสายการผลิตทั้ง 2 ไลน์ ในช่วงเดือน สิงหาคม-ตุลาคม พ.ศ. 2562 มีสัดส่วนของเสียประเภทชิ้นงานติดในรูของแต่ละไลน์ดังนี้ ไลน์ 1 สัดส่วนของเสียมีการกระจายตัวอยู่ที่ร้อยละ 0.05-0.21 และไลน์ 2 สัดส่วนของเสียมีการกระจายอยู่ที่ร้อยละ 0.06-0.11 โดยในช่วงสามเดือนที่ทำการเก็บข้อมูล ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ จึงสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดขึ้นมีความไม่แน่นอนอยู่ระหว่างร้อยละ 0.05-0.21 ซึ่งเป็นปกติของกระบวนการตัด

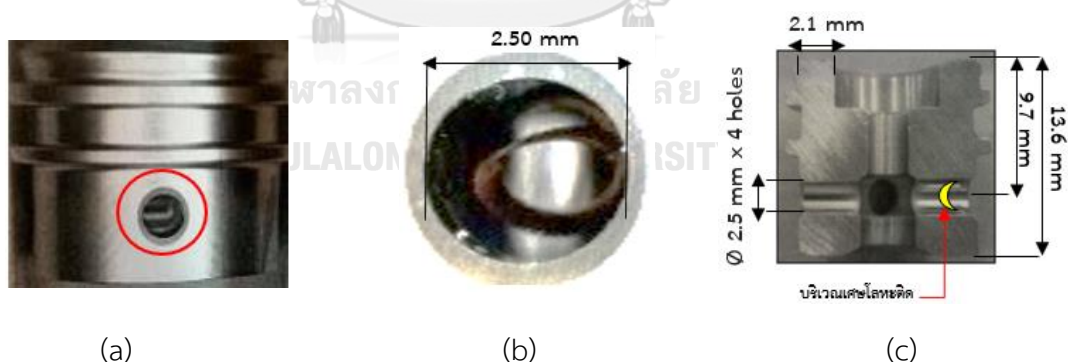
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกระจายของของเสียนี้ จะทำการศึกษาเพื่อทำการปรับปรุงกระบวนการในบ่อที่ 2 ถัดไป ซึ่งหากไม่นำสัดส่วนของเสียจากไลน์ 1 เดือนสิงหาคมมาพิจารณา จะพบว่าทั้งสองไลน์การผลิต มีสัดส่วนของเสียที่ใกล้เคียงกัน ไลน์ 1 สัดส่วนของเสียมีการกระจายตัวอยู่ที่ร้อยละ 0.05-0.07 และไลน์ 2 สัดส่วนของเสียมีการกระจายอยู่ที่ร้อยละ 0.06-0.11 ได้ทำการเลือกสายการผลิตที่ 1 มาทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปัญหาเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน เพื่อปรับปรุงและลดสัดส่วนของเสียลง จากนั้นไลน์การผลิตที่ 1 จะเป็นไลน์ต้นแบบในการขยายผลไปยังไลน์การผลิตที่ 2 รวมถึงขยายผลไปยังกระบวนการอื่นๆที่เกี่ยวข้องต่อไป

### 1.3 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

#### 1.3.1 วิเคราะห์ชิ้นงาน

วัสดุที่นำมาผลิต Seat suction valve เป็นวัสดุที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีส่วนประกอบหลัก คือคาร์บอน = 0.64% และ โครเมียม = 12.75%



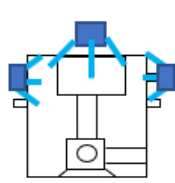

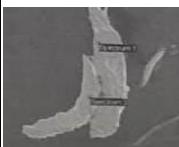

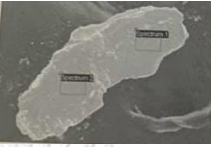
เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ พบว่ามีเศษโลหะติดมากับชิ้นงาน โดยมีลักษณะติดแน่นในส่วนรูด้านข้างชิ้นงาน เศษโลหะที่พบ หลังจากทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเป็นเศษโลหะของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งตรงกับวัสดุของชิ้นงาน จึงสรุปได้ว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตในกระบวนการ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงชิ้นงานวาล์วควบคุมแรงดัน (a), เศษโลหะติดอยู่ในรูด้านข้าง (b), จำลองการเกิดเศษโลหะติดอยู่ในรูของชิ้นงานด้วยขนาดของภาพตัด (c)

#### 1.3.2 วิเคราะห์กระบวนการผลิต

แผนผังในกระบวนการผลิต Seat suction valve มีดังนี้ ดังรูปที่ 3

	In-coming washing	Cutting	De-burring	Washing	Visual /Take Bari
Process	Ultrasonic washing				
Chip in process				Not produce Chipping	Not produce Chipping

รูปที่ 3 แผนผังในกระบวนการผลิตวาล์วควบคุมแรงดัน

#### 1) In coming and part washing

ในส่วนของ In coming ชิ้นส่วนที่รับมาจาก Supplier ถูกการันตีโดยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual inspection) 100% จากทางผู้ผลิต และถูกสุ่มตรวจสอบ (Sampling) โดยพนักงานที่ทำการ In coming อีกทั้งยังมีการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยการล้าง (Part washing) รวมถึงมีการตรวจสอบลักษณะของเศษโลหะที่เกิดปัญหาเปรียบเทียบกับเศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ พบว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการ In coming และ Part washing มีลักษณะไม่เหมือนกับเศษโลหะของชิ้นงานที่มีปัญหา จึงสรุปได้ว่า เศษโลหะที่เกิดปัญหา เกิดหลังจากผ่านกระบวนการในโรงงาน

#### 2) Cutting

กระบวนการกลึงปาดหน้าชิ้นงาน ประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ การกัดหยาบ (Rough cutting) เพื่อลดขนาดของชิ้นงานลง มีความลึกตัดมากกว่าการตัดแบบละเอียด เนื่องจากไม่สนใจผิวสำเร็จของชิ้นงานมากนัก มีเงื่อนไขในการกัดชิ้นงานคือ ความลึกตัด (Depth of cut) เท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร โดยทำการตัดสามครั้ง รวมความลึกตัดเท่ากับ 0.45 มิลลิเมตร มีอัตราป้อนตัด (Feed) เท่ากับ 0.12 มิลลิเมตรต่อรอบ และมีความเร็วรอบสปินเดิล (Spindle speed) เท่ากับ 3600 รอบต่อนาที

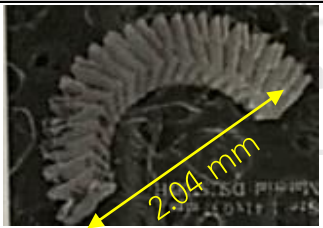
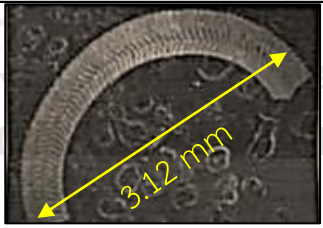
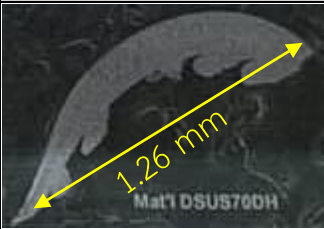
กระบวนการที่สองคือการกัดละเอียด (Fine cutting) เป็นการเก็บผิวชิ้นงานครั้งสุดท้าย มีเงื่อนไขในการกัดชิ้นงานคือ ความลึกตัด (Depth of cut) เท่ากับ 0.02 มิลลิเมตร โดยทำการตัดหนึ่งครั้ง มีอัตราป้อนตัด (Feed) เท่ากับ 0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ และมีความเร็วรอบสปินเดิล (Spindle speed) เท่ากับ 3600 รอบต่อนาที

ทั้งสองเงื่อนไขสรุปดังตารางที่ 2 จากการวิเคราะห์พบว่าเศษโลหะที่เกิดปัญหาเหมือนกับเศษโลหะที่เกิดในกระบวนการกัดหยาบ เนื่องจากเศษโลหะที่เกิดปัญหา มีลักษณะใกล้เคียงทั้งขนาดและความหนาเมื่อเทียบกับเศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดหยาบ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการตัดกระบวนการกลึงปาดหน้า

Condition	Rough cutting	Fine cutting
Depth of cut	0.15 mm	0.02 mm
Cutting speed	0.12 mm/rev	0.10 mm/rev
Spindle speed	3600 RPM	3600 RPM

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเศษโลหะงานที่มีปัญหากับเศษโลหะในกระบวนการ

Claim part	Rough cutting	Fine cutting
		
Length = 2.04 mm	Length = 3.12 mm	Length = 1.26 mm
Thickness = 0.09 mm	Thickness = 0.09 mm	Thickness = 0.03 mm

### 3) De-burring

หลังจากกระบวนการกัดโลหะ กระบวนการถัดมาคือ Deburring มีจุดประสงค์เพื่อกำจัดครีป (Bari) หรือ รอยขีดข่วน (Scratch) ต่างๆที่เกิดจากกระบวนการก่อนหน้า เศษโลหะที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบน ไม่เหมือนกับงานที่เกิดปัญหา

#### 4) Washing

ก่อนที่จะทำการล้าง ชิ้นงานจะถูกกลบล้างสนามแม่เหล็ก ด้วยเครื่อง De-magnetic จากนั้นชิ้นงานจะถูกนำเข้าสู่เครื่องล้าง โดยจะใช้หัวฉีดในการฉีดน้ำไปที่ชิ้นงาน เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ติดอยู่กับชิ้นงาน พบว่าลักษณะเศษโลหะที่ติดแน่นในรูชิ้นงาน ไม่สามารถล้างออกได้

#### 5) Visual inspection and take Bari

การตรวจสอบด้วยสายตาของพนักงาน ชิ้นงานต้องไม่มีปัญหาจาก Appearance เช่น รอยขีดข่วน และไม่มีเศษโลหะติดอยู่ในรูของชิ้นงาน เมื่อพบปัญหา จะนำขนแปรงไนลอนขัดลงไปในรู เพื่อขจัดเศษวัสดุออก โดยพนักงานมีโอกาสข้ามกระบวนการ เมื่อวิเคราะห์กระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอน พบว่ากระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสาเหตุการเกิดและการหลุดล่อนมีดังนี้

**สาเหตุการเกิด:** เมื่อนำเศษวัสดุจากชิ้นงานที่มีปัญหาไปเปรียบเทียบกับเศษที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ พบว่าเศษโลหะมีลักษณะคล้ายกับเศษที่เกิดจากกระบวนการกลึง โดยพบว่าในกระบวนการกลึงมีเศษโลหะลักษณะเป็นเศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinue chip) และแบบต่อเนื่อง (Continue chip) ปนกันอยู่ จากการวิเคราะห์พบว่า เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องมีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับงานที่เกิดปัญหา เมื่อทำการจำลองสถานการณ์โดยนำเศษโลหะที่มีความหนาและมันไปติดในรูชิ้นงาน พบว่าที่กระบวนการล้างไม่สามารถล้างออกได้

**สาเหตุการหลุดรอด:** กรณีที่เศษโลหะติดแน่น เครื่องล้างไม่สามารถล้างเศษโลหะออกได้ พนักงานมีโอกาสที่จะข้ามกระบวนการตรวจสอบ เนื่องจากความผิดพลาดของคน

### 1.4 วัตถุประสงค์งานวิจัย

ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการเกิดเศษโลหะและปรับปรุงเงื่อนไขการตัด เพื่อลดปริมาณของเสียที่มีเศษโลหะติดอยู่ในรูของชิ้นงาน มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

- 1) ลดขนาดของเศษโลหะให้น้อยกว่ารูของชิ้นงานหรือน้อยกว่า 2.5 มิลลิเมตร
- 2) ปรับองค์การเกิดเศษโลหะให้มีทิศทางเคลื่อนตัวออกจากรูทางเข้าชิ้นงาน

### 1.5 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) กระบวนการกลึงปาดหน้าด้วย CNC แบบไม่มีสารหล่อเย็น

- 2) วัสดุที่ใช้ทดลองคือเหล็กกล้าไร้สนิม
- 3) ด้ามมีดกลึง Cutting tool holder แบบด้านบวก
- 4) เม็ดมีดสำหรับตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว
- 5) การทดลองจะเลือกไลน์การผลิตที่ 1 มาเป็นต้นแบบในการดำเนินงาน

### 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงศึกษาปัจจัยในกระบวนการกลึงที่ส่งผลต่อขนาดและทิศทางการเกิดเศษโลหะ
- 2) วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะก่อนการปรับเงื่อนไขการตัด
- 3) วิเคราะห์รูปร่างของเศษโลหะที่ทำให้เศษโลหะติดอยู่ในรูของชิ้นงาน
- 4) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างเศษโลหะและเงื่อนไขการตัด โดยพิจารณาที่ ความลึกตัด (Depth of cut), ความเร็วสปินเดิล (Spindle speed) และอัตราป้อนตัด (Feed)
- 5) ปรับเงื่อนไขการตัด ทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 6) วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะหลังการปรับเงื่อนไขการตัด
- 7) วิเคราะห์คุณภาพชิ้นงานก่อนและหลังการปรับเงื่อนไขการตัด
- 8) ศึกษางานวิจัยเพิ่มเติม เพื่อสรุปผลการทดลองตามทฤษฎี
- 9) สรุปผลการดำเนินงานวิจัย ข้อเสนอแนะ
- 10) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถลดของเสียจากเศษโลหะในกระบวนการกลึง เพื่อป้องกันการเกิดของเสียหลุดลอยไปยังกระบวนการถัดไป ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์
- 2) เนื่องการในโรงงานที่ทำการศึกษา ค่าการปรับตั้งของเครื่องจักรนั้นถูกกำหนดมาจากทางบริษัทแม่ที่ประเทศญี่ปุ่น ทำให้ปัจจุบันไม่ได้มีการปรับตั้งเครื่องจักรด้วยความเข้าใจ ทำให้บางครั้งเมื่อเกิดปัญหาจะแก้ไขที่การหลุดลอกมากกว่าการแก้ไขที่ต้นเหตุ

3) ชั้นส่วนที่ทำการศึกษามีกระบวนการกลิ้งที่ใช้เหมือนกันกับชั้นส่วนประเภทอื่นในโรงงาน และเคยเกิดปัญหาคล้ายคลึงกัน จึงมุ่งหวังที่จะขยายผลการแก้ปัญหาไปยังผลิตภัณฑ์อื่น รวมถึงปัญหาจากทาง Supplier ด้วย เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพส่งมอบลูกค้า



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่ส่งผลทำให้เกิดเศษตัดจากการกลึง ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกคือทฤษฎีของกระบวนการกัดโลหะ ประกอบด้วยรูปร่างของเครื่องมือตัด (Tool geometry) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative motion) และทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงของเศษโลหะ โดยจะอธิบายรายละเอียดที่การกลึงเป็นหลัก ส่วนที่สองคือบทสรุปของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์นี้

#### 2.1 ทฤษฎีการกัด

กระบวนการกัดหรือการตัด หมายถึงกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัด (Cutting tool) ในการกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงานและวัสดุส่วนที่เหลือจะมีรูปร่างตามที่ต้องการ ขั้นตอนหลักในกระบวนการกัดเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือน (Shear deformation) ทำให้เกิดเศษตัด (Chip) เมื่อเศษตัดถูกกัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวชิ้นงานใหม่ กระบวนการกัดนี้ใช้ในการผลิตชิ้นงานโลหะให้มีรูปร่างต่างๆและถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เหตุผลที่กระบวนการกัดมีความสำคัญมากในเชิงพาณิชย์และเชิงเทคโนโลยีสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางกับวัสดุหลายประเภท โดยส่วนใหญ่ใช้ได้กับโลหะแข็ง รวมถึงพลาสติกและพลาสติกผสม (Plastic composite)
- 2) สามารถใช้ในการทำชิ้นงานที่มีรูปร่างหลากหลาย รวมถึงชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนโดยใช้วิธีการกัดหลายๆแบบและหลายๆ ขั้นตอนตามรายละเอียดชิ้นงาน
- 3) สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดความคลาดเคลื่อนหรือพิสัยความเผื่อ (Tolerance) น้อยกว่า 0.001 นิ้ว (0.025 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่ากระบวนการผลิตส่วนใหญ่
- 4) มีความสามารถผลิตผิวสำเร็จ (Surface finish) ของชิ้นงานให้มีความเรียบ  $16\mu\text{in}$  ( $0.4\mu\text{m}$ ) หรือดีกว่า ด้วยคุณสมบัติข้างต้น กระบวนการกัดจึงมักนิยมใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบอื่นๆมาแล้ว เช่น งานหล่อ (Casting) หรือการขึ้นรูปขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น การตีขึ้นรูป (Forging) โดยรูปร่างทั่วไปของชิ้นงานจะถูกผลิตโดยกระบวนการอื่นและใช้กระบวนการกัดในการผลิตชิ้นงานสำเร็จให้มีขนาดรูปร่างที่ถูกต้องและมีผิวงานตามที่ต้องการ



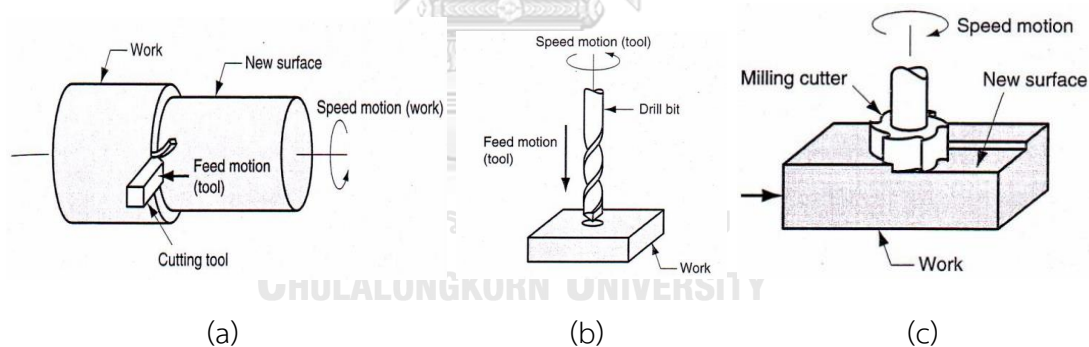
## 2.2 ประเภทของกระบวนการกัด

การกัดมีหลายประเภท แต่ละประเภทจะมีขีดความสามารถในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างและลักษณะผิวงานที่เฉพาะตัว กระบวนการกัดถูกแยกประเภทจาก จำนวนคมมีดตัด (Cutting edge) และเงื่อนไขในการตัด (cutting condition) โดยจะยกตัวอย่างกระบวนการกัดที่นิยม ดังรูปที่ 4

2.2.1 การกลึง (Turning): เครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดียว (Single cutting edge) ปอกเนื้อวัสดุจากชิ้นงานที่กำลังหมุนและทำให้เกิดชิ้นงานรูทรงกระบอก ความเร็วในการกลึงถูกกำหนดโดยความเร็วของการหมุนชิ้นงาน ( $v$ ) ส่วนการป้อนตัด ( $f$ ) คือการเคลื่อนที่ช้าๆ ของมีดตัดในทิศทางขนานกับแกนหมุน (Axis of rotation) ของชิ้นงาน

2.2.2 การเจาะ (Drilling): เครื่องมือตัดที่มีสองคมตัด (Two cutting edge) ใช้ในการผลิตรูกลม มีดตัดจะหมุนเจาะลงไปบนชิ้นงาน ด้วยการเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับชิ้นงาน

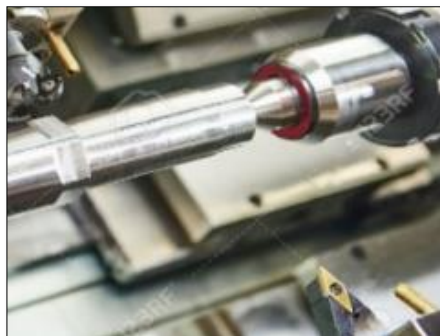
2.2.3 การกัดขึ้นรูป (Milling): เครื่องมือตัดที่มีหลายคมตัด (Multiple cutting edge) ใช้ในการสร้างพื้นผิวที่หลากหลายบนชิ้นงาน โดยมีดตัดจะหมุนเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้งฉาก (Vertical milling) และแนวขนานกับชิ้นงาน (Horizontal milling)



รูปที่ 4 การกลึง (a), การเจาะ (b) และ การกัดขึ้นรูป (c)

## 2.3 ประเภทของมีดตัด (Types of cutting tools)

ในการแยกประเภทของมีดตัด จะพิจารณาจากจำนวนคมตัดที่ใช้ในกระบวนการ โดยแบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังรูปที่ 5



(a)



(b)

รูปที่ 5 มีดตัดคมเดียว (Single point cutting tools) (a)

และมีดหลายคมตัด (Multiple cutting edge cutting tools) (b)

## 2.4 วัสดุมีดตัด (Cutting tools material)

วัสดุมีดตัดคือวัสดุที่ใช้ทำใบมีดตัดเพื่อกระบวนการกัดโลหะ ซึ่งวัสดุที่นำมาทำมีดตัดนั้นต้องแข็งแกร่งกว่าชิ้นงานที่จะขึ้นรูป ในการพิจารณาเลือกมีดตัดที่ทำจากวัสดุแต่ละประเภทมาใช้งาน ควรพิจารณาถึงลักษณะที่เกี่ยวข้องดังนี้

### 2.4.1 คุณสมบัติในการพิจารณามีดตัด

- 1) ค่าความแข็ง (Hardness): ขณะกัดชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความแข็งและความแข็งแรงของมีดตัดควรจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก
- 2) ค่าความเหนียว (Toughness): ค่าความเหนียวส่งผลต่อการแตกหักของมีดตัด
- 3) คุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance): คืออายุของใบมีด (Tool life) ที่ยอมรับได้ก่อนถึงรอบเปลี่ยน

สำหรับตัวอย่างวัสดุที่นิยมเลือกมาใช้ในกระบวนการกัด มีดังต่อไปนี้

### 2.4.2 วัสดุมีดตัด

- 1) High speed steel (HSS): ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการกัด เนื่องจากความสามารถในการรักษาความแข็งที่อุณหภูมิสูง (เสียความสามารถที่ 600°C) ดังนั้นจึงสามารถตัดด้วยความเร็วสูงได้

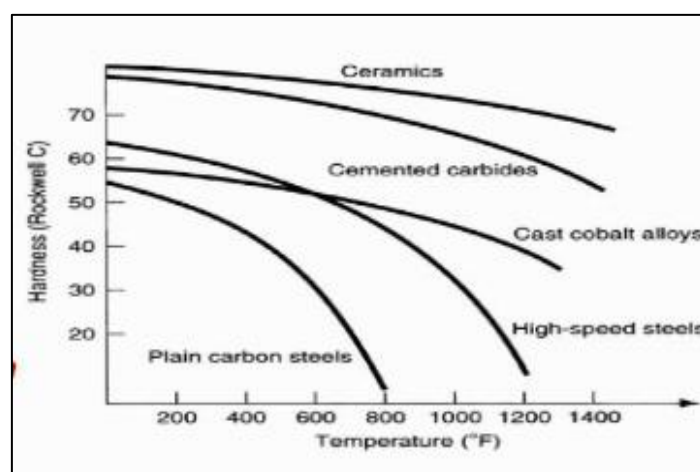
2) Carbide: แข็งกว่า HSS (เสียความสามารถที่ 900°C) แต่เหนียวน้อยกว่า ด้วยความที่ Carbide ทนอุณหภูมิได้สูง ดังนั้นจึงสามารถตัดด้วยความเร็วสูงกว่า HSS นอกจากนี้ ประเภท Carbide มีหลายชนิด เช่น Cement, Tungsten carbide

3) Coated tools: คือการนำวัสดุอื่นๆ เช่น HSS, Carbide มาทำการชุบแข็ง เพื่อให้มีดตัดทนอุณหภูมิได้มากขึ้น สิ่งที่ได้หลังจากการชุบผิวชิ้นงานคือ สามารถลดเวลาในการกัดและเพิ่มอายุของมีดตัดได้

4) Alumina base ceramic: ประกอบด้วยอลูมิเนียมออกไซด์และซิลิกอนไนไตรด์ แข็งกว่า Carbide ทนความร้อนสูง แต่มีความเหนียวน้อยกว่าเช่นกัน ด้วยคุณสมบัติที่แข็งและทนความร้อน ทำให้มีดตัด Ceramic สามารถกัดชิ้นงานด้วยความเร็วที่สูงกว่ามีดตัดที่ทำจาก Carbide และ HSS แต่เนื่องจากความเหนียวต่ำกว่า จึงไม่เหมาะแก่การใช้กัดโลหะ

5) Diamond: วัสดุที่แข็งที่สุดสำหรับการทำมีดตัด นอกจากนั้นยังมีความทนทานสูงต่อการสึกหรอ ความคมของมีดตัดเปลี่ยนแปลงไม่มากและใช้ความเร็วตัดได้แทบทุกช่วงความเร็ว เหมาะแก่การใช้งานกัดวัสดุที่ใช้ความละเอียดสูง แต่ไม่เหมาะสำหรับช่วงอุณหภูมิ 600°C ขึ้นไป และไม่เหมาะสำหรับการกัดโลหะ

เพื่อความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของมีดตัด อุณหภูมิตัด และวัสดุของมีดตัด อธิบายได้ดังรูปที่ 6 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า มีดตัดที่มีวัสดุต่างกัน มีคุณสมบัติในการทนความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยจุดประสงค์ในการเลือกใช้วัสดุของมีดตัดที่เหมาะสมนั้น เพื่อคุณภาพของชิ้นงานและต้นทุนการผลิต

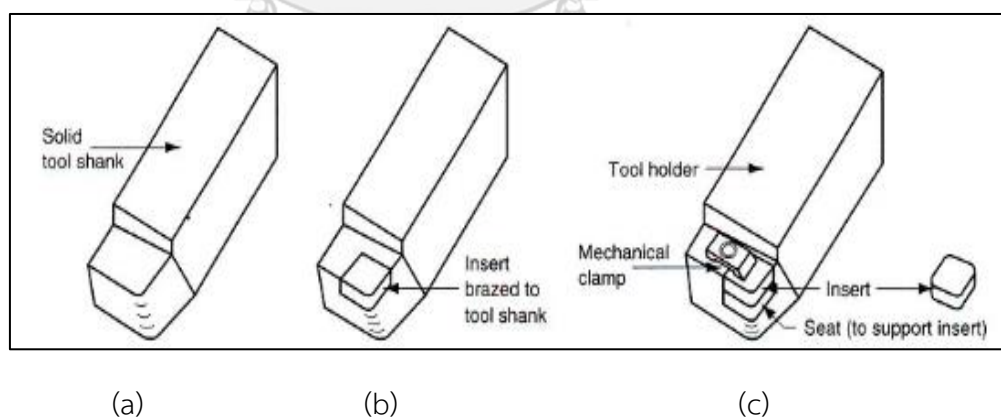


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของมีดตัด อุณหภูมิตัด และวัสดุของมีดตัด

