



## รายงานการวิจัย

การศึกษาการทำงานของโพลิเมอร์เคลือบผิวที่มีความเร็วรอบสูงที่เคลือบผิวด้วย Ti AlN  
ในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความลับของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การศึกษาการทำงานของไบมิดเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงที่เคลือบผิวด้วย Ti AlN  
ในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ไพสิน ฤกษ์จิรสวัสดิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

Mr.Phan Quang The

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2544

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2545

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณ 2544 ผู้วิจัยขอขอบคุณ Mr.Phan Quang The อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย Thai Nguyen ประเทศเวียดนาม อาจารย์แลกเปลี่ยนตามโครงการ T-GMS ระหว่างเดือนมกราคม – เมษายน 2544 ที่ได้มาทำการวิจัยโดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ อาคารเครื่องมือ 6 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของปริญญาโทระดับปริญญาเอกสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ท่านกำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัย Hanoi ประเทศเวียดนาม ทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสทำวิจัยร่วม ได้รับความรู้และได้เห็นความสำคัญของศาสตร์แขนง Tribology และ Surface Coating ที่ยังไม่ได้รับความสนใจเท่าใดนักในประเทศไทย

ขอขอบคุณบริษัท Royal Ace ที่เห็นความสำคัญของ Surface Coating ที่กรุณาเคลือบผิว PVD-TiAlN บนมีดกลึง HSS ให้โดยไม่คิดค่าใช้จ่าย คุณสุขสวัสดิ์ มาคำพันธ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการกลึงโลหะ อาคารเครื่องมือ 6 ที่ทำการทดลองกลึงชิ้นงานด้วยมีดกลึงที่เตรียมไว้ คุณอนุชิต เรืองวิทยานนท์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM/EDS คุณวรรณชัย กาญจนจิตรา เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการโลหวิทยา ที่ได้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการศึกษา Metallography คุณรัชณี หอมกลาง เจ้าหน้าที่ของสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ที่ช่วยเหลือและประสานงานกับสถานวิจัยของสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และพิมพ์งานต่าง ๆ จนเป็นที่เรียบร้อยและสมบูรณ์

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2545

## บทคัดย่อ

การทำงานของมีดกลึง HSS ขึ้นกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นขณะกลึงที่รอยต่อระหว่างเศษกลึงกับมีดกลึง ซึ่งเร่งการสึกหรอและทำให้อายุการใช้งานของมีดกลึงสั้นลง การเคลือบผิวมีดกลึงด้วยผิวเคลือบช่วยลดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นลงได้ จึงช่วยยืดอายุรวมทั้งการทำงานของมีดกลึงที่ดีขึ้นด้วย

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นที่การกระจายของอุณหภูมิที่สูงขึ้นในมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย PVD-TiN, TiCN และ TiAlN โดยเปรียบเทียบกับมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว ภายใต้สภาวะต่าง ๆ ของการกลึง ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการสึกหรอและกลไกของการสึกหรอ การศึกษาพบว่ามีดกลึงสึกหรอแบบ crater wear เป็นหลัก ร่วมกับการแตกร้าวและการหลุดร่อนเป็นแผ่นของผิวเคลือบ นอกจากนี้ยังพบการสึกหรอแบบยึดติด (adhesive) อันเนื่องมาจากการถ่ายโอนวัสดุ และการสึกหรอแบบการขัดสี (abrasive) ไปบนมีดกลึงด้วยอนุภาคที่แข็งกว่า รวมทั้งการเกิด BUE บนมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิวที่ทุกสภาวะของการกลึงและบนมีดกลึงที่เคลือบผิวทุกชนิดที่กลึงด้วยความเร็ว 53 ม./นาที และอัตราป้อนมีดกลึง 0.22 มม./รอบด้วย



## Abstract

The performance of HSS cutting tools was found to be dependent on the higher temperature developed at the interface between chip and tool. The contact temperatures accelerating tool wear shortened tool life. PVD coating on HSS tools reduced the maximum temperature development that prolonged the degradation of cutting during service and consequently better performance.

The present study focuses on the higher temperature distribution in the HSS turning tools coated with PVD-TiN, TiCN, and TiAlN compared to the uncoated tools under various cutting conditions related to wear mechanism. It was investigated that HSS turning tools were worn mainly by crater wear in combination of cracking and delamination of coating materials. Adhesive wear due to material transfer and abrasive wear due to hard and abrasive particles were observed. BUE formed on the uncoated tools under the experimental cutting conditions and also on all the coated tools at cutting speed 53 m/min and feed rate 0.22 mm/rev.

## สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อ .....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ฉ-ช
บทนำ.....	1
บทที่ 1 ทฤษฎี - การกลึงโลหะ.....	3
บทที่ 2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	15
3.1 วัสดุที่ใช้.....	16
3.2 การทดลอง.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	25
บทที่ 5 อภิปรายผลการทดลอง.....	59
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	63
บรรณานุกรม .....	64
ประวัติผู้วิจัย.....	65

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนผสมทางเคมีของ PM-HSS inserts.....	17
2	ความหนาและความแข็งของผิวเคลือบ.....	17
3	ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน 1045 steel.....	18
4	cutting condition ของการทดลองชุดแรก.....	23
5	cutting condition ของการทดลองชุดที่สอง.....	24



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1	การกลึง (lathe turning) แสดงภาคตัดขวางในแนวตั้ง และรายละเอียดของมีดกลึง..... 4
2	ลักษณะของมีดกลึงชนิด inserts ..... 5
3	ไดอะแกรมแสดงการกลึง..... 6
4	Flow zone ใน 0.1% steel หลังกลึงด้วย cutting speed สูง..... 7
5	BUE ใน 0.15% C steel หลังกลึงด้วย cutting speed ต่ำ..... 8
6	แรงกระทำบนมีดกลึง..... 9
7	การกระจายของความเค้นบนมีดกลึง..... 10
8	บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น (HAZ) บนมีดกลึงที่ใช้กลึง low-C steel ด้วย Cutting speed สูง หลัง etched ด้วย nital และเส้นแสดงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาค ..... 12
9	เครื่องมือกลึงขณะทำงาน ..... 16
10	มีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง ..... 17
11	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 1045 steel ที่ etched ด้วย Nital 3% 5 วินาที จากกล้องจุลทรรศน์ optical..... 18
12	Inclusions ในรูปที่ 11..... 19
13	ภาพถ่าย SEM ของ inclusion ในรูปที่ 12 มี 3 แบบด้วยกัน (a, b,c) พร้อมส่วนผสมทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วย EDS..... 20-22
14	rake face ของมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiAlN จากกล้อง SEM แสดง BUE และการถ่ายไออนวัสดุ ..... 26-29
15	มีดกลึง HSS ที่ไม่เคลือบผิวจากกล้อง SEM แสดงการถ่าย ไออนวัสดุที่บริเวณ ด้านหลังของ crater ..... 30-31
16	มีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiCN จากกล้อง SEM แสดง deposited layer..... 32-33
17	โครงสร้างจุลภาคของ HSS ที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิระหว่าง 600° - 900°C..... 35
18	มีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiAlN จากกล้องจุลทรรศน์ optical แสดง temperature profile แต่ละ cutting condition..... 36-39



รูปที่	หน้า
19	มีดกลึงที่ไม่เคลือบผิวและที่เคลือบผิวต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์ optical แสดง temperature profile ที่แต่ละ cutting condition ..... 40-43
20	พารามิเตอร์ที่ใช้วัดการสึกหรอของมีดกลึง ..... 44
21-24	ผลการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในมีดกลึงที่เคลือบผิวต่าง ๆ ที่ cutting condition ต่าง ๆ ..... 45-46
25	ภาพถ่ายด้วย SEM แสดง crack และ delamination ที่ด้านหน้า crater wear ของผิวเคลือบต่าง ๆ ..... 47-49
26	ภาพถ่าย SEM ของผิวเคลือบ TiN แสดง crack และ delamination ที่รอบ ๆ และที่ปลายของ crater wear ..... 50-51
27	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ optical ของมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว แสดง deformation ของ Nose ..... 52
28	ภาพถ่าย SEM ของมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiN แสดงการเกิด plastic deformation และ adhesive wear ..... 53
29	ภาพถ่าย SEM ของมีดกลึงเคลือบผิวด้วย TiCN แสดง abrasive particle ที่ปลายของ crater wear ..... 54-55
30	ภาพถ่าย SEM ของมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiAlN แสดง adhesive wear ..... 56-57

## บทนำ

กระบวนการผลิตโลหะให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Manufacturing process) ไม่ว่าจะเป็นการหล่อ (casting) การแปรรูปขึ้นรูป (forming & shaping) จำเป็นต้องมีการกลึง-ไส-เจาะ-ตัด (machining) เพื่อให้ขนาดและรูปร่างพร้อมที่จะใช้งาน การกลึงทุกรูปแบบต้องใช้พลังงานในการสร้างผิวใหม่บนชิ้นงาน (work material) และบนเศษกลึง (chip) พลังงานที่เกี่ยวข้องมีทั้งพลังงานกลที่มาจากแรงที่ใช้ในการตัด (cutting force) และความเร็วในการกลึง (cutting speed) และปฏิกิริยาเคมีระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงานที่มีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน การกลึงมีค่าใช้จ่ายถึงประมาณ 15% ของมูลค่าของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการจึงเป็นแรงจูงใจให้มีการพัฒนาการกลึงให้เป็นแบบอัตโนมัติ เพื่อประหยัดค่าแรงและเป็นการเพิ่มปริมาณชิ้นงานต่อหน่วยแรงงาน การกลึงด้วยความเร็วสูงโดยการใช้มีดกลึงที่ทำด้วยเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (high speed steel, HSS) และ cemented carbides เพื่อเพิ่มผลผลิต การผลิตและพัฒนาสารหล่อลื่น (lubricants) และสารหล่อเย็น (coolants) เพื่อช่วยปรับปรุงผิวชิ้นงานหลังกลึง และช่วยเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของเศษกลึง การผลิตเหล็กกล้าและทองเหลืองเกรดที่กลึงได้ง่าย (free-cutting) เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต เป็นต้น

การเลือกมีดกลึงที่เหมาะสมกับงานกลึงต้องคำนึงถึงวัสดุที่จะกลึง (work materials) ทั้งความแข็ง สภาพผิวภายนอกและรูปร่าง รูปแบบของการกลึง ความแข็งแรงของเครื่องกลึง พลังงานที่มีอยู่และปริมาณของเศษกลึง HSS ที่ผ่านการชุบแข็งที่เหมาะสมใช้มากในงานกลึงและในอุตสาหกรรมแปรรูปโลหะ เนื่องจากมีความแข็งแรงมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงระหว่างใช้งาน อีกทั้งยังมีความเหนียวดี (toughness) ทนต่อการสึกหรอ (wear resistance) HSS ที่ใช้กันทั่วไปจะผลิตโดยกรรมวิธี Powder Metallurgy ซึ่งจะให้โครงสร้างของคาร์ไบด์ขนาดเล็กกระจายตัวกันอยู่ใน matrix

การกลึงมีปัญหามากมาย ที่สำคัญที่สุดคือการสึกหรอของมีดกลึง (tool wear) บน rake face, cutting edge และ flank face ผู้ปฏิบัติงานกลึงจะต้องเลือก cutting condition ที่มีสมดุลย์ระหว่างความเร็วในการกลึงกับอายุการใช้งานของมีดกลึง (tool life) โดยมีพื้นฐานที่จะให้ผลผลิตมากที่สุดด้วยค่าใช้จ่ายต่ำสุด ปัญหาที่พบได้แก่ การผิดรูปของ nose (deformation) ภายใต้ compressive stress การสึกหรอลักษณะเป็นหลุมเป็นบ่อ (crater wear) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงานและระหว่างเศษกลึงกับ rake face การมีเศษกลึงเชื่อมติดกับ rake face ที่เรียกว่า build up edge, BUE ซึ่งเมื่อหลุดออกจากมีดกลึงก็จะพาเนื้อวัสดุมีดกลึงออกไปด้วย เกิดการสึกหรอที่เรียกว่า Attrition wear และการสึกหรอเนื่องจากมีเศษคาร์ไบด์ที่หลุดออก

จากตัวมีดกลึง แล้วไถครูดผิวมีดกลึงจนเป็นร่องลึก (grooves) และพาเนื้อวัสดุกลึงออกไป เกิดการสึกหรอแบบ Abrasive wear

พลังงานที่ใช้ในการกลึงส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเป็นความร้อนที่ใกล้ ๆ บริเวณคมมีด มีดกลึงจึงร้อนขึ้นทำให้ความแข็งที่อุณหภูมิห้องของคมมีดลดลงและใช้การไม่ได้ (fail) ภายในเวลาอันสั้น เนื่องจาก stress และอุณหภูมิที่สูงขึ้น การเคลือบผิวมีดกลึงด้วยชั้นบาง ๆ ของวัสดุที่แข็งเช่น TiN, TiCN, TiAlN โดยเทคนิค PVD หรือ CVD จึงช่วยเพิ่มอายุการใช้งาน และผิวกลึงก็จะดีขึ้น ทำให้สถานะของการสัมผัสระหว่างผิวทั้งสองเปลี่ยนไป การสึกหรอจึงลดลง

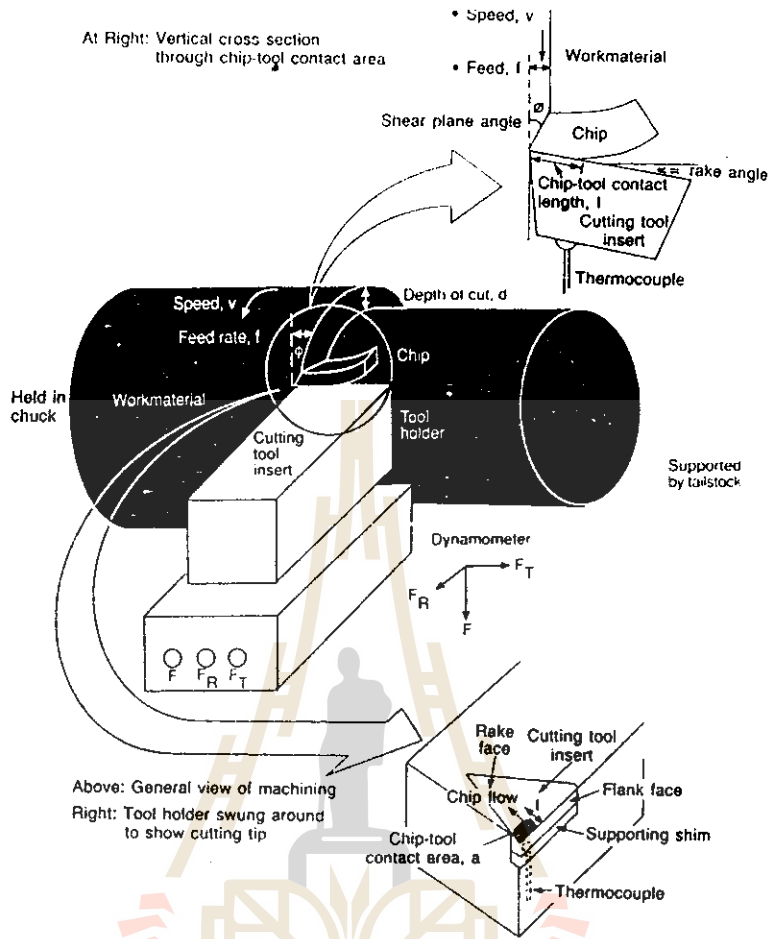
การทดลองนี้จึงเป็นการศึกษาการกระจายของอุณหภูมิที่บริเวณรอยต่อระหว่าง rake face กับเศษกลึง ที่มีผลต่อการสึกหรอของมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย PVD-TiN, TiCN, TiAlN โดยเปรียบเทียบกับมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว (uncoated) โดยใช้มีดกลึงชนิด inserts ที่ทำด้วยเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (high speed steel, HSS) เกรด M-41 ที่ผลิตโดยกระบวนการ Powder Metallurgy ที่ผ่านการชุบแข็งที่เหมาะสมและเคลือบผิวด้วยเทคนิค PVD ทำการกลึง (orthogonal turning) โดยไม่ใช้สารหล่อลื่นและหล่อเย็น ชิ้นงานที่จะกลึง (work material) เป็นเหล็กกล้าเกรด AISI1045 ทำการกลึงที่ cutting condition ต่าง ๆ หลังการทดลองจะนำมีดกลึงไปตัดผ่าและเตรียมผิวเพื่อตรวจดูโครงสร้างจุลภาค การกระจายของอุณหภูมิ และวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ crater wear ด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM/EDS ผลการทดลองจะทำให้เข้าใจถึงกลไกการสึกหรอ (Wear mechanism) และพารามิเตอร์หลักที่ควบคุมการทำงานของมีดกลึง เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกวัสดุเคลือบผิวกลึงเมื่อทำงานกลึงที่ condition นั้น ๆ

## บทที่ 1

### ทฤษฎี-การกลึงโลหะ (Turning)

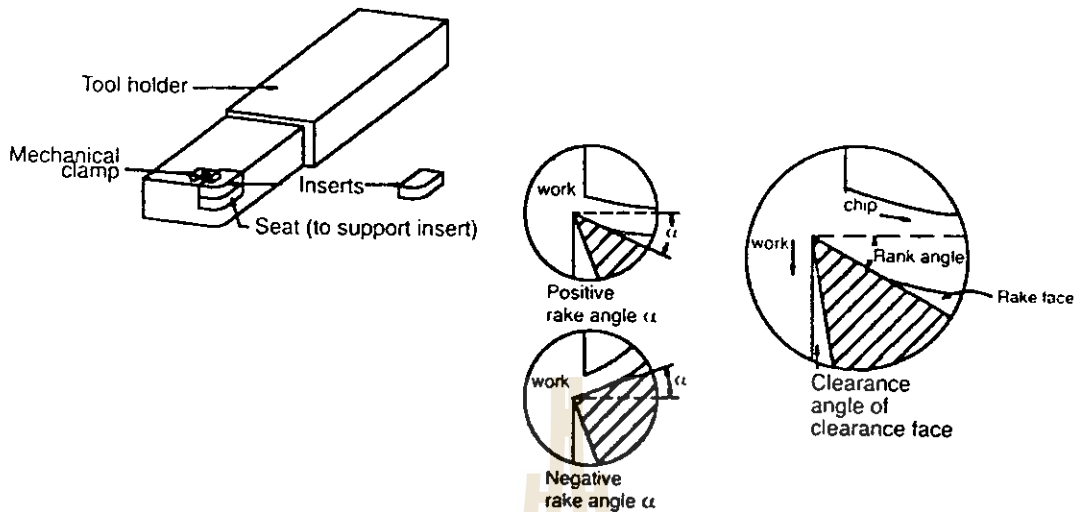
#### การกลึง (Turning)

การกลึงเป็นรูปแบบหนึ่งของการตัด (cutting) บางทีเรียก semiorthogonal cutting ชิ้นงาน (work material) ถูกจับยึดไว้ใน chuck ของเครื่องกลึง (lathe) และหมุนรอบตัวเอง (rotate) ส่วนมีดกลึงถูกจับยึดไว้กับ tool holder และเคลื่อนที่ไปตามแกนของแท่งชิ้นงานด้วยอัตราเร็วที่ควบคุม โลหะถูกตัดเฉือน (sheared) ทีละชั้น (layer) เพื่อให้ได้ผิวใหม่ พารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมคือ ความเร็วในการตัด (cutting speed,  $v$ ) ซึ่งเป็นความเร็วที่ผิวชิ้นงานที่ยังไม่ถูกตัด (uncut) เคลื่อนที่ผ่านคมมีด (cutting edge) ซึ่งปกติมีค่าระหว่าง  $3-200 \text{ m min}^{-1}$  ค่า  $v$  แปรตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทุกขณะที่ถูกตัด แต่แกนของชิ้นงานหมุนด้วยอัตราเร็วที่คงที่ อัตราการป้อนมีดกลึง (feed rate,  $f$ ) เป็นระยะที่คมมีดเคลื่อนที่ไปตามแกนของชิ้นงานที่หมุนในแต่ละรอบ ค่านี้อาจต่ำถึง  $0.12$  หรือสูงถึง  $2.5 \text{ mm/rev}$  และความลึกของคมมีดในเนื้องาน (depth of cut,  $w$ ) ซึ่งก็คือความหนาของเนื้อโลหะที่ถูกตัดเฉือน ซึ่งวัดในแนวรัศมีของชิ้นงาน ค่านี้อาจแปรจากศูนย์กลางถึงมากกว่า  $25 \text{ mm}$  ผลคูณของ  $vfw$  ก็คืออัตราการตัด (rate of metal removal) ซึ่งก็คืออัตราที่เนื้อโลหะถูกนำออกจากชิ้นงาน ปกติมีค่า  $80-160 \text{ cm}^3/\text{min}$  ค่านี้ใช้วัดประสิทธิภาพ (efficiency) ของการปฏิบัติการ  $v$  และ  $f$  เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่จะต้องปรับให้เหมาะสม (optimum condition) ส่วน  $w$  จะกำหนดตายตัวโดยขนาดของชิ้นงานก่อนและหลังตัด (รูปที่ 1)



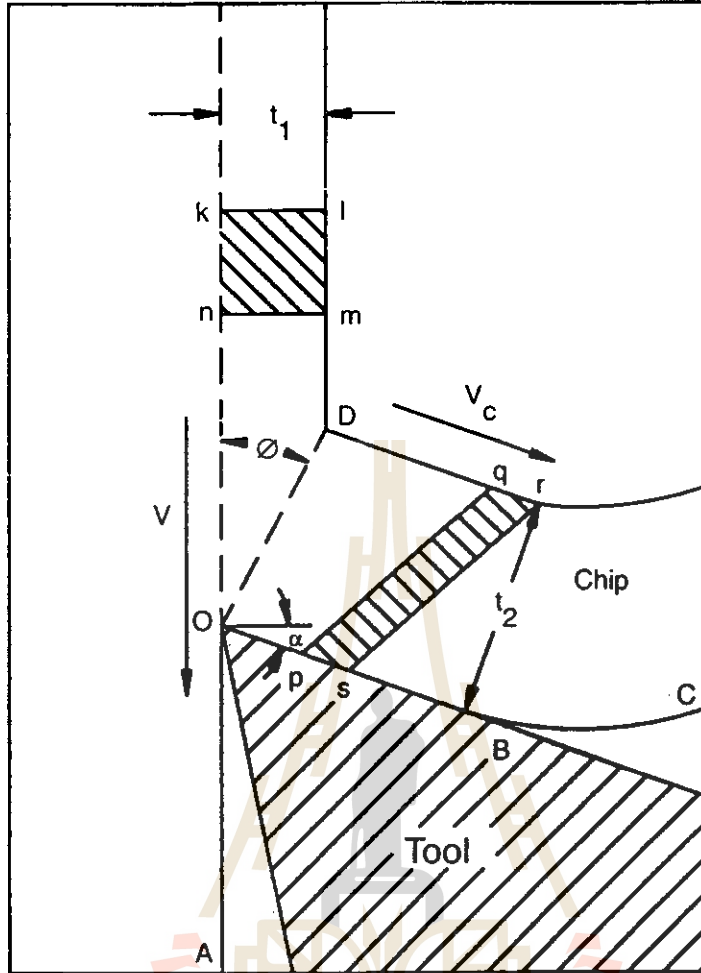
รูปที่ 1 การกลึง (lathe turning) แสดงภาคตัดขวางในแนวตั้ง (บนขวา) และ รายละเอียดของมีดกลึง (ล่างขวา)

รูปลักษณะของมีดกลึง (cutting tool) ประกอบด้วยบริเวณที่สำคัญคือ ผิวด้านบนของมีดกลึงที่เรียกว่า rake face ซึ่งเป็นบริเวณที่เศษกลึง (chip) เคลื่อนที่ผ่าน คมมีด (cutting edge) คือบริเวณที่ rake face ตัดกับขอบด้านข้างของใบมีดที่เรียกว่า flank, clearance face มีการออกแบบหรือวางแนวไม่ให้ flank face ขัดถูกับผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงมาใหม่ ๆ โดยให้มีมุม  $6-10^\circ$  และปรับให้เอียงทำมุมที่เหมาะสมกับแกนของชิ้นงาน ค่าของมุมดังกล่าวขึ้นกับชนิดของใบมีด ชนิดของชิ้นงานและสภาวะการตัด (cutting condition) nose ของใบมีดอยู่ที่บริเวณที่ rake face และ flank face มาตัดกัน ซึ่งอาจจะแหลมคม แต่โดยทั่วไปเป็นรัศมี (nose radius) ระหว่างการกลึงความหนาของเศษกลึงที่ยังไม่ deformed ก็คือค่า  $f$ , feed rate