## 2.5 เครื่องมิตตัด (Tools holder)

การกลึงงานให้เป็นรูปร่างลักษณะตามแบบที่กำหนด จำเป็นต้องอาศัยมิตกลึงทำหน้าที่ตัดเฉือนออกในขณะหมุนงาน มิตกลึงมีหลายลักษณะ รูปร่างแตกต่างกันออกไปตามการปฏิบัติงาน เครื่องมิตตัดแบบมิตตัดคมเดียว สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ดังรูปที่ 7

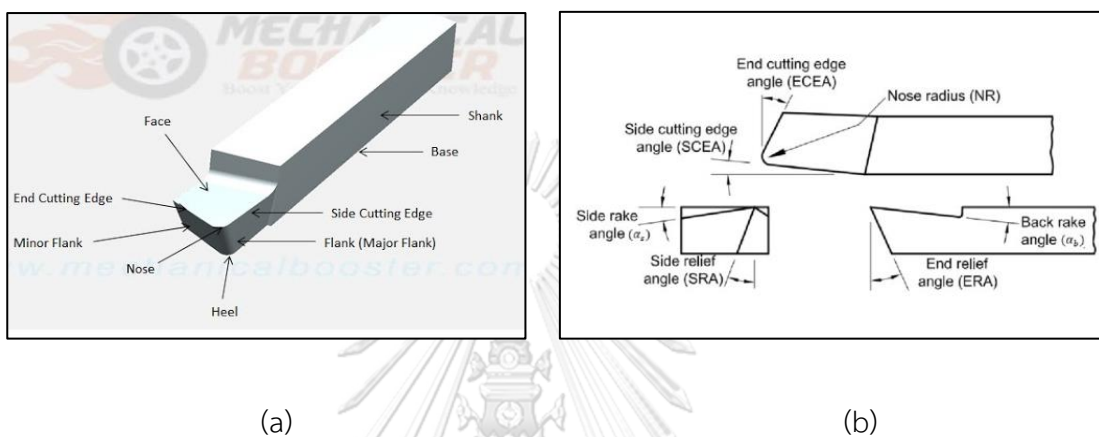
- 1) มิตตัดคมเดียวแบบแข็ง (Solid type) คือ มิตตัดที่ทำมาจากเหล็ก High speed steel (HSS) ที่มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง มีความแข็งและเหนียว หรือทำจาก Carbide ที่เหมาะสมต่อการตัดเฉือน โดยจะขึ้นรูปแบบเนื้อเดียวกัน (Homogenous) เมื่อมิตตัดเกิดการสึก ต้องเปลี่ยนใหม่ทั้งด้ามมิต ทำให้เกิดการพัฒนาเป็นมิตตัดคมเดียวแบบมิตเล็บ (Tipped tools) หรือด้ามมิตประกอบมิตตัด (Insert)
- 2) มิตตัดคมเดียวแบบมิตเล็บหรือด้ามมิตประกอบเม็ดมิตตัด (Tipped type) คือ มิตตัดที่ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนก้าน (Shank) และส่วนของเม็ดมิตตัด (Insert) ในส่วนของเม็ดมิตตัด อาจมีรูปร่างและจำนวนคมตัดที่หลากหลาย เช่น เม็ดมิตตัดแบบสามเหลี่ยม, หกมุมมิต หรือ แบบสี่เหลี่ยม, แปดมุมมิต และในส่วนของมิตตัด มีอยู่หลายประเภท เช่น มิตตัดแบบผสาน (Brazed) หรือ แบบ Clamp จับ



รูปที่ 7 7 Solid Type (a), Tipped Type: Brazed (b), Tipped Type: Clamped Insert (c)

## 2.6 เรขาคณิตมีดตัด (Tools geometry)

นิยามเรขาคณิตมีดตัดคมเดียว (Definition of Single point cutting tools geometry) เครื่องมือตัดอาจจะมีหนึ่งหรือหลายคมตัดที่ใช้ในการกำจัดเศษตัดออกจากชิ้นงานเนื่องจาก ส่วนประกอบของมีดตัดคมเดียวและหลายคมนั้นมีส่วนที่คล้ายคลึงกัน จึงจะอธิบาย โดยยกตัวอย่าง ของมีดตัดคมเดียว ดังรูปที่ 8 (a) และมุมของมีดตัด ดังรูปที่ 8 (b)



รูปที่ 8 Tool geometry of single cutting tools (a), Angle of single point cutting tools (b)

### 2.6.1 ส่วนประกอบของมีดตัดคมเดียว (8 tools geometry of single cutting tools)

- 1) Rake face: คือผิวหน้ามีดบริเวณที่ระบายหรือคายเศษตัดออกจากชิ้นงาน และอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุมกับระนาบที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นงานเท่ากับ  $\alpha$  เรียกมุมนี้ว่า Rake angle
- 2) Cutting Edges: คือมุมของมีดตัด ที่มีหน้าที่ในการกำจัดเนื้อวัสดุจากชิ้นงานเพื่อให้เกิดผิวชิ้นงานใหม่ ตำแหน่งอยู่ติดกับ Rake face โดยมมีดตัดคมเดียวจะมีมุมมีดตัด 2 มุม ที่แบ่งออกด้วย Nose radius
- 3) Side cutting edge: คมมีดตัดด้านข้าง ติดกับตำแหน่ง Major Flank
- 4) End cutting edge: คมมีดตัดด้านกลาง ติดกับตำแหน่ง Minor Flank
- 5) Nose radius: รัศมีปลายมีด มีความสัมพันธ์กับความเรียบผิวของชิ้นงาน ขนาดมุมที่ใหญ่จะช่วยให้การลบรอย Tool mark ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด แต่ต้องใช้แรงตัดที่มากขึ้น
- 6) Flank คือผิวหน้ามีดบริเวณที่ทำให้เกิดช่องว่าง (Clearance) ระหว่างมีดตัดกับผิวหน้างานที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งช่องว่างนี้จะป้องกันผิวงานจากการขัดถูกับมีดตัดอันจะเป็นผลให้คุณภาพของ

ผิวงานเสียไป ผิวหน้ามีดส่วน Flank นี้ จะอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุมกับผิวหน้างานใหม่ด้วยมุมที่เรียกว่า Relief angle โดยมุมนี้ต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้ผิวหน้างานใหม่สัมผัสกับมีดตัด นอกจากนี้ มีดตัดคมเดียว ยังมีมุมที่เป็นส่วนประกอบสำคัญอีก 7 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละมุมจะมีลักษณะสำคัญเฉพาะตัว ดังรูปที่ 8 (b)

### 2.6.2 มุมของมีดตัดคมเดียว (Angle of single point cutting tools)

- 1) End Cutting Edge Angle: มุมระหว่าง End Cutting Edge กับเส้นตั้งฉากของ Shank
- 2) Side Cutting Edge Angle: มุมระหว่าง Side Cutting Edge กับเส้นตรงที่ขนานกับ Shank
- 3) Back Rake Angle: มุมระหว่าง Rake face กับเส้นตรงที่ขนานกับ Shank
- 4) End Relief Angle: มุมระหว่างเส้นตรงในแนว Minor Flank กับเส้นตรงที่ตั้งฉากกับ Shank
- 5) Lip angle / Wedge Angle: มุมระหว่าง Rake face กับ Minor Flank
- 6) Side Rake Angle: มุมระหว่าง Rake face กับ เส้นตรงที่ตั้งฉากกับ Shank
- 7) Side Relief Angle: มุมระหว่าง Major Flank กับเส้นตรงที่ตั้งฉากกับ Shank

### 2.7 เงื่อนไขการกัด (Cutting condition)

ในกระบวนการกัดอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative movement) ระหว่างเครื่องมือกัดและชิ้นงานอันประกอบด้วย Primary motion เรียกว่า ความเร็วการตัด (Cutting speed,  $v$ ), Secondary motion เรียกว่า การป้อนตัด (Feed,  $f$ ) และขนาดการตัดเรียกว่า ความลึกในการตัด (Depth of cut,  $d$ ) ทั้งสามองค์ประกอบนี้ถูกเรียกว่า ภาวะการกัด (Cutting conditions) ดังรูปที่ 9 ในกระบวนการกัดแต่ละวิธีจะมีการกำหนดภาวะการกัดแตกต่างกัน มีรายละเอียดดังนี้

(1) ความเร็วตัด (Cutting speed): หมายถึง ความเร็วที่คมมีดตัด ตัดหรือปาดผิวโลหะออกเมื่อชิ้นงานหมุนไปครบรอบ 1 รอบ ซึ่งมีดตัดจะต้องปาดผิวโลหะออกเป็นเส้นยาวเท่ากับเส้นรอบวงของชิ้นงานพอดี หน่วยวัดความเร็วตัดคิดเป็นเมตรต่อนาที (m/min)

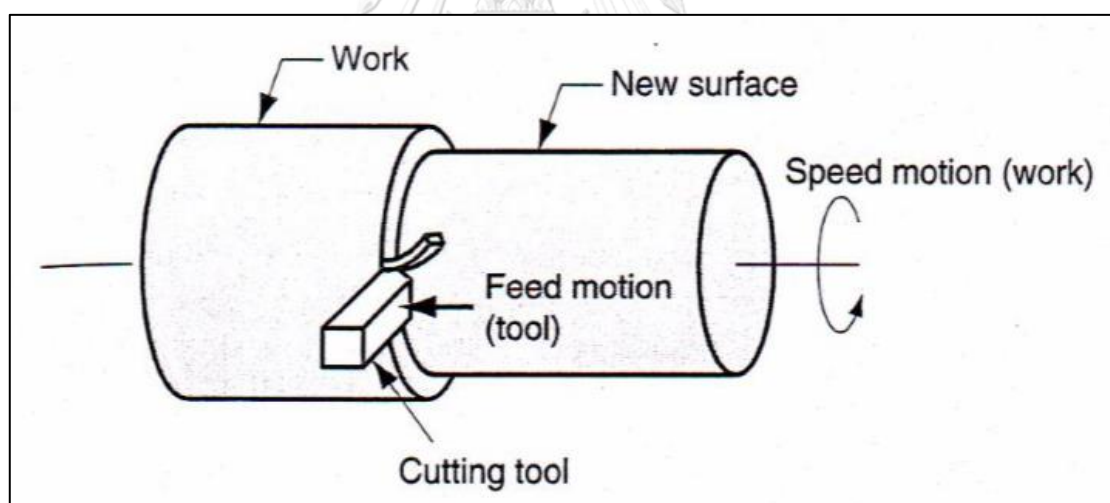
(2) อัตราป้อนตัด (Feed): หมายถึง ระยะทางการเดินป้อนมีดไปตามความยาวของชิ้นงาน ในแต่ละรอบของการป้อนตัด การป้อนตัดมี 2 ลักษณะคือ การป้อนตัดหยาบและป้อนตัด



ละเอียด การป้อนตัดหยาบ ใช้ในการป้อนตัดเมื่อกลึงงานระยะแรกที่ยังเหลือขนาดอีกมาก สามารถป้อนกลึงหยาบเพื่อกลึงงานได้รวดเร็ว ส่วนการป้อนตัดละเอียด ใช้ในการป้อนตัดละเอียด เมื่อกลึงงานที่ได้ขนาดใกล้เคียงที่ต้องการ การป้อนละเอียดจะทำให้ผิวที่ได้จากการกลึงมีผิวที่เรียบมากกว่าการกลึงหยาบ หน่วยวัดอัตราป้อนตัดคิดเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev)

(3) ความลึกในการป้อนมีด (Depth of cut): ความลึกที่เกิดขึ้นจากการป้อนตัดมีดลึกเข้าไปในงานจะทำให้เศษตัดไหลออกมา เช่น ชิ้นงานเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม. ถ้ากลึงงานแล้วงานจะถูกกลัดขนาด 4 มม.งานจะเหลือเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม.

การป้อนกินลึกและมิตแต่ละครั้ง จะขึ้นอยู่กับความละเอียดและความแข็งของวัสดุเป็นสำคัญ การใช้อัตราป้อนสามารถเลือกให้สูงได้ ถ้ากำลังของเครื่องดีพอ ความแข็งของวัสดุงานน้อยจะสามารถป้อนได้มาก ถ้าหากป้อนชิ้นงานให้ลึกแล้วต้องลดอัตราป้อนกินให้น้อยลง สิ่งที่สำคัญซึ่งจะต้องพิจารณาความเร็วตัดที่ใช้ให้ถูกต้องที่สุด ความลึกและอัตราป้อนเหมาะสมที่สุดเพื่อประหยัดเวลาในการทำงาน หน่วยวัดความลึกตัดคิดเป็นมิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 9 ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกในการป้อนมีด

## 2.8 การเกิดเศษโลหะ (Chip formation)

เพื่อให้เข้าใจถึงภาพรวมทั้งหมดในการเกิดเศษโลหะ ดังนั้นในส่วนแรกผู้เขียนได้สรุปตั้งแต่การเกิดเศษโลหะจนกระทั่งเกิดการแตกหัก จากนั้นจะอธิบายรายละเอียดแต่ละหัวข้อถัดไป ดังนี้

กระบวนการเกิดเศษตัดหรือเศษโลหะ จะเริ่มตั้งแต่มีดตัดเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับชิ้นงาน (Orthogonal cutting) เมื่อมีดตัดสัมผัสกับชิ้นงานจะเกิดแรงขณะตัด (Cutting force) โดยแบ่งออกเป็นแรงกระทำภายนอก คือแรงเสียดทานระหว่างมีดตัดและเศษโลหะ (Friction force) กับแรงในแนวตั้งฉากกับแรงเสียดทาน (Normal force) และแรงภายในวัสดุ คือแรงต้านการเสียรูปภายในวัสดุ (stress) จากนั้นวัสดุจะสะสมความเครียด (Strain) ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปเกิดเป็นเศษโลหะ โดยแรงเฉือนสูงสุดที่ทำให้วัสดุเสียรูป สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างแรงเฉือน (Shear force) กับพื้นที่ระนาบเฉือน (Area of shear plan) หรือเท่ากับกำลังของวัสดุ (Strength of work)

ในระหว่างนั้น ก่อนที่จะเศษโลหะจะแตกหัก เศษโลหะจะเกิดการโค้งงอเนื่องจาก Strain ตกค้างจาก Shear stress ที่กระทำตั้งฉากกับระยะทาง เกิดเป็นโมเมนต์ดัด (Bending moment) เมื่อ Strain เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด (Ultimate strength) เศษโลหะจะเกิดการแตกหัก เศษโลหะจะถูกแบ่งชิ้นระหว่างผิวโลหะใหม่และผิวเดิมที่ระนาบเฉือน (Shear plan) ทำให้เกิดพื้นที่ชิ้นงานใหม่นอกจากนั้น เรายังสามารถแบ่งขั้นตอนการเกิดเศษตัดออกเป็น 3 ระยะ คือ

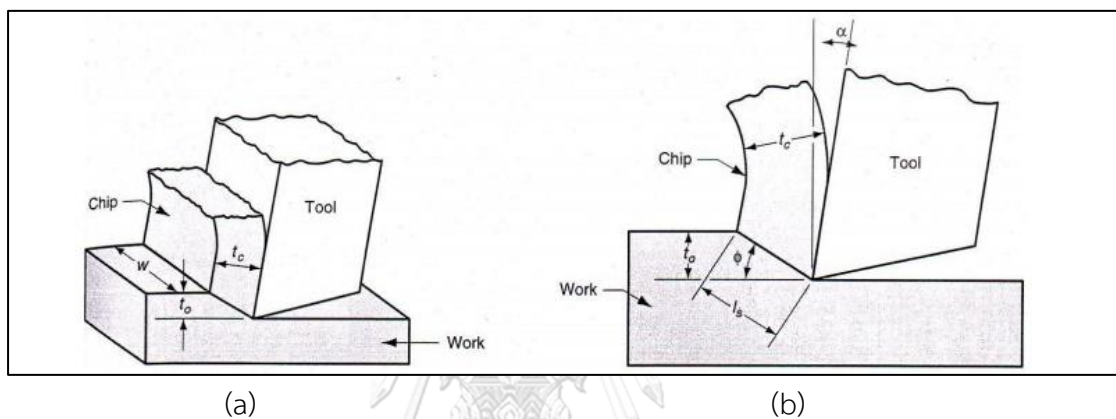
- 1) ระยะที่เศษโลหะเริ่มแยกตัวออกจากชิ้นงาน (Chip formation stage)
- 2) ระยะเศษโลหะม้วน (Chip curling stage) โดยแบ่งออกเป็น แบบม้วนทิศทางขนานกับมีดตัด (Side curling) และแบบม้วนทิศทางตั้งฉากกับมีดตัด (Up curling) เศษโลหะเมื่อสะสม shear strain จนเกินกำลังของวัสดุ (Strength of material) จะเกิดเข้าสู่ระยะที่ 3 คือเกิดการแตกหักกลายเป็น Broken chip แต่ถ้า shear strain ไม่เกินกำลังของวัสดุ เศษโลหะจะไม่แตกหัก กลายเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continue chip)
- 3) ระยะเศษโลหะแตกหัก (Chip breaking stage) สุดท้าย Continue chip จะแตกหักจากการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทางของเศษโลหะ

## 2.9 กลไกของกระบวนการกัดแบบมุมฉาก (Orthogonal cutting)

การอธิบายรูปร่างของกระบวนการกัดโดยทั่วไปมักจะมีความซับซ้อน เนื่องจากในกระบวนการกัดจริงจะเป็นลักษณะ 3 มิติ อย่างไรก็ตาม การอธิบายกลไกของกระบวนการกัดนิยมอธิบายในรูปแบบของสองมิติที่เรียกว่า Orthogonal cutting



โดยนิยาม Orthogonal cutting จะใช้มีดตัดที่มีรูปร่างเหมือนลิ้ม (Wedge) ในการกัดชิ้นงานโดยมีคมตัด (Cutting edge) อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วการตัด (Cutting speed) เมื่อมีดตัดเคลื่อนลงไปในตัววัสดุจะเกิดเศษตัด (Chip) ขึ้นตามระนาบที่เรียกว่า ระนาบเฉือน (Shear plan) ซึ่งทำมุมกับผิวหน้าของชิ้นงานเท่ากับ  $\phi$  เรียกมุมนี้อีกว่า มุมเฉือน (Shear angle) การกัดเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานและจะทำให้เกิดเศษจากชิ้นงานหลัก ในบริเวณระนาบเฉือนวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (plastic deformation) ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 Orthogonal cutting: Three-dimensional process (a) and how it reduce to two dimension in the side view (b)

มุมสำคัญอีกสองมุมของมีดตัดที่ควรพิจารณาใน Orthogonal cutting ได้แก่ Rake angle ( $\alpha$ ) และ Clearance angle โดย Rake angle พิจารณาจากทิศทางการไหลของ Chip ที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานหลักและ Clearance angle เป็นมุมระหว่างผิว Flank ของมีดตัดกับผิวหน้าใหม่ของชิ้นงาน

ในระหว่างการตัดคมมีดจะอยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าระดับผิวหน้าชิ้นงานเดิมเป็นระยะเท่ากับ ความหนาของเศษตัด  $t_0$  ส่วนเศษตัดใหม่ที่เกิดขึ้นตามระนาบเฉือน จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น  $t_c$  อัตราส่วนระหว่างความหนาเริ่มต้นและความหนาสุดท้ายนี้เรียกว่า อัตราส่วนความหนาของเศษตัด (Chip thickness ratio or chip ratio,  $r$ ) ดังสมการที่ 1

$$r = t_0 / t_c \quad (1)$$

เนื่องจากความหนาของเศษตัดจะมากกว่าความหนาเริ่มต้นเสมอ อัตราส่วนนี้จึงน้อยกว่า 1.0

นอกจากความหนาเริ่มต้นแล้ว ใน Orthogonal cutting จะพิจารณาความกว้างของการตัด,  $w$  ดังแสดงในรูปที่ 11 ถ้ากำหนด  $l_s$  เป็นความยาวของระนาบเฉือน เมื่อแทนค่า

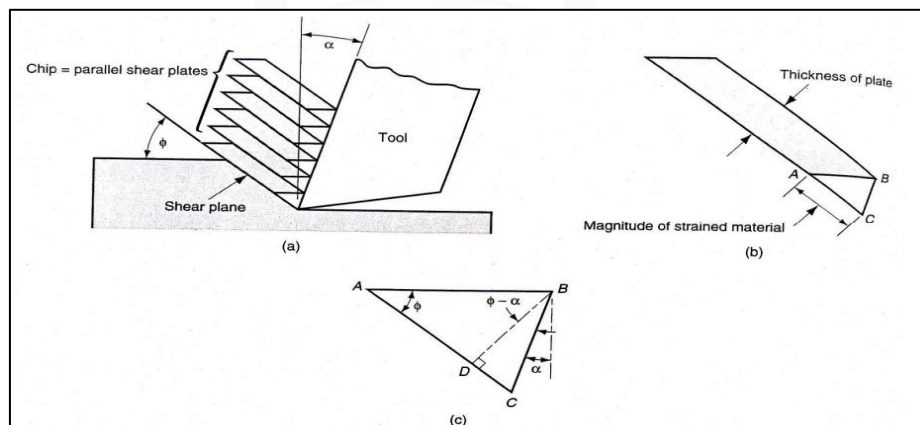
$t_0 = l_s \sin \phi$  และ  $t_c = l_s \cos(\phi - \alpha)$  ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง Chip thickness ratio, Rake angle และ Clearance angle จะเป็นดังสมการที่ 2

$$r = \frac{l_s \sin \phi}{l_s \cos(\phi - \alpha)} \quad (2)$$

สามารถคำนวณมุมเฉือน  $\phi$  จากสมการที่ 3

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (3)$$

ความเครียดเฉือน (Shear strain) เกิดขึ้นในระนาบเฉือน สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 11



รูปที่ 11 Shear strain during chip formation (a), one of the plates isolate to illustrate the definition of shear strain based on this parallel plate model (b), and shear strength (c)

จากรูปที่ 11 (a) จะเห็นว่า การเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนจะเกิดขึ้นกับชุดของระนาบที่ใกล้เคียงกันจนเกิดเป็นเศษตัด แต่ระนาบจะเกิดความเครียดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 11 (b) และจากรูปที่ 11 (c) จะได้ความสัมพันธ์ของความเครียดเฉือน ดังนี้

$$r = \frac{AC}{BC} = \frac{AC+DC}{BC} \quad (4)$$

ดังนั้นความเครียดเฉือน สามารถประเมินได้จาก

$$r = \tan(\phi - \alpha) + \cot \phi \quad (5)$$

สุดท้ายแล้วสมการความเครียดเฉือนในสมการที่ 5 จะใช้ในการคำนวณหาความเครียดเฉือนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ขาดออกจากกัน (เท่ากับจุด Ultimate strength)

## 2.10 ระบายเฉือน (Shear zone)

การเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนไม่ได้เกิดแค่ตามแนวระนาบเฉือน เพราะหากการเฉือนเกิดขึ้นผ่านแนวระนาบ นั้นหมายความว่า การเฉือนนั้นเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน แต่ในสภาพความเป็นจริง การเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนต้องอาศัยช่วงเวลาสั้นๆ และเกิดขึ้นภายในระนาบเฉือน (Shear Zone) บางๆ มากกว่าที่จะเป็นในระนาบเฉือนที่มีความหนาเท่ากับศูนย์ ลักษณะการเฉือนที่เกิดขึ้นจริง ในทางปฏิบัติแสดงได้ดังรูปที่ 12 (b) จากการทดลองในงานตัดโลหะพบว่าความหนาของโซนเฉือนนั้น จะมีขนาดเล็กมากประมาณ 0.001 นิ้ว ดังนั้นการพิจารณาการเฉือนในแนวระนาบจึงไม่มีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณมากนัก โดยแบ่งระบายเฉือนออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

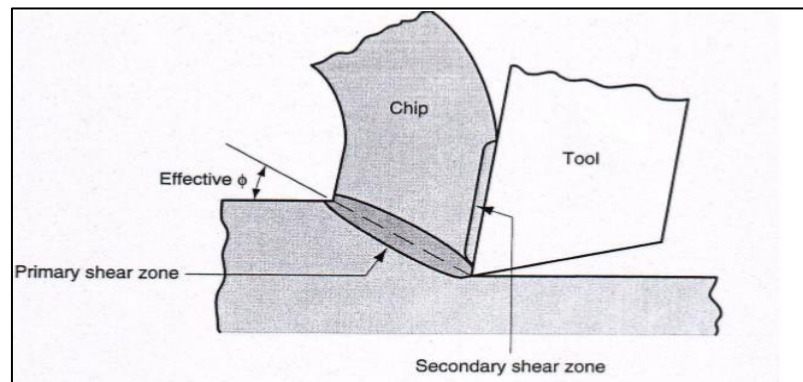
### 2.10.1 ระบายเฉือนต้น (Primary shear zone)

ในกระบวนการกัดโลหะ จะทำการกำจัดผิวชิ้นงานทีละชั้น ด้วยเครื่องมือตัด (cutting tool) ที่มีลักษณะคล้ายลิ้ม โดยเครื่องมือตัดจะออกแรงเฉือนที่ผิวของชิ้นงาน จนกระทั่งชิ้นส่วนนั้นหลุดออกมา กลายเป็นเศษตัด โดยเคลื่อนที่ผ่าน Rake face โดยตำแหน่งที่เป็นเส้นแบ่งระหว่างเศษตัดและผิวชิ้นงานเดิม เรียกว่า โซนเฉือนต้น (Primary shear zone) และเนื่องจากมีแรงกระทำจาก

เครื่องมือตัดที่ผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดตำแหน่งโซนเฉือนอีกตำแหน่งที่เรียกว่า โซนเฉือนปลาย (Secondary shear zone)

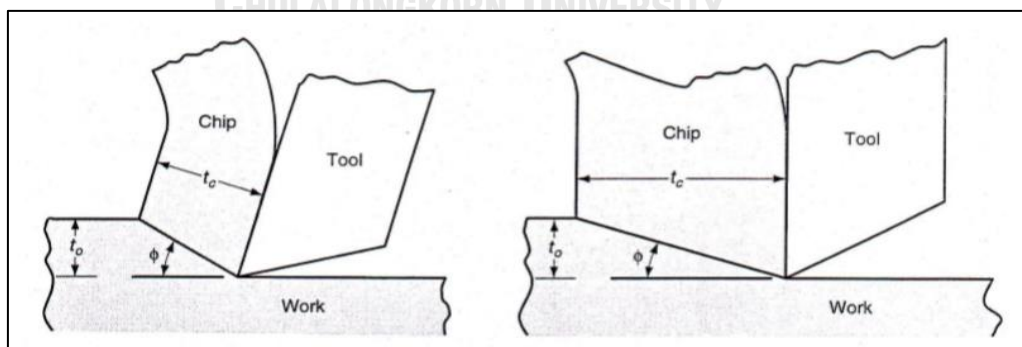
### 2.10.2 ระบายเฉือนปลาย (Primary Shear zone)

นอกเหนือจากมีการเฉือนเกิดขึ้นตามโซนเฉือนที่เรียกว่า Primary shear zone แล้ว ในการกัดจริง ยังมีการพิจารณาการเฉือนหลังจากการเกิดขึ้นของเศษตัดที่เรียกว่า Secondary shear การเฉือนนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทาน (Friction) ระหว่างเศษตัดกับคมมีดตัดในขณะที่เศษตัดไหลไปตามแนว Rake face ของมีดตัด โซนการเฉือนทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 โซนเฉือนแสดง Primary shear และ secondary

นอกจากนั้น มุมคายเศษ Rake angle ยังส่งผลต่อมุมเฉือนและระบายเฉือน จากรูปที่ 12 มุมคายเศษที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มุมเฉือนลดลง และระบายเฉือนเพิ่มขึ้น ทำให้เศษโลหะหนาขึ้นด้วย



(a)

(b)

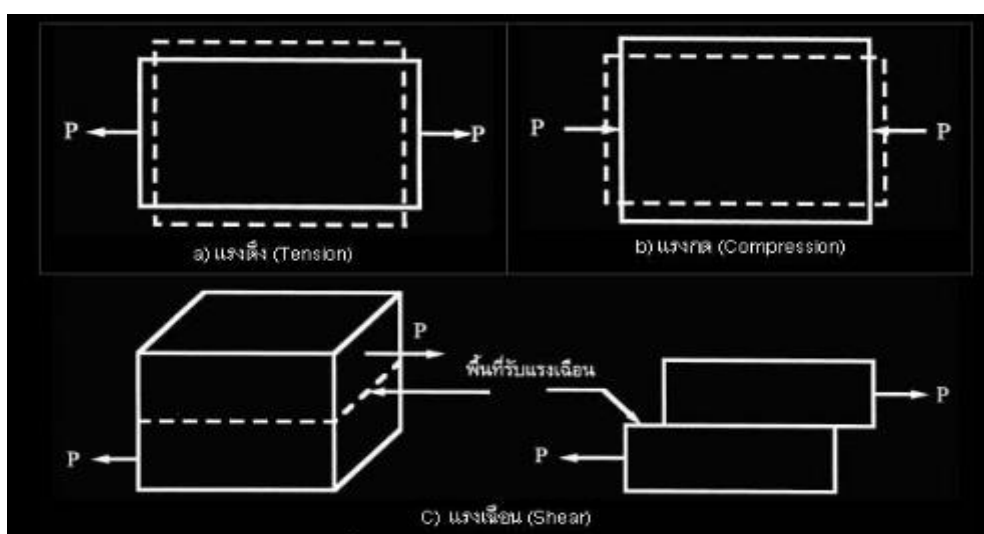
รูปที่ 13 higher shear angle, lower shear plane (a), smaller shear angle, larger shear plane

## 2.11 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

คือ คุณสมบัติของวัสดุที่ถูกนำมาพิจารณาก่อนนำมาใช้ เพื่อให้เหมาะสมต่อความต้องการ เช่น ความแข็งแรง (strength) ความเหนียว (Ductility) ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain)

### 2.11.1 ความเค้น (Stress)

ความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือเท่ากับแรงกระทำภายนอก โดยแรงกระทำสามารถแบ่งออกตามลักษณะทิศทางได้ 3 ชนิด ตามรูปที่ 14



รูปที่ 14 แรงดึง (Tension) (a), แรงกด (Compression)(b) และแรงเฉือน (Shear) (c)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 2.11.2 ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 14(a)

### 2.11.3 ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress)

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 14(b)

### 2.11.4 ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress)

ใช้สัญลักษณ์  $t$  เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากกระทำให้ทิศขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 14(c) มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่

ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน

#### 2.11.5 ความเครียด (Strain)

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

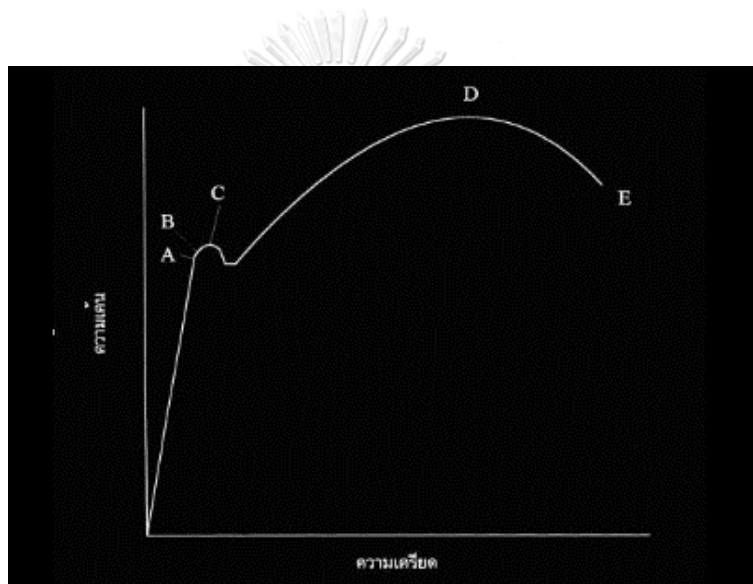
- 1) การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) คือ การเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม
- 2) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) คือ การเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่า ความเครียดกึ่งอีลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม
- แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ

### 2.11.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 15 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 15 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

### 2.11.7 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 14 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด เราพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ขึ้น

ทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิคัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิคัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิคัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดหนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิคัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกด้วยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้อาจใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า คำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือกำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจาก



พื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น

## 2.12 การเกิดขึ้นของเศษตัด (Formation of the chip)

ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ถูกกัดและภาวะการตัดโดยเศษตัดสามารถแยกได้เป็น 3 ประเภท ดังรูปที่ 16 ดังนี้

### 2.12.1 เศษตัดแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous chip)

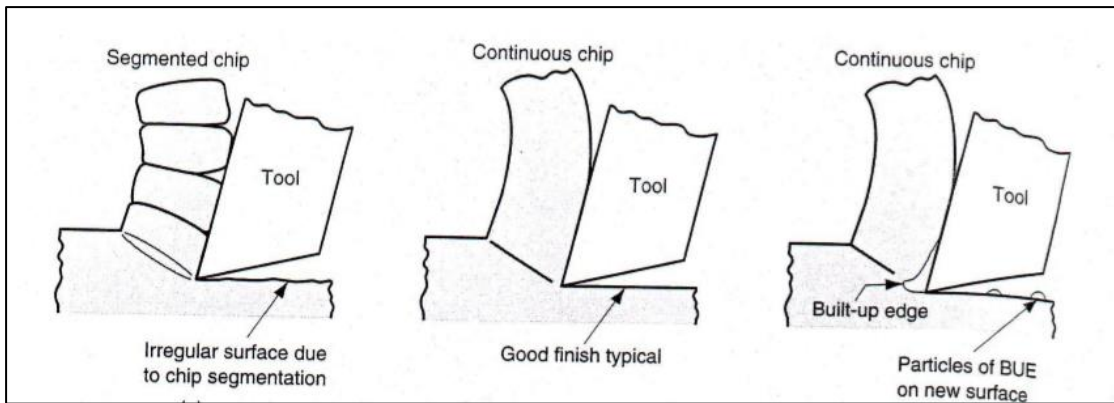
เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเปราะ (Brittle materials) เช่น เหล็กหล่อ (Cast irons) ถูกกัดในสภาพที่มีความเร็วการตัดต่ำ เศษตัดที่เกิดขึ้นจะแยกตัวเป็นส่วนๆ (Separated segments) อันเป็นสาเหตุของความไม่เรียบของผิวสำเร็จของชิ้นงาน เศษตัดชนิดนี้เกิดขึ้นได้ง่าย กรณีที่ความเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานมีค่าสูง (High tool-chip friction) และกรณีที่ขนาดของการป้อนและความลึกการตัดมีค่าสูง ดังรูปที่ 16(a)

### 2.12.2 เศษตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous chip):

เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเหนียว (Ductile materials) ถูกตัดด้วยความเร็วสูงและมีขนาดของอัตรา การป้อนและความลึกการตัดค่อนข้างต่ำ เศษตัดจะมีลักษณะยาวต่อเนื่องกันและมีผิวสำเร็จของชิ้นงานที่เรียบ เศษตัดชนิดนี้มักเกิดขึ้นในกรณีที่ มีดตัดมีความคม (Sharp cutting edge) และมีความเสียดทานระหว่างมีดตัดและชิ้นงานต่ำ ดังรูปที่ 16(b)

### 2.12.3 เศษตัดต่อเนื่องที่มีการเอี่ยมติดที่คมตัด (Continuous chip with built-up edge):

เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเหนียวถูกตัดด้วยความเร็วต่ำถึงปานกลาง ความเสียดทานระหว่างมีดตัดและชิ้นงาน ทำให้อัตราการกัดบางส่วนเกาะติดกับ Rake face ของมีดตัดใกล้ๆ บริเวณคมตัด ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Built-up edge (BUE) ซึ่ง BUE ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปกับเศษตัด แต่ส่วนที่เหลืออยู่และเกาะติดกับผิวหน้าของชิ้นงานจะทำให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานมีลักษณะขรุขระ ดังรูปที่ 16(c)



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 16 Discontinuous chip (a), Continue chip (b) and Continuous chip with built-up edge(c)

### 2.13 แรงในการตัด (Force in metal cutting)

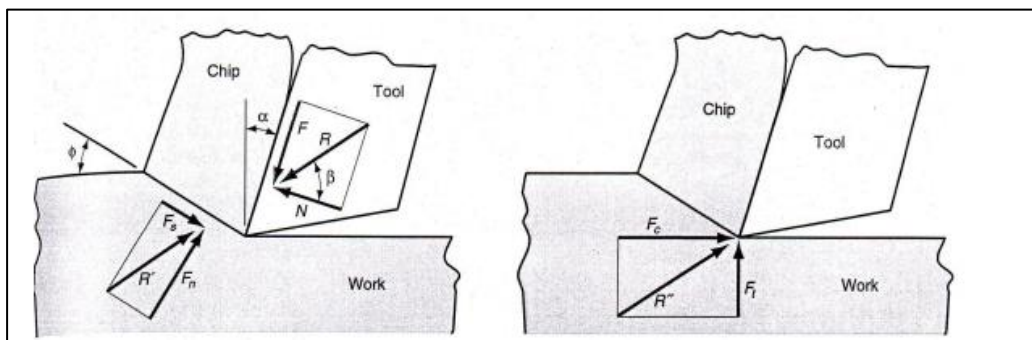
เมื่อพิจารณาแรง (Force) ที่เกิดขึ้นในเศษตัดใน Orthogonal cutting สามารถแยกแรงที่เกิดขึ้นกับเศษตัดอันเนื่องมาจากมีดตัดได้ 2 ส่วน ในแนวตั้งฉากกัน ได้แก่

#### 2.13.1 Friction force (F)

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างมีดตัดกับเศษตัดเพื่อต้านการไหลของเศษตัด (Flow of the chip) ตามแนว Rake face ของมีดตัด ดังรูปที่ 17 (a)

#### 2.13.2 Normal force to friction (N)

แรงในแนวตั้งฉากกับแรงเสียดทาน ดังรูปที่ 17 (b)



(a)

(b)

รูปที่ 17 Forces in metal cutting: (a) forces acting on the chip in orthogonal cutting and (b) forces action on the tool that can be measure

แรงทั้งสองนี้สามารถใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน,  $\mu$  ระหว่างมีดตัดและเศษตัด ดังสมการที่ 6

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (6)$$

แรงเสียดทานและแรงตั้งฉากนี้สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์เพื่อหาแรงลัพธ์ (Resultant force) R ซึ่งทำมุมเบต้า,  $\beta$  ที่เรียกว่ามุมเสียดทาน (Friction angle) มุมนี้สามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน สมการที่ 7

$$\mu = \tan \beta \quad (7)$$

นอกเหนือจากแรงที่กระทำต่อเศษตัดแล้ว ยังมีแรงอีกสองส่วนที่กระทำต่อเศษตัด ได้แก่

### 2.13.3 Shear force ( $F_s$ )

คือแรงเฉือนที่เกิดจากการตัด เกิดขึ้นในบริเวณระนาบเฉือน

### 2.13.4 Normal force to shear ( $F_n$ )

คือแรงในแนวตั้งฉากกับแรงเฉือน

ความเค้นการเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานและเศษตัดตามแนวระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$\tau = \frac{F}{A_s} \quad (8)$$

เมื่อ  $A_s$  = พื้นที่ของระนาบเฉือน (Area of the shear plan) ซึ่งสามารถคำนวณได้สมการที่ 9

$$A_s = \frac{t_0 w}{\sin \Phi} \quad (9)$$

ค่าความเค้นเฉือนที่คำนวณโดยสมการที่ 8 แสดงถึงระดับความเค้นที่ต้องการในกระบวนการกัด โดยหลักการแล้ว ความเค้นเฉือนนี้มีค่าเท่ากับกำลังวัสดุ (Strength of the work) ที่เกิดขึ้นในขณะตัด เมื่อเขียนเวกเตอร์ที่เกิดจากแรง  $F_s$  และ  $F_n$  จะได้เวกเตอร์ลัพธ์ R ซึ่งมีขนาดเท่ากับเวกเตอร์ R แต่มีทิศทางตรงกันข้าม

โดยปกติแรงย่อยทั้งสี่ ได้แก่  $F$ ,  $N$ ,  $F_s$  และ  $F_n$  ไม่สามารถวัดได้ในกระบวนการกัด แต่มีความเป็นไปได้ในการติดตั้งเครื่องมือวัดขนาดของแรงที่เรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เข้ากับมีดตัด ซึ่งจะทำได้ค่าแรงย่อย 2 แรง ที่ด้านการทำงานของมีดตัด ได้แก่

- 1) Cutting force,  $F_c$  หรือ Main force,  $F_m$  คือ แรงที่เกิดขึ้นในทิศทางของการตัด ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับความเร็วตัด
- 2) Thrust force,  $F_t$  คือ แรงในแนวของความหนา  $t_0$  ซึ่งจะมีทิศทางตั้งฉากกับ Cutting force รูปที่ 17 (b) แสดง Cutting force และ Thrust force ร่วมกับแรงลัทธิ์ แรงย่อยสองแรงนี้สามารถวัดได้โดยไดนาโมมิเตอร์ และสามารถใช้ในการคำนวณแรงย่อยทั้งสี่แรงข้างต้นจากสมการ

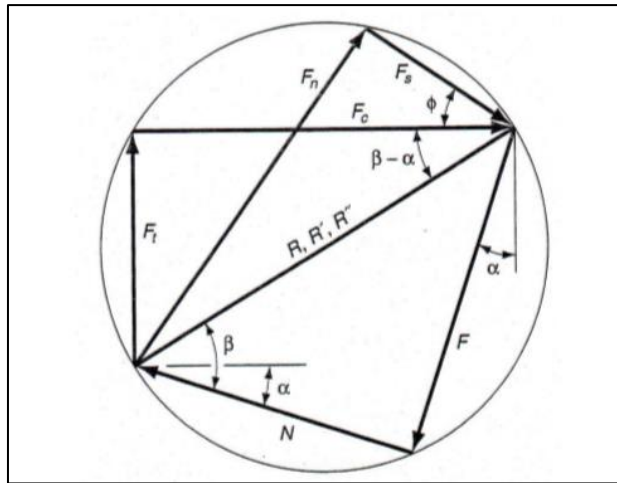
$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (10)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (11)$$

$$F_s = F_c \cos \Phi - F_t \sin \Phi \quad (12)$$

$$F_n = F_c \sin \Phi + F_t \cos \Phi \quad (13)$$

จะเห็นว่าในบางกรณี หาก Rake angle เป็นศูนย์ ( $\alpha = 0$ ) สมการ (10) และ (11) จะลดรูปเหลือ  $F = F_t$  และ  $N = F_c$  ตามลำดับ ดังนั้นในกรณีนี้แรงเสียดทาน (Friction force) และแรงตั้งฉาก (Normal force) จะสามารถวัดได้โดยตรงจากไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 18 Force diagram showing geometric relationships among  $F_s$ ,  $N$ ,  $F_n$ ,  $F_c$ ,  $F_t$

## 2.14 The merchant equation

สมการสำคัญที่ใช้ในการพิจารณากระบวนการตัดโลหะ เรียกว่า Merchant equation ซึ่งถูกพัฒนาโดย Eugene Merchant สมการดังกล่าว ตั้งอยู่บนหลักการของ Orthogonal cutting เพียงแต่เพิ่มการพิจารณาในกรณีที่กระบวนการกัดเป็นสามมิติ สมการดังกล่าวเริ่มจากการพิจารณาค่าแรงเฉือนจากการรวมความสัมพันธ์ในสมการ 8,9,12

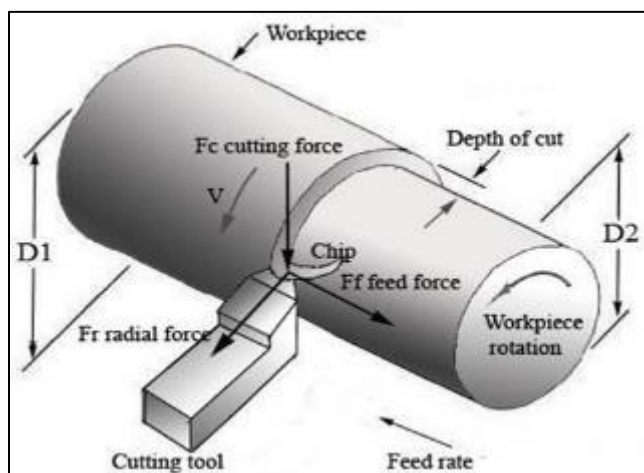
$$T = \frac{F_c \cos \Phi - F_t \sin \Phi}{(t_0 w / \sin \Phi)} \quad (14)$$

Merchant ให้เหตุผลว่า เมื่อพิจารณามุมต่างๆของคมมีดตัด ที่ทำให้การเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนจะพบว่ามุมเฉือน  $\Phi$  นั้น มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนจะเกิดขึ้นได้เมื่อความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับกำลังของวัสดุ ดังนั้นในกระบวนการกัดความเค้นเฉือนจะมีค่าน้อยกว่ากำลังวัสดุไม่ได้ เพราะการตัดจะไม่เกิดขึ้น กล่าวได้ว่าวัสดุแต่ละชนิดจะมีมุมเฉือนที่ใช้พลังงานการตัดน้อยที่สุดเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่ากำลังของวัสดุแตกต่างกัน การคำนวณมุมเฉือนสามารถทำได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของความเค้นเฉือนในสมการที่ 14 เทียบกับมุมเฉือน แล้วกำหนดค่าสมการให้เท่ากับศูนย์ จะได้ค่าประมาณมุมเฉือนตามสมการของ Merchant ดังสมการที่ 15

$$\Phi = 45 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (15)$$

สมมุติฐานที่ใช้ในสมการข้างต้นคือค่ากำลังของวัสดุ จะมีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอัตราความเครียด (Strain rate) อุณหภูมิหรือตัวแปรอื่นๆ แต่เนื่องจากในกระบวนการกัดจริง ไม่ได้เป็นไปตามสมมุติฐานดังกล่าว ค่าต่างๆที่คำนวณได้จึงเป็นค่าโดยประมาณ

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ Cutting Force หรือ Main Force ( $F_c$  หรือ  $F_m$ ) ถูกนำมาใช้มากในการประมาณแรงตัดที่เกิดขึ้นอย่างง่ายโดยใช้สมการที่ 16 เพื่อสามารถนำไปคำนวณกำลังที่ใช้ในการตัดได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 3D cutting force

จากรูป จะได้ว่า แรงตัดหลัก = ค่าความต้านทานการตัดเฉพาะ  $\times$  พื้นที่การตัด ดังนั้น

$$F_m, F_c = K_s \times A \quad (16)$$

โดยที่  $K_s$  = ความต้านทานการตัดเฉพาะแปรผันตามอัตราป้อนตัด

ทั้งนี้ จากสมการที่ 16 สามารถคำนวณกำลังที่ใช้การตัดได้จากความสัมพันธ์ของแรงตัดกับความเร็วตัด จะได้ว่า กำลังในการตัด = แรงตัดหลัก  $\times$  ความเร็วตัด เมื่อแทนความสัมพันธ์ในสมการที่ 16 จะได้กำลังในการตัด ดังสมการที่ 17

$$P = K_s \times A \times V \quad (17)$$

โดยที่  $P$  = กำลังในการตัด

ผลคูณของพื้นที่การตัดกับความเร็วตัดจะได้อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ โดยที่พื้นที่การตัดคืออัตราการป้อนตัดคูณด้วยความลึกในการตัด ดังสมการที่ 18

$$P = K_s \times f \times d \times v \quad (18)$$

อย่างไรก็ตาม ในการคำนวณหาค่าแรงตัดในกระบวนการกลึงนั้น ปกติจะใช้สมการที่ 16 ในการประมาณค่าแรงตัดหลัก ซึ่งแรงตัดหลักจะเป็นแรงที่มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับแรงป้อนตัดและแรงรัศมี เนื่องจากเกิดในทิศทางของความเร็วตัด ซึ่งแรงตัดหลักที่ได้นี้จะถูกนำมาใช้ประมาณกำลังในการตัดชิ้นงานที่จะเกิดขึ้นในขณะตัด เพื่อนำมาหาเครื่องกลึงที่มีกำลังที่เพียงพอต่อกำลังในการตัดสูงสุดที่คำนวณได้จากแรงตัดหลัก มิเช่นนั้นอาจทำให้เครื่องกลึงเกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัดได้ เนื่องจากกำลังของเครื่องกลึงไม่เพียงพอกับกำลังในการตัดชิ้นงาน

### 2.15 การแปลงหน่วยความเร็วสปีดเป็นความเร็วในการตัด

ความเร็วสปีดมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (RPM) ในการแปลง RPM ให้เป็นความเร็วในการตัดที่มีหน่วยเป็นเมตรต่อชั่วโมง (m/min) จะใช้สมการที่ 19

$$(v/60) = (r/1,000) \times \text{RPM} \times 0.10472 \quad (19)$$

เมื่อ  $v$  = ความเร็วเชิงเส้น หน่วย เมตร/นาที

$r$  = รัศมีชิ้นงาน หน่วย มิลลิเมตร

RPM = ความเร็วเชิงมุม (Spindle speed) หน่วย รอบต่อนาที

เมื่อ ความเร็วเชิงมุม = ความเร็วเชิงเส้น / 0.10472

### 2.16 การคำนวณเวลาในการตัดชิ้นงาน

สามารถคำนวณเวลาในการตัดชิ้นงานได้จากความยาวของชิ้นงานหารด้วยอัตราป้อนตัดที่คูณกับสปีด ดังสมการที่ 20

$$H = (60 \times L) / (f \times n) \quad (20)$$

เมื่อ  $H$  = เวลาในการตัดชิ้นงาน หน่วย วินาที

$L$  = ระยะในการตัดชิ้นงาน หน่วย มิลลิเมตร

$f$  = อัตราป้อนตัด หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ

$n$  = อัตราเร็วสปีด หน่วย รอบต่อนาที

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีการกัด

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะมีการสรุปรายละเอียดเพิ่มเติมจากทฤษฎีการเกิดตัดในบทที่ 2 ที่ได้ อธิบายถึงเศษโลหะทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้จะลงรายละเอียด ถึง ลักษณะการโค้งงอ ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการกัด และหัวข้ออื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะ ของเศษโลหะ

### Sawai Sukvittayawong and Ichiro Inasaki (1991) [1]

ได้ประยุกต์ใช้สัญญาณ Acoustic emission (AE) เพื่อเฝ้าติดตามและแยกสถานะของเศษ โลหะที่เกิดขึ้นขณะตัด เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟสัญญาณ AE เทียบกับความถี่ (Frequency) และ กราฟสัญญาณ AE เทียบกับเวลา(Time) พบว่า คลื่นสัญญาณ AE จะสูงขึ้นเมื่อเกิดเศษโลหะแบบไม่ ต่อเนื่อง โดยพบว่า ในขณะที่ตัดจะเกิดเศษโลหะขึ้น โดยสามารถแบ่งออกเป็นสามกลุ่มดังนี้

- (1) เศษโลหะยาว (long chip) มีความยาว 200mm ขึ้นไป
- (2) เศษโลหะสั้น (short chips) มีความยาวระหว่าง 50-200 mm
- (3) เศษโลหะฝอย (loose chip) ความยาวต่ำกว่า 50 mm

โดยอิทธิพลที่ส่งผลต่อ chip form ขึ้นอยู่กับ tool wear และ Cutting condition New tool, low feed, effect to long chip Wear tool, same feed, effect to shorter chip

### Kalhari Vahid (2001) [2]

กล่าวถึง parameter ที่สำคัญคือมุมคายเศษวัสดุ (rake angle) ซึ่งอยู่ระหว่างผิวหน้าของ เครื่องมือตัดและระนาบตั้งฉากจนถึงทิศทางการตัด มีผลต่อรูปแบบของเศษโลหะอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยได้แบ่งประเภทการแตกหักของเศษโลหะเป็น 2 ประเภท คือ แบบเปราะ (Brittle) และแบบแบบ ตัด (Ductile) การแตกหักแบบเปราะเป็นการแตกหักที่มีการกระจายตัวอย่างรวดเร็ว จะมีแนวโน้ม สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง และมีการเพิ่มขึ้นของความเครียด โดยอธิบายว่าการแตกหักแบบเปราะดี ที่สุด เพราะช่วยลดพลังงานและลดการสึกหรอของเครื่องมือได้ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ เกี่ยวข้องในกระบวนการกัดโลหะ โดยให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์อุณหภูมิ (Temperature) และ การเสียรูป (Deformation)