รูปที่ 2 ลักษณะของมีดกัดชนิด inserts

เศษกling (chip) คือเศษโลหะที่ถูกตัดเฉือนออกจากผิวชิ้นงานด้วยคมมีดและเคลื่อนที่ออกจากชิ้นงานผ่านไปบน rake face เศษกlingเกิดผิดรูปอย่างถาวร (plastic deformation) การก่อตัวและการเคลื่อนที่ของเศษกlingต้องการพลังงานจำนวนมาก การกlingทำให้เกิดผิวใหม่สองผิวบนชิ้นงานและได้ผิวเศษกling ตามทฤษฎีพลังงานที่ใช้ในการตัดน้อยมากเพียงเศษส่วนของพลังงานที่ต้องการที่จะทำให้เศษกlingผิดรูปอย่างถาวร เศษกlingเกิดจากแรงเฉือนที่กระทำในระนาบที่ค้จากคมมีดถึงตำแหน่งที่ผิวบนเศษที่กำลังเคลื่อนที่ออกจากผิวชิ้นงาน (shear plane) บริเวณนี้เกิด strain จำนวนมากภายในช่วงเวลาสั้น ๆ จนโลหะไม่สามารถทนได้ จะเกิดการแตก (fracture) shear plane ทำมุมกับผิวชิ้นงาน ได้ระนาบนี้ชิ้นงานยังไม่เกิดการผิดรูป เหนือระนาบนี้เป็นเศษกlingที่ก่อตัวและปีนขึ้น (climb up) ไปบนผิวหน้าของใบมีดขณะที่การกlingรูดหน้าต่อไป ทั้งใบมีดและเศษกlingต่างก็เคลื่อนที่จึงมีความเร็วสัมพัทธ์ (Relative velocity) และเกิดแรงเสียดทานระหว่างเศษกlingกับ rake face ความหนาของเศษกlingโตกว่า  $w$ , depth of cut เสมอ การมีเศษกlingในการตัดจึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และมีผลต่อคุณภาพผิวและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

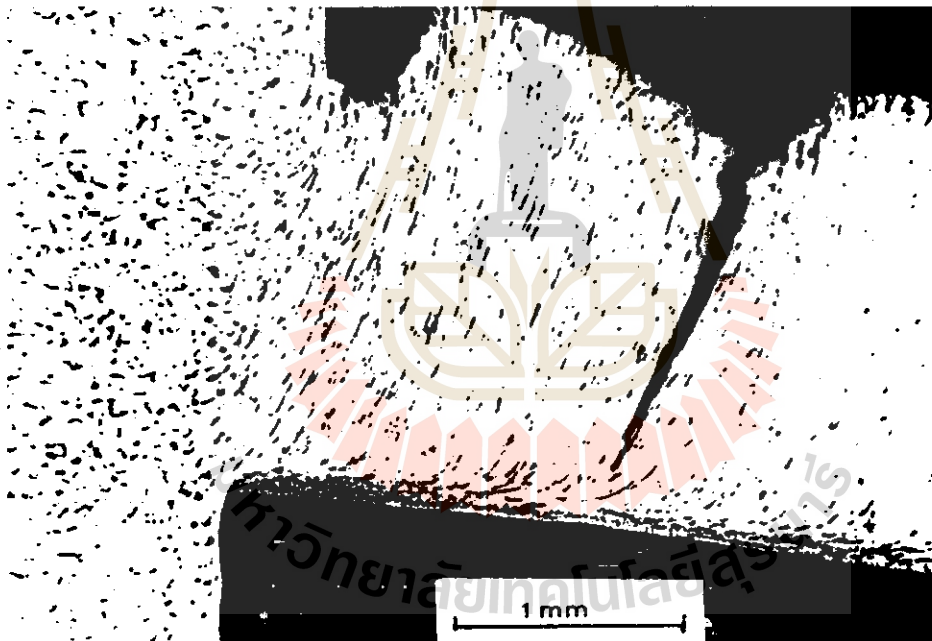


รูปที่ 3 ไดอะแกรมแสดงการกลึง

ความเร็วของเศษกลึงเคลื่อนไปบน rake face,  $v_c$  ต้องน้อยกว่า cutting speed,  $v$  จะเกิดเศษกลึงอย่างต่อเนื่อง เศษกลึงมีสองผิว ผิวหนึ่งสัมผัสกับ rake face จะมันวาว เพราะเกิดการขัดถูขณะเคลื่อนที่ขึ้นข้างบนกับอีกผิวซึ่งมาจากผิวเดิมของชิ้นงานที่ไม่ได้สัมผัสของแข็งใด ๆ มีลักษณะเป็นซี่ร่องขรุขระ ซึ่งเกิดจากการเสียดสีของเศษกลึงก่อนตัว เศษกลึงเกิดการแปรรูปในโซนแคบๆ เรียก primary shear zone ที่รอยต่อระหว่างใบมีดกับเศษกลึงมี secondary shear zone ที่เกิดจากแรงเสียดทาน เศษกลึงมีความแข็งแรงมากขึ้นยืดดึงได้น้อยเนื่องจาก strain hardening ซึ่งเกิดโดย shear strain ที่ปลายมีด (Tool tip) อาจมีเศษชิ้นงานติดอยู่ เรียก build up edge (BUE) เกาะซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ จนไม่เสถียรและแตกหักถูกพาออกไปทางด้านข้างของเศษกลึง ที่เหลือจะสะสมกระจัดกระจายไปบนผิวชิ้นงาน BUE เกิดจาก adhesion ของชิ้นงานกับ rake face

### รอยต่อระหว่างเศษกลึงกับมีดกลึง

เศษกลึงที่ก่อตัวด้วยแรงเฉือนที่กระทำบน shear plane จะเคลื่อนไปบน rake face และรอบ ๆ ขอบของมีดกลึง แรงนี้ไม่ขึ้นกับ normal force แต่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่สัมผัสระหว่างเศษกลึงกับมีดกลึง (interface) ที่บริเวณนี้มีทั้ง bonding และ interlocking ระหว่างผิวทั้งสอง บางกรณีจะมีชิ้นส่วนของงานติดอยู่กับมีดกลึงด้วย metallic bonding จนกลายเป็นวัสดุชิ้นเดียวกัน และจะแยกจากกันโดย fracture ระหว่างการกลึงชิ้นงานจะได้รับ plastic strain ระดับหนึ่งเกิดการ flow ของเนื้อโลหะไปบนผิวมีดกลึงในทิศเดียว เมื่อความเร็วในการตัดมีค่าสูงและตัดเป็นเวลานาน จะเกิด seizure ซึ่งมีพื้นที่สัมผัสขนาดเล็ก stress ที่บริเวณนี้จึงมีค่ามาก โครงสร้างจุลภาคของเศษกลึงใกล้กับ interface เปลี่ยนรูปอย่างมาก เนื่องจาก stress ที่บริเวณนี้รุนแรงกว่าบน shear plane เรียกบริเวณนี้ว่า flow zone (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 Flow zone ใน 0.1% C steel หลังกลึงด้วย cutting speed สูง

ภายใต้ seizure condition อาจเกิด BUE (รูปที่ 5) ซึ่งเป็นส่วนของชิ้นงานที่ถูก strain-hardened สะสมตัวติดแน่นอยู่รอบ ๆ คมมีดและบน rake face โดยไปแทนที่เศษกลึงที่สัมผัสโดยตรงกับมีดกลึง BUE เป็นส่วนของชิ้นงานที่ยังไม่แยกตัวออกจากชิ้นงานและมีหน้าที่เสมือน



ส่วนขยายของมีดกลึง ผิวกลึง (machined surface) เกิดโดย shear fracture ภายใต้ shearing stress มีคุณลักษณะความแข็ง คุณสมบัติและความหยาบตาม flow pattern บนผิวกลึง

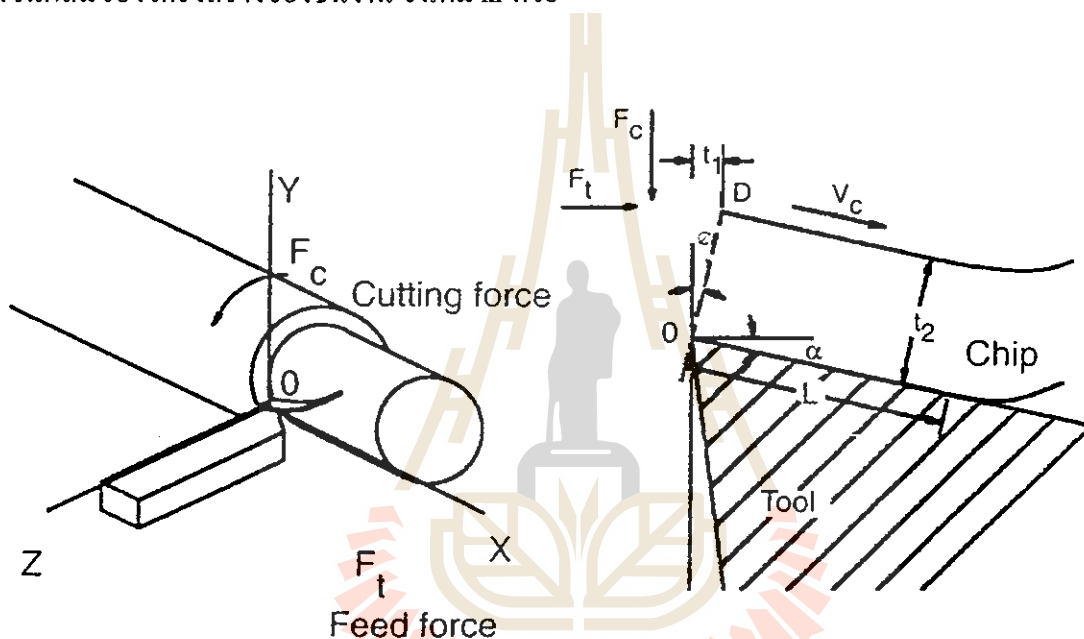


รูปที่ 5 BUE ใน 0.15% steel หลังกลึงด้วย cutting speed ต่ำ

แรงและความเค้นในการกลึง

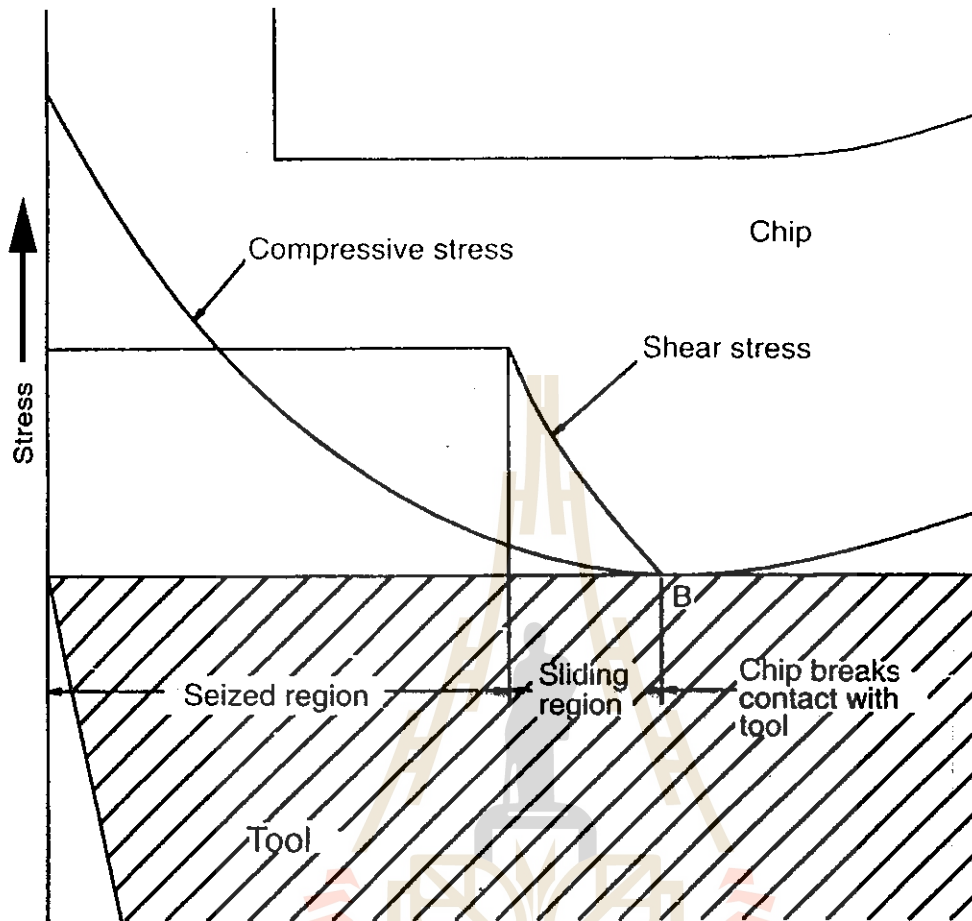
แรงตัด (cutting force,  $F_c$ ) เป็นแรงตั้งฉากกับคมมีดในทิศ  $yo$  บน rake face มีค่ามากที่สุดในการวัดแรงในแนวทั้งสามแกน กระทำในทิศตั้งฉากกับ cutting velocity แรงนี้แปรตาม tool angle แรงในทิศ  $ox$  และขนานกับทิศทางการป้อนมีดเรียก feed force,  $F_t$  แรงนี้สัมพันธ์กับ  $F_c$  ส่วนแรงในทิศ  $oz$  เป็นแรงที่ผลักมีดกลึงไปจากชิ้นงาน กระทำไปตามรัศมีของแท่งชิ้นงาน เป็นแรงที่มีค่าน้อยที่สุด ชิ้นงานถูกตัดเคลื่อนเป็นชิ้นบาง ๆ และถูกนำออกไปเป็นเศษกลึงด้วยแรง  $F_s$  เพียง 20-30 หรือ 100 กก.  $F_s$  เป็นแรงกระทำบน shear plane แต่ shear plane,  $A_s$  มีขนาดเล็ก stress จึงมีค่าสูงสุด (รูปที่ 6)  $A_s$  เกี่ยวข้องกับความหนาของเศษกลึงที่ยังไม่ deformed,  $t_1$  และความกว้างของเศษกลึง  $w$  (depth of cut) และ shear plane,  $\phi$   $A_s = t_1 w \sin \phi$   $F_s$  จึงเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรง

กับการเพิ่มของ  $t_1$  และ  $w$  ซึ่งควบคุมได้โดยตรงโดยผู้ปฏิบัติการ ส่วนมุม  $\phi$  ควบคุมไม่ได้โดยตรง ค่านี้แปรผันอย่างมากภายใต้ cutting condition แรง  $F_t$  บน rake face วิกฤต drag force ที่กระทำโดยเศษกลึงบน rake face  $F_r$  เป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของเศษกลึง แรงที่ทำให้เศษกลึงเคลื่อนไปบน rake face ก็คือเป็นแรงที่ตัดเฉือนใน flow zone,  $F_r$  ความกว้างของพื้นที่ที่เกิด seizure,  $A_r$  มีความกว้างเท่ากับ depth of cut,  $w$  ความยาวของแนวสัมผัสระหว่างเศษกลึงกับ rake face,  $L$  มากกว่า  $t_1$  เสมอ  $L$  จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดและมีอิทธิพลมากต่อ cutting force อายุของเครื่องมือและ machinability  $L$  คำนวณจาก  $A_r$ ,  $k_r$  ค่า  $k_r$  ต่ำกว่า  $k_s$  เสมอและลดตาม cutting speed  $F_t$  เพิ่มตาม ส่วนผสมของโครงสร้างของชิ้นงาน จึงเพิ่ม  $k_r$  ด้วย



รูปที่ 6 แรงกระทำบนมีดกลึง

ความเค้นบนมีดกลึงใกล้ ๆ กับคมมีดเกิดเฉพาะแห่ง (localized) ความเค้นที่สำคัญคือ 1) compressive stress บนพื้นที่สัมผัสของมีดกลึง ค่านี้เกี่ยวข้องกับ shear strength ของชิ้นงาน และหาได้จาก  $F_c$ /พื้นที่สัมผัส และ 2) Feed force,  $F_t$  ที่ทำให้เกิด shearing stress บนพื้นที่สัมผัสบน rake face มีค่ากับ  $F_t$ /พื้นที่สัมผัส  $F_t$  มีค่าน้อยกว่า  $F_c$  shear stress จึงต่ำกว่า compressive stress ที่กระทำบนพื้นที่เดียวกัน การกระจายของ compressive stress,  $\sigma_c$  ลดจากค่าสูงสุดที่คมมีดจนเป็นศูนย์เมื่อเศษกลึงพ้นจากผิวสัมผัส ส่วน shear stress มีค่าสูงสุดที่ต่ำกว่าและกระจายอย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 การกระจายของความเค้นบนมีดกลึง

### ความร้อนที่เกิดขึ้นในการกลึง

พลังงานที่ใช้ในการกลึงส่วนใหญ่เปลี่ยนเป็นความร้อนที่บริเวณใกล้ๆ กับคมมีด ซึ่งเป็นข้อจำกัดต่อ cutting speed และ feed rate ค่าที่สูงจะทำให้อายุของเครื่องมือสั้นลง

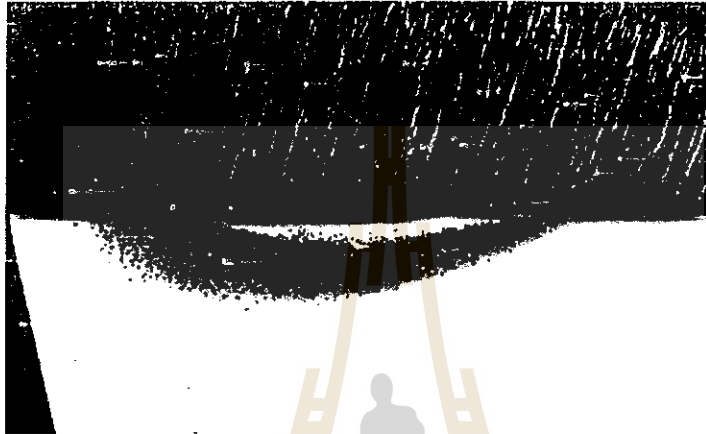
Work done ใช้ไปในการ deform ชิ้นงานเพื่อให้เกิดเศษกลึงและทำให้เศษกลึงเคลื่อนที่ งานดังกล่าวทำให้เกิด plastic strain จำนวนมาก จึงเหลือเพียง 1% ที่เก็บสะสมไว้ในรูปของ elastic energy ที่เหลืออีก 99% ใช้ในการให้ความร้อนแก่เศษกลึง มีดกลึงและชิ้นงาน ความร้อนที่เกิดขึ้นบน shear plane ส่วนใหญ่ผ่านเข้าไปในเศษกลึง ส่วนหนึ่งถูกถ่ายโอนเข้าไปในชิ้นงาน โดยการนำความร้อน อุณหภูมิของเศษกลึงมีผลต่อการทำงานของมีดกลึงตรงไปที่เศษกลึงยังสัมผัสกับมีดกลึง ความร้อนที่ยังคงอยู่ในเศษกลึงหลังจากที่พื้นผิวมีดจะถูกนำออกไปด้วย เศษกลึง

เมื่อผ่าน shear zone จะถูกทำให้ร้อนขึ้น และเมื่อเคลื่อนไปบน rake face จะไม่ถูก deformed หรือถูก heated ต่อไป เวลาเศษกลิ้งเคลื่อนไปบนพื้นผิวสัมผัสนั้นสั้นมาก ความร้อนจึงสูญเสียไปจากเศษกลิ้งได้น้อยมาก โดยการแผ่รังสีหรือโดยการพาความร้อนสู่อากาศหรือโดยการนำความร้อนเข้าไปในชิ้นงาน ส่วนของชิ้นงานที่ถูกกลิ้งไปแล้วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนใน deformed layer ถูกถ่ายโอนกลับเข้าไปในชิ้นงาน แต่ก็ไม่มาก ดังนั้นความร้อนที่ได้จาก work done บน shear plane ที่ก่อให้เกิดเศษกลิ้งส่วนใหญ่จะยังคงอยู่ในเศษกลิ้งและถูกพาออกไปกับเศษกลิ้ง

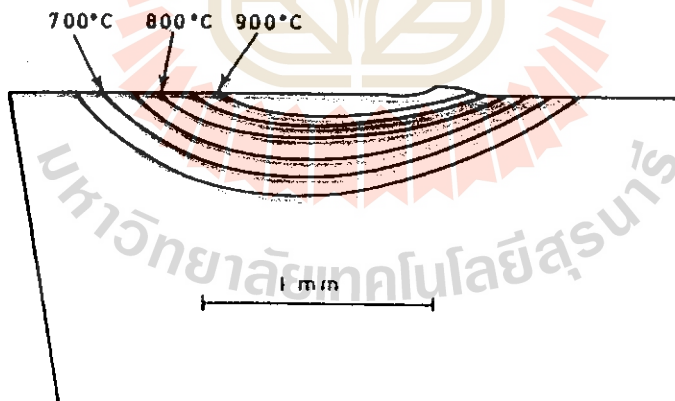
Strain ใน flow zone เป็นต้นกำเนิดหลักของความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของเศษกลิ้งสูงขึ้น flow zone ได้รับความเค้นขณะที่เศษกลิ้งเคลื่อนไปบนผิวสัมผัส ความเครียดบน flow zone มีค่ามากกว่าบน shear plane มาก ด้านล่างของ flow zone ยังคงยึดติดกับผิวของมีดกลิ้งจึงถูก strained ต่อไป ปริมาณความเครียดใน flow zone จึงมีมาก ซึ่งจะเห็นได้จาก inclusion, grain boundary จะหายไปใน flow zone หรือไม่ถูกลากไปเกือบขนานกับผิวมีดกลิ้ง compressive stress ช่วยยับยั้งการเกิด crack และเมื่อความเค้นดังกล่าวลดลงขณะที่เศษกลิ้งเคลื่อนออกจากคมมีดก็จะเกิด crack เศษกลิ้งจะ แยกตัวออกจากมีดกลิ้งโดย fracture เนื้อโลหะใน flow zone ถูก strained อย่างต่อเนื่องขณะที่เคลื่อนออกจากคมมีด จึงถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องผ่านไปบนผิวสัมผัส ยิ่งห่างจากคมมีดอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น ซึ่งผิดกับเศษกลิ้งซึ่งถูกทำให้ร้อนขึ้นเมื่ออยู่บน shear plane เท่านั้น เมื่อผ่าน ไปบนพื้นที่สัมผัสจะไม่ร้อนขึ้นอีกต่อไป เนื้อโลหะใน flow zone มีอุณหภูมิสูงขึ้นขณะที่เคลื่อนจากคมมีด อุณหภูมิที่เพิ่มตามปริมาณ work done และปริมาณเนื้อ โลหะที่ผ่าน flow zone อุณหภูมิของ flow zone จึงสูงกว่าตัวเศษกลิ้ง โดยเฉพาะที่ cutting speed สูงๆ

พื้นที่สัมผัสระหว่างเศษกลิ้งและมีดกลิ้งเป็นชั้นบาง ๆ แต่มีขนาดใหญ่ ความร้อนที่เกิดใน flow zone จึงสูงกว่าในตัวมีด และจะลดลงเมื่อสูญเสียความร้อนเข้าไปในเศษกลิ้ง เมื่อเศษกลิ้งเคลื่อนพ้นจากผิวมีดกลิ้ง flow zone ถูกพาออกไปได้ผิวเศษกลิ้งจะเย็นลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิของตัวเศษกลิ้ง ซึ่งจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากปริมาตรของตัวเศษกลิ้งใหญ่มาก ส่วนการสูญเสียความร้อนจาก flow zone เข้าไปในมีดกลิ้งโดยการนำความร้อนนั้นแตกต่างไปจากการนำความร้อนที่ interface ระหว่าง flow zone กับตัวเศษกลิ้ง ที่ interface มี metallic bonding มีดกลิ้งจึงมีอุณหภูมิเดียวกับ flow zone เนื่องจากมี heat flow อย่างต่อเนื่อง มีดกลิ้งจึงเป็น heat sink และมีอุณหภูมิภายในที่แตกต่างกัน (temperature gradient) ความร้อนทำให้ความแข็งและโครงสร้างของมีดกลิ้งเปลี่ยนแปลง ถ้าเป็น HSS ที่ผ่านการชุบแข็งที่เหมาะสม ความแข็งจะไม่ลดลงมากจนถึง  $600^{\circ}\text{C}$  ระหว่าง  $600^{\circ}\text{C}$  -  $850^{\circ}\text{C}$  ความแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วมาก และจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้ เมื่อนำมีดกลิ้งที่ผ่านการใช้งานแล้วมาตัดผ่านคมมีด แล้วขัดเตรียมผิว rake face และ etched และวัดความแข็งตลอดบริเวณที่ได้รับความร้อน (heat affected zone, HAZ) บนมีดกลิ้ง

บริเวณที่ต่ำกว่าแสดงถึงอุณหภูมิที่สูงกว่า  $650^{\circ}\text{C}$  ตรงกลางของ HAZ ซึ่งสว่างกว่ามีอุณหภูมิสูงกว่า  $900^{\circ}\text{C}$  (รูปที่ 8) Flow zone เป็น heat source ความร้อนจะไหลจากจุดที่ร้อนบนมีดกลึงซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า flow zone เล็กน้อย ไปยังคมมีดที่ถูกทำให้เย็นโดยการ feed ชิ้นงานเข้ามาอย่างต่อเนื่อง ความร้อนจึงไหลกลับไปยังคมมีด ทำให้อุณหภูมิของคมมีดเพิ่มขึ้น มีดกลึงจึงเป็น heat sink สำหรับความร้อนที่ถูกนำออกจาก flow zone



a) บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น (HAZ)



b) เส้นแสดงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคใน a)

รูปที่ 8 มีดกลึงที่ใช้กลึง low-C steel ด้วย cutting speed สูง หลัง etched ด้วย nital

## บทที่ 2

### ผลงานที่เกี่ยวข้อง

การทำงานของมีดกลึง (performance) ไม่ว่าจะเป็น rate of metal removal อายุใช้งาน (tool life) และผิวชิ้นงานหลังกลึง (surface roughness) เกี่ยวข้องกับ cutting condition ซึ่งต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของมีดกลึง รูปทรงเรขาคณิตของมีดกลึง และชนิดของชิ้นงานที่จะกลึง การศึกษาการกระจายของ stress และอุณหภูมิที่ interface ระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงาน ตลอดจนโครงสร้างจุลภาคของมีดกลึงหลังใช้งาน (worn tool) ช่วยให้เข้าใจถึงกลไกการสึกหรอ (wear mechanism) ซึ่งมีรูปแบบที่แตกต่างไปจาก sliding mechanism เนื่องจากบริเวณ interface มีการยึดกัน (seizure) ระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงานที่มีคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์และเชิงกลและส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน การเคลือบผิวมีดกลึงด้วยวัสดุที่แข็งและเสถียรทางเคมีช่วยยืดอายุใช้งานของมีดกลึงและช่วยเพิ่ม machinability แก่ชิ้นงานด้วย