### กิตติกุล กลิ่งผล (2011) [3]

ศึกษาการพัฒนาตรวจจับการแตกหักของโลหะโดยใช้สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ พบว่าเงื่อนไขการตัดที่ส่งผลต่อรูปแบบของโลหะที่เกิดขึ้น คือ ความเร็วตัด ความลึกในการตัด และอัตราป้อนตัด โดยแบ่งประเภทของโลหะออกเป็น 2 แบบคือ โลหะแบบต่อเนื่อง และโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง หลังจากการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ พบว่าขนาดแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตจะมีขนาดใหญ่เมื่อโลหะแตกหัก ซึ่งแอมพลิจูดจะมีขนาดตรงกันข้ามเมื่อเกิดโลหะแบบต่อเนื่อง จากนั้นได้หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสัญญาณและรูปร่างโลหะ โดยได้แบ่งประเภทของโลหะจากตามเงื่อนไขของความเร็วตัด ความลึกในการตัด และอัตราป้อนตัด โดยสรุปดังนี้

(1) ผลของความเร็วรอบตัดต่อการแตกหักของโลหะ: หากกึ่งขึ้นงานด้วยความเร็วรอบต่ำ จะทำให้เกิดโลหะแบบต่อเนื่องน้อยกว่าใช้ความเร็วรอบสูง เนื่องจากมุมเฉือนที่มากขึ้นจะทำให้โลหะที่หลุดออกมาบางลงและแตกหักได้ยาก อีกทั้งความเร็วตัดที่ต่ำจะส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการผลิตมากขึ้น ควรใช้ความเร็วรอบตัดที่น้อยเพื่อให้โลหะแตกหัก และความร้อนที่เกิดขึ้นจะหลุดไปกับโลหะ เพื่อลดการสึกหรอของมีดตัดที่เกิดจากความร้อน

(2) ผลของอัตราป้อนตัดต่อการแตกหักของโลหะ: พบว่าอัตราป้อนตัดที่ต่ำ จะส่งผลทำให้เกิดโลหะแบบต่อเนื่องมากกว่าอัตราป้อนตัดที่สูง มีแนวโน้มที่ความหนาของโลหะเพิ่มขึ้น และจะโค้งมาชนกับใบมีด อัตราป้อนตัดที่สูงขึ้นยังส่งผลให้ผิวชิ้นงานเรียบขึ้นด้วย

(3) ผลของความลึกตัดต่อการแตกหักของโลหะ: หากใช้ความลึกตัดต่ำ จะทำให้เกิดโลหะแบบต่อเนื่องมากกว่าการใช้ความลึกตัดสูง เนื่องจากเมื่อความลึกตัดมากขึ้น จะทำให้ความหนาและความกว้างเพิ่มขึ้น เกิดการแตกหักได้ง่าย

### อาทิตยา ชัยจรีนนท์ (2011) [4]

ในกระบวนการกลึงแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมในขณะตัดกับค่าอัตราส่วนแรงตัด (แรงป้อนตัดต่อแรงตัดหลัก) ที่วัดได้ในขณะตัดจริง จากนั้นได้ประยุกต์สมการพยากรณ์ความขรุขระของผิวชิ้นงานร่วมกับเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด รัศมีงูมตัด ความลึกในการตัด และอัตราส่วนแรงตัด สรุปได้ดังนี้

(1) ชิ้นงานเรียบขึ้นเมื่ออัตราป้อนตัด และความลึกตัดต่ำ ซึ่งตรงข้ามกับความเร็วตัดและรัศมีจุมุกตัด รัศมีจุมุกมีตัดจะทำให้ผิวงานเรียบแต่ถ้ามีมากไปจะทำให้ผิวงานไม่เรียบ

(2) ความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ชิ้นงานอ่อนนุ่ม แรงในการตัดลดลง แต่ไม่เหมาะสมสำหรับการตัดอลูมิเนียม เพราะทำให้เศษโลหะสะสมความร้อน ติดไปกับมีดตัด และความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้เศษโลหะมีความยาวมากและมีปริมาณมาก

(3) รัศมีจุมุกตัดที่ใหญ่ขึ้น จะทำให้ผิวเรียบขึ้นเนื่องจากช่วยลบรอย Feed mark

### สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ (2013) [5]

กล่าวว่า ระยะเวลาในการตัดนานขึ้น แนวนอนของความเร็วรอบกับค่าความหยาบผิวจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความเร็วรอบที่สูงขึ้น และระยะเวลาในการตัดที่ยาวนานขึ้น จะให้ค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นด้วย

ความเร็วรอบที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อายุการใช้งานของมีกัคมมีแวนโน้มสั้นลง เนื่องจากจากที่ความเร็วรอบที่สูง จะทำให้ความสามารถในการหล่อลื่นหล่อเย็นของสารหล่อเย็นน้อยลง เนื่องจากที่ความเร็วรอบสูง สารหล่อเย็นเข้าไปยังบริเวณการตัดเฉือนได้ยาก ทำให้ประสิทธิภาพในการหล่อเย็นลดลง

อัตราการป้อนตัดที่สูงทำให้การเคลื่อนที่เข้าตัดเนื้อโลหะสูงขึ้น ทำให้แรงตัดเพิ่มสูงขึ้น และความลึกตัดที่สูงกว่าจะมีอุณหภูมิเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่การตัดเฉือนสูง แต่เมื่อได้รับสารหล่อเย็น ทำให้เกิดการเย็นตัวลง ทำให้การตัดเฉือนทำได้ยากขึ้นและแรงตัดที่มากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ผิวสำเร็จที่แยกว่าที่ความลึกตัดต่ำ

### ธารรัตน์ ชาญสูงเนิน (2011) [6]

ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี ภายใต้เงื่อนไขของ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุกตัด และมุมคายเศษโลหะ จากนั้นได้ใช้ตัวแปลงสัญญาณวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงกับแรงตัดเพื่อปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในกระบวนการตัด สรุปได้ดังนี้

(1) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและการเกิดเศษโลหะ พบว่าเมื่อใช้ความลึกตัดที่มีค่าต่ำมากๆ จะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า เมื่อความลึกตัดมีค่ามาก จะทำให้เศษโลหะ

หนาขึ้น เคลื่อนที่มาชนกับหน้าคายนกคยลหะของมิตตด ทำให้แตกหักงาย แต่ความตรงมีแนวโน้มลดลง

(2) ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีจุมกมิตและการเกิดคยลหะ พบว่าเมื่อรัศมีจุมกมิตที่ใหญ่กว่าจะเกิดคยลหะที่มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า

(3) ความสัมพันธ์ระหว่างมุกคยลหะกับการเกิดคยลหะ พบว่า เมื่อใช้มุกคยลหะลหะที่มากกว่า คยลหะที่เกิดขึ้นจะมีความยาวต่อเนื่องมากกว่า เพราะมุกคยลหะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อมูมระนาบเฉือน โดยสรุปว่า เงื่อนไขการแตกหักของคยลหะแบบต่อเนื่อง ให้ผลกับค่าความเรียบของชิ้นงานที่ดีกว่า

#### เดือนพรรณ จันทนา (2014) [7]

อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการตัดต่อความกลม โดยใช้การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีผลลัพธ์ดังนี้

(1) ความเร็วตัด เมื่อความเร็วตัดสูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิการตัดมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุอ่อนนุ่ม จึงใช้แรงในการตัดน้อย ส่งผลให้การสั่นสะเทือนน้อย คุณภาพผิวที่ได้จึงออกมาดี

(2) อัตราป้อนตัด เมื่ออัตราป้อนตัดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น ทำให้แรงตัดพลวัตมากขึ้น ส่งผลต่อคุณภาพผิวชิ้นงาน

(3) ความลึกตัด การเพิ่มความลึกตัดทำให้พื้นที่ตัดเพิ่มมากขึ้น แรงขณะตัดมากขึ้น ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องมิตตดและชิ้นงาน

(4) รัศมีจุมกมิต เมื่อรัศมีจุมกมิตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะช่วยลดรอยป้อนตัดที่เกิดขึ้น

(5) มุกคยลหะ เมื่อมุกคยลหะมากขึ้น ทำให้เศษวัสดุขณะตัดเคลื่อนตัวออกได้ง่าย แรงขณะตัดน้อยลง

#### มูร์มีน ศาสน์สันติวงค์ (2015) [8]

ได้คำนวณสมการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงกว่าสมการที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว โดยมีฟังก์ชันเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีตัด และมุกคยลหะ จากนั้นได้ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อตรวจวัด

สัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะตัด สมการที่ได้มีความแม่นยำที่ความตรง 92.14% และความกลมที่ 95.51% โดยสามารถทำนายได้ทุกเงื่อนไขการตัดไม่ว่าจะแตกหักหรือต่อเนื่อง

ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความกลมของชิ้นงาน รวมถึงเงื่อนไขการตัดได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการใช้สมการเอกซ์โปเนนเชียล จากนั้นใช้ความสัมพันธ์แบบถดถอยพหุคูณเพื่อวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยใช้กำลังสองน้อยที่สุด

จากผลการทดลองพบว่า อัตราป้อนตัด อัตราส่วนแรงตัด เป็นสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความตรงของชิ้นงานมากที่สุด โดยที่ความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อใช้ความเร็วตัด รัศมีจุมกตัด และมุมคายเศษที่มีค่ามากๆ ในขณะที่ใช้อัตราป้อนตัดละความลึกตัดน้อยๆ

### ภทร ไชยวงศ์ (2017) [9]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมีดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตเพื่อแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตออกจากสัญญาณรบกวนอื่นๆ โดยมีเงื่อนไขการตัดคือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกตัด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่ 3 ระดับ

ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีความสัมพันธ์กับขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมีดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลงเมื่อเม็ดมีดมีการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น โดยแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัด แต่อัตราส่วนแรงตัดพลวัตยังคงเหมือนเดิม จึงนำแรงตัดพลวัตเพื่อใช้ในการพยากรณ์การสึกหรอของเม็ดมีดด้านข้างในรูปแบบของฟังก์ชันเอกโปเนนเชียลที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และสมการพยากรณ์การสึกหรอของเม็ดมีดนี้ให้ความแม่นยำเท่ากับ 93.85%

### ทองพรรณราย มัยโชติ (2015) [10]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือการทำนายความขรุขระผิวของชิ้นงานจากแรงตัดพลวัต โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของแรงตัดพลวัต ใช้การแปลง wavelet จากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่เพื่อแยกความถี่ของความขรุขระผิวและความถี่ของการแตกหัก แล้วจึงนำสัญญาณความถี่ของความขรุขระผิวไปพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวโดยใช้รูปแบบสมการเอกโปเนนเชียลแบบถดถอยพหุคูณในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยพบว่า ความเร็วตัดที่มากขึ้น อัตราการป้อนตัดต่ำ ความลึกตัดที่ลดลง การเพิ่มขนาดของรัศมีจุมกตัด และ มุมคายเศษโลหะที่มีค่ามากจะทำให้ค่า

ความขรุขระผิวชิ้นงานลดลง และพบว่าอัตราส่วนของแรงตัดพลวัตมีผลต่อค่าความขรุขระผิวมากที่สุด โดยสมการทำนายความขรุขระผิวนี้มีความแม่นยำในระดับสูงถึง 92.78% และ 93.46%

### KATHLEEN DEBENEDICTIS (1998) [11]

ในโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ มีปัญหาในกระบวนการกลึง พบว่าพนักงานต้องหยุดเครื่องบ่อยครั้งเพื่อซ่อมบำรุง ปัญหาเกิดจากเศษโลหะที่เกิดขึ้นจากการกลึงชิ้นงานเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยได้ทำการแก้ปัญหาคือเพิ่มมุมคายเศษให้สูงขึ้น (higher positive rake insert) หลังการแก้ไขทำให้ไม่ต้องหยุดเพื่อซ่อมบำรุงบ่อยๆอีก พบว่าลักษณะการแตกหักมี 3 แบบ

- 1) แตกหักด้วยตัวเอง → เหมาะสมต่อการใช้
- 2) แตกหักโดยแรงต้านจากเครื่องมือ → เครื่องมืออาจแตกหัก
- 3) แตกหักโดยแรงต้านจากชิ้นงาน → ผิดไม่ตี

และได้แยกประเภทของโลหะ โดยแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างการแตกหักกับขนาดของเศษโลหะ ที่เกิดขึ้น ดังนี้

- 1) เหล็กหล่อ (Cast Iron) ด้วยส่วนประกอบแล้ว จะมีเศษโลหะที่มีขนาดเล็ก คล้ายกับเศษฝุ่น และมีสีเทา
- 2) เหล็ก (Steel) เศษโลหะมีความแข็งมาก มีความต่อเนื่องของเศษโลหะ มีปล้องใหญ่ ถ้าควบคุมไม่ดีจะมีรูปร่างเป็นเกลียว คล้ายสปริง และมีสีน้ำเงิน
- 3) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) การแตกหักของเศษโลหะเหมือนเหล็ก มีแนวโน้มที่จะเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

จากประเภทคุณสมบัติที่แตกต่างกันของเหล็กแต่ละประเภท ทำให้เงื่อนไขการตัดไม่เหมือนกัน โดยเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีเงื่อนไขที่เกิดขึ้นขณะตัดคือ มีการนำความร้อนต่ำ และความอ่อนสูง กว่าเหล็กทั่วไป เนื่องจากส่วนประกอบที่สร้างขึ้นเพื่อทนการผุกร่อนและมีค่าความเค้นคราก (Yield strength) สูงกว่าโลหะทั้งสามชนิด ทำให้ขณะกัดโลหะจะเกิดแรงเสียดทาน(Friction) และต้องใช้แรงตัดสูง (Cutting force) โดยมีข้อเสนอแนะให้ใช้มุมคายเศษด้านบวก หรือ ใช้เม็ดมีดกลึงแบบหักเศษโลหะ (Chip breaker) และรูปร่างของมีดตัดที่เหมาะสมกับเนื้อวัสดุ ที่ไม่ทำให้แรงตัดเกิดการต้านทาน โดยมีการสรุปเงื่อนไขการตัด ดังนี้

อัตราป้อนตัด (Feed rate): สัมพันธ์กับรูปร่างของมีดตัดในการควบคุมเศษโลหะ โดยเป็นตัวแปรที่กำหนดความสามารถของมุมตัดที่ทำให้เกิดเศษโลหะที่อัตราป้อนตัดที่แตกต่างกันและระยะลึกตัด ต่างกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าอัตราป้อนตัดต่ำไป จะทำให้เศษโลหะยาว มีความเหนียวและไม่สามารถขาดได้ด้วยตัวเอง ในขณะที่เดียวกัน ถ้าอัตราป้อนตัดสูง จะมีเศษโลหะที่หนา โดยเป็นสัญญาณบ่งบอกว่ามีโอกาศที่จะทำให้มีดตัดสึกและต้องใช้แรงมากในการทำให้เกิดเศษโลหะ โดยมีข้อเสนอแนะให้ใช้ความลึกตัดสูงสุดจากนั้นถึงกำหนดอัตราป้อนตัดโดยมันจะใช้ได้ดีร่วมกับการออกแบบมีดตัดที่ดี

มุมนำตัดมุมตัดข้าง (Lead Angles or Side cutting edges): ส่งผลต่อทิศทางการไหลของเศษโลหะ ความหนาและความกว้างเศษโลหะ ยังมีมุมมองที่น้อย เช่น  $90^\circ$  ยิ่งทำให้มีดตัดเข้าถึงชิ้นงานอย่างฉับพลัน โดยใช้แรงตัดมากขึ้น เศษโลหะสั้นลง ความหนาเพิ่มขึ้น

รัศมีจุมุมมีด/ ความลึกตัด: รัศมีจุมุมมีดและความลึกตัดมีผลต่อรูปร่างและทิศทางของเศษโลหะ ความลึกตัดน้อยทำให้เกิดเศษโลหะรูปเกลียว ความลึกตัดที่มากจะนำไปสู่เศษโลหะที่มีขนาดเล็ก ในทำนองเดียวกัน รัศมีจุมุมมีดเล็กจะทำให้เกิดเศษโลหะที่บางและง่ายต่อการผลึกออกจากชิ้นงาน ในทางกลับกัน รัศมีจุมุมมีดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดเศษโลหะที่หนาและเกิดเศษโลหะแบบไม่มีทิศทาง และต้องการแรงตัดที่สูงขึ้น

### Yijiang Fang (1998) [12]

อธิบายถึงการเกิดเศษตัด (chip formation) การเกิดเศษโลหะที่มีลักษณะโค้งงอ (Chip curling) เกิดจากปัจจัยของเงื่อนไขการกัดและรูปร่างของเครื่องมือตัด บทความของ Van Luttervelt (1976) กล่าวว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะการโค้งงอมีดังนี้

(1) มุม Cutting edge ไม่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ (มุมคายเศษ Rake angle + ส่งผลให้เศษโลหะมีความบางกว่า Rake angle -)

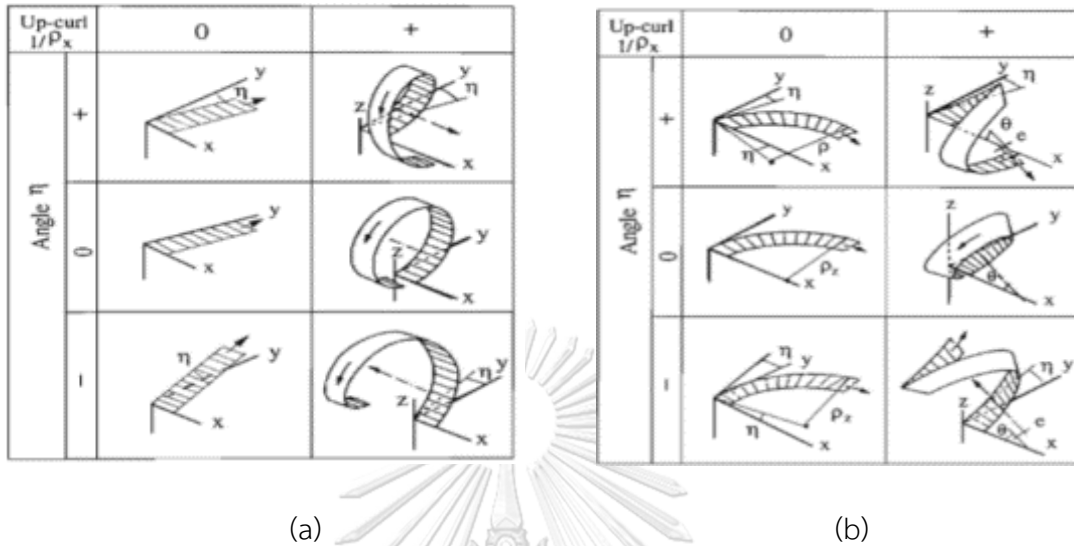
(2) การเคลื่อนที่ของมีดตัดไม่เป็นเส้นตรง

(3) ความหลากหลายของแรงอัด อันเนื่องมาจากความหนาของเศษโลหะที่มีขนาดไม่คงที่

โดยสรุปว่า เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะเกิดการตัดเฉือน จะมีด้วยกันทั้งหมด 2 ประเภท

1) Chip flow with side curling คือ การที่เศษโลหะเคลื่อนที่ผ่านผิวหน้ามีดและม้วนไปด้านข้าง โดยมีทิศเดียวหรือทิศทางตรงกันข้ามกับอัตราป้อนตัด ดังรูปที่ 20(a)

2) Chip flow with up curling คือการที่เศษโลหะม้วนขึ้นด้านบน เกิดจากการเกิด Build up edge ที่คงที่ 20(b)



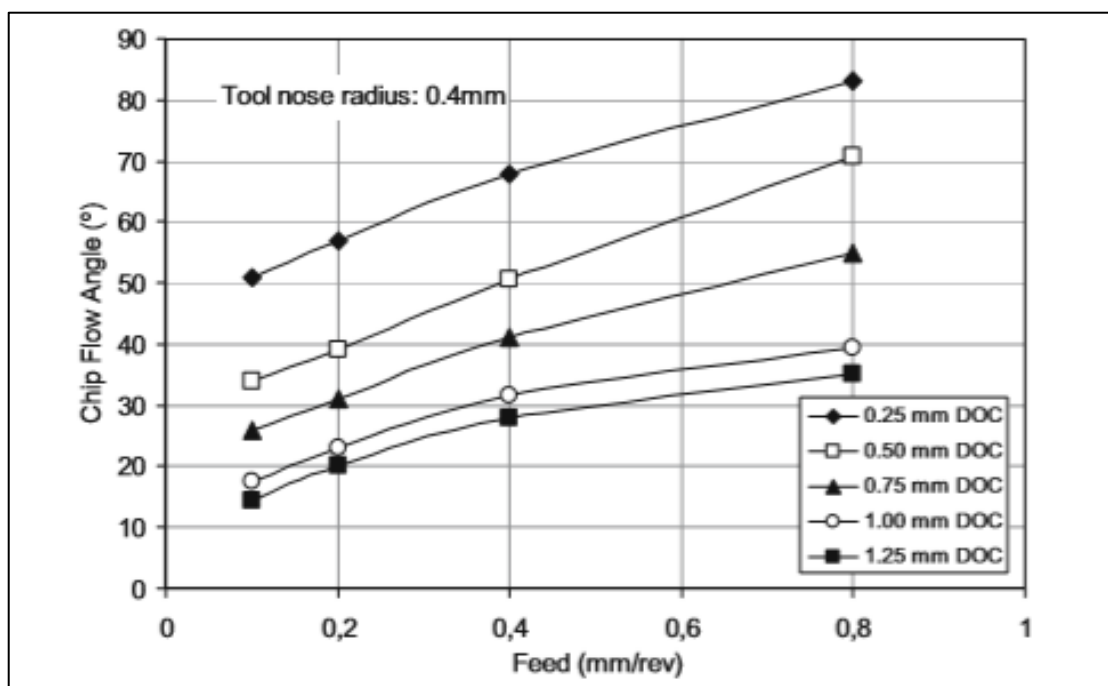
รูปที่ 20 Chip flow with side curling (a) และ Chip flow with up curling

Murat Kiyak et al (2005) [13]

กล่าวว่า สมการทำนายทิศทางเศษโลหะของหลายๆงานวิจัยยังไม่เหมาะสม จึงได้คิดค้นสมการการทำนายทิศทางของเศษโลหะ ในเหล็กกล้าที่มีส่วนประกอบ AISI1025 (C0.24%, Si0.18%, Mn0.25%, P0.02%, S0.03% and hardness 185Hv) โดยใช้ Neural network ในการสร้างสมการทำนาย มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือเงื่อนไขในการตัด โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 1) Orthogonal cutting
- 2) Depth of cut 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25
- 3) Feed 0.1 0.2 0.4 0.8 mm/rev
- 4) Nose radius 0.4
- 5) Cutting speed (not effect to chip flow angle) (105 m/min)

จากนั้นสรุปเป็น Regression model โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น พบว่ามีความใกล้เคียงในการทำนายมากกว่าวิธีอื่น โดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างน้อยสุดอยู่ที่ 5.53% จึงสรุปว่า Neural network ดีที่สุด และจากผลการทดลองสรุปว่า Chip flow angle ลดลงเมื่อ Depth of cut เพิ่มขึ้น และ Feed ลดลง ดังรูปที่ 21 ซึ่งจะเห็นได้ว่า Cutting speed ไม่มีผลต่อ Chip flow angle



รูปที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการเกิดเศษโลหะต่ออัตราป้อนตัดและความลึกตัด

ความเห็นของผู้เขียนต่อบทความนี้คือ Cutting speed อาจส่งผลต่อองศาการเกิดเศษโลหะ เนื่องจากการลด Cutting speed ทำให้เศษโลหะหนาขึ้น ความหนาของเศษโลหะส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของเศษโลหะบนผิวคายเศษของมีดตัด ทำให้เศษโลหะมีองศาการเกิดที่ลดลง

A.D'Acunto et al (2017) [14]

ได้ออกแบบสมการทำนายทิศทางของเศษโลหะในกระบวนการกลึงโลหะแบบแห้ง โดยนำปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือลักษณะของมีดตัด (Tool geometry) และเงื่อนไขการตัด (Cutting condition) มาทำการทดลองและสรุปผล โดยกำหนดระดับของปัจจัยดังนี้ คือ Stainless steel, Carbide insert, nose radius 0.4 mm Cutting speed 100 mm/min Feed 0.12 m/rev, side cutting edge angle 45°-90°, Depth of cut 0.2-0.8 mm โดยใช้ Dynamometer ในการวัดแรงขณะตัด ในทิศของความลึกตัด(Radial force, Fx) และอัตราป้อนตัด (Feed force, Fy) ซึ่งบทความนี้สนใจแรงใน



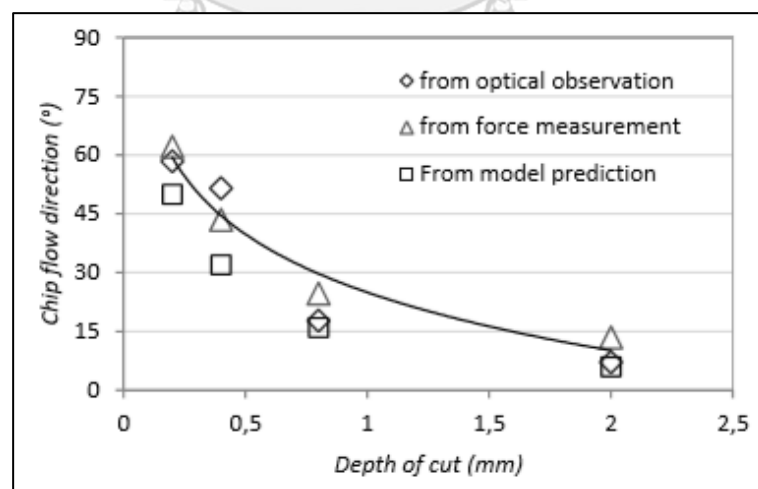
แนวอัตรाप้อนตัด (Feed force) เนื่องจากแรงป้อนตัดส่งผลต่อการสั่นสะเทือนขณะตัดและเป็นการเพิ่มความแม่นยำของสมการทำนายทิศทางของเศษโลหะ จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

Cutting-edge angle ที่  $90^\circ$  จะใช้แรงในแนวความเร็วตัด และแรงในแนวอัตรाप้อนตัดน้อยกว่ามุมที่  $45^\circ$  และความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น จะใช้แรงในการตัดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 22