ปัจจุบันการเคลือบผิว (coating) ใช้กันอย่างกว้างขวางในการควบคุมเรื่อง friction และการสึกหรอในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่มีระบบที่มี sliding contacts สำหรับเหล็กกล้ามีการเคลือบด้วย MoS<sub>2</sub> และ diamond จะช่วยลดการสึกหรอได้หลายเท่าเมื่อเทียบกับผิวที่ไม่เคลือบ (uncoated) Holmberg (1) ได้เสนอแนวคิดของ friction mechanism ของ coated surface และจำแนกกลไกนี้ไว้กว้าง ๆ ว่าเป็น macro และ micromechanical, tribochemical และ material transfer mechanism การเลือกวัสดุเคลือบและ tribological coating parameter เช่นความหนาของผิวเคลือบ ความแข็ง ความหยาบของผิวเคลือบ และความเข้าใจว่าผิวที่ถูกเคลือบเป็นอย่างไรใน sliding contacts จะเป็นประโยชน์มากในการออกแบบชิ้นส่วนและเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัด (cutting tool) ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ cemented carbides ที่เคลือบผิวด้วย CVD-TiC และ High speed steel, HSS ที่เคลือบผิวด้วย PVD-TiN การเคลือบผิวด้วยวัสดุที่แข็งและเสถียรทางเคมี เช่น TiC, TiN ช่วยยืดอายุใช้งานของมีดกลึงได้มาก Hadenqvist และ Olsson (2) ได้ทดสอบการสึกหรอแบบ sliding wear ของ coated TiN บน HSS โดยชุดทดสอบ pin-on-ring test โดยจำลอง machining condition และหา wear mechanism โดยการตรวจดูโครงสร้างด้วยกล้อง optical และ electron microscope พบว่ากระบวนการสึกหรอเกี่ยวข้องทั้ง mechanical และ chemical interaction ระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงาน การสึกหรอควบคุมโดย cutting force, cutting speed และส่วนผสมทางเคมีของมีดกลึงและชิ้นงาน ผิวเคลือบมีการสึกหรอแบบ adhesive และตัวมีดกลึงสึกหรอแบบ cracking และ plucking ของเศษ TiN ร่วมกับ adhesive wear ของ HSS

การยึดกันระหว่างผิวเคลือบ (coating) กับมีดกลึง (substrate) ที่เรียกว่า adhesion มีความสำคัญมากที่สุด ถ้า adhesion ไม่เพียงพอ มีดกลึงจะชำรุดก่อนเวลาอันควร เนื่องจากผิวเคลือบแยกตัวจากมีดกลึงได้ง่าย จึงต้องมีการทดสอบ adhesion test ที่ใช้ทั่วไปคือ Scratch-adhesion test ต่อมามีการใช้การทดสอบที่เรียกว่า Particle erosion test ซึ่ง sensitive กว่าแทน Hedenqvist และ Olsson (3) ได้ศึกษา erosion ของ TiN-coated HSS โดยใช้ชุดทดสอบ centrifugal erosion adhesion test โดยใช้อนุภาคที่แข็งของ  $Al_2O_3$  เป็น erodant เพื่อศึกษา coating failure mechanism พบว่า coating จะชำรุดด้วย fatigue wear ร่วมกับ coating erosion หรือ erosive fatigue wear และ spalling cutting tool ที่ทำด้วย HSS ที่ใช้กันทั่วไปมีทั้งที่ผลิตโดยวิธีแปรรูปจากแท่งโลหะ (cast & wrought) กับที่ผลิตโดยเทคโนโลยี Powder Metallurgy ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนอย่างเหมาะสมคือ quenched และ tempered ที่  $500^{\circ} - 560^{\circ}C$  มีโครงสร้างที่แข็งแรงของ Martensite และคาร์ไบด์ขนาดเล็กละเอียดที่เกิดจากกระบวนการ precipitation hardening กระจายไปทั่ว matrix ถ้าเป็น HSS ที่ผลิตโดย P/M จะไม่มีแถบของคาร์ไบด์ (banding) หรือการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของ alloying (segregation) เหมือนดังที่พบใน cast & wrought HSS มีความแข็งแรงมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิใช้งาน อีกทั้งมีความเหนียวดี (good toughness) และทนต่อการสึกหรอ (wear resistance) Wright & Trent (4) ได้ศึกษาการกระจายของอุณหภูมิที่ interface ระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงาน โดยการตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของมีดกลึงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (worn tool) โดยการตัดขัดและกัดผิวด้วย nital พบว่า โครงสร้างที่ถูก etched มีสีกัลล์แผ่ขยายเป็นรูปโค้ง (arc) จากคมมีด ลึกลงไปได้ rake face ซึ่งแสดงถึงมีการเปลี่ยนโครงสร้างขณะใช้งาน บริเวณสีกัลล์มีอุณหภูมิสูงกว่า secondary hardening temperature ตรงกลางของ arc มีสีอ่อนแสดงถึงอุณหภูมิก่อนเกิดอุณหภูมิวิกฤตต่ำ (lower critical temperature) เกิดเป็น martensite เมื่อเย็นลงถึงอุณหภูมิจึงเมื่อหยุดกลึง การศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงนำไปสู่การประมาณการกระจายของอุณหภูมิที่ interface ได้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการทดลอง

การเคลือบผิวมีดกลึง HSS ด้วยชั้นบางแต่แข็งและทนความร้อนและเสถียรทางเคมีของ PVD-TiN, TiCN, TiAlN ช่วยปรับปรุงการทำงานของมีดกลึงให้ดีขึ้น อายุการใช้งานนานขึ้นและผิวกลึงก็ดีขึ้นด้วย อุณหภูมิที่สูงขึ้นที่รอยต่อ (interface) ระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงานเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้มีดกลึงสึกหรอใช้การไม่ได้ การสึกหรอจะคล้ายกันกับมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว อุณหภูมิที่สูงขึ้นขณะกลึงทำให้มีดกลึงอ่อนตัวและแยกตัวจากผิวเคลือบ การเคลือบผิวช่วยลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยเปลี่ยน contact condition จึงช่วยลดการสึกหรอของมีดกลึงได้ทางหนึ่ง

การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่การศึกษาการกระจายของอุณหภูมิที่ interface ของมีดกลึงที่ทำด้วย HSS-PM-M42 ที่เคลือบผิวด้วย PVD-TiN, TiCN, TiAlN และที่ไม่เคลือบผิว (uncoated) ในการกลึง (turning) ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1045 ที่ cutting condition ต่าง ๆ โดยไม่ใช้สารหล่อเย็น แล้วนำมีดกลึงหลังใช้งานมาตัดผ่านคมมีด ขัดและกัดผิวด้วยสารละลายกรด แล้วตรวจดูโครงสร้างของผิวที่สึกหรอด้วยกล้อง optical และ electron microscope เพื่อศึกษาการสึกหรอแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และวัดความแข็งด้วยเครื่อง microhardness tester แล้วประมาณค่าอุณหภูมิที่กระจายไปตามผิวที่สึกหรอจากข้อมูล โครงสร้างและความแข็งที่ศึกษาไว้แล้ว และวัดพารามิเตอร์ของการสึกหรอ แบบ crater wear ที่พบเสมอในงานกลึง (turning)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองโดยการกลึง (turning) ด้วยเครื่องกลึงยี่ห้อ SN32 ผลิตใน Slovakia และใช้มีดกลึงชนิด insert ที่ทำด้วย HSS ที่ผลิตโดยเทคโนโลยี Powder Metallurgy (PM-HSS) ที่ผ่านการชุบแข็งและเคลือบผิวด้วย CVD-TiN เป็นผลิตภัณฑ์จากประเทศออสเตรีย ทำการกลึง ชิ้นงานที่เป็นเหล็กเหนียวเกรด AISI 1045 ที่ซื้อจากร้านค้าในจังหวัดนครราชสีมา (รูปที่ 9)





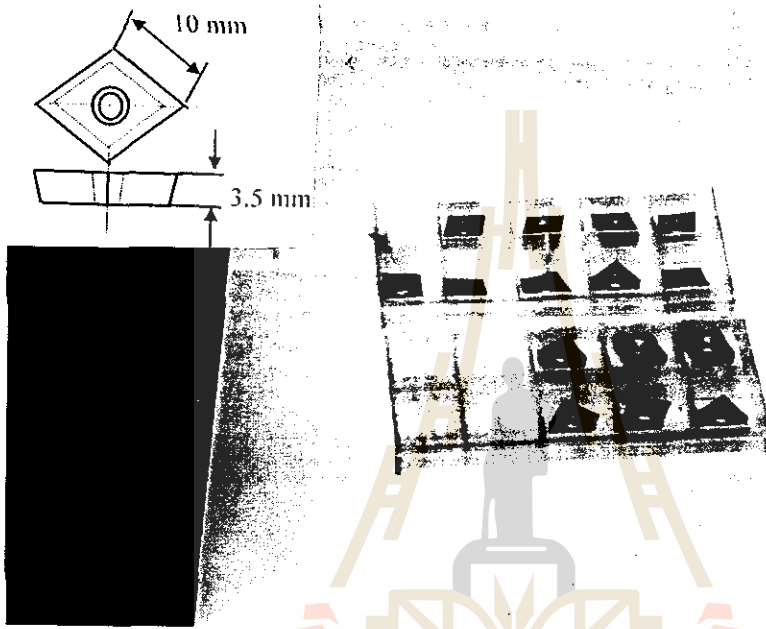
รูปที่ 9 เครื่องกลึงขณะทำงาน

### 3.1 วัสดุที่ใช้

มีดกลึง (cutting tools) เป็นเหล็ก PM-HSS ที่มีส่วนผสมเทียบเท่าเหล็ก HSS-M41 ดังแสดงในตารางที่ 1 และมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 10 จำนวน 10 อัน ผ่านการเจียรราบ (grinding) เพื่อกำจัดผิวเคลือบ CVD-TiN บน rake face ออกหมดรวมทั้งร่องของ chip breakers ด้วย โดยเหล็กลึงเคลือบด้านข้าง (flank face) ไว้ แล้วนำมีดกลึงจำนวน 4 อันไปเคลือบผิวด้วย PVD-TiN, PVD-TiCN ด้วยเทคนิค Low-electron beam ที่ประเทศออสเตรเลีย อีก 6 ตัวอย่างส่งไปเคลือบผิว PVD-TiAlN ด้วยเทคนิค Cathode-Arc Plasma Deposition (CAPD) ที่บริษัท Royal Ace ที่จังหวัดสมุทรปราการ วัดความหนาของผิวเคลือบโดยตรงจากภาพถ่ายโครงสร้างของภาคตัดขวางด้วย SEM และวัดความแข็งของผิวเคลือบโดย Microhardness tester ด้วยน้ำหนักกด 0.100 kg (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของมีดคดิ่ง PM-HSS เทียบกับ M41

ตัวอย่าง	% โดยน้ำหนัก												
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Nb	Co	W
PM-HSS	1.02	0.34	0.25	0.015	0.024	0.5	4.35	4.61	0.10	1.86	<0.05	5.3	6.62
M41	1.10						4.25	3.75		3.0		5.0	6.75



รูปที่ 10 มีดคดิ่ง PM-HSS ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 ความหนาและความแข็งของผิวเคลือบ PVD

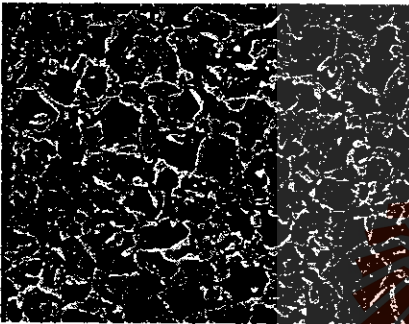
	ชนิดของผิวเคลือบ PVD			
	TiN	TiCN	TiAlN	Uncoated
ความหนา, ไมโครเมตร	2.5	2.5	1.0	0
ความแข็ง, HV <sub>0.100</sub>	1024	1414	1068	785

ชิ้นงาน (work piece) เป็นเหล็กแท่งกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มม. ยาว 600 มม. มีส่วนผสมที่วิเคราะห์โดย Spectrographic เทียบกับเหล็กเกรด AISI 1045 ดังตารางที่ 3 เมื่อตัดตัวอย่างตามขวางและตามยาว แล้วเตรียมผิวหน้าสำหรับตรวจดูโครงสร้าง (metallographic) ทั้งสองระนาบ

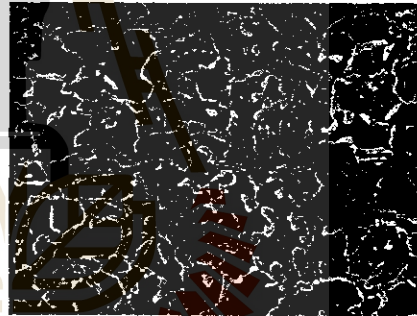
ด้วยกล้อง optical และ SEM จะเห็น Ferrite และ Pearlite (รูปที่ 11) และ sulphide inclusions ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ไมโครเมตร ที่ประกอบด้วย S, Ti, Mn, Fe และ Al เล็กน้อย ที่มีลักษณะยืดยาวไปตามแกนของแท่งเหล็ก แต่ไม่พบ silicate inclusions (รูปที่ 12 และ 13)

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเทียบกับ AISI 1045

ตัวอย่าง	% โดยน้ำหนัก									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu
ชิ้นงาน	0.455	0.036	0.696	0.015	0.026	0.154	0.172	0.023	0.022	0.147
AISI 1045	0.43-		0.6-	<0.04	<0.05					
	0.5		0.9							

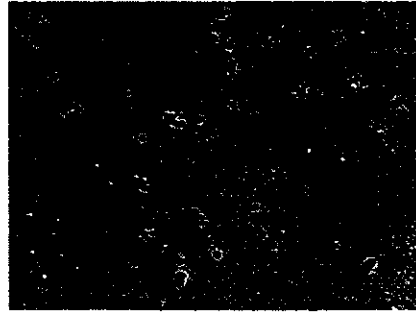


a) ภาคตัดขวาง

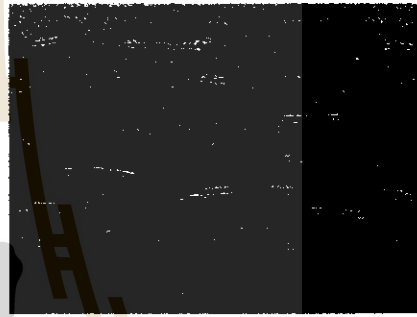
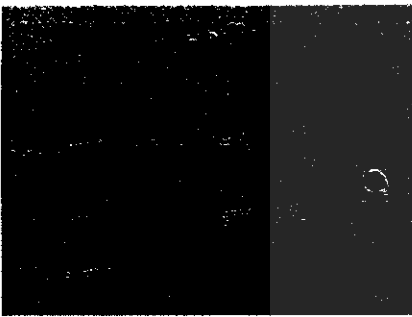


b) ภาคตัดตามยาว

รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 1045 steel ที่ etched ด้วย Nital 3% 5 วินาที จากกล้องจุลทรรศน์ optical



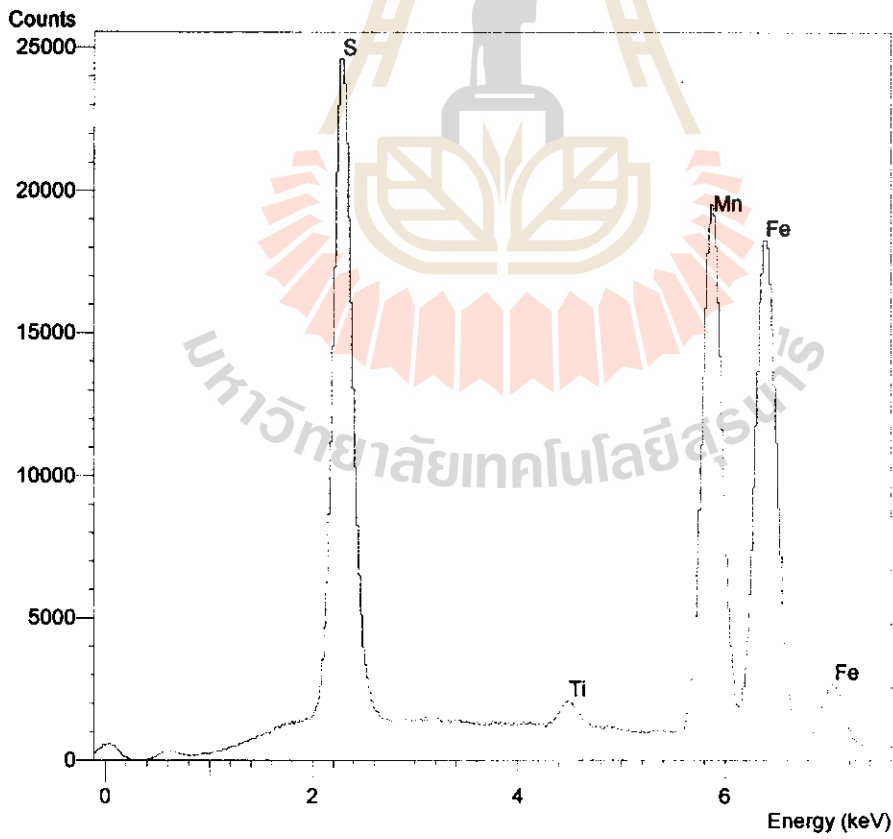
a) ภาคนตัดขวาง



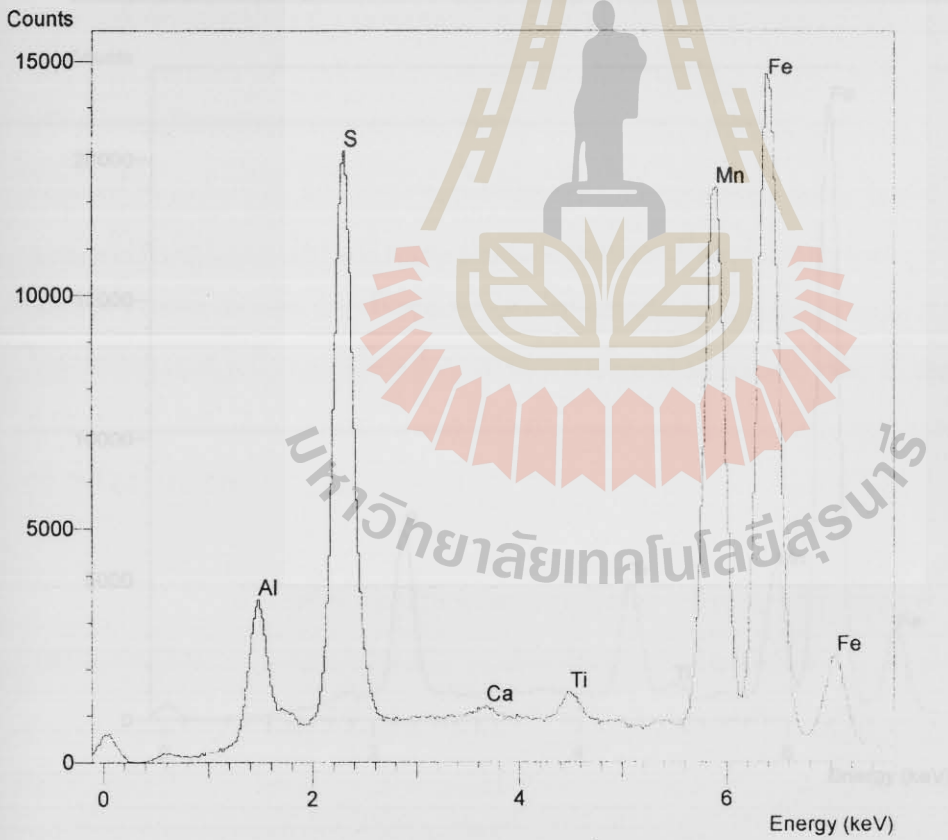
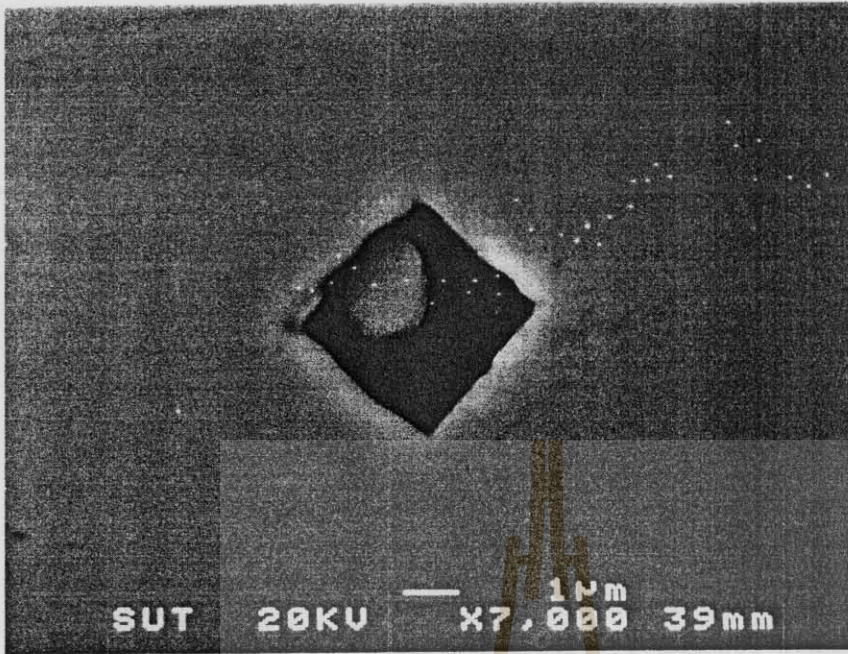
b) ภาคนตัดตามยาว

รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของ 1045 Steel จากกล้อง optical แสดง inclusion

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



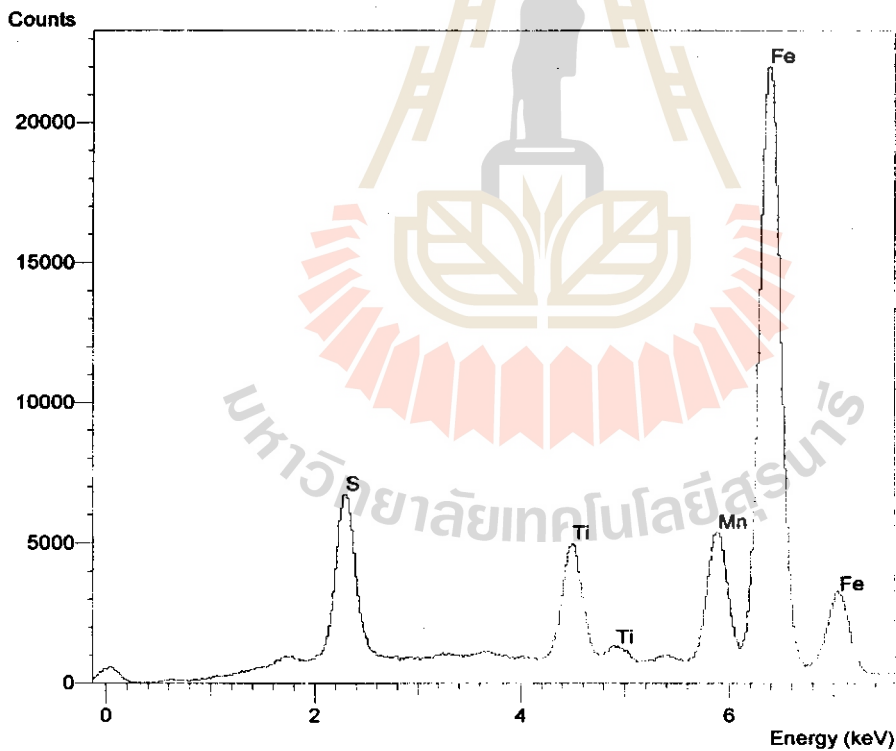
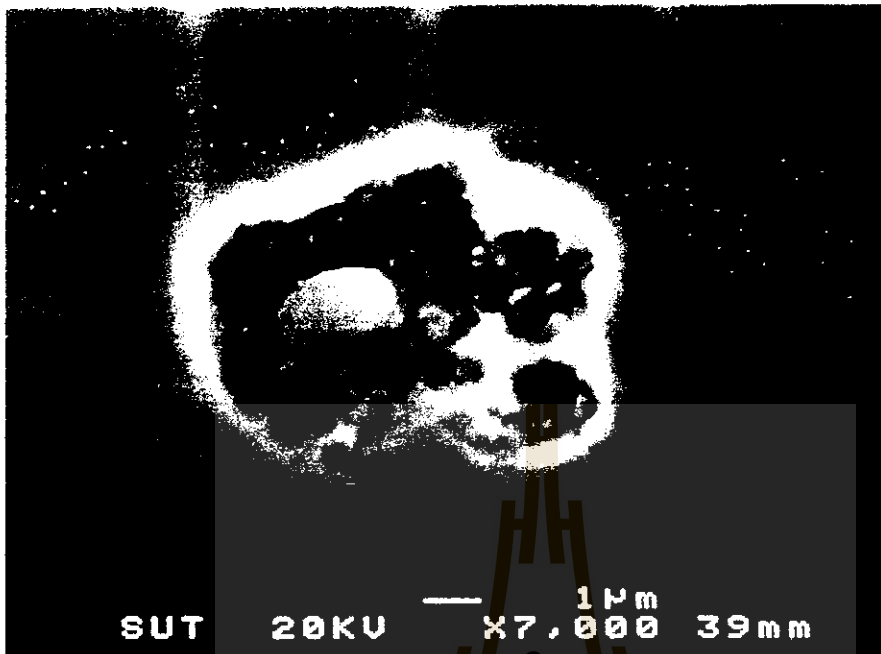
13 a) MnS inclusion