Cutting Speed V (m/min)	Feed f (mm/rev)	Depth of cut ap (mm)	Cutting angle Kr ( $^\circ$ )	X direction Force (N)	Y direction force (N)
100		0.2		$65^{+/-1}$	$33^{+/-1}$
100	0.12	0.4	90	$79^{+/-2}$	$83^{+/-1.5}$
100		0.8		$92^{+/-1}$	$200^{+/-2}$
100		2		$131^{+/-2}$	$546^{+/-3}$
100		0.2		$64^{+/-0.5}$	$32^{+/-2}$
100	0.12	0.4	45	$102^{+/-2}$	$70^{+/-2}$
100		0.8		$183^{+/-2}$	$153^{+/-4}$
100		2		$460^{+/-1}$	$410^{+/-3}$

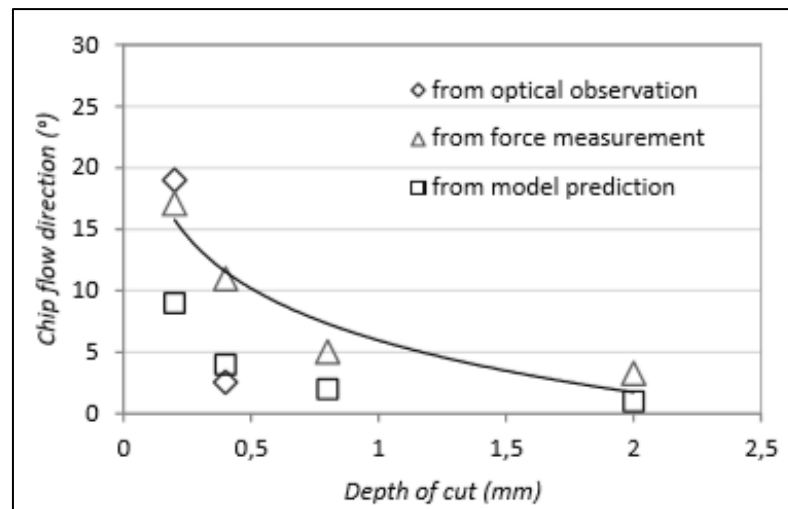
รูปที่ 22 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด

Side cutting edge angle สูงขึ้น ทำให้ Chip flow angle สูงขึ้น ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและทิศทางของการเกิดเศษโลหะ ที่ side cutting edge angle =  $90^\circ$

Side cutting edge angle ต่ำลง ทำให้ Chip flow angle ต่ำ ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและทิศทางของการเกิดเศษโลหะที่ side cutting edge angle = 45°



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การออกแบบการทดลอง

กำหนดเงื่อนไขการตัดที่เกี่ยวข้องกับทิศทางของเศษโลหะ และลักษณะของเศษโลหะที่มีขนาดเล็กกว่าของชิ้นงานที่มีความกว้างน้อยกว่า 2.5 มิลลิเมตร ทำให้ไม่ติดในรูของชิ้นงาน และสามารถล้างออกด้วยกระบวนการถัดไปได้ โดยที่คุณภาพผิวงานไม่เปลี่ยนแปลง

#### 3.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา ที่เกี่ยวข้องกับทิศทางของเศษโลหะและการแตกหักของเศษโลหะ พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลดังนี้

1) การเกิดเศษโลหะ ประกอบด้วย การแตกหักและทิศทางของเศษโลหะ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ความลึกตัด อัตราป้อนตัด อัตราเร็วสปินเดิล มุมคายเศษ ลักษณะของมีดตัดและปัจจัยอื่นๆ แต่เนื่องจากในโรงงานที่ทำการศึกษา ไม่สามารถปรับลักษณะของมีดตัดได้จากเหตุผลเรื่องการสั่งซื้อและปริมาณสินค้าคงคลังดังนั้นจะไม่นำปัจจัยที่เกี่ยวกับลักษณะของมีดตัดพิจารณาในการทดลอง รวมถึงปัจจัยอื่นเช่น อุณหภูมิขณะตัด เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยตรงและไม่ใช่ปัจจัยหลักที่เกี่ยวกับการเกิดเศษโลหะ ดังนั้นปัจจัยที่จะนำมาพิจารณาคือ ความลึกตัด อัตราป้อนตัด อัตราเร็วสปินเดิล เนื่องจากสามารถปรับทดลองได้และเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงกับการเกิดเศษโลหะ

2) ความเร็วตัด (Cutting speed, m/min) จะถูกแทนที่ด้วย ความเร็วรอบสปินเดิล (Spindle speed, RPM) ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจาก ปัจจัยทั้งสองเกี่ยวข้องกับความเร็วที่คมมีดตัด ตัดผิวโลหะออก เมื่อชิ้นงานหมุนไปครบรอบ 1 รอบ ซึ่งความเร็วรอบสปินเดิล จะนำขนาดของชิ้นงานมาคำนวณร่วมด้วย

#### 3.3 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับของปัจจัย จะพิจารณาจากความสามารถของเครื่องจักรที่สามารถทำได้ รวมถึงเงื่อนไขของแต่ละปัจจัย จะถูกทดลองให้สอดคล้องกับทิศทางการเกิดเศษโลหะ และการแตกหักของเศษโลหะ ซึ่งสามารถแบ่งเงื่อนไขในการทดลอง คือ เงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 1 เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 2 เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 3 ดังตารางที่ 4, 5, 6 และ ตารางที่ 7

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน

ปัจจัย	เงื่อนไขการตัด
1.อัตราป้อนตัด (Feed)	0.12 mm/rev
2.ความลึกตัด (Depth of cut)	0.15 mm
3.ความเร็วรอบสปินเดิล (spindle speed)	3600 rpm

จากตารางที่ 4 เงื่อนไขการตัดในปัจจุบันถูกกำหนดตั้งแต่การตั้งไลน์การผลิต เป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดปัญหาเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน

ตารางที่ 5 เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 1

ปัจจัย	เงื่อนไขการตัด
1.อัตราป้อนตัด (Feed)	0.12 mm/rev
2.ความลึกตัด (Depth of cut)	0.45 mm
3.ความเร็วรอบสปินเดิล (spindle speed)	3600 rpm

จากตารางที่ 5 เงื่อนไขการตัดการทดลองที่ 1 ถูกกำหนดขึ้นหลังการเก็บข้อมูลด้วยการติดตั้งกล้อง High speed camera ขณะตัดชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน หลังจากวิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะในเงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน พบว่าเศษโลหะมีแนวโน้มแตกหักและตกในรูของชิ้นงานทุกระยะตัด จุดประสงค์ของเงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 1 คือ เพิ่มโอกาสในการแตกหักของชิ้นงานด้วยการเพิ่มความลึกตัด รายละเอียดจะถูกอธิบายอีกครั้งในบทที่ 4

ตารางที่ 6 เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 2

ปัจจัย	เงื่อนไขการตัด
1.อัตราป้อนตัด (Feed)	0.12 mm/rev
2.ความลึกตัด (Depth of cut)	0.45 mm
3.ความเร็วรอบสปินเดิล (spindle speed)	1200 rpm

จากตารางที่ 6 เงื่อนไขการตัดการทดลองที่ 2 ถูกกำหนดขึ้นหลังการเก็บข้อมูลขณะตัดชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดที่ 1 พบว่าเศษโลหะมีแนวโน้มการแตกหักมากขึ้นและทิศทางของเศษโลหะกระเด็นออกจากชิ้นงาน แต่เนื่องจากพบเศษโลหะแบบต่อเนื่องเพิ่มขึ้นทำให้มีโอกาสที่จะเกิดปัญหาเศษโลหะพันกับชิ้นงานหรือมีติดทำให้เกิดการหยุดเครื่องจักร จุดประสงค์ของเงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 2 คือลดการเกิดเศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องลง รายละเอียดจะถูกอธิบายอีกครั้งในบทที่ 4

ตารางที่ 7 เงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 3

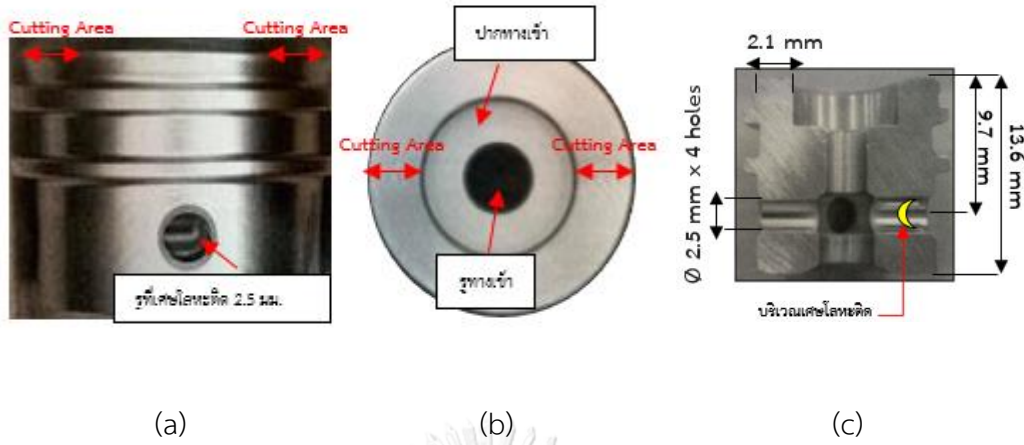
ปัจจัย	เงื่อนไขการตัด
1.อัตราป้อนตัด (Feed)	0.80 mm/rev
2.ความลึกตัด (Depth of cut)	0.15 mm
3.ความเร็วรอบสปินเดิล (spindle speed)	3600 rpm

จากตารางที่ 7 เงื่อนไขการตัดการทดลองที่ 3 ถูกกำหนดขึ้นหลังการเก็บข้อมูลขณะตัดชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดที่ 2 พบว่าเศษโลหะแตกหักเพิ่มมากขึ้นและมีขนาดเล็กลง ไม่ติดในรูชิ้นงาน ผิวชิ้นงานมีลักษณะไม่เรียบทำให้ส่งผลต่ออายุมีดตัด จึงออกแบบเงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 3

จุดประสงค์ของเงื่อนไขการตัดในการทดลองที่ 3 คือ เพิ่มองศาการเกิดเศษโลหะเพื่อป้องกันเศษโลหะตกอยู่ในรูชิ้นงาน หลังการเก็บข้อมูลพบว่าเศษโลหะมีแนวโน้มเคลื่อนตัวออกจากรูของชิ้นงานเนื่องจากเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องจึงเคลื่อนตัวแบบอิสระ รายละเอียดจะถูกอธิบายอีกครั้งในบทที่ 4

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) วาล์วควบคุมแรงดันที่มีวัสดุเหล็กกล้า (DSUS70DH) ขนาด กว้าง 15 มิลลิเมตร สูง 13.6 มิลลิเมตร และรูจ่ายน้ำมันเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 25



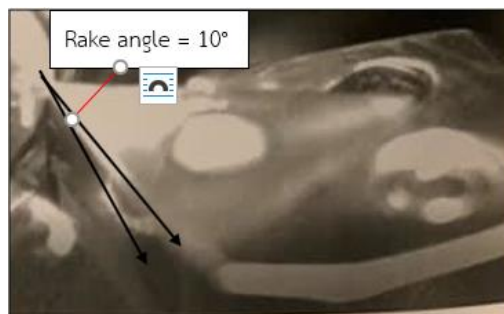
รูปที่ 25 ชิ้นงานวาล์วควบคุมแรงดันและขนาดของชิ้นงาน, Side view (a), Top view (b), Side view Dimension (c)

2) เม็ดมิดตัด (Insert) ที่ใช้เป็นเม็ดชนิด CBN (Coated cubic boron nitride) สำหรับงานกลึงหยาบ โดยมี Nose radius = 0.4 mm, มี 6 คมตัด, อายุมิดตัดเท่ากับ 80 ชิ้น/มุม



รูปที่ 26 เม็ดมิดตัด CBN ชนิด 6 มุมมิด

3) ด้ามมิดตัด (Tool holder) ชนิดยึดตำแหน่ง ที่มีมุมคายเศษ (Rake angle,  $\alpha$ )  $10^\circ$



รูปที่ 27 ด้ามมิดตัด

#### 4) เครื่องกลึงซีเอ็นซี ยี่ห้อ Takamaz กัดโลหะแบบแห้ง



รูปที่ 28 เครื่องกลึงซีเอ็นซี

#### 5) กล้อง High speed camera ใช้สำหรับตรวจสอบทิศทางการเกิดเศษโลหะ

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลสภาพการเกิดเศษโลหะในปัจจุบัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของเศษโลหะ ทั้งแบบต่อเนื่อง (Continuous chip) และเศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง (Broken chip) ที่ส่งผลต่อทิศทางการไหลของเศษโลหะ (Chip flow Angle) จากนั้นทำการวิเคราะห์ถึงรูปแบบการแตกหัก และทิศทางการไหลของเศษโลหะที่ทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัด ติดอยู่ในรูของชิ้นงาน

### 3.6 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

1) เตรียมชิ้นงาน (Workpiece) โดยนำชิ้นส่วนวาล์วควบคุมแรงดันโหลดใส่เครื่องตัด จากนั้นเครื่องจะใช้ปากจับ (Chuck) เพื่อยึดชิ้นงาน เพื่อเตรียมกลึงปาดหน้าผิวที่ไม่ต้องการออกด้วยการตัดหยาบ (Rough cutting) และการตัดละเอียด (Fine cutting)

2) ติดตั้งกล้อง High speed camera เพื่อเตรียมเก็บข้อมูลขณะตัด โดยทำการติดตั้งกล้องกับจอมอนิเตอร์ จากนั้นปรับองศาของเลนส์กล้อง ให้มองเห็นตำแหน่งของมีดตัดขณะสัมผัสผิวชิ้นงานในขณะตัด (ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อการวิเคราะห์การเกิดเศษโลหะที่ถูกต้อง) มีจุดประสงค์ในการศึกษาทิศทางการเกิดเศษโลหะและรูปแบบการแตกหักของเศษโลหะ

3) ทำการกลึงปาดหน้าด้วยการกลึงหยาบ ด้วยความลึกตัด 0.15 มิลลิเมตร จำนวน 3 ครั้ง รวมความลึกตัดของการตัดหยาบเท่ากับ 0.45 มิลลิเมตร จากนั้นเครื่องกลึงจะตัดละเอียด ด้วยความลึกตัด 0.02 มิลลิเมตร จำนวน 1 ครั้ง รวมความลึกตัดชิ้นงานทั้งหมด 0.47 มิลลิเมตร

ขณะเดียวกันนั้นได้ทำการจดบันทึกข้อมูลแบบวิดีโอด้วยกล้อง High speed camera โดยเริ่มบันทึกข้อมูลตั้งแต่เริ่มตัด จนกระทั่งชิ้นงานเป็นผิวสำเร็จ จำนวนชิ้นงานต่อเนื่องเท่ากับ 20 ชิ้นต่อเงื่อนไขการตัด ทั้งนี้อาจเพิ่ม-ลดจำนวนชิ้นงาน หากวิเคราะห์แล้วเศษโลหะเกิดขึ้นหลังการทดลองมีรูปแบบการแตกหักและทิศทางที่ไม่เหมาะสม รวมถึงสภาพผิวของชิ้นงานหลังการตัด จะถูกนำมาพิจารณาด้วย ในการทดลองนี้ เวลาในการตัดจะช้าลง 1 ต่อ 100 เท่าเพื่อป้องกันการสังเกตการเกิดเศษโลหะ เช่น เวลาตัดชิ้นงานจริง 0.3 วินาที เวลาที่ได้จากกล้องเท่ากับ 30 วินาที

4) ความกว้างของเศษโลหะ จะถูกวัดจากปลายด้านหนึ่งจนถึงปลายอีกด้านหนึ่ง ด้วยกล้อง microscope กำลังขยาย 50 เท่า

5) ชิ้นงานถูกตัดเท่ากับ 2.1 มิลลิเมตร เวลาในการตัดชิ้นงานจริงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20 ตัวอย่างเช่น ระยะเวลาในการตัดชิ้นงานปัจจุบันเท่ากับ  $(H) = (60 \times 2.1) / (0.12 \times 3600) = 0.3$  วินาที นำเวลาในการตัดมาหารเฉลี่ยเป็นระยะทางในการตัดเป็น 4 ช่วงเวลา คือช่วงคมมีดตัดเริ่มสัมผัสกับชิ้นงาน คิดเป็นระยะทางที่ 0.00 มิลลิเมตร ระยะเวลาตัด 0.0 วินาที, ช่วงต้นเริ่มตั้งแต่มีดตัดสัมผัสกับชิ้นงานจนถึงระยะ 1 ใน 3 ของชิ้นงาน คิดเป็นระยะทางที่ 0.00-0.07 มิลลิเมตร ระยะเวลาตัด 0.0-0.1 วินาที, ช่วงกลางมีดตัดเริ่มตัดชิ้นงานระยะ 2 ใน 3 ของชิ้นงาน คิดเป็นระยะทางที่ 0.07-0.14 มิลลิเมตร ระยะเวลาตัด 0.1-0.2 วินาทีและช่วงท้ายมีดตัดตั้งแต่ช่วงกลางจนครบระยะตัดของชิ้นงาน คิดเป็นระยะทางที่ 0.14-0.21 มิลลิเมตร ระยะเวลาตัด 0.2-0.3 วินาที

6) เมื่อตัดชิ้นงานครบในแต่ละเงื่อนไขการตัด จะต้องทำการเปลี่ยนมุมมีดตัดทุกครั้ง เพื่อป้องกันปัจจัยที่เกิดจากการสึกหรอของมีดตัดที่อาจส่งผลต่อทิศทางและรูปแบบการแตกหักของการเกิดเศษโลหะ จากนั้นจะพิจารณาถึงการปรับเพิ่ม-ลดอายุของมีดตัดตามความเหมาะสม

7) การคำนวณองศาการเกิดเศษโลหะ จะใช้แกน x+ ซึ่งเป็นแนวเดียวกับชิ้นงาน จากนั้นใช้แกน y- ซึ่งเป็นแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เพื่อคำนวณองศาการเกิดเศษโลหะ

8) หลังการวิเคราะห์สภาพปัจจุบัน จะทำการพิจารณาปรับเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม จากนั้นทำการทดลองใหม่อีกครั้งตามขั้นตอนการดำเนินงานที่ 1-6 โดยเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดในการดำเนินงานข้อที่ 3 จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลหลังการปรับปรุง และสรุปผลการทดลอง



### 3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลก่อน-หลังปรับปรุงกระบวนการ

1) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการแตกหักและทิศทางของเศษโลหะในแต่ละช่วงเวลา เพื่อวิเคราะห์รูปร่าง ทิศทาง และช่วงเวลา ที่ทำให้เศษโลหะติดอยู่ในรูชิ้นงาน

2) วิเคราะห์รูปแบบการแตกหักและทิศทางของเศษโลหะเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการตัด เพื่อกำหนดเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม โดยพิจารณาแต่ละเงื่อนไขตามทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เปรียบเทียบลักษณะเศษโลหะอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO-3685-197 ดังรูปที่ 29

3) วิเคราะห์สภาพของมิดตัด ต่อเงื่อนไขการตัด เปรียบเทียบสภาพมิดตัดในแต่ละเงื่อนไข การทดลอง ในด้านการสึกหรอและร่องรอยการเคลื่อนที่ของเศษโลหะบนผิวคายเศษ

4) วิเคราะห์คุณภาพของชิ้นงาน: เปรียบเทียบเงื่อนไขการตัดปัจจุบันกับเงื่อนไขการตัดที่ทำการปรับปรุง โดยพิจารณาค่า Flatness, Parallel และ Roughness

1 RIBBON CHIPS*	2 TUBULAR CHIPS*	3 SPIRAL CHIPS	4 WASHER-TYPE HELICAL CHIPS*	5 CONICAL HELICAL CHIPS*	6 ARC CHIPS**	7 ELEMENTAL CHIPS	8 NEEDLE CHIPS
1.1 Long	2.1 Long	3.1 Flat	4.1 Long	5.1 Long	6.1 Connected		
1.2 Short	2.2 Short	3.2 Conical	4.2 Short	5.2 Short	6.2 Loose		
1.3 Starred	2.3 Starred		4.3 Starred	5.3 Starred			

รูปที่ 29 ISO 3685-197: Chip formation zone

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

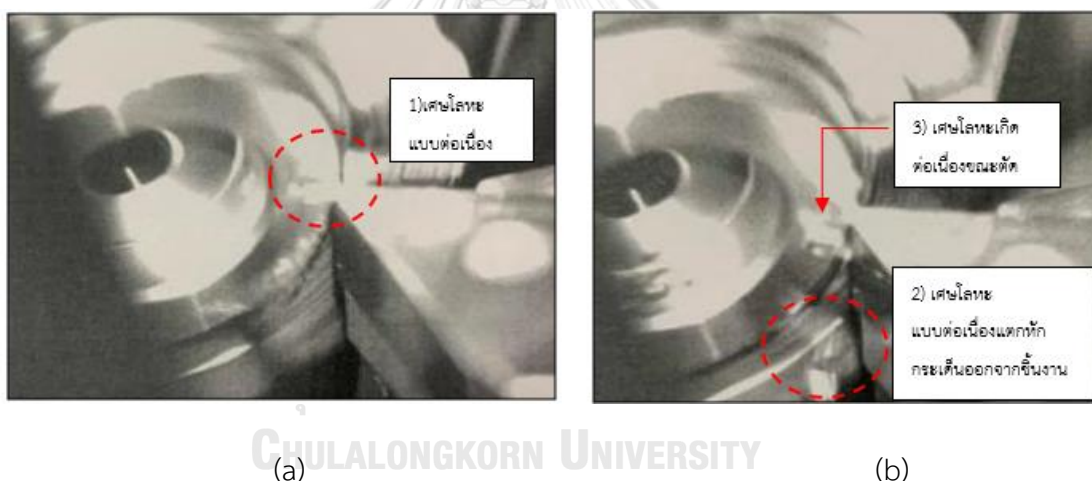
จากข้อมูลที่ได้รับจากผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขการตัด โดยเริ่มตั้งแต่สภาพปัจจุบัน จะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงลักษณะการเกิดเศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัด ที่เป็นสาเหตุของเศษโลหะติดอยู่ในรูของชิ้นงาน โดยจะแยกการวิเคราะห์แต่ละหัวข้อดังนี้

#### 4.1 วิเคราะห์ก่อนปรับปรุงกระบวนการ

##### 4.1.1 วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะ

จากการเก็บข้อมูลด้วยกล้อง High speed camera ในขณะตัดชิ้นงาน โดยใช้เงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน ตามตารางที่ 2 (Depth 0.15 mm, Feed 0.12 mm/rev, Spindle speed 3600 RPM) เศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา มีลักษณะดังนี้

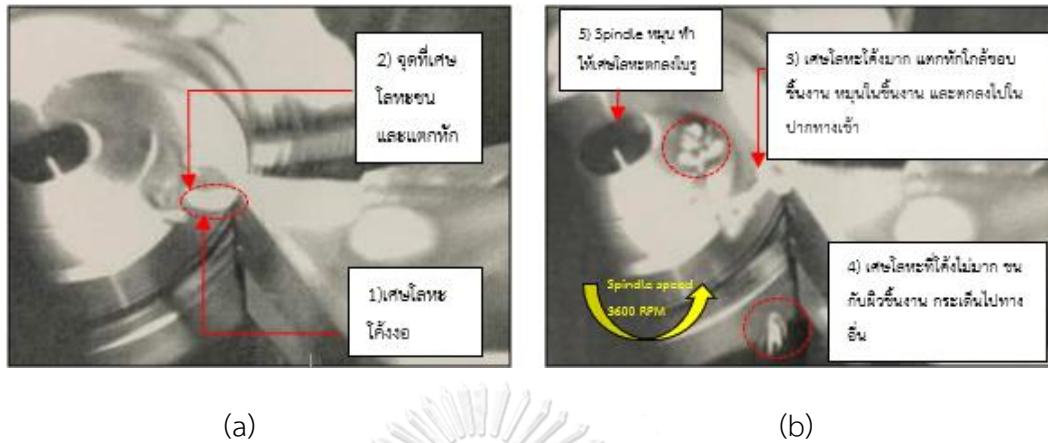
##### 1) ช่วงคมมีดตัด เริ่มสัมผัสกับชิ้นงาน



รูปที่ 30 สภาพปัจจุบัน ช่วงมีดตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงาน (a), มีดตัดสิ้นสุดช่วยสัมผัสชิ้นงานเข้าสู่ระยะตัน (b)

ขณะมีดตัดเข้าตัดชิ้นงานด้วยคมมีดตัด เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างคมมีดตัดกับผิวชิ้นงานมีน้อย ทำให้แรงที่เกิดขึ้นมีไม่มากพอที่จะทำให้เศษโลหะแตกหักได้ในทันที ส่งผลให้เกิดเศษโลหะที่มีลักษณะเป็นเศษโลหะต่อเนื่อง (continue chip) ดังรูปที่ 30(a) เมื่อพื้นที่สัมผัสระหว่างคมมีดตัดและผิวชิ้นงานมากขึ้น แรงในการตัดจะเพิ่มมากขึ้น รวมถึงเมื่อเศษโลหะสะสมความเครียดมากพอ เศษโลหะแบบต่อเนื่องจะเกิดการแตกหัก ดังรูปที่ 30(b) การเคลื่อนตัวของเศษโลหะแบบต่อเนื่องกระเด็นออกห่างจากปากทางเข้า ไม่ตกลงไปในรูทางเข้า เนื่องจากเศษโลหะแบบต่อเนื่องมีลักษณะบางและใช้แรงตัดที่น้อย เคลื่อนตัวไหลออกจากพื้นที่การตัดได้ดี