13 b) MnS inclusion ที่มี Al อยู่ด้วย และ Ti

รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของ 1045 Steel จากห้องปฏิบัติการ สวทช. แสดง inclusion แบบต่างๆ

และวิเคราะห์ด้วย EDS



13 c) Complex inclusion ที่มี Mn, S, และ Ti

รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของ 1045 Steel จากกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดง inclusion แบบต่างๆ และผลวิเคราะห์ด้วย EDS

### 3.2 การทดลอง

พารามิเตอร์ในการกลึง ซึ่ง ได้แก่ cutting speed,  $v$  ; feed rate,  $f$  ; depth of cut,  $t$  ; และ cutting time,  $T$  มีผลต่อการทำงาน (performance) อายุใช้งาน (tool life) และผิวกลึง (surface finish) อุณหภูมิที่สูงขึ้นและ stress ที่เกิดขึ้นขณะที่กลึงที่รอยต่อ (interface) ระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงาน เป็นสาเหตุของการสึกหรอ (wear) ของมีดกลึง ซึ่งทำให้มีดกลึงชำรุดใช้การไม่ได้ (fail) ในที่สุด

การทดลองจึงแบ่งเป็นสองชุดตาม cutting condition เพื่อศึกษาผลของการแปรเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิบนมีดกลึงและต่อการสึกหรอของมีดกลึง โดยชุดแรกเป็นการศึกษาผลของ feed rate และ cutting time เมื่อใช้มีดกลึงเคลือบผิวด้วย PVD-TiAlN (ตารางที่ 4) และชุดที่สองเป็นการศึกษา cutting speed เมื่อกลึงด้วยมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย PVD-TiN, TiCN และ TiAlN เมื่อเทียบกับมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว (ตารางที่ 5) การทดลองเป็นแบบ quick-stop test โดยไม่ใช้สารหล่อเย็นหรือหล่อลื่น (dry cutting)

หลังการทดลอง ชิ้นงานทุกชิ้นจะนำมาตัดตั้งฉากตรงจุดกึ่งกลางของคมมีด (cutting edge) แล้วนำไปอัดในเรซิน (cold mounting) แล้วขัดผิวด้วยผงกากเพชร (diamond paste) ขนาด 6 และ 1 ไมโครเมตร แล้วกัดผิวหน้า (etched) ด้วย nital 3% เป็นเวลานาน 30 วินาที แล้วตรวจดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ optical และ electron และวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณที่สึกหรอด้วย SEM/EDS แล้ววัดความแข็งด้วยเครื่อง microhardness tester โดยใช้ load 0.1000 กก. จากนั้นจึงนำข้อมูลของโครงสร้างจุลภาคและความแข็งมาเขียนเส้นระดับอุณหภูมิ (temperature profile) ของบริเวณ rake face ที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นขณะกลึง (heat affected zone, HAZ) โดยเทียบกับโครงสร้างจุลภาคที่เป็นผลจากการศึกษาการกระจายอุณหภูมิบนมีดกลึง โดยวิธี Metallography ของ P.W.Wright และ E.M.Trent (4) และวิเคราะห์ wear mechanism ที่ปรากฏบน rake face ของมีดกลึงหลังการทดลอง

ตารางที่ 4 อัตราป้อนและเวลากลึงต่าง ๆ สำหรับ PVD-TiAlN

cutting condition	cutting speed, $v$	feed rate, $f$	depth of cut, $t$	cutting time, $T$
	m/min	mm/rev	mm	min
1	53	0.16	1.25	0.5 ; 1.5
2	53	0.18	1.25	0.5 ; 1.5
3	53	0.22	1.25	0.5 ; 1.5
4	53	0.24	1.25	0.5 ; 1.5



**ตารางที่ 5 cutting speed ต่าง ๆ เมื่อใช้มีดกลึงที่เคลือบ PVD-TiN, TiCN, TiAlN และ uncoated**

cutting condition	cutting speed, v	feed rate, f	depth of cut, t	cutting time, T
	m/min	mm/rev	mm	min
1	53	0.22	1.25	0.5
2	66	0.22	1.25	0.5



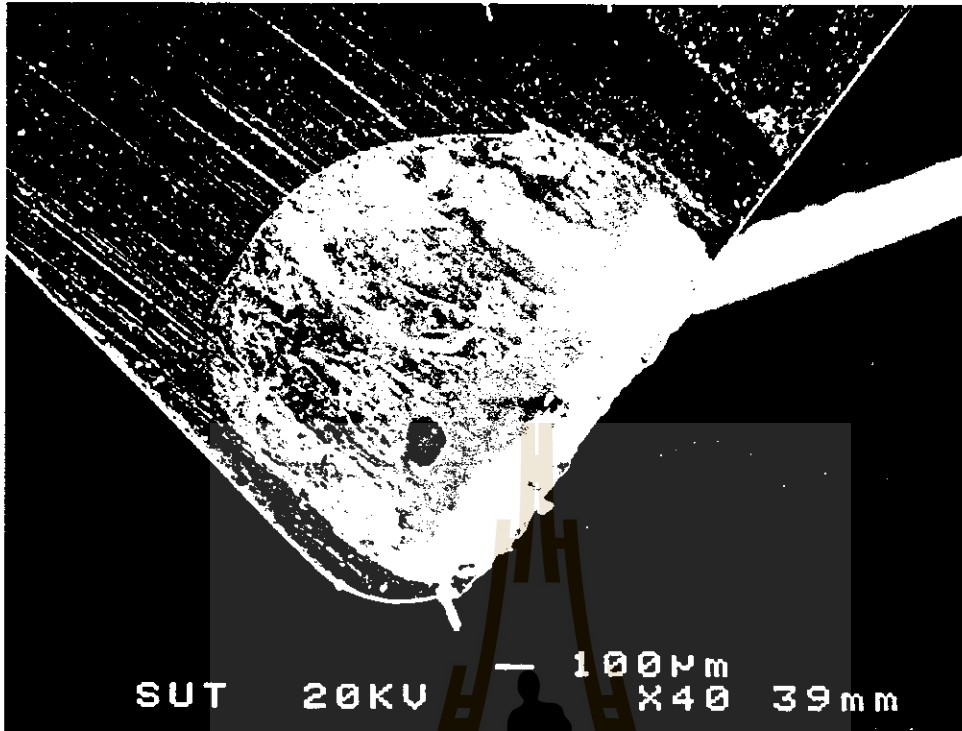
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

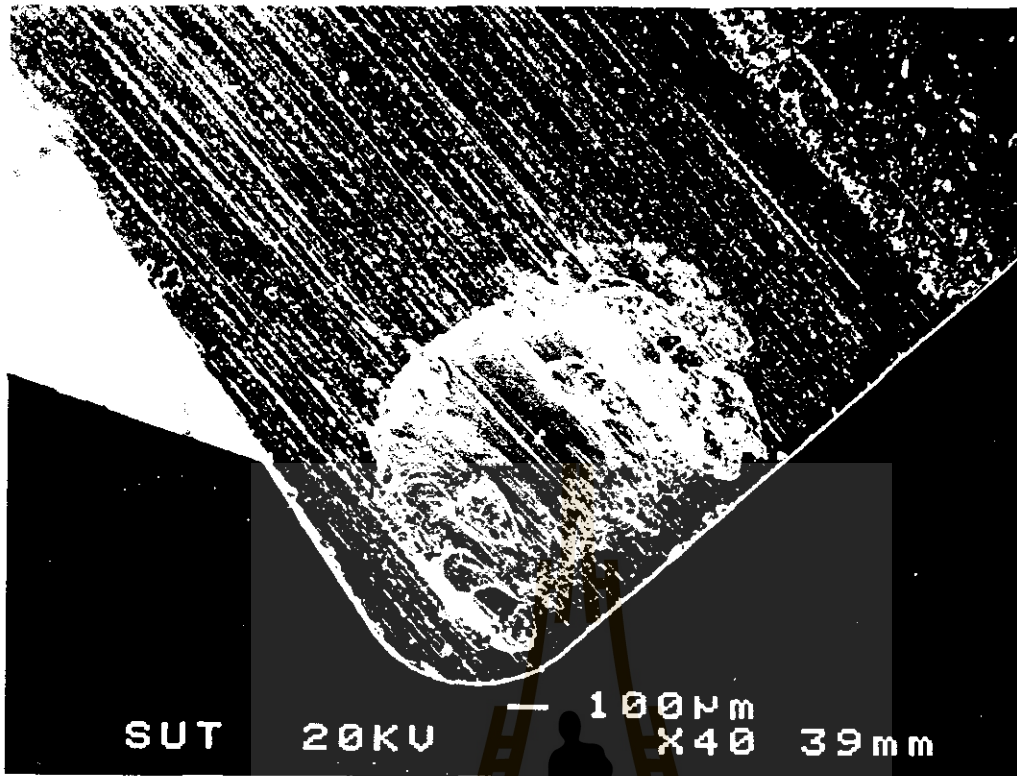
#### สภาพบริเวณผิวสัมผัสที่มีแรงเสียดทานระหว่างเศษกลึงกับ rake face

การทดลองชุดแรกเมื่อใช้มีดกลึงที่เคลือบด้วย PVD-TiAlN ทดลองกลึงที่ feed rate และ cutting speed ต่าง ๆ กัน เมื่อตรวจดูโครงสร้างด้วย SEM/EDS จะเห็นบริเวณสัมผัสระหว่างเศษกลึงกับ rake face แบ่งเป็นสองลักษณะคือ บริเวณที่มีและไม่มี Built-up edge (BUE) ใกล้กับขอบมีด (cutting edge) กับบริเวณที่มี sliding พร้อมกับการถ่ายโอนวัสดุ (material transfer) จากชิ้นงานมายังมีดกลึง ดังรูปที่ 14

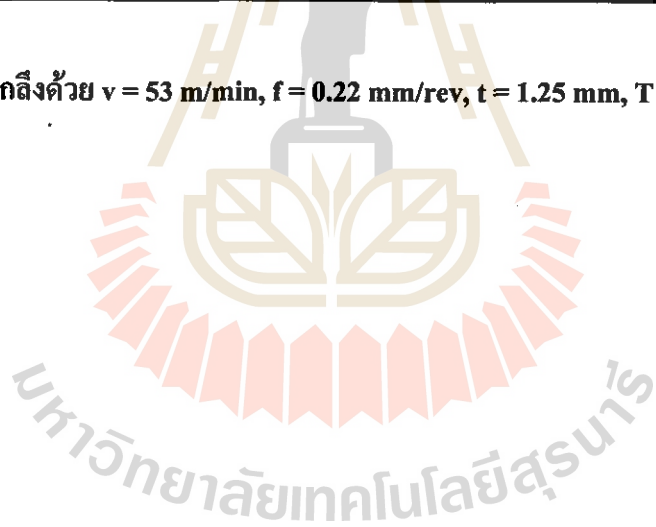
ที่ feed rate 0.16, 0.18 mm/rev ; cutting time 0.5, 1.5 min และ feed rate 0.22 mm/rev ; cutting time 1.5 min จะพบ BUE แต่เมื่อ feed rate เพิ่มขึ้นเป็น 0.24 mm/rev BUE ไม่เกิด ทุกตัวอย่างที่กลึงนาน 0.5 นาที จะเห็น crater wear บน rake face และ feed rate ที่สูงขึ้น crater wear จะมีขนาดใหญ่ขึ้น การศึกษาด้วย SEM แสดงว่ามีการถ่ายโอนของธาตุ Fe จากชิ้นงานไปยัง rake face โดยเฉพาะเมื่อกลึงด้วย feed rate 0.18 mm/rev ที่บริเวณด้านหลังของ crater wear จะเห็น peak ของ Fe, Si, S (รูปที่ 14c) แต่ใน feed rate 0.24 mm/rev จะเห็น Fe เพียงเล็กน้อยในบริเวณใกล้ๆ ขอบมีด (รูปที่ 14d)

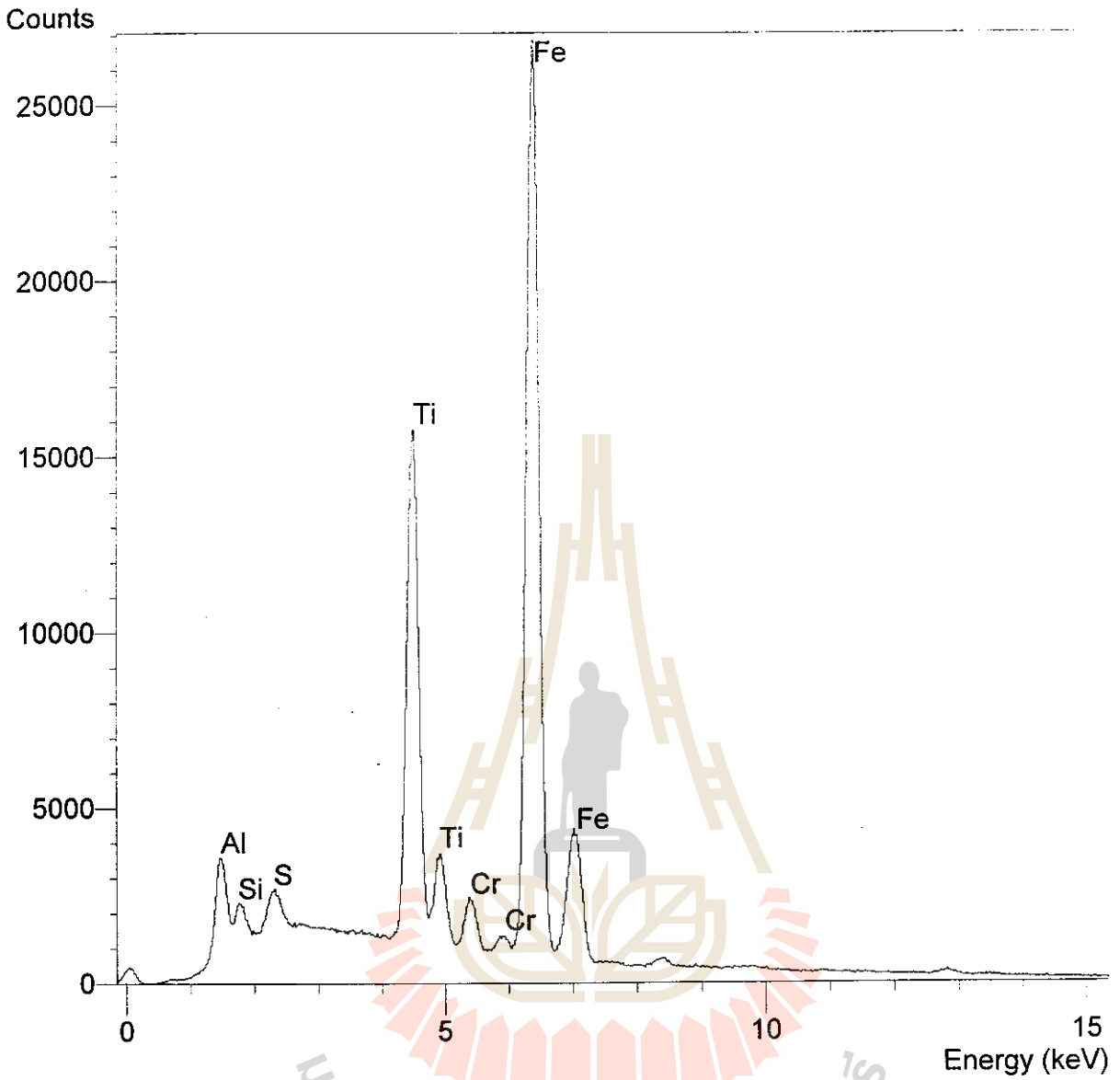


14 a) BUE เมื่อกัดด้วย  $v = 53 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.16 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 1.5 \text{ min}$



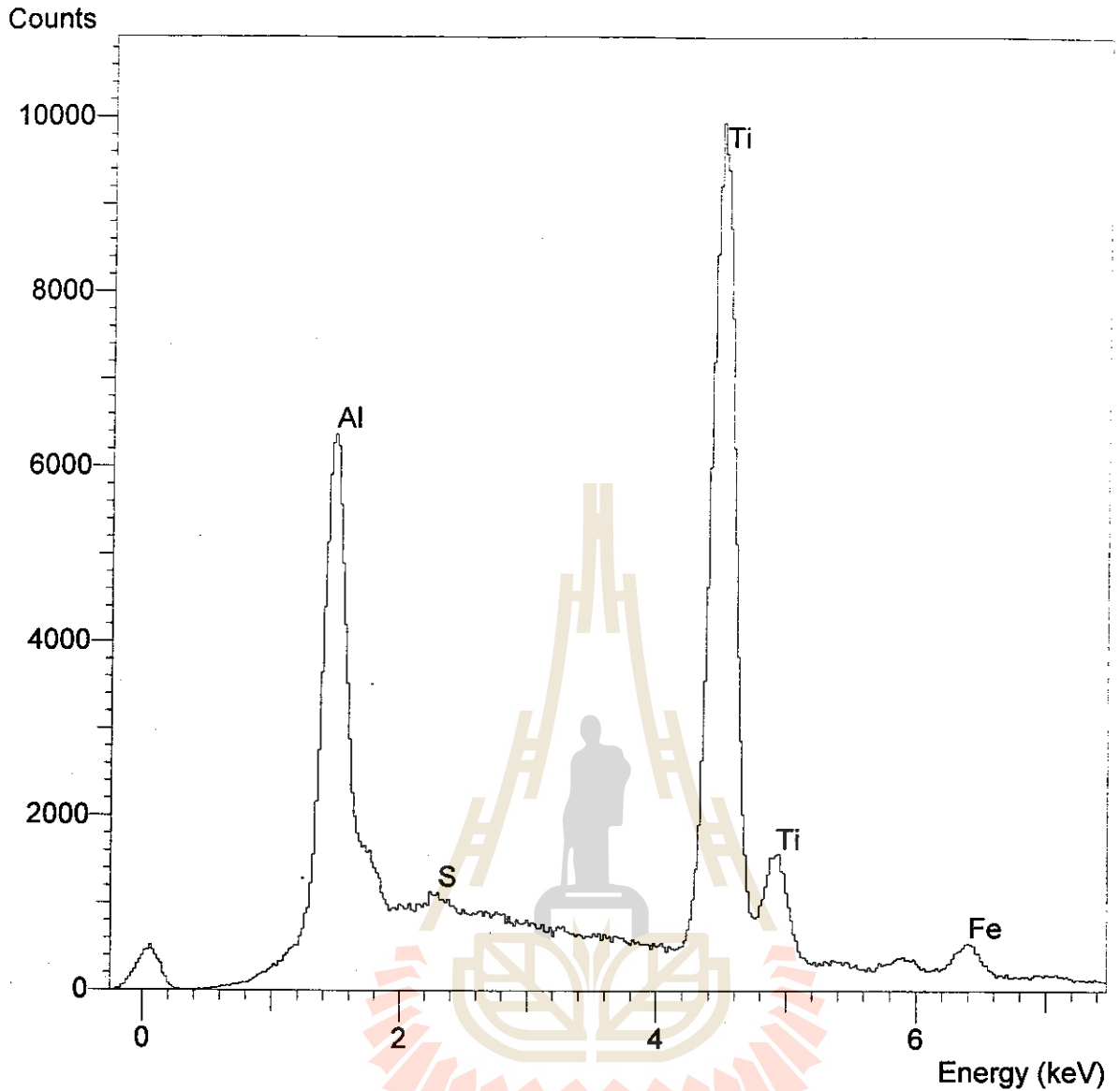
14 b) ไม่มี BUE เมื่อกลึงด้วย  $v = 53$  m/min,  $f = 0.22$  mm/rev,  $t = 1.25$  mm,  $T = 0.5$  min





14 c) SEM/EDSบริเวณด้านหลังของ crater wear แสดงการถ่ายโอนของ Fe, S, Si ที่

$v = 53 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.18 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 1.5 \text{ min}$

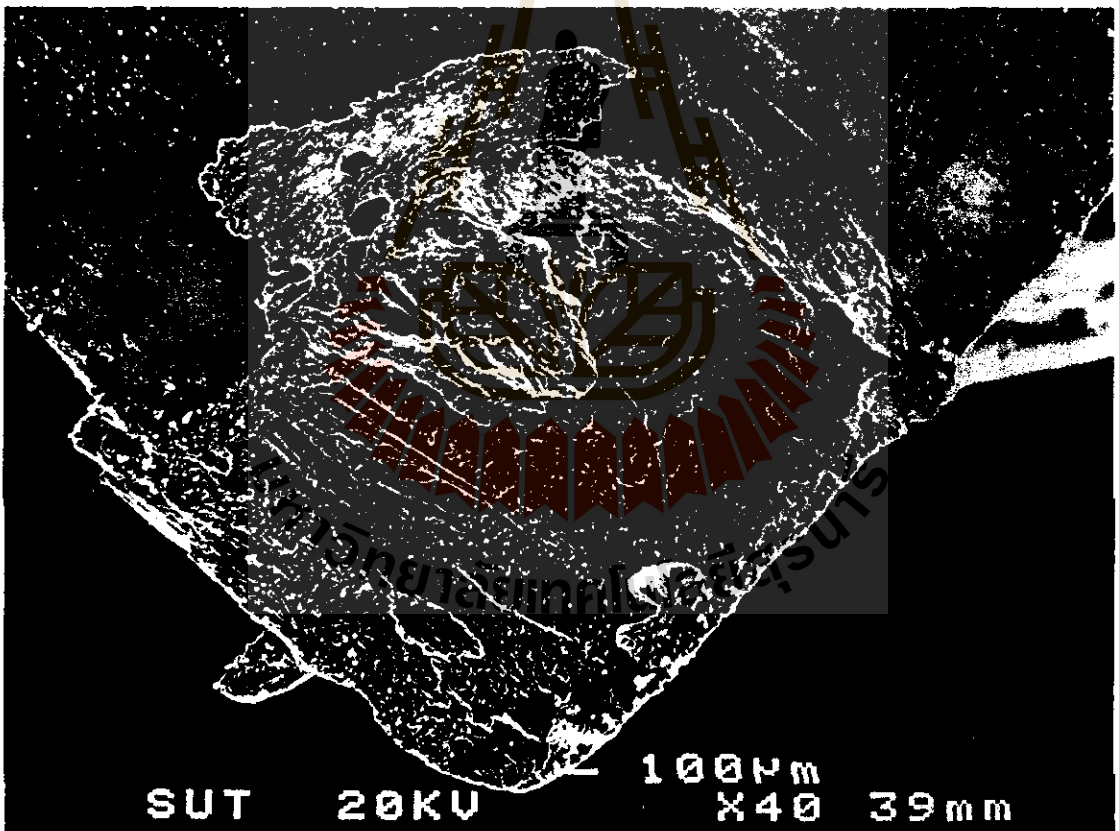


14 d) SEM/EDSบริเวณใกล้ ๆ คมมีด แสดงการถ่ายโอนของ Fe, S เพียงเล็กน้อย ที่

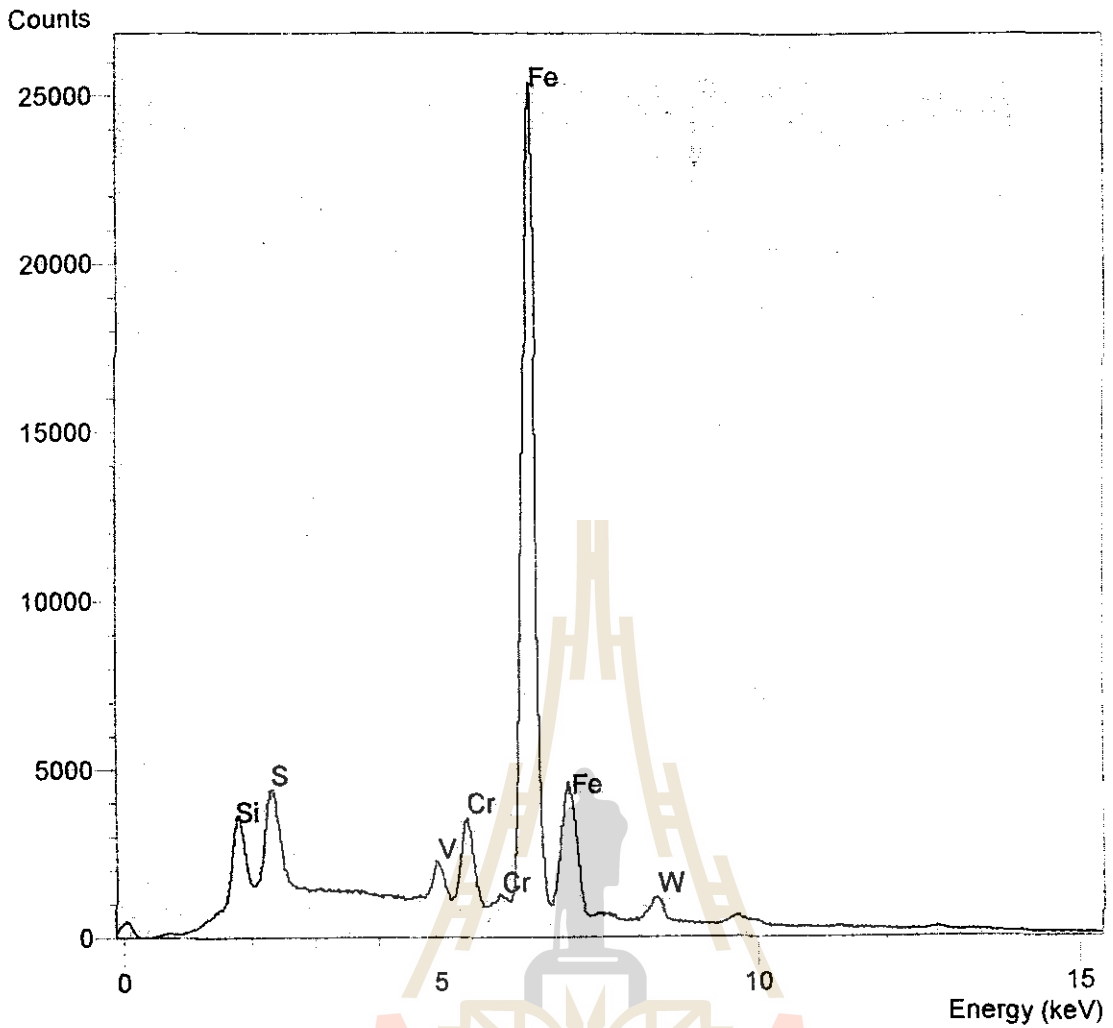
$v = 53 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.24 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 1.5 \text{ min}$