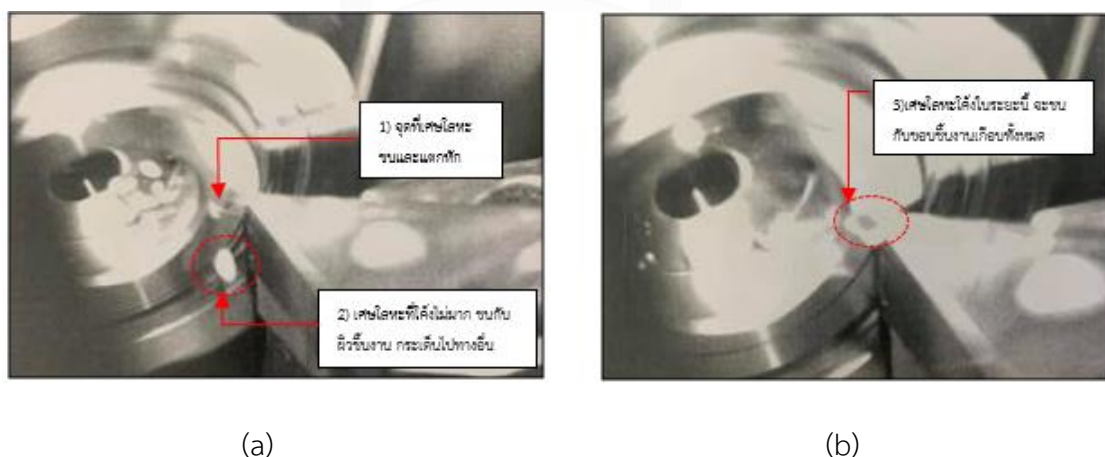
2) ช่วงต้น เริ่มตั้งแต่มีดตัดสัมผัสกับชิ้นงาน จนถึงระยะ 1 ใน 3 ของชิ้นงาน



รูปที่ 31 สภาพปัจจุบัน ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้น (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะต้น เข้าสู่ระยะกลาง (b)

พื้นที่สัมผัสระหว่างคมมีดตัดกับผิวชิ้นงานเริ่มมากขึ้นจากอัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เศษโลหะหนาตามระยะความลึกตัด เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะโค้งงอจาก Bending moment (แรงเฉือนตั้งฉากกับชิ้นงาน) เพื่อพยายามแตกหัก จากผลการทดลองเห็นว่า เศษโลหะโค้งงอจนไปชนกับชิ้นงานในบริเวณใกล้ตำแหน่งขอบปลายสุดของชิ้นงาน เมื่อเกิดการแตกหัก ประกอบกับชิ้นงานมีการหมุนจากสปินเดิล ทำให้เศษโลหะตกลงไปในปากทางเข้าและหมุนเข้าไปติดในรูทางเข้าของชิ้นงาน

3) ช่วงกลาง มีดตัดเริ่มตัดชิ้นงานระยะ 2 ใน 3 ของชิ้นงาน

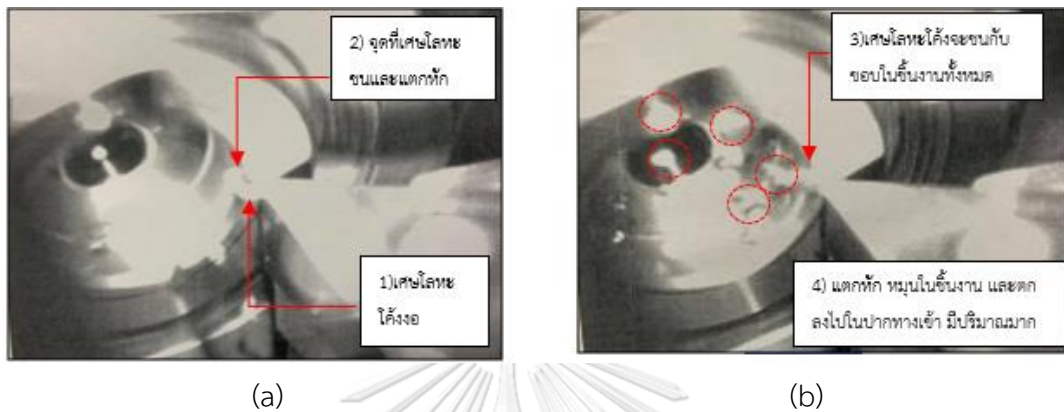


รูปที่ 32 สภาพปัจจุบัน ช่วงมีดตัดเริ่มระยะกลาง (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะกลาง เข้าสู่ระยะท้าย (b)

ในช่วงนี้ เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะคล้ายกันกับช่วงที่ 1 และ 2 คือระยะในการตัดเพิ่มมากขึ้นจากอัตราป้อนตัด ระยะห่างระหว่างส่วนโค้งของเศษโลหะกับชิ้นงานลดลง ทำให้เศษโลหะเกือบทั้งหมด

โค้งงอจนไปชนกับชิ้นงานในบริเวณใกล้ตำแหน่งขอบปลายสุดของชิ้นงานจนเกิดการแตกหัก ตกลงไปในปากทางเข้าและตกลงในรูทางเข้า มีส่วนน้อยที่เกิดเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่องและกระเด็นไปทางอื่น

4) ช่วงท้าย มีดตัดตั้งแต่ช่วงกลาง จนครบระยะตัดของชิ้นงาน



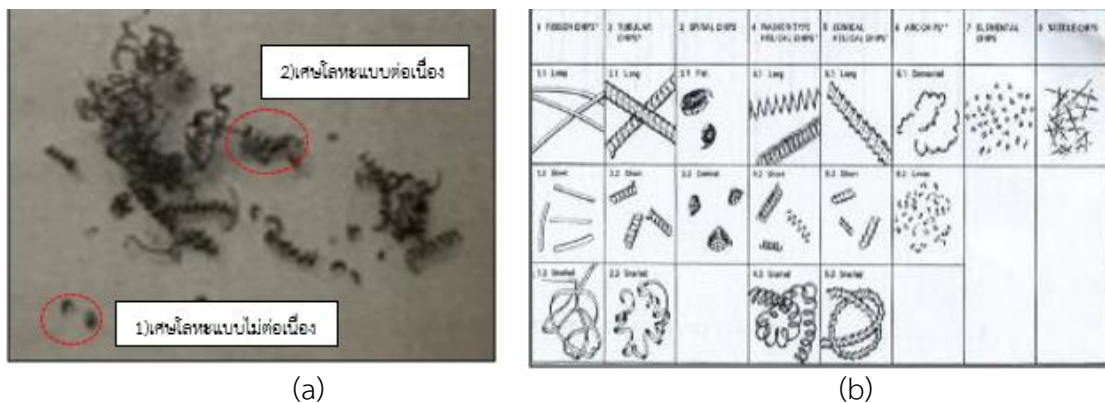
รูปที่ 33 สภาพปัจจุบัน ช่วงมีดตัดเริ่มระยะท้าย (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะท้าย (b)

เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะคล้ายกันกับช่วงที่ 1,2 และ 3 คือระยะในการตัดเพิ่มมากขึ้นจากอัตราป้อนตัดระยะห่างระหว่างส่วนโค้งของเศษโลหะกับชิ้นงานลดลง ทำให้เศษโลหะเกือบทั้งหมดโค้งงอจนไปชนกับชิ้นงานในบริเวณใกล้ตำแหน่งขอบปลายสุดของชิ้นงานจนเกิดการแตกหัก ตกลงไปในปากทางเข้าและตกลงในรูทางเข้าของชิ้นงาน

#### 4.1.2 วิเคราะห์เศษโลหะ:

ทำการเก็บเศษโลหะที่เกิดขึ้นหลังการตัด สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ดังรูปที่ 34 (a)

เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ISO 3685-1977 (E) ดังรูปที่ 34 (b)



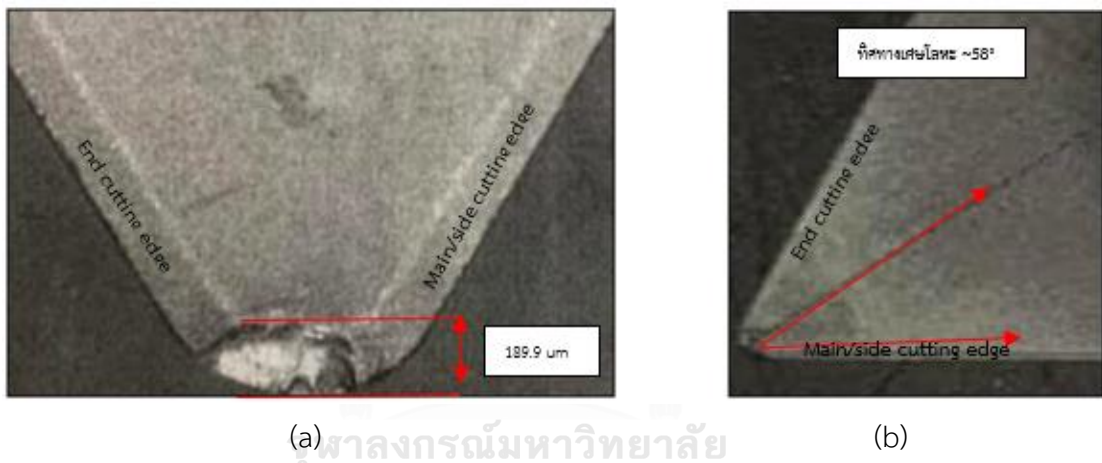
รูปที่ 34 เศษโลหะหลังเงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน (a) ,ประเภทเศษโลหะตามมาตรฐานISO3685-1977-E (b)



เศษโลหะในเงื่อนไขการตัดปัจจุบัน มีทั้งเศษโลหะแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับตารางมาตรฐาน ISO-3685-1977 (E) เศษโลหะในปัจจุบันเป็นแบบผสมระหว่างประเภทที่ 4.1 (Long chip) และประเภทที่ 4.2 (Short chip) มีความโค้ง 2.04-3.12 มิลลิเมตร คาดว่าเศษโลหะที่มีความโค้งตั้งแต่ 2.5 มิลลิเมตรขึ้นไปมีโอกาสจะติดในรูชิ้นงานทำให้ล้างไม่ออก เนื่องจากมีความใกล้เคียงกับรูของชิ้นงานที่มีความกว้าง 2.5 มิลลิเมตร

#### 4.1.3 วิเคราะห์มิติตัด:

นำมิติตัดที่มีอายุการใช้งานที่ 20 ชิ้น เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบการสึกหรอของมิติตัดก่อนและหลังการปรับปรุงเงื่อนไขการตัด จากรูปที่ 35 (a) มิติตัดสึกหรอบริเวณพื้นที่การตัดในช่วงรัศมีจุมุกตัดเท่ากับ 189.9 ไมครอน และทิศทางการเกิดเศษโลหะอยู่ที่ประมาณ  $58^\circ$  ดังรูปที่ 35 (b) สังเกตได้ว่าทิศทางการเกิดเศษโลหะสัมพันธ์กับบริเวณที่มิติตัดสึกหรอ



รูปที่ 35 เงื่อนไขการตัดปัจจุบัน มิติตัดสึกหรอบริเวณจุมุกมิติตัด = 189.9 ไมครอน (a), องศาการเกิดเศษโลหะประมาณ  $58^\circ$  (b)

สรุปผล: เศษโลหะที่มีการแตกหักแบบต่อเนื่องเคลื่อนตัวออกจากชิ้นงานได้ดีและกระเด็นออกไปไกลจากรูชิ้นงาน ส่วนเศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง มีแนวโน้มที่จะม้วนไปชนกับขอบด้านในของชิ้นงาน เกิดการแตกหักและตกลงในปากทางเข้า และมีโอกาสตกลงไปในรูทางเข้า จนไปติดแน่นในรูของชิ้นงาน ยิ่งระยะตัดชิ้นงานมาก เศษโลหะยิ่งแตกหักตกในรูมากขึ้นด้วย ซึ่งถ้าดูจากทิศทางการเกิดเศษโลหะในหัวข้อที่ 4.1.2 จะพบว่าทิศทางการเกิดเศษโลหะที่  $58^\circ$  การพิจารณาลักษณะของเศษโลหะจะต้องมีความโค้งน้อยกว่า 2.5 มิลลิเมตร เพื่อให้เศษโลหะทะลุผ่านรูของชิ้นงานได้

จากการเก็บข้อมูลจำนวนทั้งสิ้น 20 ชิ้นต่อเนื่อง พบว่าลักษณะการเกิดเศษโลหะตั้งแต่ชิ้นที่ 1 ถึง ชิ้นที่ 20 ไม่แตกต่างกัน รวมถึงเศษโลหะในช่วงเริ่มตัดจนกระทั่งได้ชิ้นงานสำเร็จ การเกิดเศษโลหะไม่แตกต่างกัน จึงสรุปได้ว่า จากการเก็บข้อมูลชิ้นงานต่อเนื่องจำนวน 20 ชิ้น สำหรับมีดตัดที่มีช่วงอายุ 1/80 ชิ้น อาจไม่ส่งผลต่อลักษณะการแตกหักในงานวิจัยนี้มากนัก เนื่องจากความลึกตัดของเงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน (0.15 mm) ประกอบกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะตัดด้วยความเร็วรอบสปินเดิล (3600 RPM) และอัตราป้อนตัด (0.15 mm/rev) ไม่ทำให้มีดตัดเสียรูปไปจนกระทั่งส่งผลต่อรูปแบบและทิศทางการเกิดเศษโลหะ อีกทั้งมีดตัดมีการทดลองเก็บข้อมูลในการเพื่อระยะปลอดภัย (safety zone) ไว้ที่ 1/100 ชิ้น คุณภาพของชิ้นงานไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าจำนวนชิ้นงานทดลอง 20 ชิ้น เพียงพอต่อการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 4.2 วิเคราะห์หลังปรับปรุงกระบวนการ: ข้อเสนอแนะเงื่อนไขการตัดที่ 1

ได้เสนอเงื่อนไขการตัด เพื่อกำหนดทิศทางและรูปแบบการแตกหัก ที่ไม่ทำให้เศษโลหะติดอยู่ในรูชิ้นงาน จึงเสนอเงื่อนไขใหม่ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เงื่อนไขการตัดปัจจุบันเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการตัดที่ 1

ปัจจัย	เงื่อนไขการตัดปัจจุบัน	เงื่อนไขการตัดที่ 1
1.อัตราป้อนตัด (Feed)	0.12 mm/rev	0.12 mm/rev
2.ความลึกตัด (Depth of cut)	0.15 mm	<b>0.45 mm</b>
3.ความเร็วรอบสปินเดิล (spindle speed)	3600 rpm	3600 rpm

ซึ่งการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขนี้อ้างอิงจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถอธิบายได้ดังนี้

#### พิจารณาเพิ่มความลึกตัด

เพื่อลดองศาการเกิดเศษโลหะ ดังนี้

$$1) \text{ พื้นที่เฉือนเพิ่มขึ้น ทำให้เศษโลหะหนาขึ้น (Chip thickness ratio, } r = t_0 / t_c \text{ )}$$

แรงตัดเพิ่มมากขึ้น (Main force,  $F_m$ ,  $F_c = K_s \times d \times f$ ), เมื่อกำหนด  $K_s$  เป็นค่าคงที่ เท่ากับ 1 N/mm<sup>2</sup>

$$\text{แรงตัดเดิมเท่ากับ } 1 \text{ N/mm}^2 \times 0.15 \text{ mm} \times 0.12 \text{ mm/rev} = 0.018 \text{ N}$$

แรงตัดใหม่เท่ากับ  $1 \text{ N/mm}^2 \times 0.45 \text{ mm} \times 0.12 \text{ mm/rev} = 0.054 \text{ N}$

2) แรงเสียดทานระหว่างมีดตัดกับเศษโลหะเพิ่มขึ้น ( $\mu = \frac{F}{N}$ ) ทำให้องศาการเกิดเศษโลหะต่ำลง

3) เพิ่มการแตกหักของเศษโลหะ จากข้อ 1 แรงตัดที่มากขึ้น จะส่งผลให้เศษโลหะแตกหักง่ายขึ้น โดยคาดว่าเศษโลหะจะแตกหักก่อนที่จะโค้งไปชนกับขอบชิ้นงาน

อัตราป้อนตัดและความเร็วสปินเดิล จะยังไม่ถูกนำมาพิจารณาในเงื่อนไขการตัดนี้ เนื่องจากหากเพิ่มอัตราป้อนตัดด้วย จะไม่ทราบว่าจะองศาการเกิดเศษโลหะที่เปลี่ยนไป เกิดจากปัจจัยเดียวหรือปัจจัยร่วม อีกทั้งแรงตัดจะเพิ่มขึ้นมาก ส่งผลต่อคุณภาพและอายุของมีดตัด โดยการเพิ่มความลึกตัดใหม่เท่ากับ 0.45 มิลลิเมตร มาจากเหตุผลดังนี้

#### เหตุผลในการปรับความลึกตัดเป็น 0.45 มิลลิเมตร

1) ชิ้นงานมีเงื่อนไขการตัดหยาบด้วยความลึกตัด 0.15 มิลลิเมตร จำนวน 3 ครั้ง การปรับความลึกตัดที่ 0.45 มิลลิเมตร จำนวน 1 ครั้ง ไม่ส่งผลต่อขนาดของชิ้นงาน อีกทั้งมีการตัดละเอียดเพื่อเก็บผิวงานครั้งสุดท้ายอีกครั้ง ทำให้คุณภาพของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงจากปัจจุบัน

2) ต้องการให้เศษโลหะแตกหักก่อนที่จะโค้งไปชนกับขอบชิ้นงานเพื่อป้องกันเศษโลหะติดอยู่ในรูชิ้นงาน จึงปรับความลึกตัดสูงสุดเท่าที่จะทำได้เพื่อเพิ่มแรงในการตัด

3) ต้องการให้เศษโลหะมีขนาดเล็กกว่า 2.5 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันเศษโลหะติดอยู่ในรูชิ้นงาน

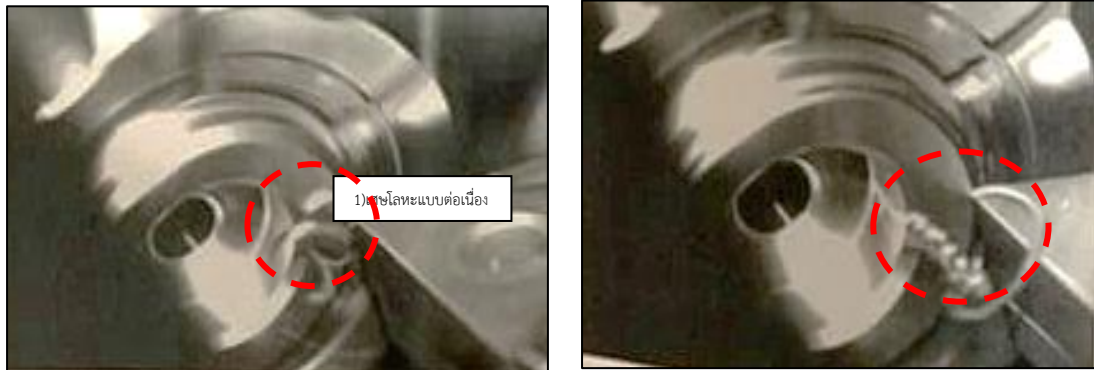
4) จากการศึกษาทฤษฎีจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าความลึกตัดและอัตราป้อนตัดส่งผลต่อทิศทางการเกิดเศษโลหะ ดังนั้นจึงปรับความลึกตัดสูงสุดเพื่อให้เศษโลหะแตกหักไปในทิศทางด้านตรงข้ามกับอัตราป้อนตัด

จากนั้นทำการดำเนินการทดลอง โดยเริ่มตั้งแต่การติดตั้งกล้อง High speed camera และทำการกลึงปาดหน้าชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดที่ 1 จนครบ 20 ชิ้น

#### 4.2.1 วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะ:

จากการเก็บข้อมูลด้วยกล้อง High speed camera ในขณะตัดชิ้นงาน โดยใช้เงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน ตามตารางที่ 2 (Depth 0.45 mm, Feed 0.12 mm/rev, Spindle speed 3600 RPM) เศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา มีลักษณะดังนี้

1) ช่วงคมมีดตัด เริ่มสัมผัสกับชิ้นงาน



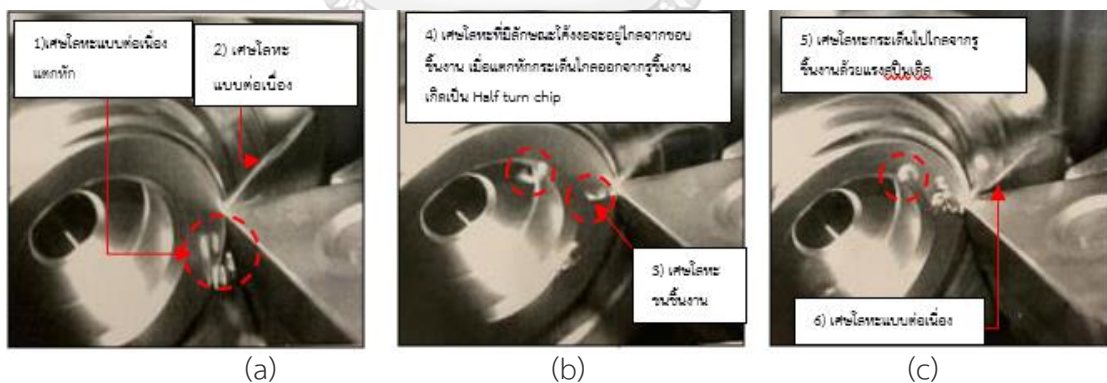
(a)

(b)

รูปที่ 36 เงื่อนไขที่ 1 ช่วงมีดตัดเริ่มสัมผัสกับชิ้นงาน (a), มีดตัดลึกลงสุดช่วยสัมผัสกับชิ้นงาน เข้าสู่ระยะต้น (b)

ขณะมีดตัดเข้าตัดชิ้นงานด้วยคมมีดตัด พื้นที่สัมผัสระหว่างคมมีดตัดกับผิวชิ้นงานมากขึ้น เศษโลหะหนา และมีทิศทางแบบ Up-curling คือโค้งขึ้นด้านบน ตามทฤษฎีการเกิด Up-curling เกิดจาก Built-up edge (BUE) ซึ่ง BUE ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปกับเศษตัด โดยมีการเกิดร่วมกับ Side curling ที่มีองศา เกิดเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 36(a)(b)

2) ช่วงต้น เริ่มตั้งแต่มีดตัดสัมผัสกับชิ้นงาน จนถึงระยะ 1 ใน 3 ของชิ้นงาน



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 37 เงื่อนไขที่ 1 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้น (a), ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้นหลังเศษโลหะต่อเนื่องแตกหัก (b), ช่วงมีดตัดลึกลงสุดระยะต้นเข้าสู่ระยะกลาง (c)

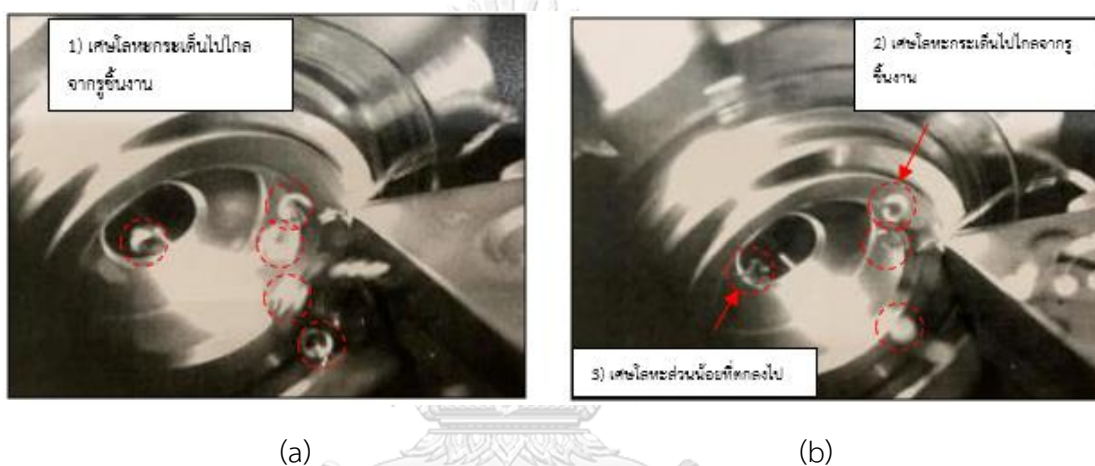
เศษโลหะแบบต่อเนื่องจากช่วงแรกเกิดการแตกหัก โดยมีเศษโลหะแบบต่อเนื่องเกิดขึ้นอีกครั้งและมีทิศทางตรงข้ามกับอัตราป้อนตัด เกิดจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้องศาการเกิดเศษ



โลหะต่ำ ดังรูปที่ 37(a) จากนั้นเศษโลหะเกิดแบบผสมระหว่างเศษโลหะแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 37(b)(c) สาเหตุเกิดจากพื้นที่ในการตัดแต่ละคมตัดไม่เท่ากัน ทำให้แรงตัดแตกต่างกันในแต่ละมุมตัด เศษโลหะที่มีลักษณะโค้งงอจะอยู่ไกลจากขอบชิ้นงาน เมื่อเกิดการชนกันระหว่างชิ้นงานกับเศษโลหะ เศษโลหะจะแตกหัก และกระเด็นไปทางอื่นด้วยแรงหมุนจากสปินเดิล

เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นในช่วง Main cutting edge ส่วนเศษโลหะที่แบบต่อเนื่องเกิดในช่วงรัศมีมุมมีดตัดและ End cutting edge ซึ่งจะสังเกตได้จากรอยสีของมีดตัด

### 3) ช่วงกลาง มีดตัดเริ่มตัดชิ้นงานระยะ 2 ใน 3 ของชิ้นงาน



รูปที่ 38 เงื่อนไขที่ 1 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะกลาง (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะกลาง เข้าสู่ระยะท้าย (b)

ในช่วงนี้ เศษโลหะจะเกิดแบบผสมระหว่างเศษโลหะแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องจะเกิดการแตกหักกับชิ้นงาน ความโค้งงอของเศษโลหะต่ำลงจากความหนาเศษตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้เศษโลหะแตกหักกับขอบชิ้นงานไกลจากปากทางเข้าและกระเด็นไปทางอื่น สังเกตได้ว่าเศษโลหะตกลงไปในรูทางเข้าน้อยลง เมื่อเทียบกับเงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน ดังรูปที่ 38(a)(b)

#### 4) ช่วงทำย มีดตัดตั้งแต่ช่วงกลาง จนครบระยะตัดของชิ้นงาน



(a)

(b)

รูปที่ 39 เงื่อนไขที่ 1 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะทำย (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะทำย (b)

เศษโลหะแบบต่อเนื่องเกิดเป็นเส้นยาว มีทิศทางอิสระ สุดทำยเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะเกิดการแตกหัก ซึ่งเศษโลหะแบบต่อเนื่อง จะไม่ตกลงไปในรูทางเข้าของชิ้นงานเนื่องจากลักษณะที่ยาวขวางกับปากทางเข้า ทำให้ไม่ตกลงไปพันในรูของชิ้นงาน