รูปที่ 14 rake face ของมีดคดถึงเคลือบผิวด้วย TiAlN จากกล้อง SEM

การทดลองชุดที่สอง เป็นการกลึงด้วยมีดกลึงเคลือบผิวและไม่เคลือบ พบ BUE ในมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว และบนมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiN ที่ cutting speed = 53 mm/min ในขณะที่บนมีดกลึงอื่น ๆ ไม่พบ BUE และไม่มี crater wear ที่ cutting speed นี้ ยกเว้นในมีดกลึงที่เคลือบด้วย TiCN ผลวิเคราะห์ด้วย SEM/EDS ของมีดกลึงไม่เคลือบผิว แสดงว่ามีการถ่ายโอนของธาตุ Si, S จากชิ้นงานไปยัง rake face ที่บริเวณด้านหลังของ crater wear ที่ cutting speed = 53 mm/rev และ ที่ cutting speed = 66 mm/rev (รูปที่ 15) การถ่ายโอนของ Si, S ยิ่งมากขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับมีดกลึงที่เคลือบผิวที่ cutting speed = 66 mm/rev จะไม่เห็นการถ่ายโอนของธาตุต่าง ๆ แต่ที่ cutting speed = 53m/min จะพบ Al ที่ใกล้กับ crater wear ของผิวเคลือบ TiN บนผิวเคลือบ TiCN จะมีชั้นที่มี Fe, Al อยู่มาก (deposited layer) ในบริเวณที่ห่างจากคมมีดไป 240 ไมโครเมตร แต่ชั้นที่มากาะผิวเคลือบใกล้คมมีดจะเห็นแต่ Fe, Ti (รูปที่ 16) เท่านั้น ใกล้ๆ คมมีดของมีดกลึงทุกชนิดมีการถ่ายโอนของวัสดุน้อยมาก



15 a) rake face ที่  $v = 66$  m/min,  $f = 0.22$  mm/rev,  $t = 1.25$  mm,  $T = 0.5$  min

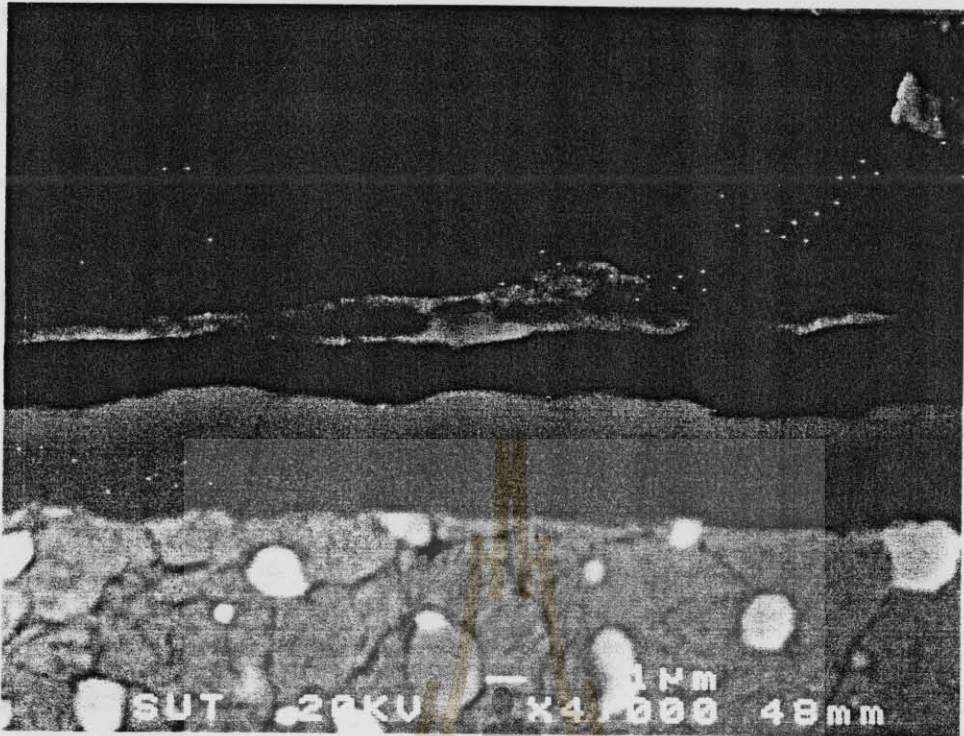


15 b) SEM/EDS ที่บริเวณด้านหลังของ crater wear แสดงการถ่ายโอนของ Si, S

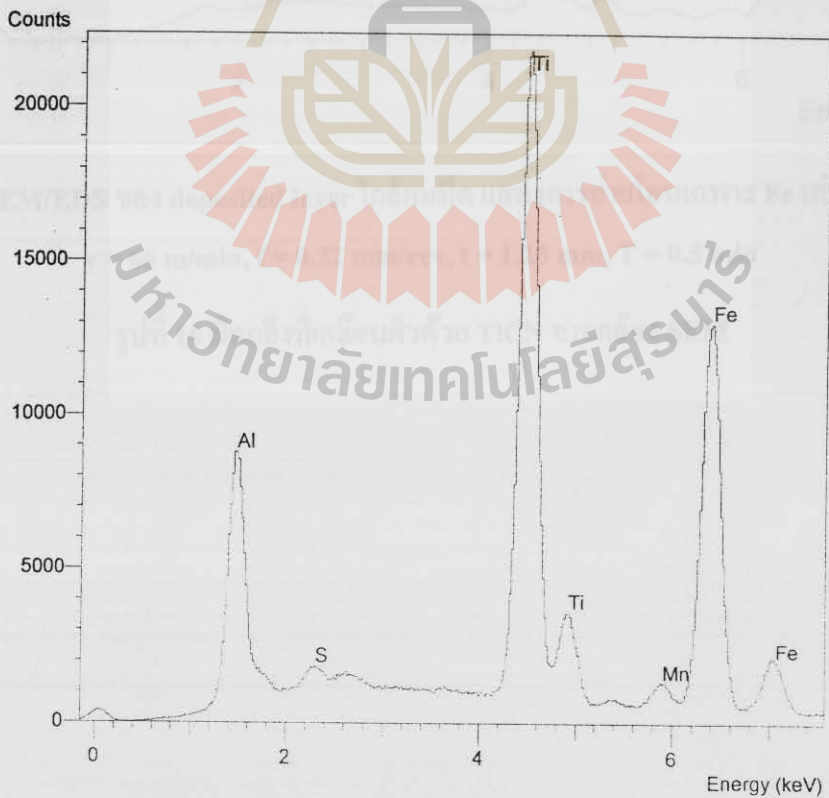
รูปที่ 15 มีดกลึง HSS ที่ไม่เคลือบผิวจากกล้อง SEM

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

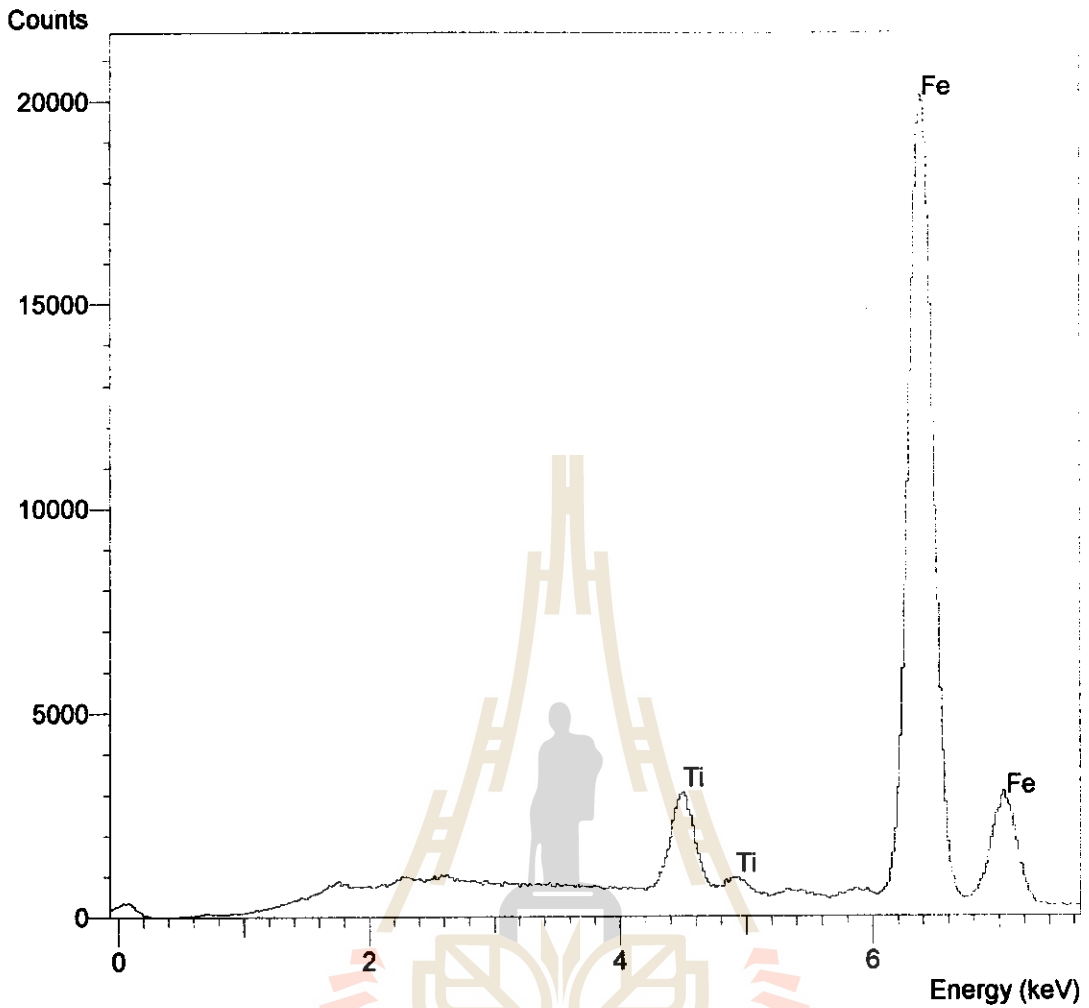




16 a) deposited (glassy) layer ที่  $v = 53$  m/min,  $f = 0.22$  mm/rev,  $t = 1.25$  mm,  $T = 0.5$  min



b) SEM/EDS แสดง Al, S, Mn, Fe ใน a)



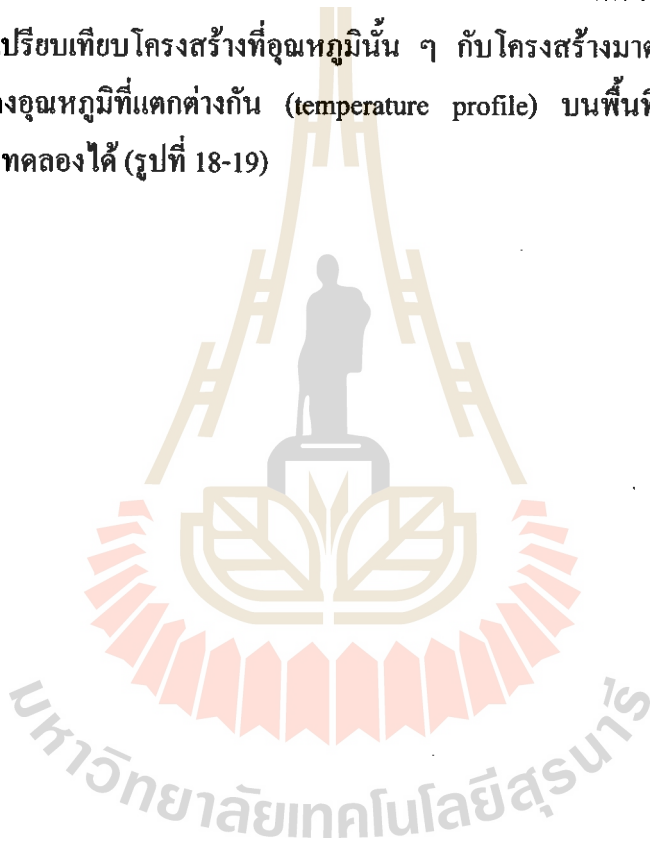
c) SEM/EDS ของ deposited layer ไกล้คมมีด แสดงการถ่ายโอนเฉพาะ Fe เท่านั้น ที่

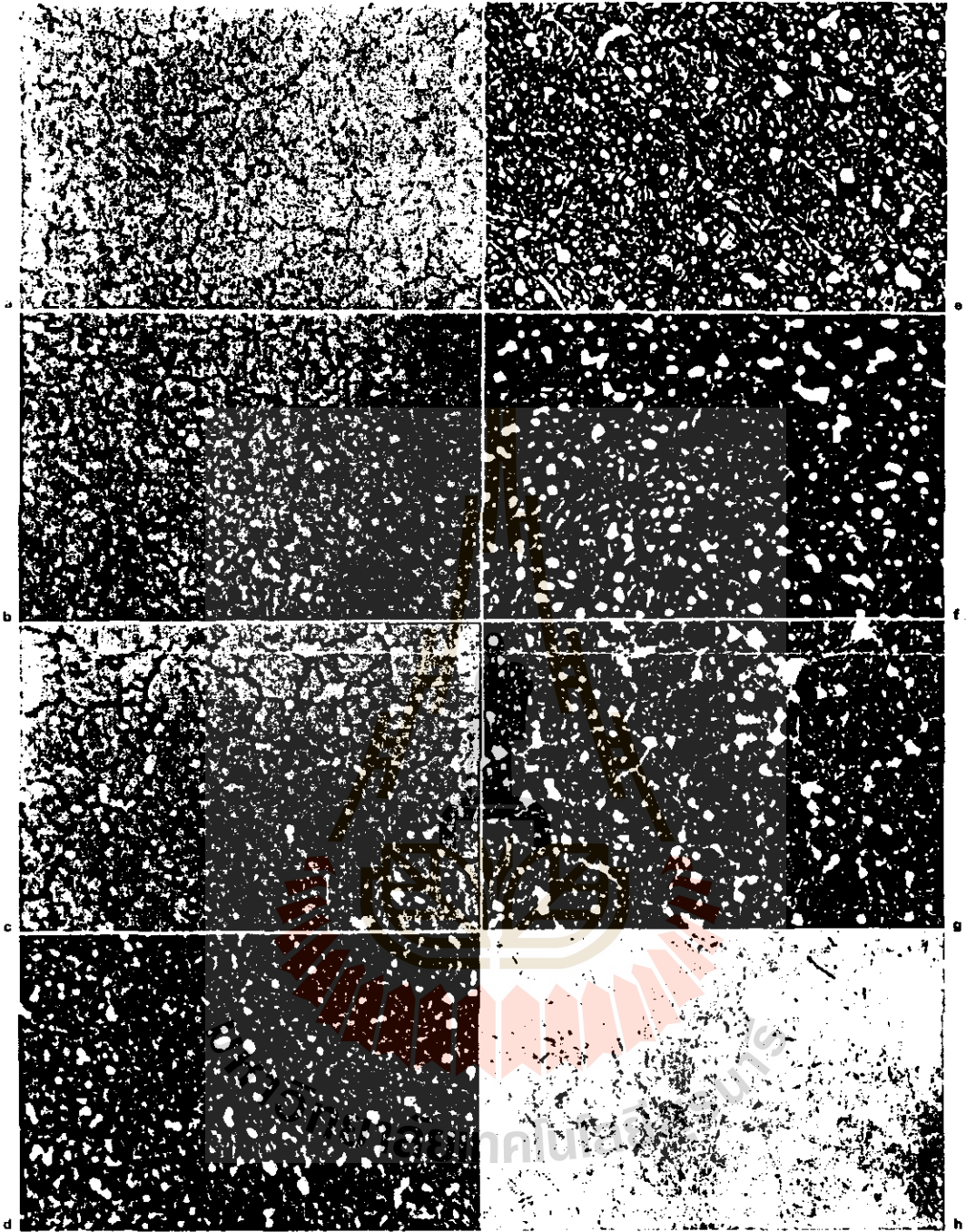
$v = 66 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.22 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 0.5 \text{ min}$

รูปที่ 16 มีดกึ่งที่เคลือบผิวด้วย TiCN จากกล้อง SEM

### การกระจายของอุณหภูมิที่สูงในมิกคิ่ง

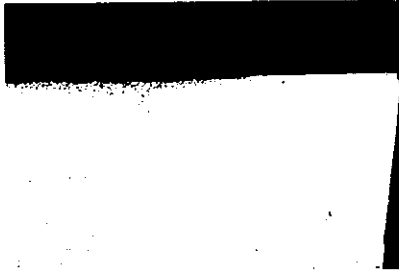
การตรวจสอบอุณหภูมิที่สูงขึ้นขณะกลึง โดยการตรวจดูโครงสร้างที่อุณหภูมิห้องของมิกคิ่งหลังการทดลอง โดยเปรียบเทียบกับ โครงสร้างของ HSS-PM-M41 ที่ศึกษาโดย Wright (4) ซึ่งใช้เป็นโครงสร้างมาตรฐานอ้างอิง การทดลองให้ผลเหมือนกันดังนี้คือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $600^{\circ}\text{C}$  จะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ชัดเจน ที่  $600^{\circ}\text{C}$  Grain boundary เริ่มมีสีคล้ำและจะคล้ำขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง  $700^{\circ}\text{C}$  grain boundary จะคล้ำมากที่สุด ที่  $750^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างพื้นที่เป็น tempered martensite เริ่มคล้ำและยากที่จะเห็น grain boundary เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ที่  $900^{\circ}\text{C}$  ไม่สามารถแยกแยะโครงสร้างได้และมีลักษณะเหมือนโครงสร้างที่ไม่ถูก etched (รูปที่ 17) จากการเปรียบเทียบโครงสร้างที่อุณหภูมินั้น ๆ กับโครงสร้างมาตรฐานอ้างอิง ทำให้สามารถลากเส้นแสดงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (temperature profile) บนพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างมิกคิ่งหลังการทดลองได้ (รูปที่ 18-19)



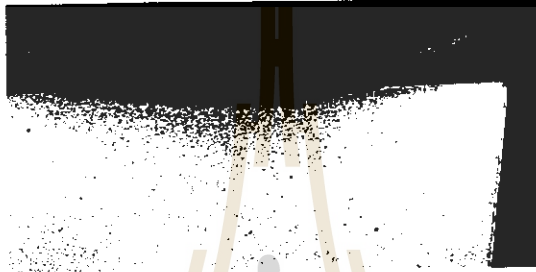


รูปที่ 17 โครงสร้างจุลภาคของ HSS ที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิระหว่าง 600° -900° C

**PVD-TiAIN COATED INSERT**



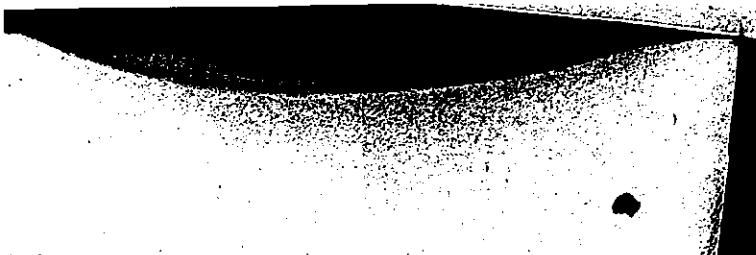
**V = 53m/min ; f = 0.16 mm/rev ; t = 1.25 mm ; T = 0.5 min**



**V = 53m/min ; f = 0.16 mm/rev ; t = 1.25 mm ; T = 1.5 min**



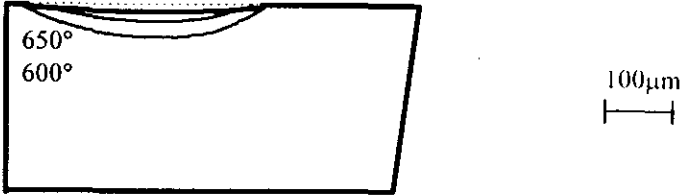
**V = 53m/min ; f = 0.18 mm/rev ; t = 1.25 mm ; T = 0.5 min**



**V = 53m/min ; f = 0.18 mm/rev ; t = 1.25 mm ; T = 1.5 min**

18 a) บริเวณที่ถูก etched และมีสีคล้ำ

## PVD-TiAlN COATED INSERT



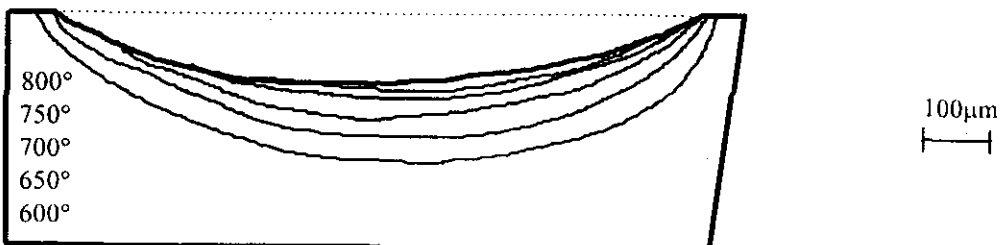
$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.16\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.16\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 1.5\text{ min}$



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.18\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.18\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 1.5\text{ min}$

18 b) temperature profile ที่แต่ละ cutting condition

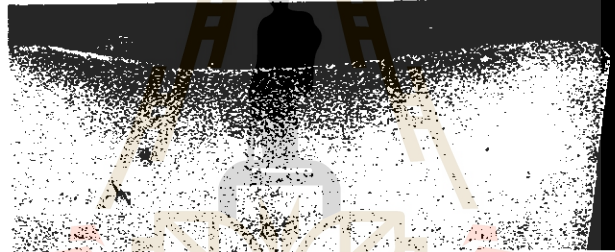
## PVD-TiAlN COATED INSERT



$V = 53\text{m/min} ; f = 0.22 \text{ mm/rev} ; t = 1.25 \text{ mm} ; T = 0.5 \text{ min}$



$V = 53\text{m/min} ; f = 0.22 \text{ mm/rev} ; t = 1.25 \text{ mm} ; T = 1.5 \text{ min}$



$V = 53\text{m/min} ; f = 0.24 \text{ mm/rev} ; t = 1.25 \text{ mm} ; T = 0.5 \text{ min}$



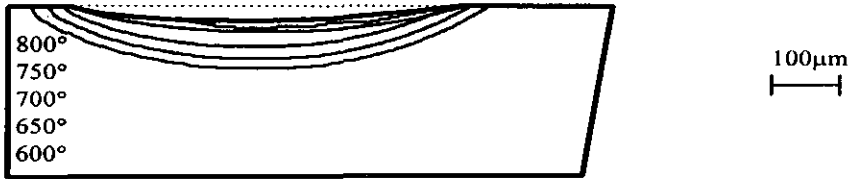
$V = 53\text{m/min} ; f = 0.24 \text{ mm/rev} ; t = 1.25 \text{ mm} ; T = 1.5 \text{ min}$



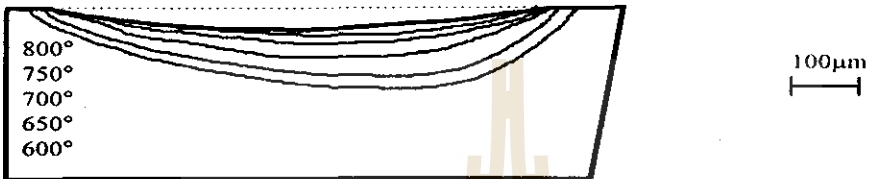
$V = 53\text{m/min} ; f = 0.24 \text{ mm/rev} ; t = 1.25 \text{ mm} ; T = 1.75 \text{ min}$

18 a) บริเวณที่ถูก etched และมีสีคล้ำ

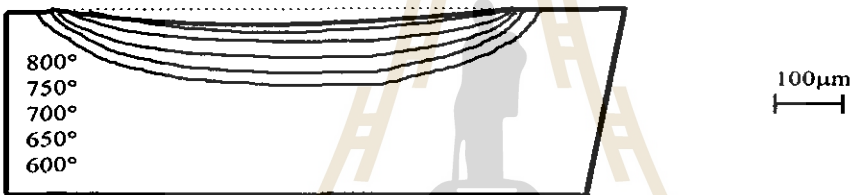
## PVD-TiAIN COATED INSERT



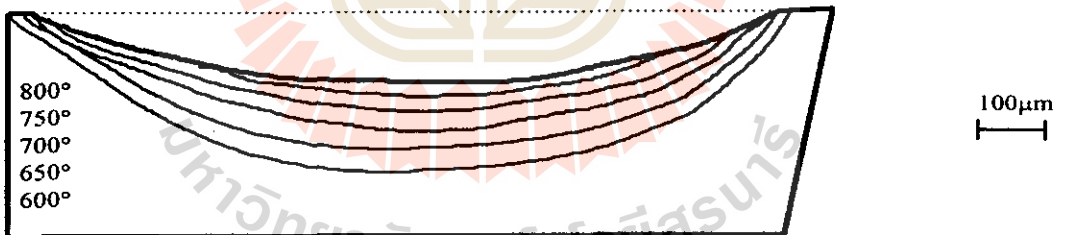
$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



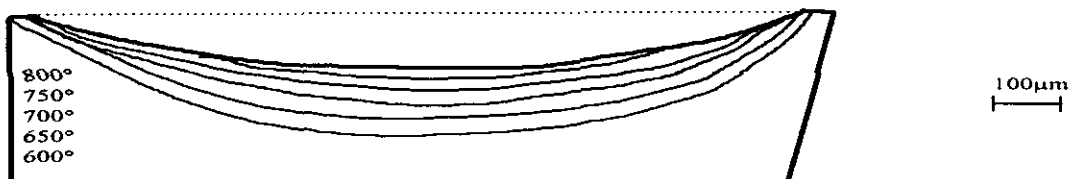
$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 1.5\text{ min}$



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.24\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.24\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 1.5\text{ min}$



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.24\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 1.75\text{ min}$

18 b) temperature profile ที่แต่ละ cutting condition

รูปที่ 18 มีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiAlN จากกล้อง optical



**PVD-TiCN COATED INSERT**



**V = 53m/min ; f = 0.22 mm/rev ; t = 1.25 mm ; T = 0.5 min**

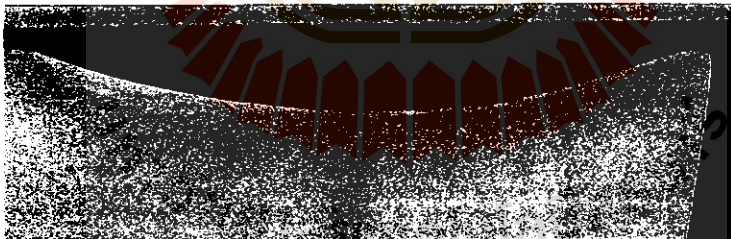


**V = 66m/min ; f = 0.22 mm/rev ; t = 1.25 mm ; T = 0.5 min**

**PVD-TiAlN COATED INSERT**



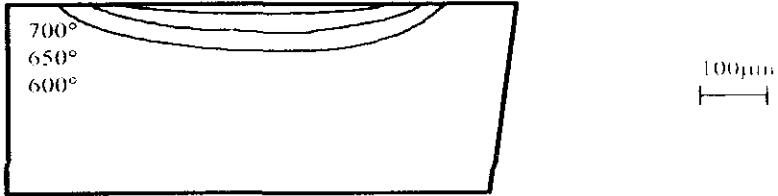
**V = 53m/min ; f = 0.22 mm/rev ; t = 1.25 mm ; T = 0.5 min**



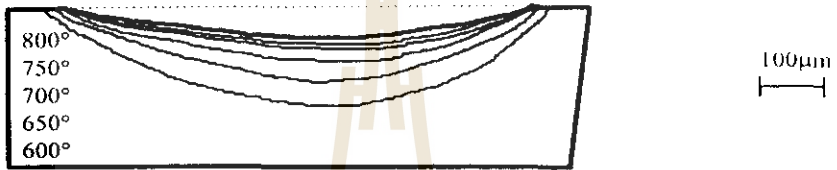
**V = 66m/min ; f = 0.22 mm/rev ; t = 1.25 mm ; T = 0.5 min**

19 a) หลัง etched ด้วย nital

### PVD-TiCN COATED INSERT



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$

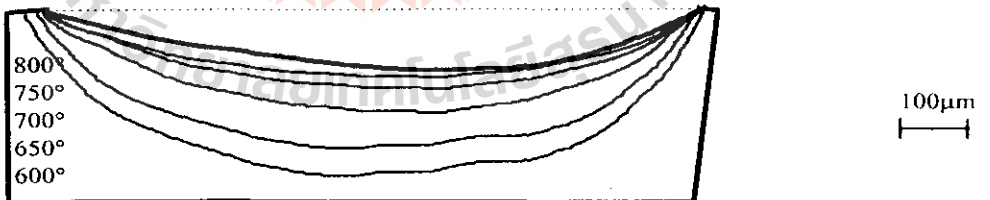


$V = 66\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$

### PVD-TiAlN COATED INSERT



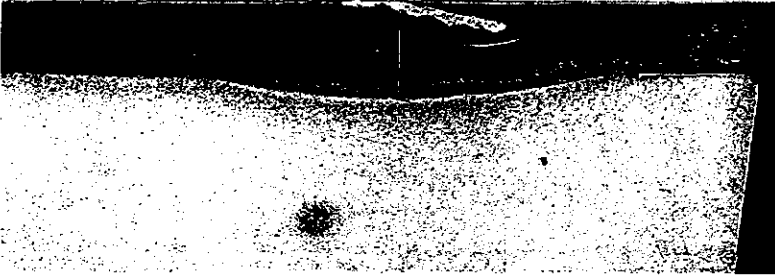
$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



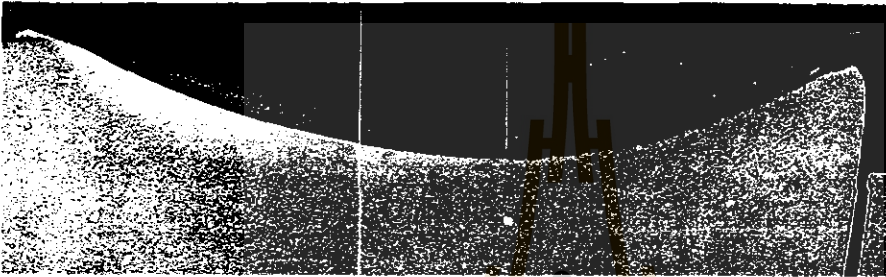
$V = 66\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$

19 b) temperature profile  $\text{ที่}$   $\text{แต่ละ}$  cutting conditions

## UNCOATED INSERT



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



## PVD-TIN COATED INSERT

$V = 66\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



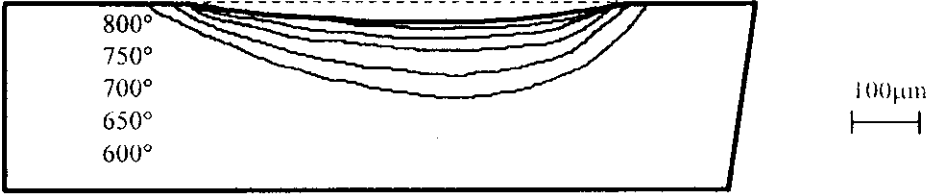
$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



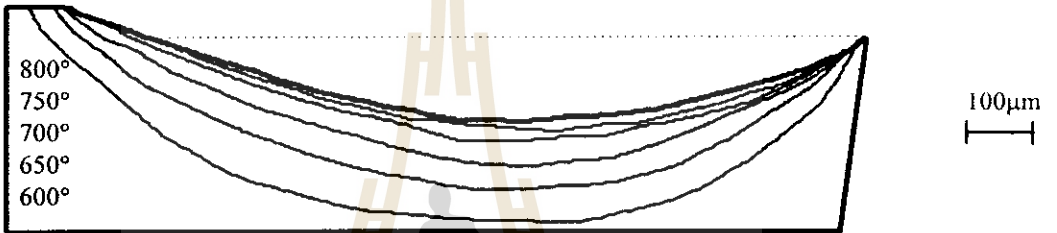
$V = 66\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$

19 a) หลัง etched ด้วย nital

## UNCOATED INSERT

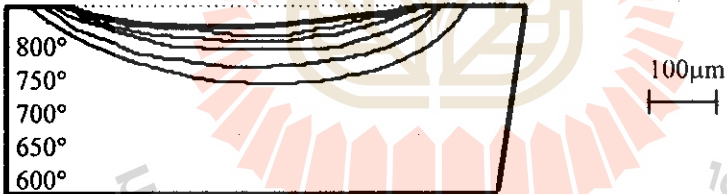


$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$

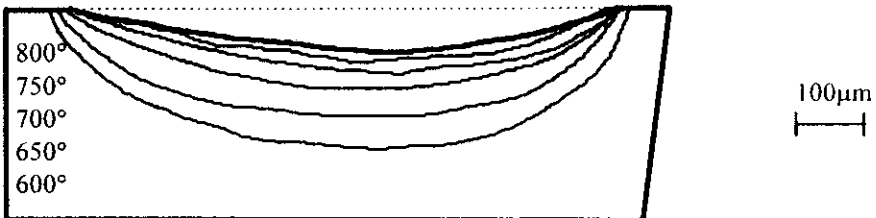


## PVD-TiN COATED INSERT

$V = 66\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



$V = 53\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$



$V = 66\text{m/min}$  ;  $f = 0.22\text{ mm/rev}$  ;  $t = 1.25\text{ mm}$  ;  $T = 0.5\text{ min}$

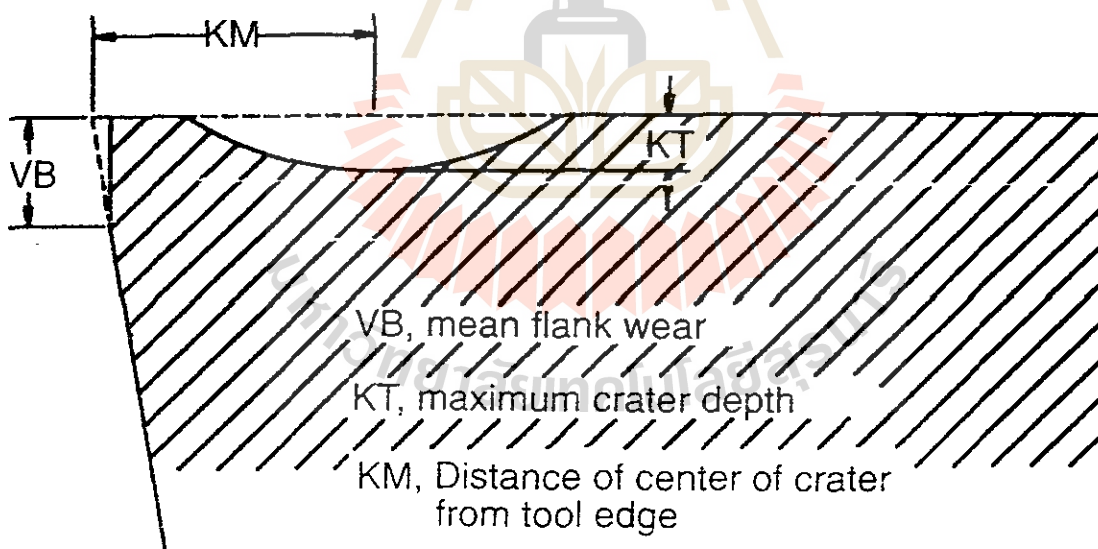
19 b) temperature profile ที่แต่ละ cutting conditions  
รูปที่ 19 มีคดถึงที่ไม่เคลือบผิวและที่เคลือบผิวต่างๆ จากกล้อง optical

เมื่อชั้นเคลือบยังคงอยู่ อุณหภูมิสูงสุดได้ผิวเคลือบด้วย TiCN ประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  แต่หลังจากที่ผิวเคลือบบางส่วนแตกหัก อุณหภูมิสูงสุดบน crater wear จะขึ้นไปถึง  $800^{\circ}\text{C}$  เส้นแสดงอุณหภูมิที่แตกต่างกันจึงเป็นไปตามอุณหภูมิบน crater wear ใกล้คมมีอุณหภูมิจะชั้นเล็กน้อย crater wear ยิ่งกว้างบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น (heat affected zone) จะกว้างขึ้นด้วย เมื่อมีคดกถึงใกล้จะใช้งานไม่ได้ (fail) เส้นแสดงอุณหภูมิจะชิดกันเมื่อเทียบกับกรณีของ crater ที่มีขนาดเล็กกว่า (รูปที่ 19 b)

ในผิวเคลือบ TiAlN ศูนย์กลางของเส้นแสดงอุณหภูมิจะถอยไปทางด้านหลังของคม มีคเมื่อ cutting time เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับเมื่อ cutting speed เปลี่ยนจาก 53 เป็น 66 m/min โดยสรุป อุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วไปทางด้านหลังของคมมีคมากกว่าทางด้านหน้าของคมมีค (รูปที่ 19 b)

### การสึกหรอของมีดกลึง

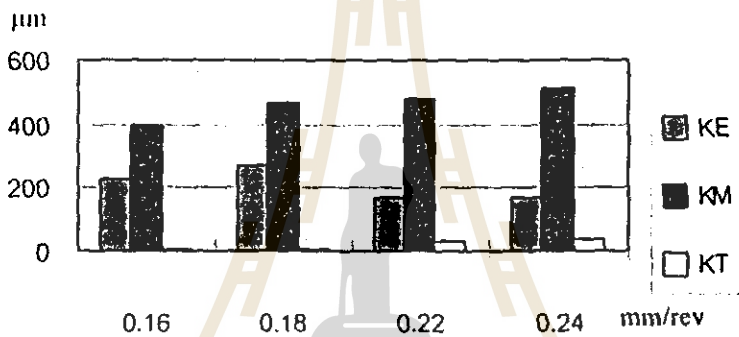
**Crater wear** การสึกหรอของมีดกลึงทุกตัวอย่างเกิดที่ด้านบนของมีดกลึง (rake face) เป็นแบบหลุมบ่อ (crater wear) ไม่มีการสึกหรอที่ด้านข้าง (flank wear) พารามิเตอร์ที่ใช้วัด crater wear แสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 พารามิเตอร์ที่ใช้วัดการสึกหรอของมีดกลึง

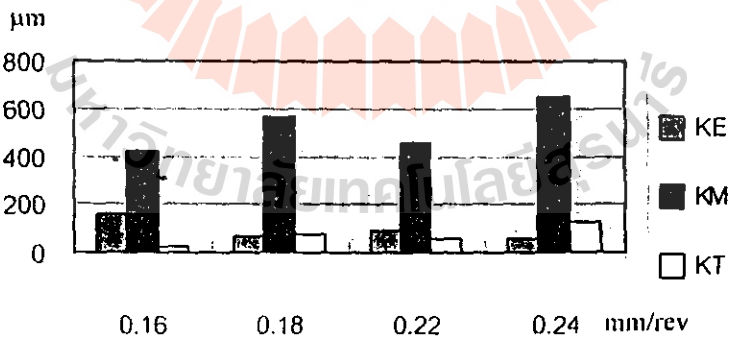
ในผิวเคลือบ TiAlN หลังเวลาถลึง 0.5 นาที ศูนย์กึ่งกลางของ crater wear อยู่ที่ระยะหนึ่งห่างจากคมมีด เช่นเดียวกันที่เวลา 1.5 นาที (รูปที่ 22) crater wear จะลึกที่สุดที่ feed rate 0.24 mm/rev feed rate ยิ่งสูงระยะนี้ยิ่งห่าง ที่ feed rate 0.22, 0.24 mm/rev crater wear ยิ่งลึก (รูปที่ 21) เช่นเดียวกันที่เวลา 1.5 นาที (รูปที่ 22) crater wear จะลึกที่สุดที่ feed rate 0.24 mm/rev

ระยะจากศูนย์กลางของ crater wear ถึงคมมีดจะลดลงตามลำดับจาก TiAlN, TiN, TiCN ความลึกของ crater wear เกือบจะเท่ากันที่ cutting speed 53 m/min (รูปที่ 23) แต่ที่ cutting speed 66 m/min ความลึกจะเพิ่มขึ้นตามลำดับจาก TiN, TiCN, TiAlN (รูปที่ 24) มีดกลึงเกือบจะใช้การไม่ได้แล้ว



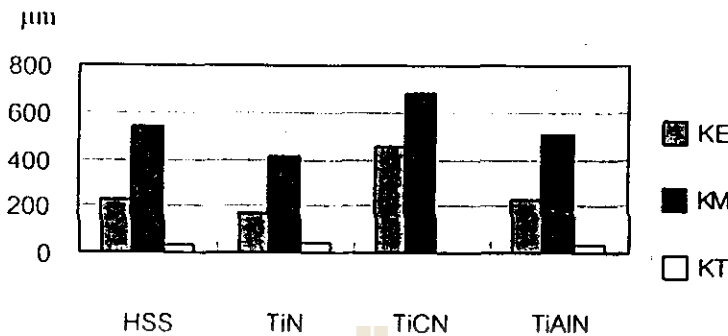
รูปที่ 21 แสดง crater wear บนมีดกลึงเคลือบผิวด้วย PVD-TiAlN ที่ f ค่าต่าง ๆ

$v = 53 \text{ m/min}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 0.5 \text{ min}$

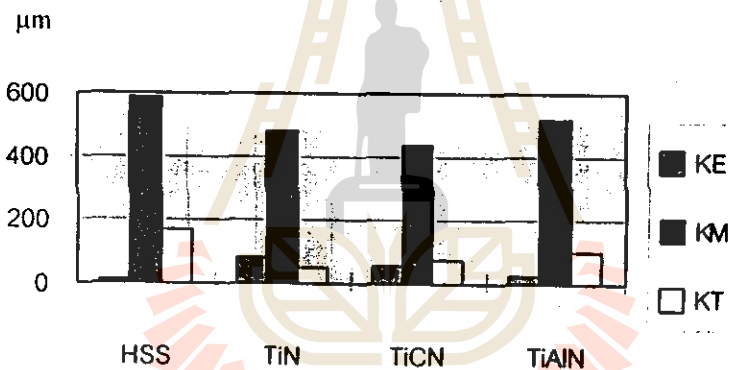


รูปที่ 22 แสดง crater wear บนมีดกลึงเคลือบผิวด้วย PVD-TiAlN ที่ f ค่าต่าง ๆ

$v = 53 \text{ m/min}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 1.5 \text{ min}$



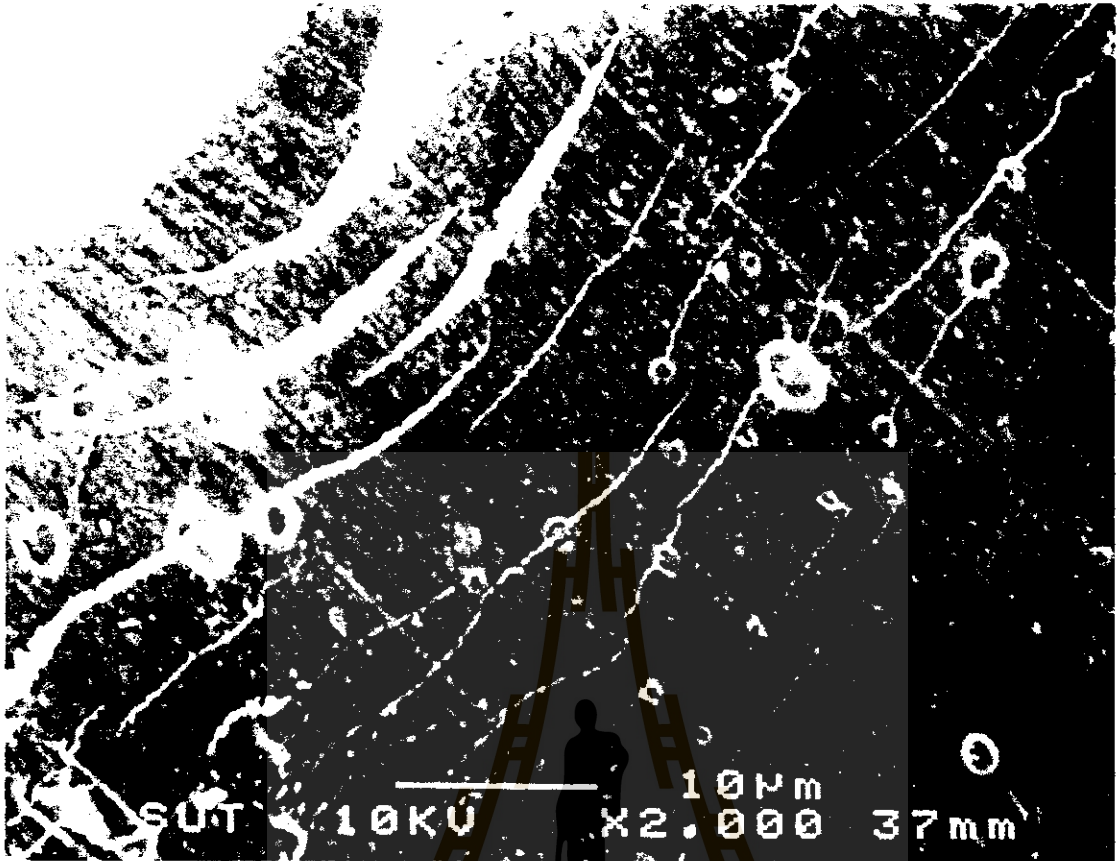
รูปที่ 23 แสดง crater wear บนมีดกลึงเคลือบผิวด้วย PVD-TiN, TiCN, TiAlN และมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว (HSS) ที่  $v = 53$  m/min,  $f = 0.22$  mm/rev,  $t = 1.25$  mm,  $T = 0.5$  min



รูปที่ 24 แสดง crater wear บนมีดกลึงเคลือบผิวด้วย PVD-TiN, TiCN, TiAlN และมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว (HSS) ที่  $v = 66$  m/min,  $f = 0.22$  mm/rev,  $t = 1.25$  mm,  $T = 0.5$  min

**Wear mechanism** Crater wear จะปรากฏเมื่อชั้นเคลือบบางส่วนแตกทำลายและฉีกขาดในบริเวณที่มี sliding หลังจากนั้น crater wear จะปรากฏที่ด้านหลังของคมมีดได้รวดเร็วกว่าด้านหน้าไม่ว่าเมื่อ cutting speed และ feed rate ที่เพิ่มขึ้น

รูปแบบของการชำรุดของผิวเคลือบด้านหน้าของ crater wear แสดงดังรูปที่ 25 อุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ชั้นเคลือบและ stress ที่กระทำทำให้ชั้นเคลือบแตกหักและจมอยู่ในตัวมีดกลึง แต่ยังคงปกป้องมีดกลึงไม่ให้สึกหรอ รอยแตก (crack) ค้างจากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษกลึง รูปที่ 25c แสดงเศษของผิวเคลือบที่แตกหลุดออกเป็นชั้น (delamination wear) รอยแตกของชั้นที่ลอกเปิดสู่ crater wear

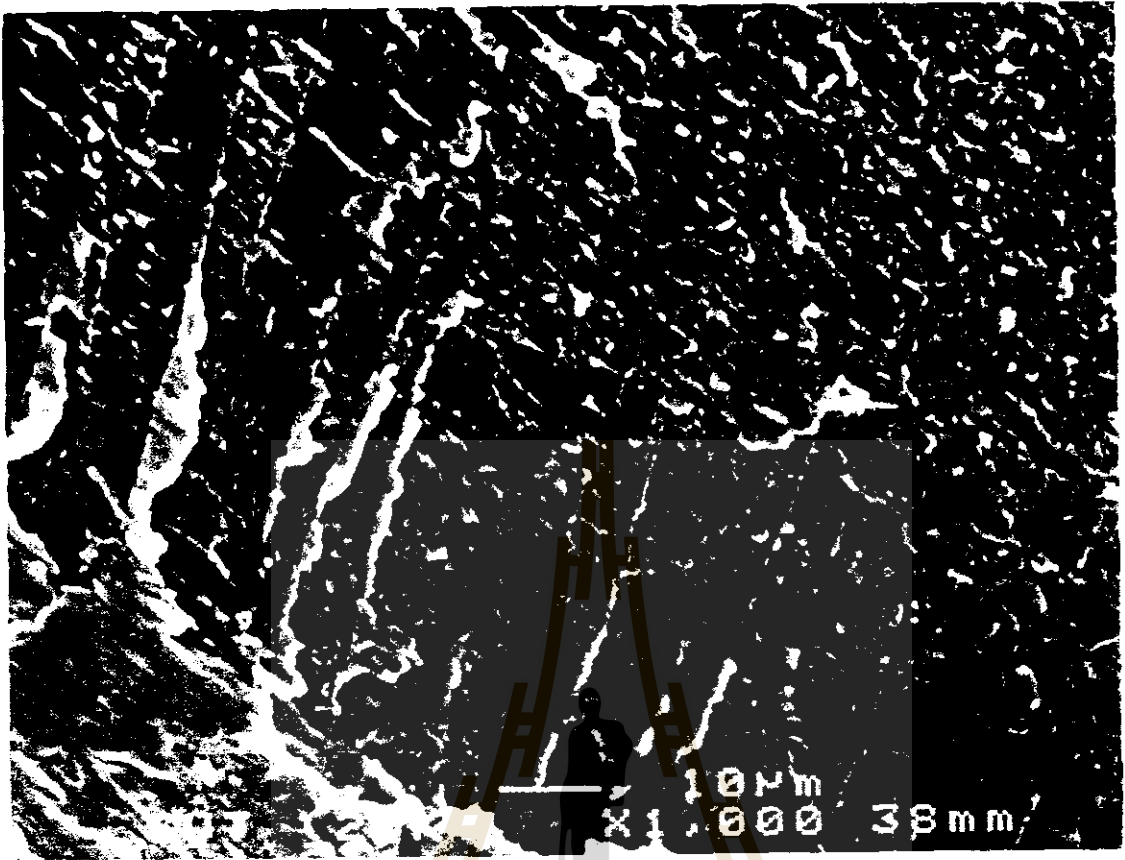


25 a) การแตกร้าวของผิวเคลือบ TiAlN ที่ด้านหน้าของ crater wear ที่

$v = 53 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.24 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 1.5 \text{ min}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

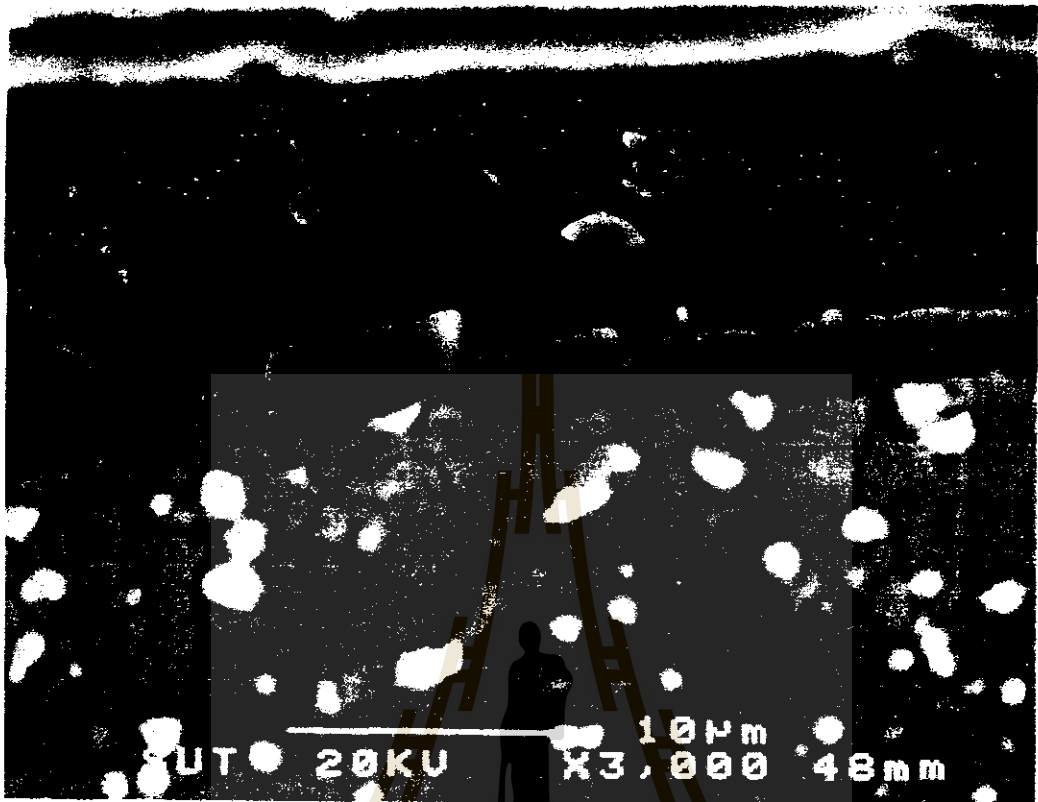




25 b) การแตกร้าวของผิวเคลือบ TiN ที่ด้านหน้าของ crater wear ที่

$v = 53 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.22 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 0.5 \text{ min}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

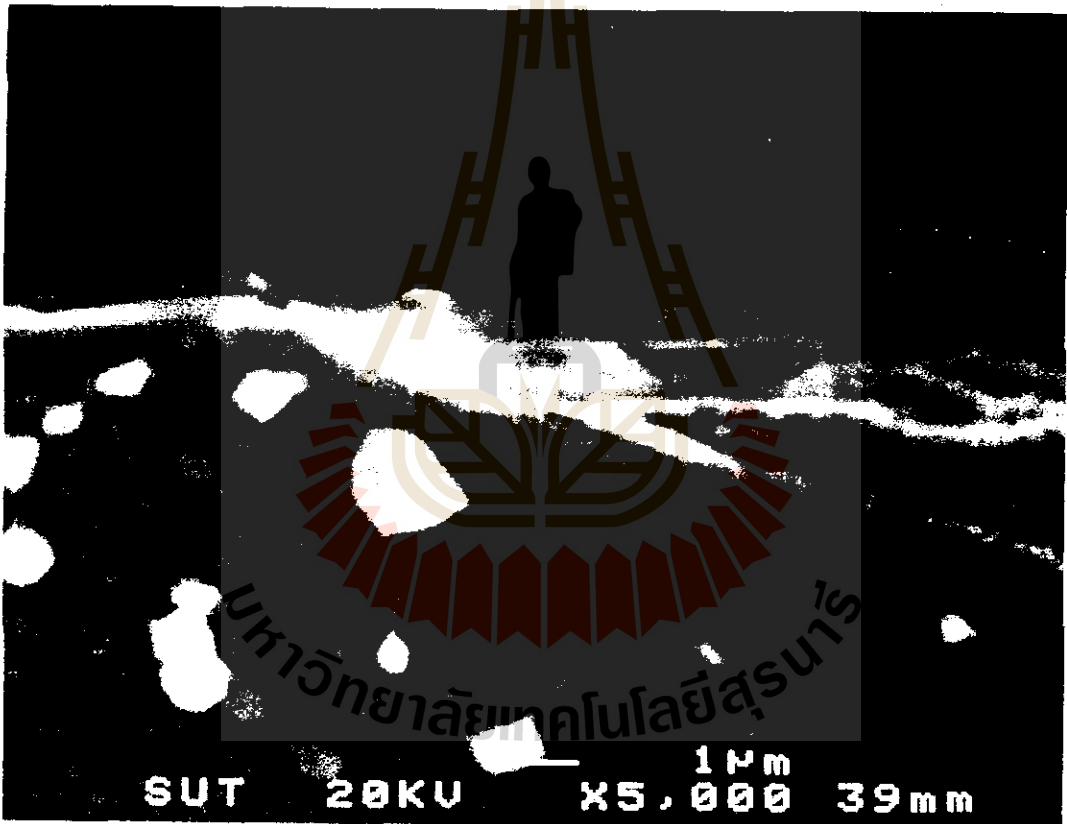


25 c) ผิวนเคลือบ TiCN ที่แตกหักและลอกเป็นแผ่นที่ด้านหน้าของ crater wear และ deposited layer ที่  $v = 53 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.22 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 0.5 \text{ min}$

รูปที่ 25 ภาพถ่ายด้วย SEM ของมีดกลึงที่เคลือบผิว

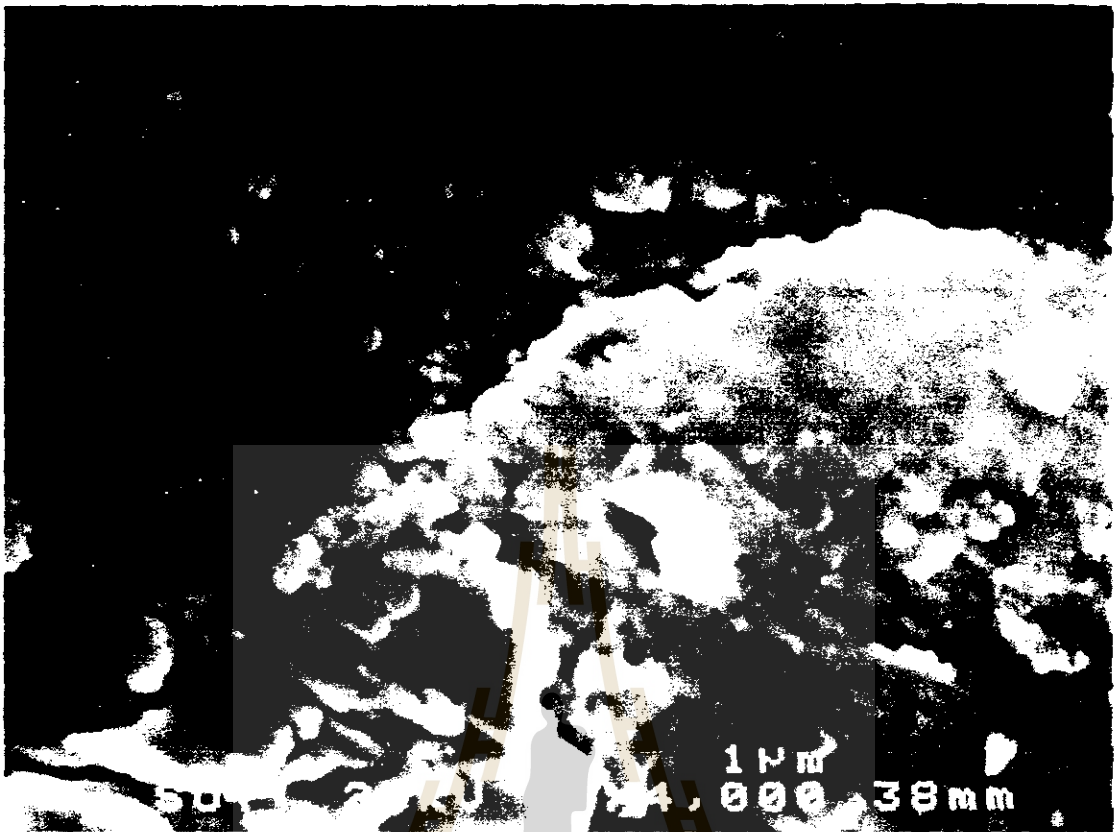
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปแบบของการชำรุดเสียหายของผิวเคลือบด้านหลังของ crater wear จะต่างไปจากด้านหน้า shear stress ที่กระทำบนผิวของ crater wear ภายใต้อุณหภูมิสูง ทำให้ชั้นใกล้ผิว crater เกิด plastic deformation เกิดแรงที่ทำให้ส่วนของชั้นเคลือบที่ปลายของ crater แตกหักและสึกหรอเคียงคู่ไปกับการเคลื่อนที่ของเศษกลึง รอยแตกของชั้นเคลือบเปิดสู่มีดกลึงเนื่องจากถูกเฉือน (sheared) ที่ปลายสุดของผิวเคลือบ (รูปที่ 26 a) การแตกของผิวเคลือบที่ด้านหลังของ crater wear บน rake face แสดงดังรูปที่ 26 b รอยแตกจะโค้ง (curved) ตรงบริเวณด้านหน้าและถดจาก crater wear delamination wear (แสดงดังรูปที่ 26 a) รูปแบบการสึกหรอที่ด้านหลังของ crater wear เกิดรวดเร็วกว่าการสึกหรอด้านหน้า ดังนั้น crater wear จึงเคลื่อนที่ไปทางด้านหลังเร็วกว่าทางด้านหน้า



26 a) การแตกหักและลอกเป็นแผ่นของผิวเคลือบ TiN ที่ปลายของ crater wear ที่

$$v = 53 \text{ m/min}, f = 0.22 \text{ mm/rev}, t = 1.25 \text{ mm}, T = 0.5 \text{ min}$$

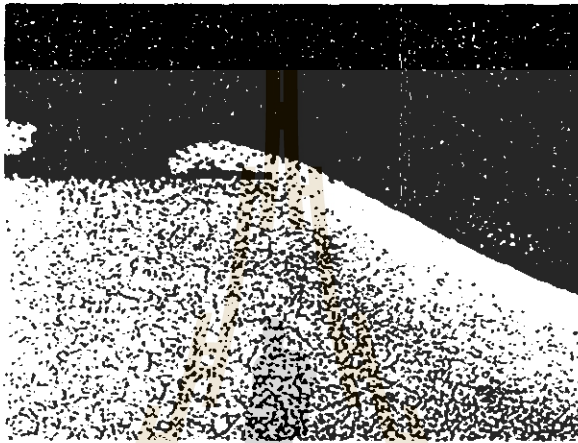


26 b) การแตกร้าวของผิวเคลือบ TiN ที่รอบ ๆ crater wear ที่  
 $v = 66 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.22 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 0.5 \text{ min}$

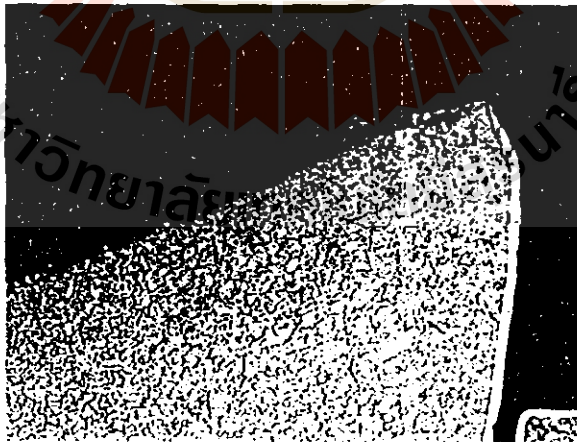
รูปที่ 26 ภาพถ่าย SEM ของผิวเคลือบ TiN

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กลไกการสึกหรอใน crater wear ที่พบในการทดลองนี้มีทั้ง adhesive-, abrasive- และ chemical wear รูปที่ 27 a และรูปที่ 28 แสดง adhesive wear เมื่อวัสดุมีดกลึงถูกเจียนออกไปจาก crater wear รูปที่ 29a แสดง abrasive wear เนื่องจากอนุภาครูปทรงสามเหลี่ยมขนาดใหญ่ไถครูดผิว crater wear จนเป็นร่องลึก (grooves) อนุภาคนี้นี้ประกอบด้วยธาตุ Si, S, Ti, V, Cr, Fe, W (รูปที่ 29 b) chemical wear แสดงดังรูปที่ 30 a มีการถ่ายโอนวัสดุจากชิ้นงานเข้าไปในมีดกลึง ผลของการวิเคราะห์ด้วย EDS แสดงปริมาณ Cr ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก interface เข้าไปในมีดกลึง (substrate) รูปที่ 30 b และ c

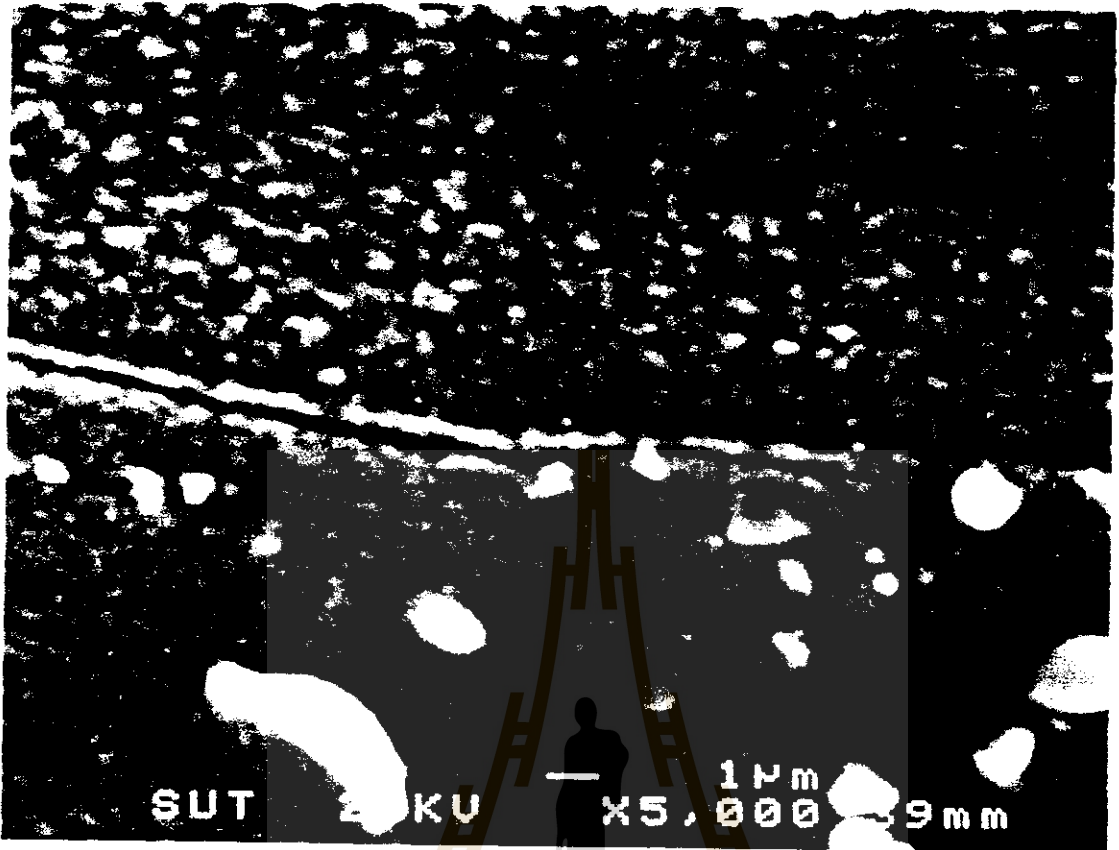


a) วัสดุมีดกลึงถูกเจียนที่ปลายของ crater wear ที่  
 $v = 66 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.22 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 0.5 \text{ min}$

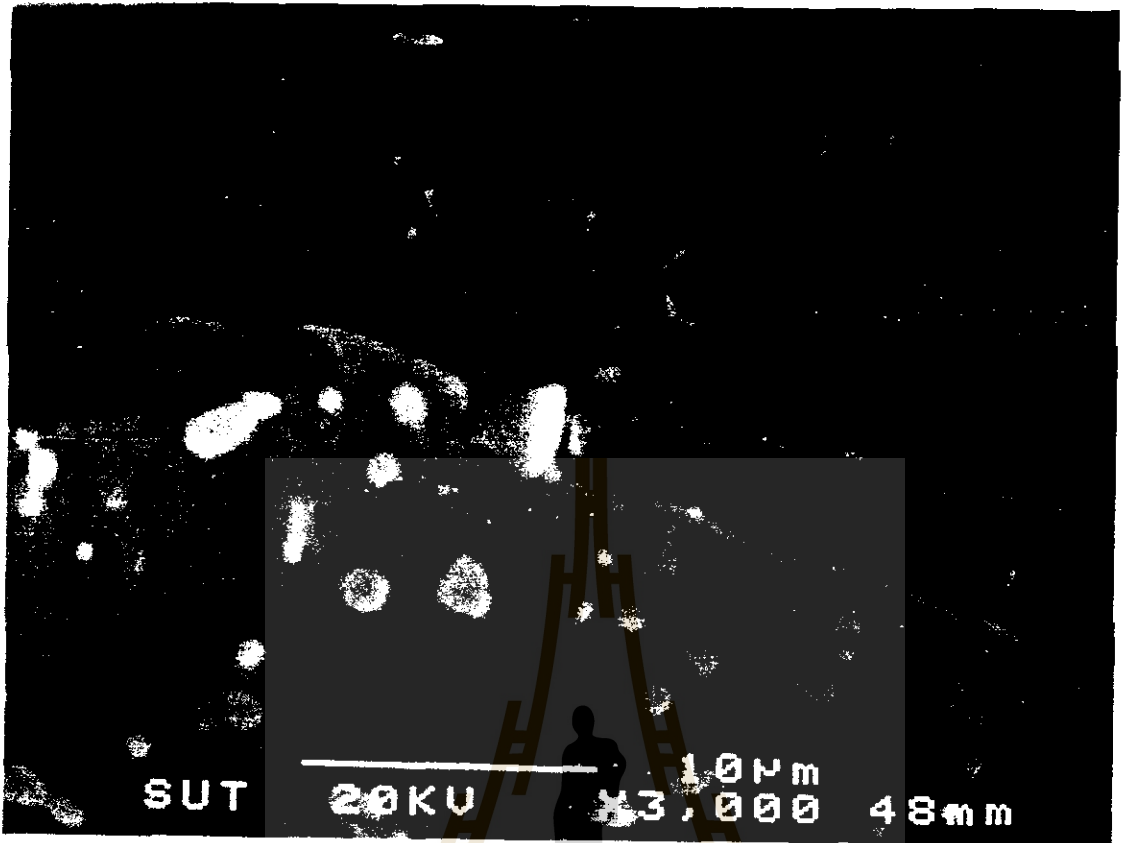


b) Nose เกิด deformed

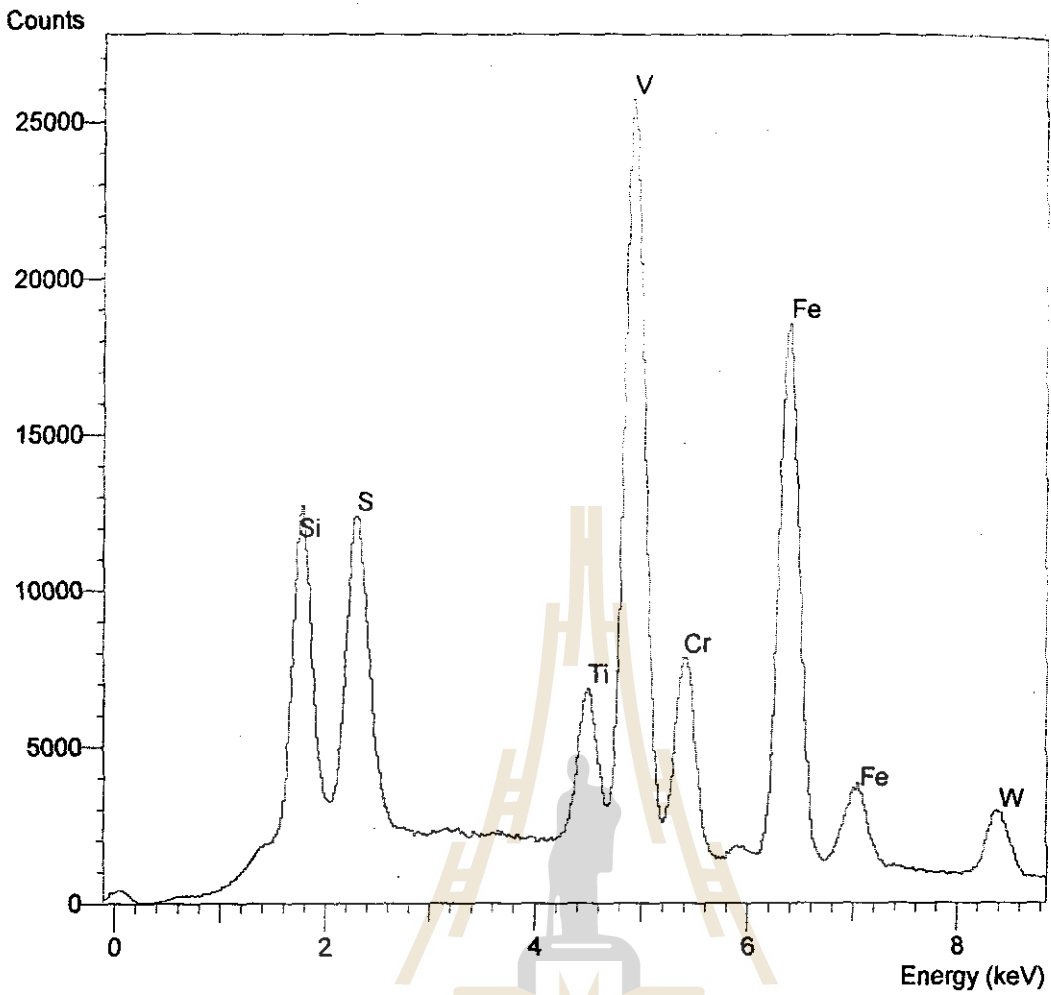
รูปที่ 27 ภาพถ่ายด้วยกล้อง optical ของมีดกลึงที่ไม่เคยลับผิว



รูปที่ 28 ภาพถ่าย SEM ของมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiN แสดงการเกิด plastic deformation และ adhesive wear ที่  $v = 66 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.22 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 0.5 \text{ min}$



29 a) แสดง Abrasive wear และ abrasive particle ใน crater wear

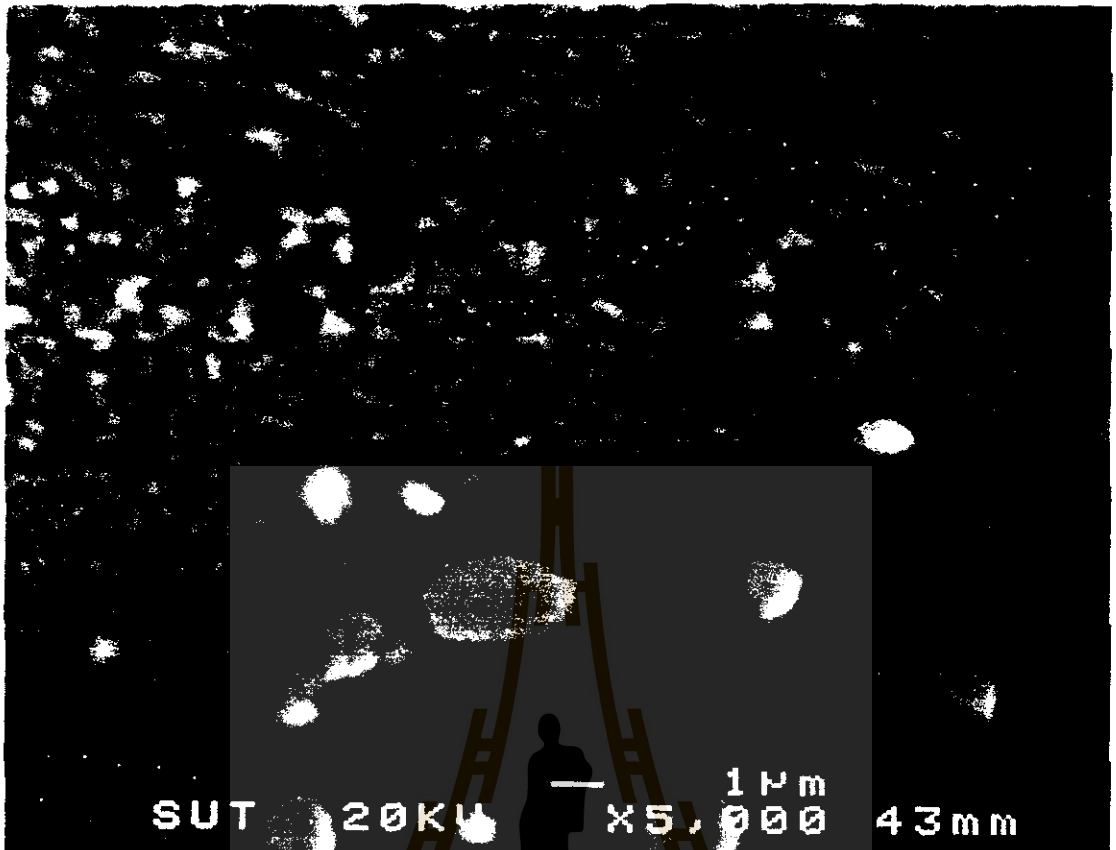


29 b) SEM/EDS แสดงส่วนผสมทางเคมีของอนุภาคใน a) ที่มี Si, S, V, Cr, Fe, W

รูปที่ 29 ภาพถ่าย SEM ของมีดกล้าที่เคลือบผิวด้วย TiCN

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

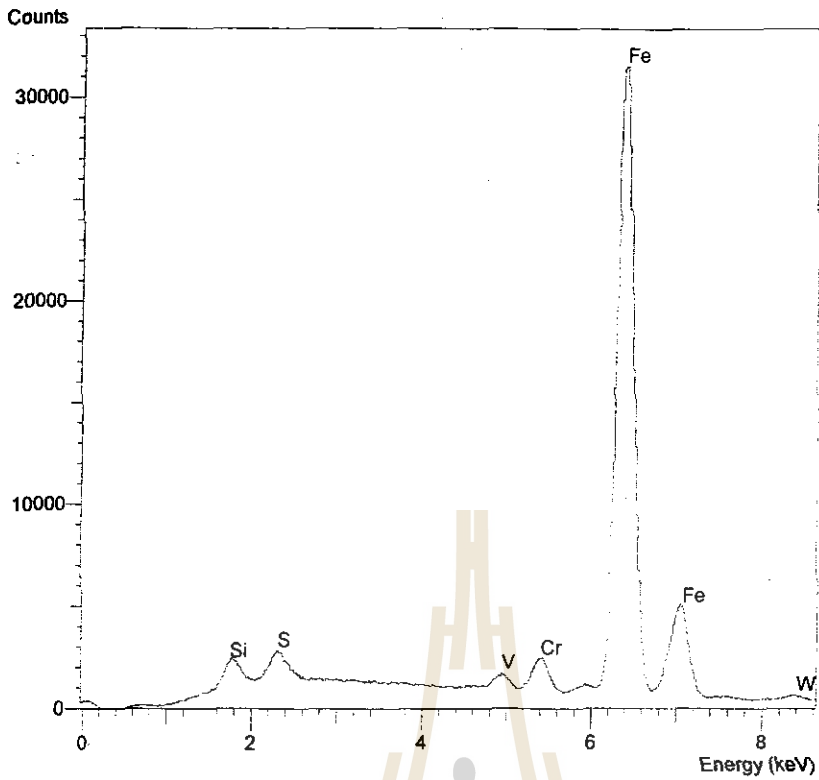




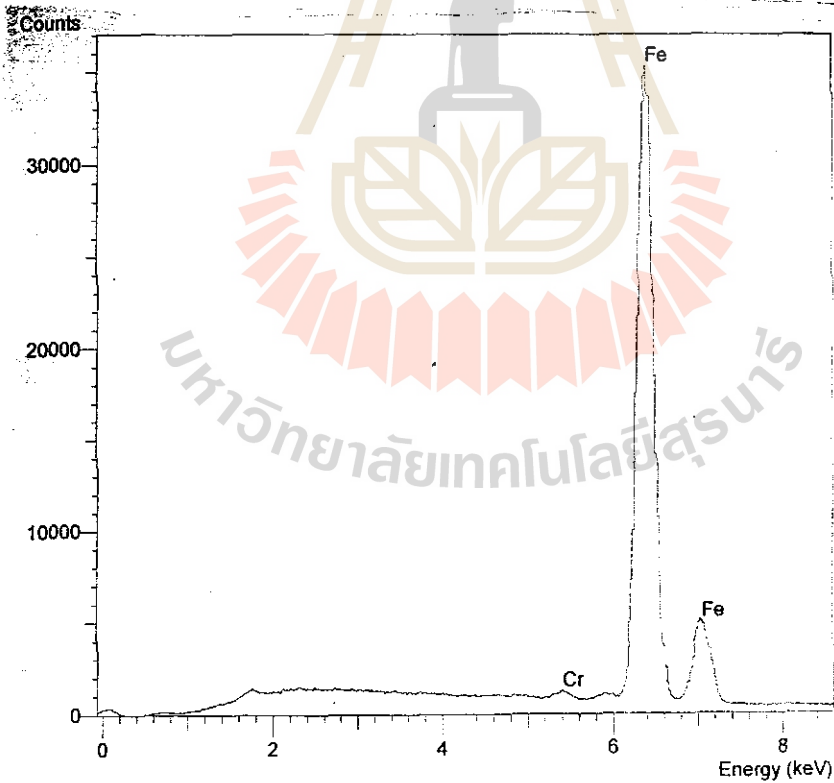
30 a) บริเวณที่มีการถ่ายโอนวัสดุระหว่างชิ้นงานกับมีดกลึงเกิด adhesion บริเวณ crater ที่

$v = 53 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.22 \text{ mm/rev}$ ,  $t = 1.25 \text{ mm}$ ,  $T = 0.5 \text{ min}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



b) SEM/EDS ที่ระยะ 1.5 ไมโครเมตรจากรอยต่อ



c) SEM/EDS ที่ระยะ 0.5 ไมโครเมตรจากรอยต่อแสดงการลดลงของ Cr เมื่อเทียบกับ b)

รูปที่ 30 ภาพถ่ายSEM ของผิวเคลือบด้วย TiAlN

เมื่อ crater wear ไปถึงคมมีด คมมีดจะสึกหรือเกิดผิวใหม่ที่ระยะ 50 ไมโครเมตรต่ำกว่า rake face (รูปที่ 27 a) ในมีดถึงไม้เคลือบผิวที่ cutting speed 66 m/min, feed rate 0.22 mm/rev, depth of cut 1.25mm, cutting time 0.5 min tool Nose จะ deformed (รูปที่ 27 b) เห็นได้จากชั้น CVD แตกหักแต่ยังคงปกป้อง Flank face ไม่ให้สึกหรือ



## บทที่ 5

### อภิปรายผลการทดลอง

#### ปฏิสัมพันธ์เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเศษกลึงกับมีดกลึง

มีดกลึงไม่เคลือบผิวแสดง BUE ทั้งที่ cutting speed 53 และ 66 m/min และที่ feed rate 0.22 mm/rev ในขณะที่มีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiAlN จะพบ BUE ที่ cutting speed 66 m/min และ feed rate ที่ต่ำกว่า 0.22 mm/rev (รูปที่ 14a) ที่ cutting speed 66 m/min ไม่พบ BUE ในมีดกลึงที่เคลือบทุกชนิด ผิวเคลือบจึงลดแนวโน้มในการเกิด BUE ได้ feed rate หรือ cutting speed ยิ่งสูง แนวโน้มในการเกิด BUE จะน้อยลง ถึงแม้ว่า BUE จะเกิดที่บริเวณใกล้เคียงกับคมมีดของมีดกลึงที่เคลือบผิว แต่ความยาวของการสัมผัสระหว่างเศษกลึงกับ rake face ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว

ระหว่างเศษกลึงกับ rake face พบ deposited layer เมื่อดูด้วยกล้อง SEM มีลักษณะคล้ายแก้ว (glassy) ซึ่งเกิดจาก inclusion ในชิ้นงาน ซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเศษกลึงและ rake face แบ่งเป็นสามโซน อันเป็นคุณลักษณะของ tribological contact condition บน rake face การเกิด deposited layer จึงช่วยกำจัดการเกิด BUE ได้

บนมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiN, TiAlN ไม่พบ deposited layer ถึงแม้ว่าปริมาณ Si, S, Al ในชิ้นงานจะสูง inclusion ที่พบคือ MnS (รูปที่ 12) แต่ไม่พบ silicate inclusion ใดๆ ที่การเกิด deposited layer (glassy layer) เกี่ยวข้องกับรูปร่างและขนาดของ silicate inclusion เมื่อไปก่อตัวเป็นชั้นบน rake face แล้ว S-inclusion ก็จะไปเกาะร่วมด้วยเกิดเป็น complex layer ที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ยุ่งยากขึ้น

การมาเกาะของ Si, S ที่ด้านหลังของ crater wear ในมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิวช่วยลดแรงเสียดทานที่บริเวณนี้ MnS inclusion มี affinity ต่อ HSS มาก แต่ไม่มี affinity ต่อผิวเคลือบ TiN, TiCN และ TiAlN

ที่บริเวณที่มีการเลื่อนไหล (sliding) บนผิวเคลือบ TiCN พบ deposited layer ที่มี Al อยู่มาก จึงมี performance ที่ดีกว่าที่ cutting speed 53 m/min จะเห็นได้จากการที่ไม่พบ crater wear หลังการกลึงนาน 0.5 นาที ซึ่งต่างไปจากมีดกลึงที่เคลือบผิวอื่น ๆ deposited layer อาจเกิดขึ้นและหายไปจึงทำให้ผิวบนของผิวเคลือบด้วย TiCN ไม่เรียบ (uneven) Al อาจเกิดเป็น  $Al_2O_3$  เนื่องจากออกซิเจนเข้าถึงบริเวณนี้ oxide layer จึงช่วยปกป้องการชำรุดเสียหายให้กับ TiCN ดังนั้นการเคลือบผิวจึงเปลี่ยน tribological contact condition ที่ interface ซึ่งจะมีผลต่อการกระจายอุณหภูมิในมีดกลึงที่เคลือบผิวเมื่อเทียบกับมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว

### อุณหภูมิที่สูงขึ้นในมีดกลึง

บนมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิวอุณหภูมิสูงขึ้นถึง  $700^{\circ}\text{C}$  ภายในเวลาไม่ถึง 0.5 นาที ภายใต้สภาวะทั้งสองชุด การสัมผัสระหว่าง โลหะที่เป็นเศษกลึงและมีดกลึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น

ในมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiCN อุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่เกิน  $700^{\circ}\text{C}$  ปรากฏที่ผิวเคลือบยังไม่แตกหัก (รูปที่ 19a) ผิวเคลือบจึงไม่สามารถป้องกันการถ่ายโอนความร้อนเข้าไปในมีดกลึงได้ แต่ก็ช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดในมีดกลึงลงได้  $100^{\circ}\text{C}$  เมื่อเทียบกับมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิว ผิวเคลือบซึ่งไม่ใช่โลหะช่วยลด adhesion ระหว่างเศษกลึงกับ rake face จึงทำให้ความร้อนถ่ายเทได้น้อยลงและอุณหภูมิที่ interface ที่สูงขึ้นก็ต่ำกว่าด้วย

เมื่อผิวเคลือบแตกหักเป็นบางส่วน เศษกลึงจะสัมผัสกับมีดกลึงโดยตรง อุณหภูมิใน crater wear จึงเพิ่มขึ้นถึง  $800^{\circ}\text{C}$  แต่ HAZ รอบ ๆ crater wear มีขนาดเล็กกว่า HAZ ในมีดกลึงที่ไม่เคลือบผิวมาก ผิวเคลือบที่เหลืออยู่ที่ด้านหน้าและด้านหลังของ crater wear ยังคงปกป้องมีดกลึงไม่ให้อุณหภูมิสูงขึ้น HAZ จึงมีขนาดเล็กกว่า

ในมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiAlN feed rate มีบทบาทสำคัญต่อขนาดของ HAZ ค่าที่สูงขึ้นจะทำให้ HAZ โดจขึ้น (รูปที่ 18a) feed rate ที่สูงขึ้นเป็นผลให้พื้นที่สัมผัสมีขนาดใหญ่ขึ้น และ feed force สูงขึ้นซึ่งจะเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างเศษกลึงกับ rake face จึงทำให้ HAZ มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ feed rate ไม่มีอิทธิพลมากนักต่อระดับอุณหภูมิในมีดกลึง (รูปที่ 18b) การเพิ่ม feed rate มีผลต่อการเพิ่มของอุณหภูมิได้น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของ cutting speed

Cutting speed มีผลต่อ HAZ และการกระจายของอุณหภูมิอย่างมากทั้งในมีดกลึงที่เคลือบและไม่เคลือบผิว ในมีดกลึงที่เคลือบผิวที่ cutting speed 53 m/min เส้นแสดงระดับอุณหภูมิจะชันกว่าเมื่อเทียบกับ cutting speed 66 m/min (รูปที่ 19 b) ที่ cutting speed 66 m/min HAZ มีขนาดใหญ่กว่าเนื่องจาก cutting speed เพิ่มขึ้นทั้ง shear strain และ strain rate ในบริเวณ secondary deformed zone และความเร็วของเศษกลึงซึ่งขัดถู (rubbing) rake face ช่วยเร่งการชำรุดของผิวเคลือบ HAZ จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น อายุใช้งานจึงลดลง ผิวเคลือบ (รูปที่ 19a) จึงไม่ช่วยลดขนาดของ HAZ เมื่อใช้ cutting speed สูง ๆ

อุณหภูมิที่สูงขึ้นในมีดกลึงจึงเป็นเหตุผลหลักต่อการชำรุดใช้การไม่ได้ของผิวเคลือบ และมีอิทธิพลอย่างมากต่อ wear mechanism ที่เกิดขึ้นบนมีดกลึง

### การสึกหรอของมีดกลึง

การศึกษาทดลองครั้งนี้พบ crater wear ทั้งในมีดกลึงที่เคลือบและไม่เคลือบผิว ซึ่งมีศูนย์กลางที่ระยะห่างไปจากคมมีด crater wear เริ่มต้นที่บริเวณที่มีการเลื่อนไหล (sliding) ที่ซึ่งอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นแห่งแรก แล้ว crater wear จึงเคลื่อนไปทางด้านหลังของคมมีด ซึ่งแสดงว่า crater wear คำนวณไปทางด้านหลังได้เร็วกว่าเข้าหาคมมีด

ในมีดกลึงที่เคลือบผิว อัตราการสึกหรอ (wear rate) หาได้จากความยาวและความลึกของ crater wear ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ในผิวเคลือบ TiAlN wear rate สูงขึ้นตาม feed rate ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ HAZ ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและ temperature profile ที่ชันน้อยกว่า การเพิ่ม cutting speed จะเพิ่ม wear rate ด้วย เนื่องจากทำให้ HAZ ขนาดใหญ่ขึ้นและ temperature profile ชันน้อยลง

ในมีดกลึงที่เคลือบผิว wear process ก็คือการชำรุดของผิวเคลือบและการสึกหรอของ HSS ใน crater ไปพร้อมกันหลังจากที่ crater ก่อตัว การชำรุดของผิวเคลือบที่ด้านหน้าของ crater เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นในตัวมีดกลึง ซึ่งไม่สามารถรองรับผิวเคลือบภายใต้การกระทำของทั้ง compressive และ shear stress ที่สูงได้ (รูปที่ 25) รอยแตก (crack) ของผิวเคลือบตั้งฉากกับคมมีด shear stress ที่กระทำบนผิวของ crater wear ซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึง  $800^{\circ}\text{C}$  ทำให้ชั้นของ HSS ใกล้เคียง ๆ กับผิวเกิด plastic deformation (รูปที่ 26) การ flow ของ HSS ที่ deformed จะดันส่วนบนของผิวเคลือบที่ด้านหลังของ crater ทำให้ crater กว้างขึ้น (รูปที่ 26a) รอยแตกบน rake face แสดงดังรูปที่ 26b มีลักษณะเดียวกับ crater profile ความคงทนต่อการคดโค้ง (bending resistance) ของผิวเคลือบอาจมีบทบาทสำคัญต่อการที่ crater เคลื่อนที่ไปด้านหลังของคมมีด crater wear คำนวณไปทางด้านหลังได้เร็วกว่าด้านหน้า เนื่องจากความร้อนถูกถ่ายโอนได้มากกว่า HAZ จึงมีขนาดเล็กกว่าด้านหน้าซึ่งสึกหรอเร็วกว่า

Adhesive wear พบทั้งในมีดกลึงที่เคลือบและไม่เคลือบผิว (รูปที่ 27) แต่ในผิวที่ไม่เคลือบ adhesive wear จะรุนแรงกว่าเมื่อวัสดุมีดกลึงถูกเหวี่ยงออกไปกับการเคลื่อนที่ของเศษกลึงผิวเคลือบที่อยู่ด้านหน้าและด้านหลังของ crater wear ช่วยลด adhesion ใน crater wear ซึ่งเกี่ยวข้องกับ temperature profile ที่ชันกว่าในผิวเคลือบ ชั้นที่เกิด plastic deformation ใกล้เคียงผิว crater มีน้อยกว่า

Abrasive wear เห็นได้ชัดจากร่องลึก (grooves) บน crater ดังรูปที่ 14 b) ร่องลึกอาจเกิดจากอนุภาคที่แข็งในชิ้นงานและหรือใน BUE การทดลองนี้พบอนุภาคที่ abrasive ที่ปลายของ crater wear จากการวิเคราะห์ด้วย SEM/EDS พบว่ามีส่วนผสมที่ยุ่งยาก อนุภาคนี้มาได้อย่างไร ยังไม่เป็นที่แน่ชัด แต่มีบทบาทที่สำคัญต่อ abrasive wear ใน crater wear

Adhesion ที่เกิดจากการถ่ายโอนของวัสดุมีดกึ่งกับวัสดุชิ้นงานนั้นสังเกตได้จากการที่ไม่มีช่องว่างที่รอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองเมื่อถูก etched ดังแสดงในรูปที่ 28 ที่แสดงพื้นที่ที่มีการยึดติดแน่น อุณหภูมิที่สูงช่วยเสริม adhesion ระหว่างวัสดุชิ้นงานกับวัสดุมีดกึ่งใน crater ซึ่งเห็นได้จากปริมาณ Cr ในมีดกึ่งที่ถ่ายโอนไปยังชิ้นงาน (รูปที่ 30)

ผิวเคลือบด้วย CVD-TiN บน flank face เดิม ช่วยเสริมความคงทนต่อ wear ถึงแม้ tool nose จะเกิด plastic deformation แต่ CVD-coating ยังคงติดแน่นอยู่กับ flank face จึงช่วยปกป้องไว้ tool nose จึงไม่ชำรุดแม้แต่เมื่อ crater wear ไปถึงคมมีดแล้ว เนื่องจากอุณหภูมิได้คมมีดต่ำกว่า  $600^{\circ}\text{C}$  wear mechanism ซึ่งทำให้เกิดคมมีดใหม่อาจเกี่ยวข้องกับ plastic deformation และ adhesion ที่อุณหภูมิต่ำก็เป็นได้



## บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย

การทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษา performance ของมีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiAlN ที่ feed rate ต่าง ๆ และการทำงานของมีดกลึงที่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวที่ cutting speed สองค่าคือ 53 และ 66 m/min

ปฏิสัมพันธ์เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเศษกลึงกับ rake face ให้ผลเช่นเดียวกับที่ศึกษาแล้วโดย Trent ผิวเคลือบช่วยลดแนวโน้มในการเกิด BUE เท่านั้น inclusion ที่มาเกาะในชั้น deposited ไม่พบใน rake face ที่เคลือบผิวด้วย TiN, TiAlN อาจเป็นเพราะไม่พบ silicate inclusion ในชิ้นงาน

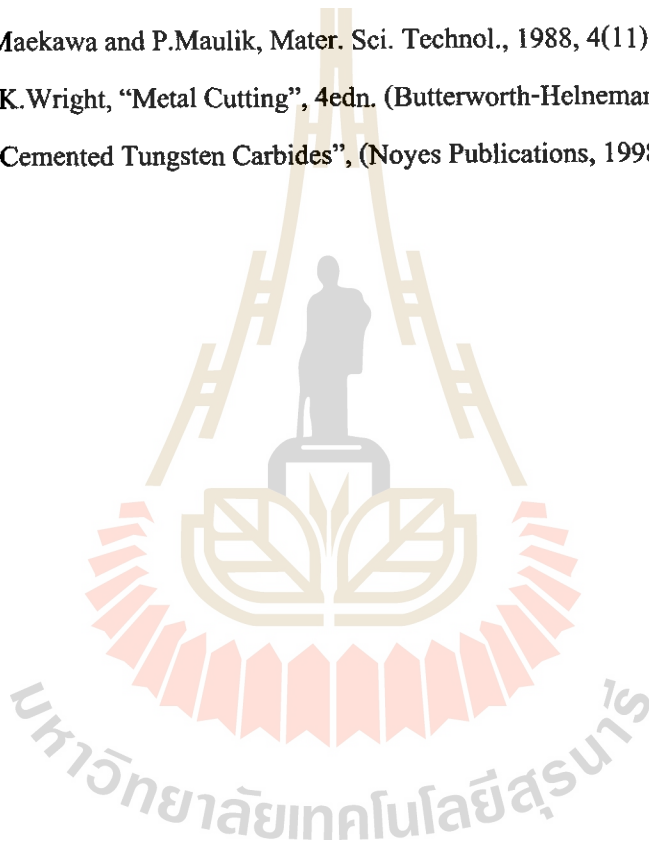
การเพิ่ม feed rate ทำให้ HAZ มีขนาดใหญ่ขึ้นและ temperature gradient ในมีดกลึงที่เคลือบด้วย TiAlN มีความชันน้อยกว่า เช่นเดียวกันกับเมื่อ cutting speed เพิ่มจาก 53 เป็น 66 m/min ในมีดกลึงทั้งไม่เคลือบและเคลือบผิวทุกชนิด

การสึกหรอของ HSS ก็คือ crater wear ร่วมกับ adhesive, abrasive และ chemical mechanism wear rate แปรผกผันกับความชันของ temperature profile การศึกษาครั้งนี้พบอนุภาคที่ abrasive ใน crater wear ซึ่งยังไม่รู้ว่าก่อตัวในสถานะใดในการกลึง ซึ่งจะต้องศึกษาต่อไป การเสียหายของผิวเคลือบที่ด้านหน้าและด้านหลังของ crater มี mechanism ที่แตกต่างกัน อุณหภูมิที่สูงขึ้นใน crater ร่วมกับ cutting stress มีบทบาทสำคัญต่อการชำรุดใช้การไม่ได้ของผิวเคลือบ



**บรรณานุกรม**

1. K.Holmberg. Surf. Coat. Technol., 56(1992) 1-10
2. P.Hedenqvist and M. Olsson, Tribology Int., 24 (1991) 143-150.
3. P.Hedenqvist and M. Olsson, Tribology Int., 23 (1990) 173-181.
4. P.K Wright and E.M. Trent, J.Iron Steel Inst., May (1973) 364-368.
5. R.S. Irani, C.S. Wright and A.S. Wronski, J.Mater, Sci. Lett., 1(1982) 318-320.
6. C.S Wright and R.S. Irani, J.Mater, Sci, Lett., 19(1984) 3389-3398.
7. T.H.C.Childs, K.Maekawa and P.Maulik, Mater. Sci. Technol., 1988, 4(11), 1006-1019.
8. E.M. Trent and P.K.Wright, "Metal Cutting", 4edn. (Butterworth-Heinemann, 2000).
9. G.S.Upadhyaya, "Cemented Tungsten Carbides", (Noyes Publications, 1998).



## ประวัตินักวิจัย

1. นางไพลิน ฤกษ์จิรสวัสดิ์ ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์เกิดเมื่อวันที่ 23 กันยายน 2485 ที่กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาตรี วทบ. (เคมี) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2509 ปริญญาตรี วศบ. (วิศวกรรมโลหการ) จากมหาวิทยาลัย British Columbia ประเทศแคนาดา ปี 2515 และปริญญาโท วทม.(โลหวิทยาและวัสดุศาสตร์) จากมหาวิทยาลัย Denver ประเทศสหรัฐอเมริกา ปี 2518 มีประสบการณ์และผลงานทางวิชาการด้านการสกัดโลหะจากแร่โดยกระบวนการ Hydrometallurgy ลงพิมพ์ในเอกสารการประชุมเหมืองแร่และโลหการที่จัดโดยภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ของ 3 มหาวิทยาลัยคือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และที่จัดโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เคยได้รับรางวัลประกาศนียบัตรชมเชยผลงานวิจัยดีเด่นประจำปี 2525 ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ รางวัลนักเขียนบทความดีเด่นประจำปี 2516 และ 2524 ของกรมทรัพยากรธรณี สถานที่ติดต่อได้ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. Mr.Phan Quang The อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย Thai Nguyen ประเทศเวียดนาม อายุ 45 ปี เกิดที่ประเทศเวียดนาม จบการศึกษาปริญญาตรี วศบ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัย Thai Nguyen ประเทศเวียดนาม ปริญญาโท วศม.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี Swinburne ประเทศออสเตรเลีย และกำลังศึกษาปริญญาเอกสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัย Hanoi ประเทศเวียดนาม ประสบการณ์และผลงานทางวิชาการด้าน Tribology และ Surface Coating ลงพิมพ์ในเอกสารการประชุมนานาชาติด้าน Tribology and Coatings ครั้งที่ 6 ที่ประเทศอังกฤษ และในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของเวียดนาม สถานที่ติดต่อได้ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thai Nguyen University, Thai Nguyen, Vietnam.