เศษโลหะแบบแตกหัก เมื่อเกิดการโค้ง ประกอบกับระยะตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้เศษโลหะโค้งจนชนขอบด้านในชิ้นงาน และเกิดการแตกหัก ซึ่งยังมีเศษโลหะบางชิ้นตกลงไปในรูทางเข้าอยู่ 39(a)(b)

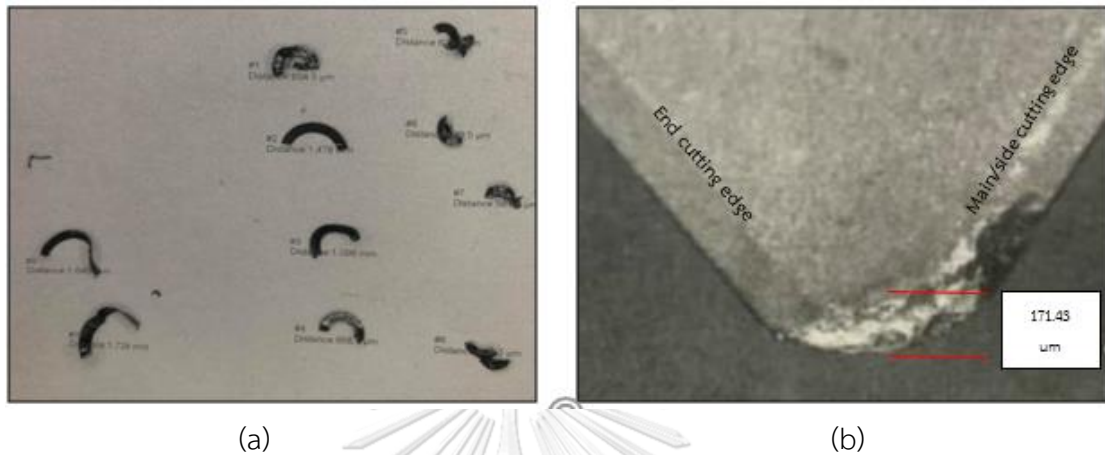
พื้นผิวหลังจากผ่านกระบวนการหยาบอาจมีรอยขีดข่วนจากการที่เศษโลหะไปพันที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งจะมีการกลึงละเอียดเพื่อเก็บคุณภาพผิวชิ้นงานอีกครั้ง

#### 4.2.2 วิเคราะห์เศษโลหะ:

เศษโลหะของเงื่อนไขการตัดที่ 1 มี 2 รูปแบบ คือการแตกหักแบบ Half turn/full turn ดังประเภทที่ 4.2 มีขนาดเส้นและความโค้ง 0.56-1.48 มิลลิเมตร และยังเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องเป็นเส้นตรงคล้ายกับประเภทที่ 2.3 มีความโค้ง 1.65-1.72 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 40(a) เศษโลหะแบบที่เกิดขึ้นมีความโค้งน้อยกว่ารูของชิ้นงานที่มีความกว้าง 2.5 มิลลิเมตร ทำให้จากการสุมชิ้นงานไม่พบว่ามีปัญหาเศษโลหะติดอยู่ในรู เนื่องจากขนาดเศษโลหะเล็กกว่ารู ทำให้ทะลุผ่านไป

#### 4.2.3 วิเคราะห์มีดตัด:

มีดตัดสีกหอบบริเวณพื้นที่การตัดในช่วงรัศมีจุกตัดและ Main/side cutting edge เท่ากับ 189.9 ไมครอน สังเกตได้ว่าทิศทางการเกิดเศษโลหะสัมพันธ์กับบริเวณที่มีดตัดสีก ดังรูปที่ 40 (b)



รูปที่ 40 เศษโลหะหลังเงื่อนไขการตัดที่ 1 (a), เงื่อนไขการตัดที่ 1 มีดตัดสีกหอบบริเวณจุกมีดตัด = 171.43 ไมครอน (b)

สรุปผล: จากเงื่อนไขการตัดที่ 1 ในการเพิ่มความลึกตัด เศษโลหะที่เกิดการแตกหักมีทิศทางตรงข้ามกับรูทางเข้า ทำให้โอกาสที่เศษโลหะจะติดในรูของชิ้นงานลดลงเมื่อเทียบกับเงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน อีกทั้งเศษโลหะที่เกิดการแตกหักมีขนาดที่สั้น ซึ่งช่วยลดโอกาสในการติดแน่นในรูชิ้นงาน และทำให้ล้างออกได้ง่าย จากผลการเก็บข้อมูลจำนวน 20 ชิ้น ไม่พบว่ามีเศษโลหะติดอยู่ในชิ้นงานเนื่องจากขนาดเศษโลหะเล็กกว่ารูชิ้นงานที่มีขนาด 2.5 มิลลิเมตร ทำให้ทะลุผ่านไป อย่างไรก็ตามในเงื่อนไขการตัดที่ 1 เศษโลหะยังเกิดแบบผสมกันอยู่ ระหว่างเศษโลหะแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเศษโลหะแบบต่อเนื่องช่วงท้ายอาจเกิดการพันกันขณะตัด ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะในการลดความเร็วสปีด เพื่อให้เศษโลหะแตกหักมากขึ้น ดังเงื่อนไขที่ 2 ตารางที่ 9

#### 4.3 วิเคราะห์หลังปรับปรุงกระบวนการ: ข้อเสนอแนะเงื่อนไขการตัดที่ 2

ได้เสนอเงื่อนไขการตัด เพื่อกำหนดทิศทางและรูปแบบการแตกหัก ที่ไม่ทำให้เศษโลหะติดอยู่ในรูชิ้นงาน จึงเสนอเงื่อนไขใหม่ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เงื่อนไขการตัดที่ 1 เปรียบเทียบกับเงื่อนไขการตัดที่ 2

ปัจจัย	เงื่อนไขการตัดที่ 1	เงื่อนไขการตัดที่ 2
1.อัตราป้อนตัด (Feed)	0.12 mm/rev	0.12 mm/rev
2.ความลึกตัด (Depth of cut)	0.45 mm	0.45 mm
3.ความเร็วรอบสปินเดิล (spindle speed)	3600 rpm	<b>1200 rpm</b>

ซึ่งการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขนี้อ้างอิงจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถอธิบายได้ดังนี้

#### พิจารณาลดความเร็วสปินเดิล

1) เพื่อให้เศษโลหะเกิดการแตกหัก ดังนี้

1.1) แรงตัดสูงขึ้น จากอุณหภูมิที่ต่ำลง

1.2) มุมเฉือนที่ลดลง ทำให้เศษโลหะหนาขึ้น เกิดการแตกหัก

2) อ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ความเร็วสปินเดิลไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดเศษโลหะ โดยการลดความเร็วสปินเดิลเท่ากับ 1,200 rpm มาจากเหตุผลดังนี้

#### เหตุผลในการปรับความเร็วสปินเดิลเป็น 1,200 rpm

1) จากรูปที่ 26 ชนิดของมีดตัดที่ใช้ มีเงื่อนไขการตัดที่แนะนำให้ใช้ความเร็วรอบสปินเดิลระหว่าง 660-4,920 rpm ซึ่งความสามารถของเครื่องจักรในการปรับอยู่ที่ 600-4,000 rpm โดยความเร็วสปินเดิลที่ 1,200 RPM ยังอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่แนะนำ เพราะหากมากไปหรือน้อยเกินไปจะส่งผลต่ออายุของมีดตัด

2) เมื่อรัศมีชิ้นงานเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ความเร็วตัด( $v$ ) ดังสมการที่ 19 เท่ากับ  
 $(v/60) = (r/1,000) \times \text{RPM} \times 0.10472$  ดังนั้น

$$\text{ความเร็วตัดปัจจุบัน} = (v/60) = (7.5/1,000) \times (3600) \times 0.10472 = 170 \text{ m/min}$$

$$\text{ความเร็วตัดเงื่อนไขที่ 1} = (v/60) = (7.5/1,000) \times (3600) \times 0.10472 = 170 \text{ m/min}$$

$$\text{ความเร็วตัดเงื่อนไขที่ 2} = (v/60) = (7.5/1,000) \times (1200) \times 0.10472 = 56.5 \text{ m/min}$$

สมการกำลังตัดที่ 18 กำลังในการตัด เท่ากับ  $P = K_s \times d \times f \times v$  ดังนี้

กำลังตัดเจ็อนไขปัจจุบัน =  $1 \times 0.15 \text{ mm} \times 0.12 \text{ mm/rev} \times 170 \text{ m/min} = 3.06 \text{ W}$

กำลังตัดเจ็อนไขที่1 =  $1 \times 0.45 \text{ mm} \times 0.12 \text{ mm/rev} \times 170 \text{ m/min} = 9.18 \text{ W}$

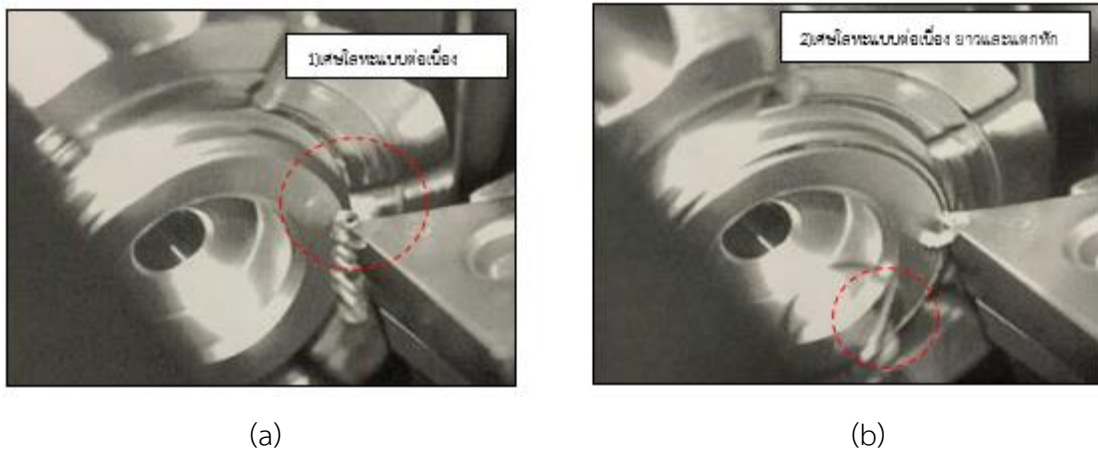
กำลังตัดเจ็อนไขที่2 =  $1 \times 0.45 \text{ mm} \times 0.12 \text{ mm/rev} \times 56.5 \text{ m/min} = 3.05 \text{ W}$

สืบเนื่องจากการเพิ่มความลึกตัดในเจ็อนไขที่ 1 ทำให้กำลังที่เกิดขึ้นในขณะตัดสูงขึ้น กำลังตัดเจ็อนไขปัจจุบัน = 3.06 W, กำลังตัดเจ็อนไขที่1 = 9.18 W ดังนั้น เพื่อป้องกันการเกิดการสั่นสะเทือนขณะตัดอันเนื่องจากเครื่องกลึงที่อาจมีกำลังไม่เพียงพอ จึงปรับลดกำลังตัดลง กำลังตัดเจ็อนไขที่2 = 3.05 W ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังตัดในเจ็อนไขปัจจุบัน ประกอบกับการลดความเร็วสปีดช่วยเพิ่มอัตราการเกิดเศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง

#### 4.3.1 วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะ:

โดยใช้เจ็อนไขการตัดที่ 2 ตามตารางที่ 9 (Depth 0.45 mm, Feed 0.12 mm/rev, Spindle speed 1200 RPM) เศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา มีลักษณะดังนี้

##### 1) ช่วงคมมีดตัด เริ่มสัมผัสกับชิ้นงาน

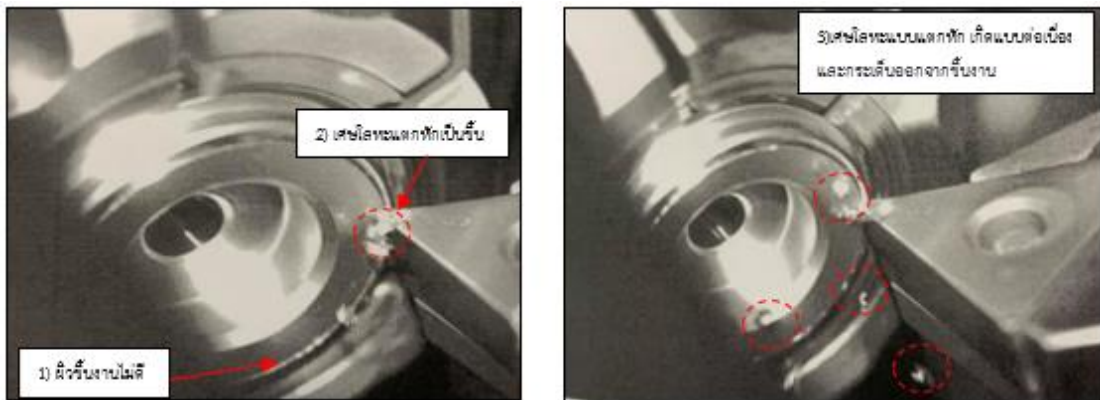


รูปที่ 41 เจ็อนไขที่ 2 ช่วงมีดตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงาน (a), มีดตัดสิ้นสุดช่วยสัมผัสชิ้นงาน เข้าสู่ระยะต้น (b)

เศษโลหะที่เกิดในช่วงคมมีดตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงาน มีลักษณะเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เป็นเพราะความเร็วสปีดที่หมุนช้าลง ทำให้อุณหภูมิขณะตัดต่ำ ประกอบกับช่วงคมตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงานทำให้เกิดเศษโลหะบาง เศษโลหะไม่เกิดการแตกหัก



2) ช่วงต้น เริ่มตั้งแต่มีดตัดสัมผัสกับชิ้นงาน จนถึงระยะ 1 ใน 3 ของชิ้นงาน



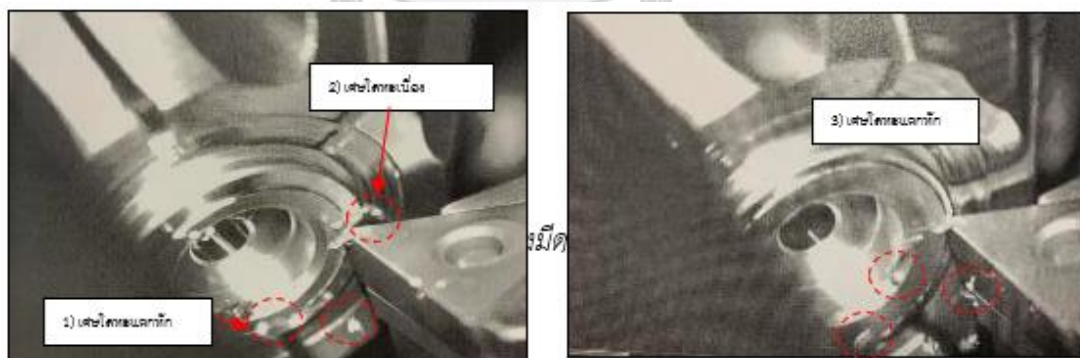
(a)

(b)

รูปที่ 42 เงื่อนไขที่ 2 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้น (a), มีดตัดสิ้นสุดระยะต้น เข้าสู่ระยะกลาง (b)

เมื่ออุณหภูมิขณะตัดต่ำลง แรงตัดเพิ่มมากขึ้น เศษโลหะมีการโค้งงอเล็กน้อยเท่านั้นก็เกิดการแตกหักและแตกหักเป็นชิ้นเล็ก กระเด็นออกจากรูชิ้นงานเล็กน้อยเนื่องจากเศษโลหะมีขนาดเล็ก นอกจากนี้แรงตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ผิวชิ้นงานไม่ดี

3) ช่วงกลาง มีดตัดเริ่มตัดชิ้นงานระยะ 2 ใน 3 ของชิ้นงาน



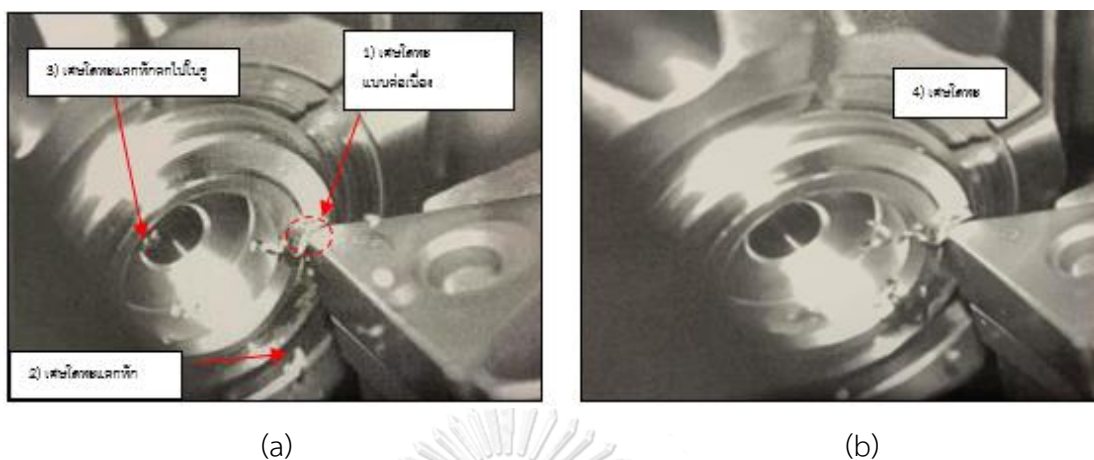
(a)

(b)

รูปที่ 43 เงื่อนไขที่ 2 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะกลาง (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะกลาง (b)

พร้อมกับเศษโลหะแบบแตกหักคล้ายกับเงื่อนไขการตัดที่ 1 แต่เนื่องจากแรงตัดที่สูงขึ้นทำให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องแตกหักง่าย ไม่เกิดเป็นเศษยาว

#### 4) ช่วงท้าย มีดตัดตั้งแต่ช่วงกลาง จนครบระยะตัดของชิ้นงาน



รูปที่ 44 เงื่อนไขที่ 2 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะท้าย (a), ช่วงมีดตัดสิ้นสุดระยะท้าย (b)

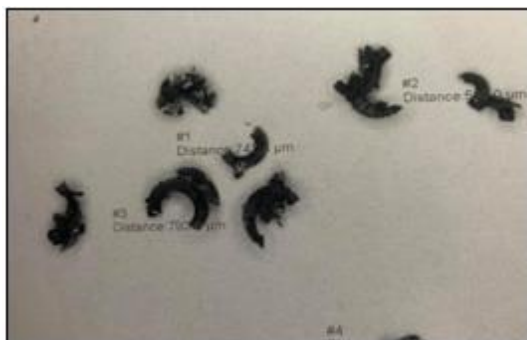
เศษโลหะมีการเกิดร่วมระหว่างเศษโลหะแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ในระยะนี้เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องตกลงไปในรูทางเข้า จากการที่เศษโลหะมีขนาดเล็กทำให้ไม่พบเศษโลหะติดอยู่ในรูชิ้นงาน เศษโลหะแบบต่อเนื่องมีทิศทางเคลื่อนที่ออกจากชิ้นงาน สิ้นสุดท้ายจะเกิดการแตกหัก

#### 4.3.2 วิเคราะห์เศษโลหะ:

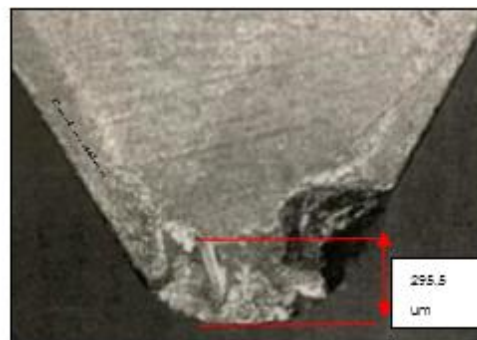
เศษโลหะของเงื่อนไขการตัดที่ 2 มี 2 รูปแบบ คือการแตกหักคล้ายกับ Loosen chip หัวข้อที่ 6.2 และแบบต่อเนื่องที่เป็นเส้นยาว Ribbon ตามหัวข้อที่ 1 มีความโค้ง 0.57-0.79 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 45 (a) เศษโลหะที่เกิดขึ้นมีความโค้งน้อยกว่ารูของชิ้นงานที่มีความกว้าง 2.5 มิลลิเมตร ทำให้จากการสุมชิ้นงานไม่พบว่าจะเกิดปัญหาเศษโลหะติดอยู่ในรู เนื่องจากขนาดเศษโลหะเล็กกว่ารู ทำให้ทะลุผ่านไป

#### 4.3.3 วิเคราะห์มีดตัด:

มีดตัดสึกหอบบริเวณพื้นที่การตัดในช่วงรัศมีจุมุกตัดและ Main/side cutting edge เท่ากับ 295.5 ไมครอน สึกหอบมากกว่าเงื่อนไขปัจจุบันและเงื่อนไขที่ 1 จากแรงที่เพิ่มขณะตัด ทำให้อายุของมีดตัดลดลง ดังรูปที่ 45 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 45 เศษโลหะหลังเงื่อนไขการตัดที่ 2 (a), เงื่อนไขการตัดที่ 2 มีดตัดสึกหรอบริเวณจุมุมมีดตัด = 295.5 ไมครอน (b)

สรุปผล: จากเงื่อนไขการตัดที่ 2 ในการลดความเร็วสปีดิล เศษโลหะมีการแตกหักอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงทำให้แรงตัดเพิ่มมากขึ้น เศษโลหะที่เกิดการแตกหักมีความโค้งเล็กน้อยจากนั้นเกิดการแตกหัก เศษโลหะขนานและกระเด็นออกไปเล็กน้อย บางครั้งมีการตกลงไปในรูทางเข้า ไม่พบเศษโลหะติดอยู่ที่ชิ้นงาน เนื่องจากเศษโลหะมีขนาดเล็กทำให้หลุดผ่านรูชิ้นงานโดยไม่เกิดการขัดติดแน่นในรู นอกจากนั้นคุณภาพพื้นผิวหลังการตัดไม่ดีซึ่งอายุของมีดตัดลดลงจากการสึกหรอเร็วขึ้น จึงได้สรุปผลการทดลองที่จำนวนชิ้นงานทั้งหมด 5 ชิ้น จากนั้นได้ออกแบบเงื่อนไขการตัดที่ 3 ดังนี้

#### 4.4 วิเคราะห์หลังปรับปรุงกระบวนการ: ข้อเสนอแนะเงื่อนไขการตัดที่ 3

ได้เสนอเงื่อนไขการตัด ในการเพิ่มอัตราป้อนตัด เพื่อเพิ่มองศาการเกิดเศษโลหะ ดังเงื่อนไขที่ 3 ตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เงื่อนไขการตัดที่ 3 เปรียบเทียบกับเงื่อนไขการตัดปัจจุบัน

ปัจจัย	เงื่อนไขการตัดปัจจุบัน	เงื่อนไขการตัดที่ 3
1.อัตราป้อนตัด (Feed)	0.12 mm/rev	0.80 mm/rev
2.ความลึกตัด (Depth of cut)	0.45 mm	0.45 mm
3.ความเร็วรอบสปีดิล (spindle speed)	3600 rpm	3600

พิจารณาเพิ่มอัตราป้อนตัด



- 1) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อทิศทางการเกิดเศษโลหะคือ ความลึกตัด และอัตราป้อนตัด จากเงื่อนไขการตัดที่ 1 ได้ทำการลดองศาการเกิดเศษโลหะ โดยการเพิ่มความลึกตัดไป (0.15 mm -> 0.45 mm) ซึ่งในทางตรงกันข้าม หากต้องการเพิ่มองศาการเกิดเศษโลหะต้องทำการลดความลึกตัด แต่เนื่องจากเกี่ยวข้องกับขนาดของชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถลดความลึกในการตัดได้ จึงพิจารณาเพิ่มอัตราป้อนตัดเพิ่มลดองศาการเกิดเศษโลหะ
- 2) เพื่อเพิ่มอัตราการแตกหักของเศษโลหะ หากเศษโลหะไม่แตกหักเกิดแบบต่อเนื่อง จะทำให้เศษโลหะพันกับชิ้นงานและมีดตัด

โดยปรับความเร็วสปีดกลับไปที่เงื่อนไขปัจจุบัน เนื่องจากแรงตัดที่มากขึ้น จำเป็นต้องทำให้อุณหภูมิสูง เพื่อชดเชยการแรงที่เพิ่มขึ้นจากอัตราป้อนตัด

#### เหตุผลในการปรับอัตราป้อนตัด 0.80 มิลลิเมตร

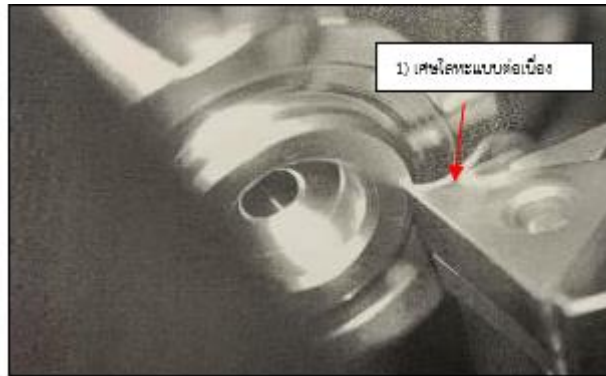
ปัจจุบันอัตราป้อนตัดอยู่ที่ 0.12 mm/rev การเพิ่มอัตราป้อนตัดไม่มาก ด้วยเวลาที่จำกัดอาจไม่พบการเปลี่ยนแปลงมาก จึงพิจารณาในการเพิ่มอัตราป้อนตัดสูงจากนั้นจะพิจารณาปรับลดต่อไป จากนั้นทำการดำเนินการทดลอง โดยเริ่มตั้งแต่การติดตั้งกล้อง High speed camera และทำการกลึงปาดหน้าชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดที่ 3

#### 4.4.1 วิเคราะห์ลักษณะการเกิดเศษโลหะ:

จากการเก็บข้อมูลด้วยกล้อง High speed camera ในขณะที่ตัดชิ้นงาน โดยใช้เงื่อนไขการตัดในที่ 3 ตามตารางที่ 10 (Depth 0.15 mm, Feed 0.80 mm/rev, Spindle speed 3600 RPM)

เศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา มีลักษณะดังนี้

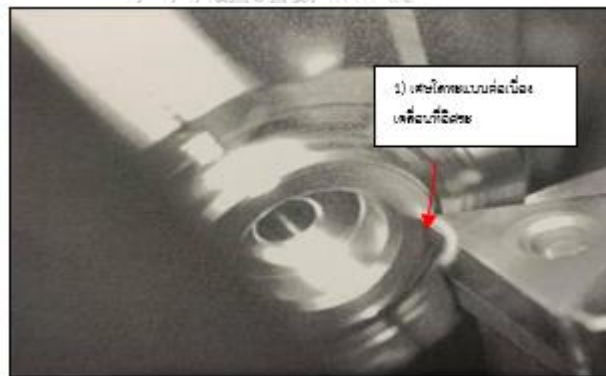
- 1) ช่วงคมมีดตัด เริ่มสัมผัสกับชิ้นงาน



รูปที่ 46 เงื่อนไขที่ 3 เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัดช่วงต้น

เศษโลหะที่เกิดในช่วงคมมีดตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงาน มีลักษณะเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เกิดจาก อัตราป้อนตัดที่มีความเร็วสูง ทำให้เศษโลหะไม่เกิดการโค้งงอชนกับชิ้นงาน เศษโลหะจะเคลื่อนตัว อิสระบนผิวคายเศษของมีดตัด

2) ช่วงต้น เริ่มตั้งแต่มีดตัดสัมผัสกับชิ้นงาน จนถึงระยะ 1 ใน 3 ของชิ้นงาน



รูปที่ 47 เงื่อนไขที่ 3 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะต้นและเข้าสู่ระยะกลาง

เศษโลหะแบบต่อเนื่องในช่วงต้น มีการเคลื่อนที่แบบอิสระเนื่องจากไม่เกิดการแตกหัก ไม่พบเศษโลหะแบบแตกหักในระยะนี้

3) ช่วงกลาง มีดตัดเริ่มตัดชิ้นงานระยะ 2 ใน 3 ของชิ้นงาน



รูปที่ 48 เงื่อนไขที่ 3 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะกลางจนสิ้นสุดระยะกลาง

เศษโลหะแบบต่อเนื่องเคลื่อนที่แบบอิสระและมีทิศทางด้านบนคล้ายกับ Up curling ไม่พบเศษโลหะแบบแตกหักในระยะนี้

4) ช่วงท้าย มีดตัดตั้งแต่ช่วงกลาง จนครบระยะตัดของชิ้นงาน



รูปที่ 49 เงื่อนไขที่ 3 ช่วงมีดตัดเริ่มระยะท้ายจนสิ้นสุดระยะท้าย

เศษโลหะเกิดการชนกับขอบชิ้นงานและเกิดการแตกหัก เศษโลหะที่มีลักษณะยาวไม่ตกลงไปในรูของชิ้นงานด้วยความยาวกว่ารูทางเข้า ไม่พบเศษโลหะขนาดเล็กและสั้นในระยะนี้

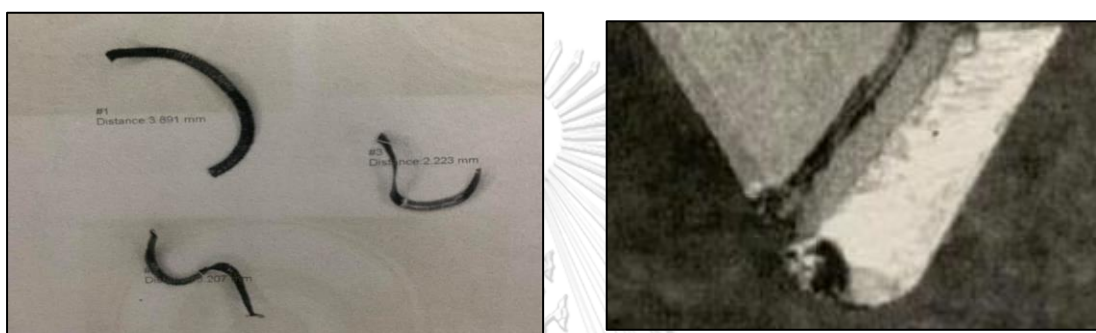
4.4.2 วิเคราะห์เศษโลหะ:

เศษโลหะของเงื่อนไขการตัดที่ 3 มี 2รูปแบบ คือการแตกหักแบบ Loosen chip หัวข้อที่ 6.2 และแบบต่อเนื่องที่เป็นเส้นยาว Ribbon มีความโค้ง 2.22-3.89 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 50 (a)

เศษโลหะที่เกิดขึ้นมีความโค้งคาบเกี่ยวกับขนาดของรูชิ้นงานที่มีความกว้าง 2.5 มิลลิเมตร มีโอกาสที่เศษโลหะจะติดในรูชิ้นงานได้ แต่เนื่องจากเศษโลหะมีลักษณะแบบต่อเนื่อง มีความเป็นเส้นตรงจากอัตราป้อนตัดสูง ทำให้จากการสุมชิ้นงานไม่พบว่าเกิดปัญหาเศษโลหะติดอยู่ในรู เนื่องจากขนาดเศษโลหะไม่ได้พันแน่นในรูชิ้นงานและทะลุผ่านรูชิ้นงานไป

#### 4.4.3 วิเคราะห์มิตตัด:

เมื่อทำการทดลอง มิตตัดเกิดการแตกหักที่ชิ้นงานตัวที่ 3 เจื่อนไข่นี้จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานเนื่องจากแรงตัดที่สูงเกินไป ดังรูปที่ 50(b)



(a)

(b)

รูปที่ 50 เศษโลหะหลังเจื่อนไขการตัดที่ 3 (a), มิตตัดเจื่อนไขที่ 3 เกิดการแตกหัก (b)

**สรุปผล:** จากเจื่อนไขการตัดที่ 3 ในการเพิ่มอัตราป้อนตัด เศษโลหะแบบต่อเนื่องมีทิศทางเคลื่อนตัวออกจากชิ้นงาน มีส่วนน้อยที่เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องแตกหักเป็นเศษเล็กๆ และตกลงไปในรูชิ้นงาน แต่เนื่องจากขนาดที่เล็ก ทำให้ไม่ติดในรูของชิ้นงาน คุณภาพพื้นผิวหลังการตัดไม่ดีมีลักษณะเป็นคลื่นจากแรงตัดที่สูง

#### 4.5 เปรียบเทียบคุณภาพชิ้นงานหลังการปรับปรุง

ทำการเปรียบเทียบคุณภาพผิวชิ้นงานระหว่างเจื่อนไขปัจจุบันกับเจื่อนไขหลังการปรับปรุง (เจื่อนไขที่

1) ตามตารางที่ 11 ดังนี้

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบคุณภาพผิวชิ้นงานระหว่างเงื่อนไขปัจจุบันกับเงื่อนไขหลังการปรับปรุง

หัวข้อ	เงื่อนไขปัจจุบัน (n=30)	เงื่อนไขที่ 1 (n=3)		
		No.1	No.10	No.20
Roughness (Std Rz7)	3.08	3.66	3.96	4.04
Flatness (Std 0.05 Max)	0.002	0.001	0.002	0.002
Parallel (Std 0.01 Max)	0.003	0.005	0.006	0.006

เงื่อนไขปัจจุบัน: สุ่มเก็บตัวอย่างแบบไม่ต่อเนื่อง โดยแบ่งเก็บจากช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลายของอายุมีดตัด (อายุมีดตัด 80 ชิ้น) โดยแบ่งเก็บช่วงละ 10 ชิ้น รวมทั้งสิ้น 30 ชิ้น จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย

เงื่อนไขที่ 1 หลังการปรับปรุง: สุ่มเก็บตัวอย่างแบบไม่ต่อเนื่องในช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลายของชิ้นงานที่ทำการทดลอง ช่วงละ 1 ชิ้น รวมทั้งสิ้น 3 ชิ้น

ค่าความเรียบผิว (Roughness): มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1Rz แต่ยังคงอยู่ภายใต้มาตรฐานที่ 7Rz

ค่าความตรง (Flatness): ค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขปัจจุบันที่ 0.002 มาตรฐานที่ 0.05 Max

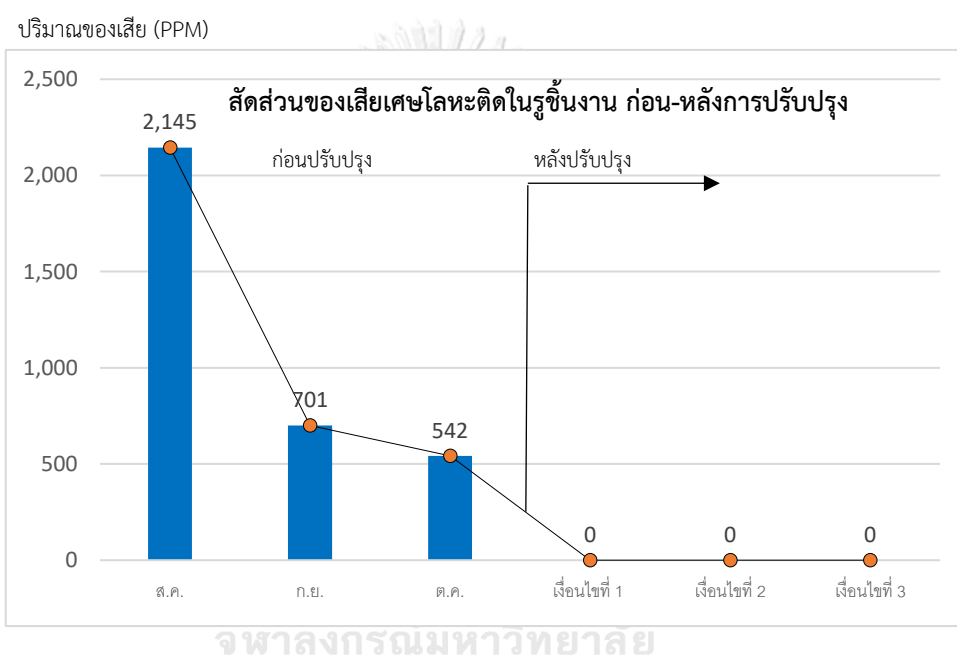
ค่าความขนาน (Parallel): แนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 0.003 แต่ยังคงอยู่ภายใต้มาตรฐานที่ 0.01 Max

สามารถสรุปได้ว่า เงื่อนไขการตัดหลังการปรับปรุง มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากแรงตัดที่สูงขึ้น ภายใต้ชิ้นงานทดลอง 20 ชิ้น อย่างไรก็ตาม ในการใช้ที่อายุมีดตัดในปัจจุบันที่ 80 ชิ้น คุณภาพของชิ้นงานคาดว่าจะต่ำลงตามอายุมีดตัดจากการสึกหรอ ทั้งนี้จะทำการพิจารณาระหว่างอายุมีดตัดใหม่กับเงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมอีกครั้ง

#### 4.6 เปรียบเทียบสัดส่วนของเสียเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน ก่อน-หลังการปรับปรุง

ทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน ก่อนและหลังการปรับปรุง จากรูปที่ 51 พบว่า ปริมาณของเสียมีปริมาณลดลง ก่อนปรับปรุงสัดส่วนของเสียเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม พ.ศ.2562 อยู่ที่ 542-2,145 PPM หลังการปรับปรุงเหลือ 0 PPM ซึ่งคิดเป็น 100% ที่

สามารถลดสัดส่วนของเสียลงได้ อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 12 จำนวนชิ้นงานที่ทำการสุ่มแต่ละเงื่อนไข เงื่อนไขที่ 1 สุ่มชิ้นงาน 20 ชิ้น เงื่อนไขที่ 2 สุ่มชิ้นงาน 5 ชิ้นและเงื่อนไขที่ 3 สุ่มชิ้นงาน 3 ชิ้น มีความเป็นไปได้ที่สัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุงเหลือ 0 ชิ้น เนื่องจากปริมาณการสุ่มที่ไม่เพียงพอ ทำให้ไม่พบของเสียจากเศษโลหะติดที่ชิ้นงาน หรือไม่พบของเสียเนื่องจากขนาดของเศษโลหะมีความเหมาะสมกับการที่ไม่ทำให้เศษโลหะติดในรูของชิ้นงาน ทั้งนี้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือเงื่อนไขที่ 1 เนื่องจากเศษโลหะมีขนาดเล็กกว่ารูของชิ้นงาน จึงต้องทำการศึกษาและทดลองเพิ่มเติมในอนาคตต่อไป



รูปที่ 51 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียก่อนปรับปรุง สิงหาคม-ตุลาคม พ.ศ.2562 เปรียบเทียบกับ สัดส่วนของเสียหลังปรับปรุงเงื่อนไขที่ 1 2 และ 3

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบสัดส่วนของเสียระหว่างเงื่อนไขปัจจุบันกับเงื่อนไขหลังการปรับปรุง

ก่อนปรับปรุง			หลังปรับปรุง					
สัดส่วนของเสีย			เงื่อนไขที่ 1		เงื่อนไขที่ 2		เงื่อนไขที่ 3	
ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	จำนวนสุ่ม (ชิ้น)	สัดส่วนของเสีย (PPM)	จำนวนสุ่ม (ชิ้น)	สัดส่วนของเสีย (PPM)	จำนวนสุ่ม (ชิ้น)	สัดส่วนของเสีย (PPM)
2145	701	542	20	0	5	0	3	0

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เงื่อนไขการตัดที่ 1 การเพิ่มความลึกตัดทำให้เศษโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้น ความโค้งลดลง และแตกหักด้วยการชนกันกับชิ้นงาน กระเด็นออกไปทางอื่น ซึ่งจากการทดลองจำนวน 20 ชิ้น ไม่พบเศษโลหะติดค้างในรู เนื่องจากความโค้งของเศษโลหะสั้นกว่ารูของชิ้นงานที่มีขนาด 2.5 มิลลิเมตร (ก่อนปรับปรุง 2.04-3.12 มิลลิเมตร, หลังปรับปรุง 0.56-1.72 มิลลิเมตร) จึงสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่ 1 มีความเหมาะสมในการช่วยลดโอกาสที่ทำให้เศษโลหะติดค้างในรูได้ ซึ่งมีส่วนที่ต้องปรับปรุงเพิ่มเติมคือเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่เกิดในเงื่อนไขการตัดที่ 1 อาจเกิดการพันกับชิ้นงานส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม เศษโลหะแบบต่อเนื่องมีทิศทางเคลื่อนที่ออกจากชิ้นงาน หากเกิดรอยขีดข่วน มีกระบวนการตัดละเอียดเก็บผิวชิ้นงานอีกครั้งที่ระยะ 0.02 มิลลิเมตร ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อผิวสำเร็จ

เงื่อนไขการตัดที่ 2 เพิ่มความลึกตัดและลดความเร็วตัด/ความเร็วสปินเดิล ส่งผลให้เศษโลหะมีขนาดเล็กเนื่องจากแรงตัดที่สูงและความร้อนขณะตัดต่ำลง จากการเก็บข้อมูลไม่พบเศษโลหะติดในรูชิ้นงาน แต่ผิวชิ้นงานหลังการตัดไม่ดีส่งผลให้อายุของมีดตัดสั้นลงจึงยังไม่เหมาะสมต่อการใช้เงื่อนไขนี้


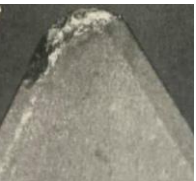

เงื่อนไขการตัดที่ 3 เพิ่มอัตราป้อนตัด เศษโลหะแบบต่อเนื่องมีทิศทางเคลื่อนตัวออกจากชิ้นงาน เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องแตกหักเป็นเศษเล็กๆ และมีบางส่วนตกลงไปในรูชิ้นงาน คุณภาพพื้นผิวหลังการตัดไม่ดีจากแรงตัดที่สูง ต้องพิจารณาปรับลดอัตราป้อนตัดลง ผิวชิ้นงานหลังการตัดไม่ดีส่งผลให้อายุของมีดตัดสั้นลง จึงยังไม่เหมาะสมต่อการใช้เงื่อนไขนี้เช่นกัน

ผลสรุปของเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 13, 14, 15, 16 ดังนี้

ตารางที่ 13 สรุปความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดในปัจจุบัน

เงื่อนไขการตัด	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	ความเร็วสปินเดิล (RPM)	เศษโลหะ	มีดตัดสึก	คุณภาพชิ้นงาน
ปัจจุบัน	0.12	0.15	3600	 เศษโลหะโค้ง 2.04-3.12 มม	 มีดสึก 189.9 ไมครอน	 ไม่เปลี่ยนแปลง




ตารางที่ 14 สรุปความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดที่ 1

เงื่อนไขการตัด	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	ความเร็วสปีนเดิล (RPM)	เศษโลหะ	มิติตัดสีก	ชิ้นงาน
เงื่อนไขที่ 1	0.12	0.45	3600	<p>1.65-1.72 mm    0.56-1.48 mm</p>  <p>เศษโลหะโค้ง 0.56-1.48 มม., 1.65-1.72 มม.</p>	 <p>มิติสีก 171.4 ไมครอน</p>	 <p>ไม่เปลี่ยนแปลง</p>

ตารางที่ 15 สรุปความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดที่ 2

เงื่อนไขการตัด	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	ความเร็วสปีนเดิล (RPM)	เศษโลหะ	มิติตัดสีก	ชิ้นงาน
เงื่อนไขที่ 2	0.12	0.45	1200	 <p>เศษโลหะโค้ง 0.57-0.79 มม.</p>	 <p>มิติสีก 295.5 ไมครอน</p>	 <p>ผิวไม่เรียบ</p>

ตารางที่ 16 สรุปความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดที่ 3

เงื่อนไขการตัด	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	ความเร็วสปีนเดิล (RPM)	เศษโลหะ	มิติตัดสีก	ชิ้นงาน
เงื่อนไขที่ 3	0.80	0.15	3600	 <p>เศษโลหะโค้ง 2.22-3.89 มม.</p>	 <p>มิติตัดแตกหัก</p>	 <p>ผิวไม่เรียบ เป็นคลื่น</p>



ปัจจัยที่ส่งผลต่อทิศทางและรูปแบบการแตกหักของเศษโลหะมีอยู่หลายปัจจัย เช่น รูปร่างของมีดตัด ชนิดของมีดตัด ชนิดของวัสดุ เงื่อนไขการตัด เป็นต้น เมื่อพิจารณาแล้ว เงื่อนไขการตัด ที่ประกอบด้วย ความลึกตัด อัตราป้อนตัด และความเร็วรอบสปีนเดิล ถูกนำมาทดลองเนื่องจากสามารถปรับแต่งและทำการทดลองได้เลย

เศษโลหะแบบต่อเนื่อง เคลื่อนตัวออกจากผิวคายเศษของมีดตัดได้ดี เนื่องจากมีความยาวและบาง ทำให้แรงที่เกิดขึ้นขณะตัดมีน้อย เศษโลหะที่มีความยาวมากทิศทางการเกิดจะอยู่ด้านตรงข้ามกับอัตราป้อนตัด มีข้อเสียคือ เมื่อความยาวมาก อาจเกิดการพันกับชิ้นงานหรือมีดตัดซึ่งส่งผลต่อด้านคุณภาพ ส่วนเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่มีความยาวไม่มาก จะม้วนตัวไปทิศทางเดียวกันกับอัตราป้อนตัดจากนั้นเกิดการแตกหักด้วยการชนกับชิ้นงานหรือมีดตัด ซึ่งเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะไม่ติดอยู่ในรูของชิ้นงาน เนื่องจากความยาวของตัวเอง

เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง เคลื่อนตัวออกจากผิวคายเศษของมีดตัดได้ไม่ดีจากแรงเสียดทาน เศษโลหะที่มีความโค้งมากจะชนกับชิ้นงานหรือมีดตัดจนกระทั่งแตกหัก ความโค้งของเศษโลหะมีความสัมพันธ์กับแรงในการตัด กล่าวคือ ยิ่งแรงตัดสูง ยิ่งทำให้เศษโลหะโค้งไม่มากและเกิดการแตกหักง่าย เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง ที่มีความโค้งมากกว่า Full turn เล็กน้อย มีโอกาสติดแน่นในรูชิ้นงานหากมีขนาดที่เหมาะสม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ตั้งเป้าหมายและพิจารณาผลกระทบในการปรับปรุงกระบวนการก่อนทำการทดลอง เพื่อป้องกันการเสียเวลาและค่าใช้จ่าย เช่น ต้องเพิ่มเศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องด้วยการเพิ่มความลึกตัดหรือเพิ่มอัตราป้อนตัด เพื่อป้องกันเศษโลหะแบบต่อเนื่องพันกับชิ้นงาน สามารถยอมรับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นของมีดตัดสึกหรอได้หรือไม่
- 2) การปรับความเร็วตัด/ความเร็วสปีนเดิล สามารถปรับได้โดยไม่ส่งผลต่อขนาดของชิ้นงาน ควรปรับให้ความเร็วตัดสูงเพื่อยืดอายุของมีดตัด ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับวัสดุประสงค์ของผู้ใช้งานด้วย
- 3) การพิจารณาทิศทางของเศษโลหะ ควรพิจารณาความโค้งของเศษโลหะประกอบด้วย เนื่องจากเศษโลหะที่มีความโค้งสูง จะไปชนกับชิ้นงานและกระเด็นไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Chip side angle และ Up curling ประกอบด้วย

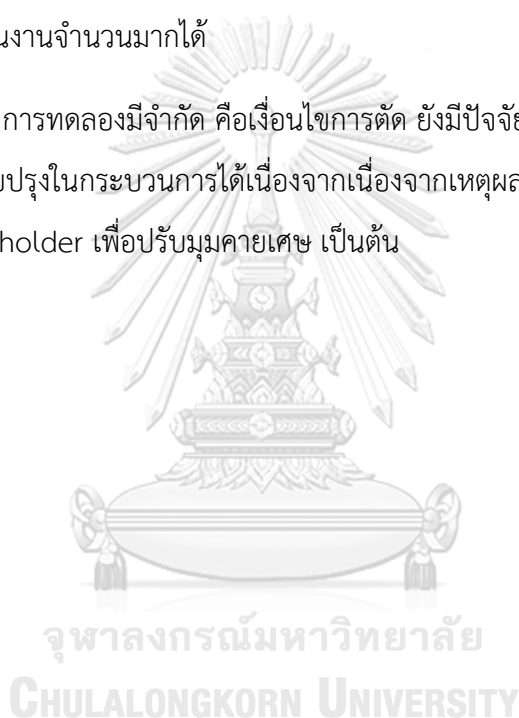
4) จำนวนในการทดลอง สามารถปรับลดได้ตามความเหมาะสม เพื่อป้องกันการเสียเวลาและค่าใช้จ่าย หากเห็นว่ามีความไว้มันไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆด้วย

5) ทิศทางและลักษณะการแตกหักของเศษโลหะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆอีก เช่น มุมคายเศษ ชนิดของมีดตัดแบบมีร่องคายเศษ ทั้งนี้ในโรงงานที่ทำการศึกษายังไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ หากผู้ศึกษาสามารถทดลองปัจจัยเหล่านี้ อาจพิจารณาเพิ่มเติมได้

### 5.3 อุปสรรคในการวิจัย

1) เนื่องจากข้อจำกัดในส่วนของเวลาและค่าใช้จ่ายเรื่องจำนวนชิ้นงานและมีดตัด ทำให้ไม่สามารถทดลองด้วยชิ้นงานจำนวนมากได้

2) ปัจจัยที่ทำการทดลองมีจำกัด คือเงื่อนไขการตัด ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการเกิดเศษโลหะที่ไม่สามารถนำมาปรับปรุงในกระบวนการได้เนื่องจากเนื่องจากเหตุผลด้านธุรกิจ เช่น การเปลี่ยนมีดตัด การเปลี่ยน Tool holder เพื่อปรับมุมคายเศษ เป็นต้น



## บรรณานุกรม

1. Sawai Sukvittayawong and Ichiro Inasaki, Identification of Chip Form in Turning Process. SME International Journal, 1991. 34(4): p. 553-560.
2. Kalhori Vahid, Modeling and Simulation of Mechanical cutting. Luleå University of Technology 1 jan 1997, 2001: p. 36.
3. กิตติกุล กลึงผล, การพัฒนาตรวจจับการแตกหักเศษโลหะโดยใช้สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2011.
4. อาทิตยา ชัยจรีนนท์, การพยากรณ์ในกระบวนการสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานในการกลึงอะลูมิเนียม. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2011.
5. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, การพัฒนาความสามารถในการตัดสำหรับกระบวนการกัดเหล็กกล้า โดยการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุดเพื่อกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์. รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ฉบับสมบูรณ์ กรุงเทพมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2013.
6. ธารัตน์ ชาญสูงเนิน, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับแรงตัดในกระบวนการกลึง. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2011.
7. เดือนพรรณ จันทนา, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงกับแรงตัด. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2014.
8. มุอ์มิน ศาสน์สันติวงศ์, การพัฒนาการทำนายค่าความตรงและความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2015.
9. ภัทร ไชยวงศ์, การพยากรณ์การสึกหรอของเม็ดมีดในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2017.
10. ทองพรรณราย มัยโชติ, การทำนายความขรุขระของผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดย

ประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตของแรงตัดพลวัต. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2015.

11. KATHLEEN DEBENEDICTIS, READ YOUR CHIPS. RETRIEVED JUN 15, 2019, FROM MODERN MACHINE SHOP, 1998.
12. Yijiang Fang, THEORETICAL MODELING AND ANIMATION OF THE CHIP CURLING PROCESS IN 3D METAL CUTTING. DOCTOR OF PHILOSOPHY THESIS. DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING UNIVERSITY OF WOLLONGONG, 1998.
13. Murat Kiyak, Mirigul Altan, and Erhan Altan, PREDICTION OF CHIP FLOW ANGLE IN ORTHOGONAL TURNING OF MILD STEEL BY NEURAL NETWORK APPROACH. RETRIEVED JUNE 14, 2005, SPRINGER-VERLAG LONDON LIMITED, 2006.
14. A.D'Acunto, et al., EFFECT OF CUTTING-EDGE GEOMETRY ON CHIP FLOW DIRECTION-ANALYTICAL MODELING AND EXPERIMENTAL VALIDATION. THE 16TH CIRP CONFERENCE ON MODELING OPERATIONS, 2017.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายพยุห์
วัน เดือน ปี เกิด	14 กุมภาพันธ์ 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดนครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย:โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล ปริญญาตรี:มหาวิทยาลัยวิทยาลัยศรีปทุม ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.29
ที่อยู่ปัจจุบัน	599/94 หมู่บ้านไพลิน ถนนโพธิ์ศรี ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัด อุดรธานี 41000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY