

การศึกษาผลของความเร็วการตัด กำลังของเลเซอร์ และแรงดันแก๊สช่วยตัด ต่อสมบัติ

และโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์บนแผ่นโลหะผสมไทเทเนียม



นายวาริท โปษยานนท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF EFFECT OF CUTTING SPEED, LASER POWER AND ASSIST GAS PRESSURE
ON PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE AT LASER CUTTING AREA
OF TITANIUM ALLOY SHEET



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาผลของความเร็วการตัด กำลังของเลเซอร์ และ
แรงดันแก๊สช่วยตัด ต่อสมบัติและโครงสร้างจุลภาคบริเวณ
รอยตัดด้วยเลเซอร์บนแผ่นโลหะผสมไทเทเนียม

โดย

นายวาริท โปษยานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วาริท โปษยานนท์ : การศึกษาผลของความเร็วการตัด กำลังของเลเซอร์ และแรงดันแก๊สช่วยตัด ต่อสมบัติและโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์บนแผ่นโลหะผสมไทเทเนียม (STUDY OF EFFECT OF CUTTING SPEED, LASER POWER AND ASSIST GAS PRESSURE ON PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE AT LASER CUTTING AREA OF TITANIUM ALLOY SHEET) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน, 200 หน้า.

โลหะไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V เป็นโลหะที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอากาศยานและทางการแพทย์ เนื่องจากความแข็งแรงที่สูง การขึ้นรูปเบื้องต้นด้วยกรรมวิธีการตัดด้วยเลเซอร์จึงสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ แต่เนื่องจากวิธีนี้ทำให้เกิดความร้อนสูงและการหลอมละลายในบริเวณที่รอยตัดรวมถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างรุนแรงกับออกซิเจนรวมไปถึงไนโตรเจนที่เป็นแก๊สช่วยตัดด้วยนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการตัดคือ 1.กำลังของเลเซอร์ 2.ความดันแก๊สช่วยตัด 3.ความเร็วการตัด ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติของรอยตัดเพื่อให้สามารถทราบขีดจำกัดของการใช้งานและผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงด้วยต้นทุนที่ต่ำ ในงานวิจัยนี้จะทดสอบการตัดแผ่นโลหะไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V หนา 2 มิลลิเมตร โดยใช้ไฟเบอร์เลเซอร์ขนาดกำลัง 3000 วัตต์ ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยตัด และตรวจวัดความลึกและลักษณะของชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคที่เป็นผลจากความร้อน รวมไปถึงเฟสที่เกิด ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและการกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณรอยตัด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วการตัดจะทำให้ความหนาชั้นที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนลดลง เพื่อความสม่ำเสมอและคุณภาพรอยตัดดีที่สุดควรความดันแก๊สที่เหมาะสมไม่สูงหรือต่ำเกินไป ในส่วนของกำลังของเลเซอร์นั้นผลกระทบเมื่อใช้กำลังของเลเซอร์ต่ำมากเนื่องจากน้ำโลหะที่อุณหภูมิต่ำมีความหนืดสูงกว่าจึงค้างอยู่บริเวณรอยตัดมากกว่าส่งผลให้ความเท่ากันของความลึกของชั้นดังกล่าวเปลี่ยนไป การเพิ่มความดันแก๊สช่วยตัดสามารถลดผลกระทบนี้ได้ ในส่วนของโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าการแพร่เข้าของออกซิเจนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และพบเฟสที่มีไนโตรเจนสูงฝังอยู่ภายในชั้นหลอมละลายซึ่งแข็งและเปราะ หากต้องการชิ้นงานคุณภาพสูงต้องกำจัดชั้นเหล่านี้

ภาควิชา	วิศวกรรมโลหการ	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2560	

5670531321 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS:

VARIT POSHYANANDA: STUDY OF EFFECT OF CUTTING SPEED, LASER POWER AND ASSIST GAS PRESSURE ON PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE AT LASER CUTTING AREA OF TITANIUM ALLOY SHEET. ADVISOR: ASST. PROF. BOONRAT LOHWONGWATANA, Ph.D., 200 pp.

Ti-6Al-4V alloy is widely used in Aerospace and Medical industries. Because of its high Hardness laser cutting method can help reduce production's costs but this process can cause an overheating, melting at a cutting area and the reactive character of Titanium will occur of a severe reaction with oxygen in the air including nitrogen which is an assist gas used in cutting process so we need to study about the effect of the main cutting parameter that is 1. power of laser 2. pressure of assist gas 3. cutting speed to microstructure transformation and the properties of cutting area to know the limitation of usage and to fabricate a high-quality part with lower cost. In this research will examine in cutting Ti-6Al-4V titanium metal sheet with 2mm thick by using fiber laser and nitrogen assist gas then inspect the depth and the character of the layer that having a change in their microstructure by the heat including evolution. The character of microstructure and the distribution of the elements around the cut. The test result shows that increase a cutting speed will decrease the thickness of the Heat-affected zone. An Appropriate gas pressure gives us an equality of Heat-affected zone (HAZ) and the better quality cut. In part of a laser power, when it too low due to a low temperature of a liquid metal that has a much high viscosity, therefore, it is stuck on a cut area and cause of unequal HAZ layer. However, increasing a gas pressure can reduce this effect. Meanwhile, we found out that there is only a little bit diffusion of oxygen into a surface microstructure, and there is a high nitrogen phase inside the recast layer that is hard and brittle. Finally, we have to remove those layers, for a completely perfect workpiece.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์ และ อาจารย์ ดร.เชษฐา พันธุ์เครือบุตร ที่สละเวลาคอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้งานวิจัยนี้ผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่คอยให้ความรู้ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา รวมถึงขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆมหาลัยทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. อัจฉรา คำกองแก้ว และ นางสาวจิตสุชา ดาราเย็น ที่คอยให้ความช่วยเหลือตลอดเวลาที่ทำการวิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และบุพพการีทุกท่านที่ได้อบรม และให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	1
สารบัญตาราง.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 โลหะไทเทเนียม.....	3
2.1.1.1 ประโยชน์และการใช้งานของโลหะไทเทเนียม.....	7
2.1.1.2 ผลจากออกซิเจนและไนโตรเจนต่อสมบัติของไทเทเนียม.....	7
2.1.1.3 ไนโตรเจน.....	9
2.1.1.4 Ti-6Al-4V.....	11
2.1.2 เทคโนโลยีเลเซอร์.....	13
2.1.2.1 เลเซอร์คืออะไร.....	13
2.1.2.2 ส่วนประกอบของเลเซอร์.....	14
2.1.2.3 ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	14

2.1.3 การตัดด้วยเลเซอร์.....	15
2.1.3.1 หลักการทำงาน	15
2.1.3.2 ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการตัดด้วยเลเซอร์.....	15
2.1.3.2.1 เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์.....	16
2.1.3.2.2 ไฟเบอร์เลเซอร์	16
2.1.3.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	17
2.2.2 โครงสร้างทางจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงเฟส	17
บทที่ 3 ระเบียบและวิธีการวิจัย.....	19
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย	19
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	19
3.1.2 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมผิวชิ้นงาน	20
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	21
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	22
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	22
3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบชิ้นงาน	24
3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค	25
3.2.4 การทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล	26
3.2.5 แผนผังสรุปกระบวนการทดลอง	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	28
4.1 ส่วนผสมทางเคมีของแผ่นโลหะไทเทเนียม Ti-6Al-4V ที่ได้รับ.....	28
4.2 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะไทเทเนียม Ti-6Al-4V ที่ได้รับ	28

4.3	กำลังของเลเซอร์ที่เริ่มตัดชิ้นงานได้สำเร็จต่อความเร็วการตัด	31
4.4	ลักษณะบริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์	35
4.5	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการตัดด้วยเลเซอร์	38
4.5.1	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคภายในรอยตัดด้วยเลเซอร์	38
4.5.2	การกระจายตัวของธาตุและเฟสที่เกิด	42
4.5.3	การทดสอบการดัดงอ	50
4.5.4	การทดสอบการแตกหัก	52
4.5.5	การทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	53
4.6	การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้น HAZ	56
4.7	ผลของความดันแก๊สช่วยตัดต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ	58
4.7.1	ชิ้นงานทดสอบผลของความดันแก๊สช่วยตัด	58
4.7.1.1	ชิ้นงานที่ D4	58
4.7.1.2	ชิ้นงานที่ D2	59
4.7.1.3	ชิ้นงานที่ A6N	60
4.7.1.4	ชิ้นงานที่ D1	61
4.7.1.5	ชิ้นงานที่ A7N	62
4.7.1.6	ชิ้นงานที่ D0	63
4.7.1.7	ชิ้นงานที่ A8N	64
4.7.2	วิเคราะห์ผลของความดันแก๊สช่วยตัดต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ	65
4.8	ผลของกำลังของเลเซอร์ต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ	68
4.8.1	ชิ้นงานทดสอบผลของกำลังของเลเซอร์	68
4.8.1.1	ชิ้นงานที่ A1	68
4.8.1.2	ชิ้นงานที่ B4N	69

4.8.1.3	ชิ้นงานที่ B1	70
4.8.1.4	ชิ้นงานที่ B5N	71
4.8.1.5	ชิ้นงานที่ D1	72
4.8.1.6	ชิ้นงานที่ A0	73
4.8.1.7	ชิ้นงานที่ A5	74
4.8.1.8	ชิ้นงานที่ B0	75
4.8.1.9	ชิ้นงานที่ B5	76
4.8.1.10	ชิ้นงานที่ D0	77
4.8.2	วิเคราะห์ผลของกำลังของเลเซอร์ต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ	78
4.9	ผลของความเร็วการตัดต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ	80
4.9.1	ชิ้นงานทดสอบผลของความเร็วการตัด	80
4.9.1.1	ชิ้นงานที่ D1	80
4.9.1.2	ชิ้นงานที่ B3N	81
4.9.1.3	ชิ้นงานที่ F2	82
4.9.1.4	ชิ้นงานที่ B1N	83
4.9.1.5	ชิ้นงานที่ G7	84
4.9.1.6	ชิ้นงานที่ B0N	85
4.9.1.7	ชิ้นงานที่ A9N	86
4.9.1.8	ชิ้นงานที่ D0	87
4.9.1.9	ชิ้นงานที่ B2N	88
4.9.1.10	ชิ้นงานที่ F1	89
4.9.1.11	ชิ้นงานที่ A5N	90
4.9.1.12	ชิ้นงานที่ G6	91

4.9.1.13	ชิ้นงานที่ A4N.....	92
4.9.1.14	ชิ้นงานที่ A3N.....	93
4.9.2	วิเคราะห์ผลของความเร็วการตัดต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ	94
บทที่ 5	สรุปผล และข้อเสนอแนะ	96
5.1	สรุปผล.....	96
5.2	ข้อเสนอแนะ	97
รายการอ้างอิง	98
ภาคผนวก ก	(ตารางแสดงผลการวัดความลึกชั้น HAZ)	102
ภาคผนวก ข	(ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงด้วยเทคนิคโพลาไรซ์ของชิ้นงานต่าง ๆ).....	104
ภาคผนวก ค	(ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่พบ).....	137
ภาคผนวก ง	(ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบบริเวณโครงสร้างต่างๆ).....	154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	200

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	แผนภาพแสดงความแข็งแรงของโลหะชนิดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [3].....	5
รูปที่ 2.2	โครงสร้างผลึกแบบ HCP และ BCC [4].....	5
รูปที่ 2.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเฟสและสมบัติทางกล [6].....	7
รูปที่ 2.4	Ellingham diagram [8]	8
รูปที่ 2.5	เฟสไดอะแกรมของไทเทเนียมและออกซิเจน [9].....	9
รูปที่ 2.6	เฟสไดอะแกรมของไทเทเนียมและไนโตรเจน [9]	10
รูปที่ 2.7	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Gibbs Free energy ของปฏิกิริยาการเกิด สารประกอบระหว่างไนโตรเจนกับธาตุต่างๆ [10]	10
รูปที่ 2.8	แผนภาพแสดงเฟสต่างๆที่เกิดในโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่อัตราการเย็นตัวต่างๆ [12].....	12
รูปที่ 2.9	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ Ti-6Al-4V ที่เกิดที่อัตราการเย็นตัวต่างๆ [13].....	12
รูปที่ 2.10	การเกิดแสงเลเซอร์จากการกระตุ้นอิเล็กตรอน [14]	13
รูปที่ 2.11	การเกิดแสงเลเซอร์ที่มีเฟสตรงกัน [14]	13
รูปที่ 2.12	ส่วนประกอบต่างๆของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ [15].....	14
รูปที่ 2.14	การลำเลียงแสงในระบบของเครื่องตัดด้วยเลเซอร์ [16].....	15
รูปที่ 2.16	แสดงการเกิดแสงเลเซอร์ในไฟเบอร์เลเซอร์ [17]	16
รูปที่ 2.17	ผิวของรอยตัดด้วยเลเซอร์ที่ใช้อาร์กอน (ซ้าย) และไนโตรเจน (ขวา) เป็นแก๊สช่วยตัด [28]	18
รูปที่ 3.1	เครื่อง BySprint Fiber 3015 และ Fiber 3000 [29]	19
รูปที่ 3.2	ตัวอย่างแผ่นไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V [30]	20
รูปที่ 3.3	เครื่องพับโลหะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ [31]	21
รูปที่ 3.4	แสดงลักษณะการตัดชิ้นงานตัวอย่าง.....	22
รูปที่ 3.5	แสดงตำแหน่งที่จะทำการศึกษาลักษณะผิวรอยตัด	24
รูปที่ 3.6	แสดงตำแหน่งที่จะทำการตัดชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค	24

รูปที่ 3.7	แสดงการพับชิ้นงานและตำแหน่งที่จะทำการศึกษาสมบัติของผิวรอยตัด.....	24
รูปที่ 4.1	โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะไทเทเนียม Ti-6Al-4V ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
รูปที่ 4.2	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงเฟส α (สีอ่อน) และ β (สีเข้ม) พร้อมตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิค EDS ใน ตารางที่ 4.2.....	30
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัดและกำลังของเลเซอร์ ที่เริ่มตัดสำเร็จ	34
รูปที่ 4.4	บริเวณด้านบนของรอยตัด แสดงชิ้นงานที่ตัดไม่สำเร็จเนื่องจากกำลังของเลเซอร์ต่ำไป (3 ชิ้นจากบน) และชิ้นงานที่สามารถตัดได้สำเร็จ (ชิ้นล่าง).....	35
รูปที่ 4.5	บริเวณด้านล่างของรอยตัด แสดงชิ้นงานที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดต่ำเกินไป (2 ชิ้นจากบน) และชิ้นงานที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดมากพอ (2 ชิ้นจากล่าง)	36
รูปที่ 4.6	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงร่องตัดขนาด 0.24 มิลลิเมตร	36
รูปที่ 4.7	ลักษณะบริเวณผิวรอยตัดเมื่อใช้ความดันแก๊สช่วยตัดที่ 1 , 4 และ 16 bar.....	37
รูปที่ 4.8	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงลักษณะโครงสร้างคล้ายถุงหุ้ม น้ำโลหะในบริเวณผิวรอยตัด.....	37
รูปที่ 4.9	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด แสดงชั้นของรอยตัด	39
รูปที่ 4.10	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด แสดงลักษณะ ของชั้น RC และชั้น HAZ	39
รูปที่ 4.11	ชิ้นงานที่ A1 ความดันแก๊สช่วยตัดที่ 8bar ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW	40
รูปที่ 4.12	หยดน้ำโลหะที่ค้างอยู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานที่ A1 ความดันแก๊สช่วยตัด ที่ 8bar ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW.....	40
รูปที่ 4.13	หยดน้ำโลหะที่ค้างอยู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานที่ A1 ความดันแก๊สช่วยตัด ที่ 8bar ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW ด้วยเทคนิค DIC	41
รูปที่ 4.14	หยดน้ำโลหะที่ค้างอยู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานที่ A1 ความดันแก๊สช่วยตัด ที่ 8bar ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW ด้วยเทคนิค DIC	41

รูปที่ 4.15 ตำแหน่งที่วิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิค EDS บริเวณเนื้อพื้นของ ชั้นหลอมละลาย	42
รูปที่ 4.16 การเกิดเฟสที่มีไนโตรเจนสูงภายในชั้นหลอมละลาย	43
รูปที่ 4.17 ภาพจากเทคนิค EDS Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บริเวณผิวรอยตัด และเดนไดรต์ของเฟสที่มีไนโตรเจนสูง	44
รูปที่ 4.18 ผิวรอยตัด แสดงบริเวณที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่พบรูพรุน	45
รูปที่ 4.19 ภาพแสดงพื้นผิวบริเวณรอยตัดที่วิเคราะห์ด้วย EDS Mapping	46
รูปที่ 4.20 ภาพจากเทคนิค SEM Secondary Electron แสดงบริเวณชั้นหลอมละลายที่ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS Mapping (ซ้ายบน), ภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุ ไทเทเนียม (ขวาบน), ภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุออกซิเจน (ซ้ายกลาง), ภาพ แสดงการกระจายตัวของธาตุไนโตรเจน (ขวากลาง) และกราฟแสดงปริมาณของธาตุ ที่ตรวจพบในบริเวณภายใน	47
รูปที่ 4.21 หยดน้ำโลหะทรงกลมที่พบบริเวณผิวรอยตัด	48
รูปที่ 4.22 ภาพแสดงทรงกลมของหยดน้ำโลหะบนผิวรอยตัดที่วิเคราะห์ด้วย EDS Mapping.....	49
รูปที่ 4.23 รอยแตกบริเวณชั้นหลอมละลายของชิ้นงานที่ผ่านการตัดงอ (ซ้าย) และรอยแยก ระหว่างชั้นหลอมละลายและชั้น HAZ (ขวา)	50
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมที่วัดได้จากเทคนิค EDS โดยใช้เครื่อง Oxford X-act (ซ้าย) และภาพจาก เทคนิค SEM Secondary Electron แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS (ขวา)	51
รูปที่ 4.25 พื้นผิวที่เกิดการแตกหักแสดงการแยกตัวระหว่างชั้น RC, HAZ และเนื้อพื้นเดิม (Base)	52
รูปที่ 4.26 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด แสดงรอยจากการยิงเลเซอร์.....	53
รูปที่ 4.27 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงผิวเดิมก่อนการทดสอบยิง เลเซอร์ (บน), เฟสที่เกิดจากการยิงด้วยเลเซอร์ภายใต้แก๊สไนโตรเจน (กลาง) และ รอยแตกขนาดเล็กบริเวณเฟสที่เกิด (ล่าง).....	54
รูปที่ 4.28 ภาพจากเทคนิค EDS Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุ ไนโตรเจนและ ออกซิเจน บริเวณรอยจากการยิงเลเซอร์	55

รูปที่ 4.29 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดความลึกชั้น HAZ.....	56
รูปที่ 4.30 ภาพจากเทคนิคโพลาไรซ์แสดงชั้น RC, HAZ และ เนื้อพื้นเดิม	57
รูปที่ 4.31 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D4.....	58
รูปที่ 4.32 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D2.....	59
รูปที่ 4.33 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A6N	60
รูปที่ 4.34 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D1.....	61
รูปที่ 4.35 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A7N	62
รูปที่ 4.36 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D0.....	63
รูปที่ 4.37 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A8N	64
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้น HAZ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความดันแก๊สช่วยตัด.....	66
รูปที่ 4.39 ลักษณะชั้น RC ของชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัด 1 bar (ซ้าย) และ 16 bar (ขวา)	67
รูปที่ 4.40 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A1.....	68
รูปที่ 4.41 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B4N	69
รูปที่ 4.42 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B1.....	70
รูปที่ 4.43 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B5N	71
รูปที่ 4.44 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D1.....	72
รูปที่ 4.45 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A0.....	73
รูปที่ 4.46 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A5.....	74
รูปที่ 4.47 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B0.....	75
รูปที่ 4.48 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B5.....	76
รูปที่ 4.49 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D0.....	77
รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความแตกต่างของชั้น HAZ เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์.....	79

รูปที่ 4.51	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D1.....	80
รูปที่ 4.52	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B3N	81
รูปที่ 4.53	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ F2.....	82
รูปที่ 4.54	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B1N	83
รูปที่ 4.55	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ G7.....	84
รูปที่ 4.56	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B0N	85
รูปที่ 4.57	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A9N	86
รูปที่ 4.58	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D0.....	87
รูปที่ 4.59	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B2N	88
รูปที่ 4.60	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ F1	89
รูปที่ 4.61	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A5N.....	90
รูปที่ 4.62	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ G6.....	91
รูปที่ 4.63	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A4N	92
รูปที่ 4.64	ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A3N.....	93
รูปที่ 4.65	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัดและความลึกของชั้น HAZ ที่กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar.....	95
รูปที่ 4.66	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัดและความลึกของชั้น HAZ ที่กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สมบัติทางกลต่อความหนาแน่นของโลหะไทเทเนียมและโลหะอื่นๆ [2]	3
ตารางที่ 2.2	สมบัติทางกลของโลหะไทเทเนียมที่ส่วนผสมต่างๆ [2]	4
ตารางที่ 2.3	ผลของธาตุผสม ในโลหะไทเทเนียม [5].....	6
ตารางที่ 2.4	สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) [7]	8
ตารางที่ 2.5	แสดงสมบัติของไทเทเนียม Ti-6Al-4V [11]	11
ตารางที่ 3.1	แสดงประสิทธิภาพของเครื่อง BySprint Fiber 3015 และ Fiber 3000 [19]	19
ตารางที่ 3.2	ช่วงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัด.....	23
ตารางที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบ	26
ตารางที่ 4.1	ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
ตารางที่ 4.2	ปริมาณธาตุประกอบภายในเฟส α และ β จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS	30
ตารางที่ 4.3	ผลการตัดด้วยความเร็วและกำลังต่างๆ ที่ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar แสดงช่วงที่ตัดสำเร็จ (บริเวณสีเขียว) และช่วงที่ตัดไม่สำเร็จ (บริเวณสีแดง).....	33
ตารางที่ 4.4	ปริมาณธาตุประกอบบริเวณชั้น RC และเฟสอื่นที่พบ.....	42
ตารางที่ 4.5	ส่วนผสมทางเคมีของทรงกลมของหยดน้ำโลหะที่พบบนผิวรอยตัด.....	49
ตารางที่ 4.6	ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D4	58
ตารางที่ 4.7	ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D2	59
ตารางที่ 4.8	ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A6N.....	60
ตารางที่ 4.9	ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D1	61
ตารางที่ 4.10	ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A7N	62
ตารางที่ 4.11	ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D0.....	63
ตารางที่ 4.12	ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A8N	64
ตารางที่ 4.13	แสดงค่าความลึกชั้น HAZ ที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สช่วยตัด เมื่อใช้กำลังของเลเซอร์ 3000 W และ ความเร็วการตัด 4000 mm/min	66

ตารางที่ 4.37 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชั้นงานที่ A4N	92
ตารางที่ 4.38 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่างๆ ที่วัดได้จากชั้นงานที่ A3N	93
ตารางที่ 4.39 แสดงค่าความลึกชั้น HAZ ที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วการตัด เมื่อใช้กำลังของเลเซอร์ 3000 Watt.....	94



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

โลหะไทเทเนียมเป็นโลหะที่เริ่มมีการนำมาใช้งานมากขึ้นเรื่อย ๆ อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่นในงานที่ต้องการโลหะที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และทนต่อการกัดกร่อน ทั้งในทางอากาศยาน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ไปจนถึงทางการแพทย์ในกลุ่มที่ต้องฝังเข้าไปในร่างกายมนุษย์เพื่อรักษาอาการต่าง ๆ เช่นยึดกระดูกที่แตกหักเป็นต้น เนื่องจากสมบัติพิเศษของไทเทเนียมผสมบางชนิดสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อและกระดูกของมนุษย์ได้ดี แต่เพราะความแข็งของไทเทเนียมส่งผลให้การขึ้นรูปสามารถทำได้ยากและเกิดความสึกหรอของเครื่องมือสูง ทำให้ต้นทุนในการขึ้นรูปของโลหะไทเทเนียมนั้นสูงกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ การตัดด้วยเลเซอร์นั้นเป็นเทคโนโลยีในสมัยใหม่ที่ใช้ลำแสงเลเซอร์เป็นแหล่งพลังงานในการหลอมละลายเนื้อโลหะเป็นบริเวณที่เล็กมากและใช้แรงดันแก๊สเป่าให้โลหะหลอมเหลวหลุดออกไป ความแข็งของวัสดุที่ต้องการตัดจึงไม่ใช่ปัญหาของวิธีนี้ ดังนั้นการขึ้นรูปจากการตัดด้วยเลเซอร์จึงสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขึ้นรูปได้ แต่วิธีนี้ยังคงมีข้อเสียคือ เกิดความร้อนสูง มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณที่ได้รับความร้อน (HAZ) และชั้นหลอมละลาย (RC) บริเวณรอยตัด และเนื่องด้วยสมบัติที่ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาสารประกอบของไทเทเนียมนี้เอง ส่งผลให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ขึ้นบริเวณที่ได้รับความร้อนเช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ และไทเทเนียมออกไซด์ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะศึกษารอยตัดที่เกิดขึ้นโดยเฉพาสภาวะที่ใช้ในการตัด เพื่อนำผลที่ได้ไปพัฒนาปรับปรุงกรรมวิธีการตัดด้วยเลเซอร์ให้ได้รอยตัดที่มีคุณภาพสูงขึ้นและมีต้นทุนที่ต่ำลง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ทราบผลของความเร็วการตัด ความดันแก๊สช่วยตัด และกำลังของเลเซอร์ต่อสมบัติและโครงสร้างทางจุลภาคของรอยตัดที่ตัดด้วย Fiber Laser บนโลหะผสมไทเทเนียม (6%Al 4%V) เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการตัดขึ้นงานโลหะไทเทเนียมด้วยเลเซอร์
2. เข้าใจถึงลักษณะของรอยตัดด้วยเลเซอร์ และจุดบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น
3. สามารถเข้าใจถึงกลไกที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดด้วยเลเซอร์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในการวิจัยนี้จะทำการทดสอบการตัดแผ่นโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่มีธาตุผสม 6%Al และ 4%V ด้วยเครื่องตัดโลหะที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิด Fiber Laser ขนาดกำลังสูงสุด 3000W (สามารถปรับกำลังได้) และใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยตัด โดยจะตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและบริเวณที่จะนำมาศึกษา คือรอยตัดตำแหน่งที่แผ่นโลหะจะถูกตัดเป็นเส้นตรง ในส่วนของตัวแปรที่จะทำการศึกษาได้ถูกยกตัวแปรหลักที่สำคัญมาสามตัวแปร คือ

- 1.ความเร็วการตัด
- 2.กำลังของเลเซอร์
- 3.ความดันแก๊สช่วยตัด

ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ จะถูกทดสอบคัดเลือกค่าต่าง ๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำมาทำการทดลองตัดชิ้นงาน หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ถูกตัดด้วยตัวแปรข้างต้นที่ค่าต่าง ๆ กัน แล้วจึงวิเคราะห์คุณภาพรอยตัดที่ได้ไปจนถึงสมบัติของรอยตัด เช่น HAZ, Micro crack, Recast Layer, Splatter zone เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ และผลจากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อรอยตัด

1.4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.สามารถปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้เหมาะสมกับวัสดุยิ่งขึ้น ส่งผลได้ได้รอยตัดที่มีคุณภาพสูง และยังสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการตัดชิ้นงานได้
- 2.สามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปปรับใช้ในการพัฒนาการตัดโลหะชนิดอื่น ๆ ด้วยเลเซอร์
- 3.สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 โลหะไทเทเนียม

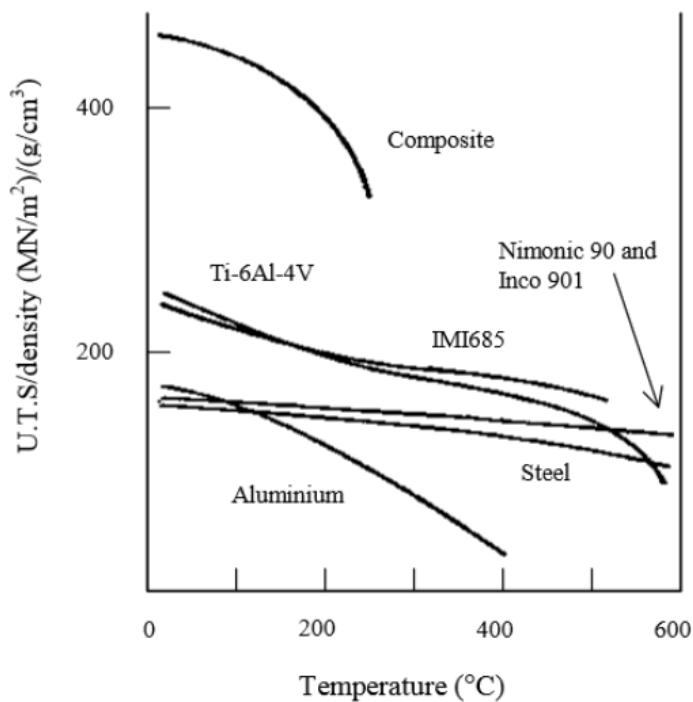
ไทเทเนียมเป็นธาตุในกลุ่มโลหะที่สามารถพบได้มากที่สุดเป็นอันดับที่ 9 บนชั้นผิวโลก มีสัญลักษณ์ “ Ti ” ตามตารางธาตุ ไทเทเนียมมีเลขอะตอม 22 มวลอะตอม 47.90 กรัมต่อโมล โดยทั่วไปจะพบธาตุไทเทเนียมบนผิวโลกในรูปของแร่รูไทล์ (Rutile TiO_2) ที่พบได้มากใน ออสเตรเลีย และแอฟริกาใต้ หลังจากนำแร่รูไทล์มาถลุงและผ่านกรรมวิธีทางเคมี จะได้โลหะไทเทเนียมที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1670 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 4.51 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โมดูลัสของยังอยู่ในช่วง 80 ถึง 125 GPa มีความแข็งแรงสูง ค่าความเค้นจุดครากต่อความหนาแน่นอยู่ที่ $78 (\times 10^6 N.m.kg^{-1})$ ความทนต่อความเค้นแรงดึงต่อความหนาแน่นถึง $107 (\times 10^6 N.m.kg^{-1})$ ในกรณีที่ไม่มีการผสมธาตุผสมใด ๆ ซึ่งเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ ตาม ตารางที่ 2.1 แล้ว จะพบได้ว่า โลหะไทเทเนียมมีความแข็งแรงต่อความหนาแน่นสูงมากเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ และยิ่งเมื่อเพิ่มธาตุผสมให้โลหะไทเทเนียมแล้วคุณสมบัติทางกลของไทเทเนียมจะยิ่งดีขึ้นไปอีก ดังใน ตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ โลหะผสมไทเทเนียมยังสามารถคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 (40-500 องศาเซลเซียส) [1, 2]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลต่อความหนาแน่นของโลหะไทเทเนียมและโลหะอื่น ๆ [2]

วัสดุ	ความเค้นจุดครากต่อความหนาแน่น ($\times 10^6 N.m.kg^{-1}$)	ความทนต่อความเค้นแรงดึงต่อความหนาแน่น ($\times 10^6 N.m.kg^{-1}$)	ความต้านทานการล้า 10^7 ที่รอบต่อความหนาแน่น ($\times 10^6 N.m.kg^{-1}$)
ไทเทเนียม ASTM เกรด 2	78	107	54
Ti-6Al-4V	206	226	135
Ti-10V-2Fe-3Al	264	282	155
Maraging Steel	170	202	121
FV 520 B Steel	153	165	105
13% Cr Stainless Steel	95	105	68
18/8 Stainless Steel	68	75	40

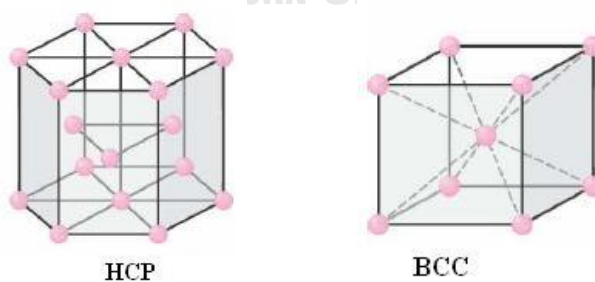
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของโลหะไทเทเนียมที่ส่วนผสมต่าง ๆ [2]

วัสดุ	0.2% Proof (MPa)	Tens. Str. (MPa)	Fatigue Limit (%of Tens.Str)	Elong. (%)	Red. Of Area (%)	Elastic Modulus (GPa)
ไทเทเนียม ASTM เกรด 1	172	241	50	25	35	103
ไทเทเนียม ASTM เกรด 2	276	345	50	20	35	103
ไทเทเนียม ASTM เกรด 3	379	448	50	18	35	103
ไทเทเนียม ASTM เกรด 3	483	552	50	15	30	104
Ti-3%Al-2.5%V	483	621	-	15	-	91
Ti-6%Al-4%V	828	897	55-60	10	20	114
Ti-2.5%Cu	400	540	-	16	35	-
Ti-4%Al-4%Mo-2%Sn-0.5%Si	959	1104	50-60	9	38	114
Ti-6%Al-6%V-2%Sn	966	1035	50-60	8	15	-
Ti-10%V-2%Fe-3%Al	1104	1241	50	-	-	103
Ti-15%V-3%Cr-3%Sn-3%Al	966	1000	-	7	-	103
Ti-8%Al-1%Mo-1%V	828	897	-	10	20	117



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงความแข็งแรงของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [3]

โดยทั่วไปโลหะไทเทเนียมจะมีโครงสร้างผลึกสองชนิดคือ HCP (Hexagonal Close Packed) จะเรียกว่าเฟส แอลฟา α ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำ และ BCC (Body Centered Cubic) เรียกว่าเฟส บีตา β เป็นเฟสที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง การเติมธาตุผสมลงไปในโลหะไทเทเนียมจะส่งผลให้สามารถเพิ่มหรือลดความเสถียรของโครงสร้างแต่ละชนิดได้ ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบ HCP และ BCC [4]

ตารางที่ 2.3 ผลของธาตุผสม ในโลหะไทเทเนียม [5]

Alloying Element	Range (wt%)	Effect on structure
Aluminum	2 - 7	Alpha stabilizer
Tin	2 - 6	Alpha stabilizer
Molybdenum	2 - 20	Beta stabilizer
Chromium	2 - 12	Beta stabilizer
Copper	2 - 6	Beta stabilizer
Zirconium	2 - 8	Alpha and Beta Strengthening
Silicon	0.2 - 1	Improve creep resistance

เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสคือการเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างผลึก ดังนั้นผลจากธาตุผสม จึงทำให้สมบัติของโลหะผสมเปลี่ยนไปด้วย สมบัติทางกลที่เป็นผลจากเฟสที่ต่างกันของโลหะไทเทเนียม เช่น

1. **α Alloy** มีความแข็งแรงและความแกร่งสูง สามารถต้านทานความคืบได้ดี และเชื่อมได้ง่าย และเนื่องจากเฟสนี้ ไม่มีจุดเปลี่ยนจากการแตกแบบเหนียวเป็นแบบเปราะ จึงสามารถนำไปใช้ในที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ ได้ดี
2. **$\alpha + \beta$ Alloy** สามารถใช้กรรมวิธีทางความร้อนควบคุมให้เกิดการตกตะกอน ของ β ในเนื้อพื้น α ได้ ส่งผลให้สามารถสร้างวัสดุที่มีสมบัติทางกลหลากหลายตามอัตราส่วนธาตุผสมและกรรมวิธีทางความร้อน โลหะผสมชนิดนี้โดยส่วนใหญ่จะสามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิห้อง และสามารถคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ปานกลาง
3. **β Alloy** เกิดจากการทำ Solution treatment เพื่อให้ได้โครงสร้างเป็น β ทั้งหมด มีคุณสมบัติคือ ความแกร่งและความเหนียวสูง ความแข็งแรงต่ำ แต่สามารถขึ้นรูปได้ดี เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของ α เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การใช้งานของโลหะชนิดนี้จึงไม่เหมาะกับสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงเพราะจะเกิดการ Over aged ได้

α alloys	Unalloyed titanium Ti-5Al-2.5Sn	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> <p style="text-align: center;">-Higher density -Increasing heat treatment response -Higher short time strength -Increasing strain rate sensitivity -Improved fabricability</p> </div> <div style="flex: 1; text-align: center;"> <p style="font-size: 2em;">↑</p> </div> </div>
Near- α	Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	
$\alpha+\beta$ alloys	Ti-6Al-4V Ti-6Al-2Sn-6V	
Near- β	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Ti-3Al-10V-2Fe	
β alloys	Ti-13V-11Cr-3Al Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเฟสและสมบัติทางกล [6]

2.1.1.1 ประโยชน์และการใช้งานของโลหะไทเทเนียม

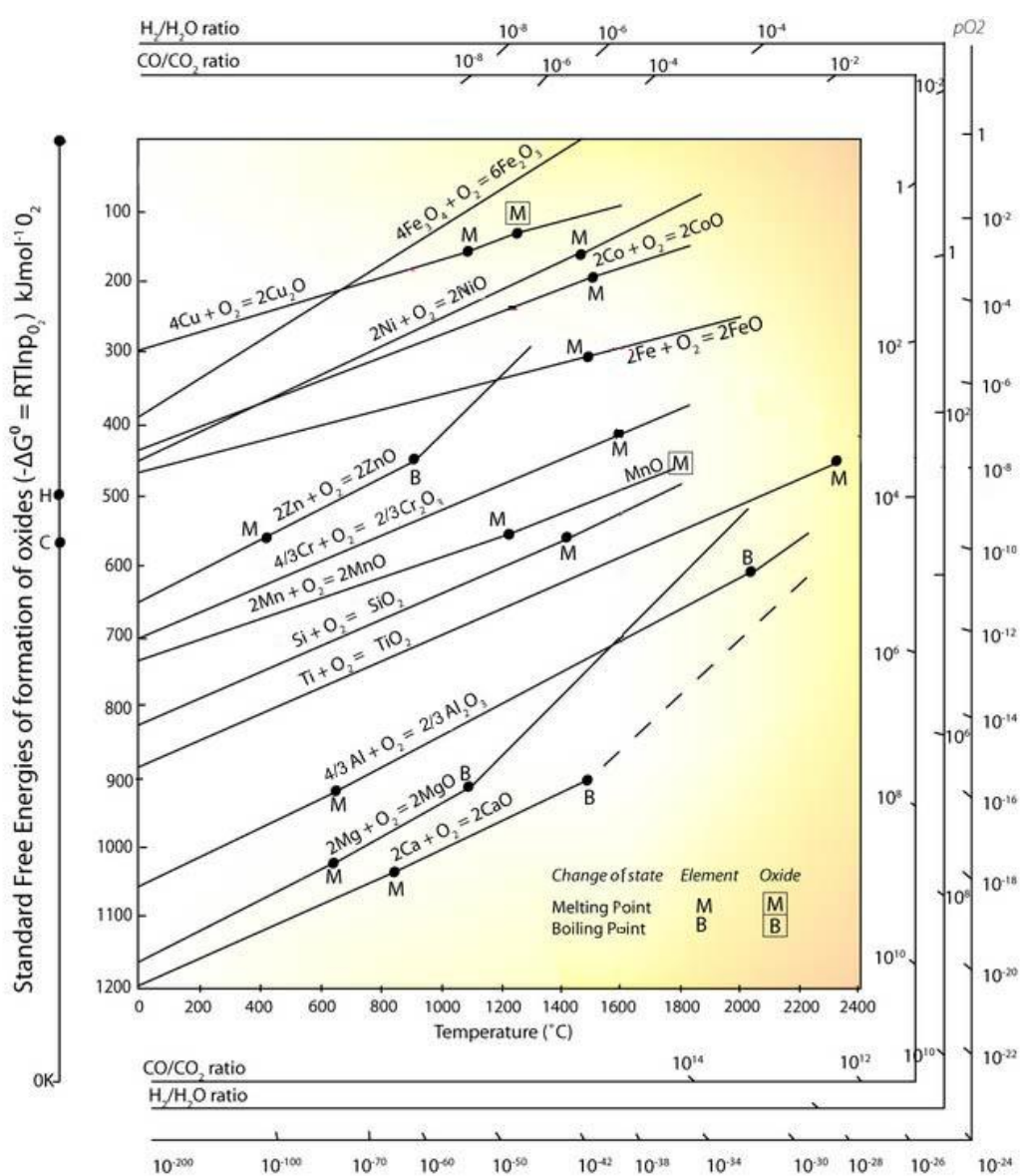
โลหะไทเทเนียมสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดี และทนต่อสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อน เนื่องจากไทเทเนียมไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและเกิดสารประกอบออกไซด์และไนไตรด์ชั้นที่ผิว แต่สารประกอบเหล่านี้จะเกิดเป็นชั้นเคลือบผิวและสามารถช่วยป้องกันและยับยั้งการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อม ในปัจจุบันมีการนำโลหะไทเทเนียมไปใช้ใน อวกาศและอากาศยาน รถยนต์ประสิทธิภาพสูง การใช้งานทางทะเล และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากทนทานต่อการกัดกร่อน ความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา รวมไปถึงทางการแพทย์ที่ใช้ฝังเข้าไปในร่างกายผู้ป่วยเพื่อช่วยทดแทนหรือยึดกระดูกที่แตกหักเข้าไว้ด้วยกันเพราะไทเทเนียมสามารถเข้ากับร่างกายได้ดีไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้จากการต่อต้านของเซลล์เนื้อเยื่อ และเซลล์กระดูกยังสามารถมายึดเกาะกับไทเทเนียมได้อีกด้วย

2.1.1.2 ผลจากออกซิเจนและไนโตรเจนต่อสมบัติของไทเทเนียม

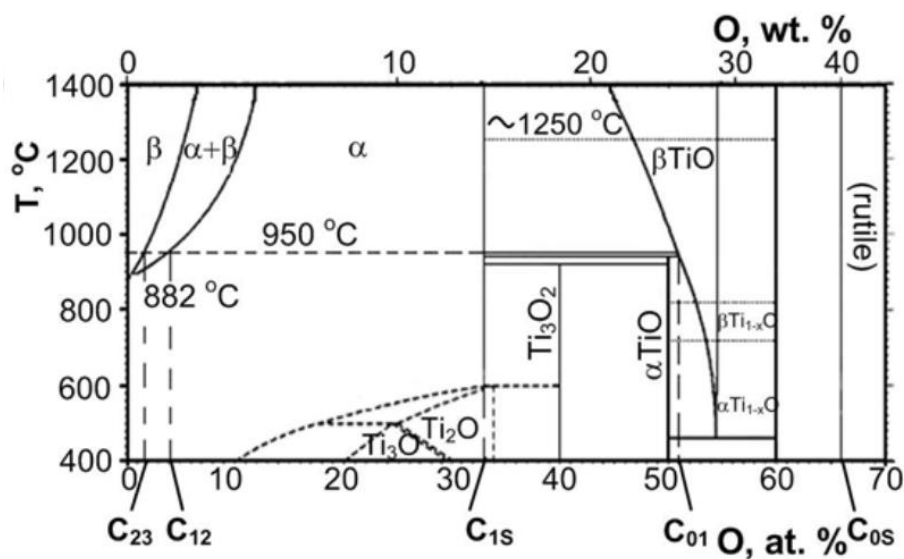
ไทเทเนียมเป็นโลหะที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจึงสามารถเกิดสารประกอบออกไซด์ของไทเทเนียมได้ง่าย และยังสามารถเกิดออกไซด์ได้ง่ายขึ้นมากที่อุณหภูมิสูง สามารถพบได้ในรูปของ TiO TiO_2 Ti_2O_3 Ti_3O_5 โดยมากจะพบ TiO_2 เป็นหลัก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้มีความแข็งแรง ยึดติดกับผิวได้ดีเกิดเป็นฟิล์มบางช่วยปกป้องเนื้อโลหะจากการเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ออกซิเจนมีความสามารถที่จะแพร่เข้าสู่โลหะไทเทเนียมอย่างรวดเร็วและละลายแบบ Interstitial ในโลหะไทเทเนียม ส่งผลให้เฟส α มีความเสถียรเพิ่มขึ้นทำให้เกิดชั้น Alpha case ที่มีความแข็งแรงและเปราะ

ตารางที่ 2.4 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) [7]

Molecular Weight (g/mol.)	80
Density (g/cm ³)	4.23
Specific Gravity	3.9- 4.2
Melting Point (°C)	1830- 1850
Boiling Point (°C)	2500- 3000



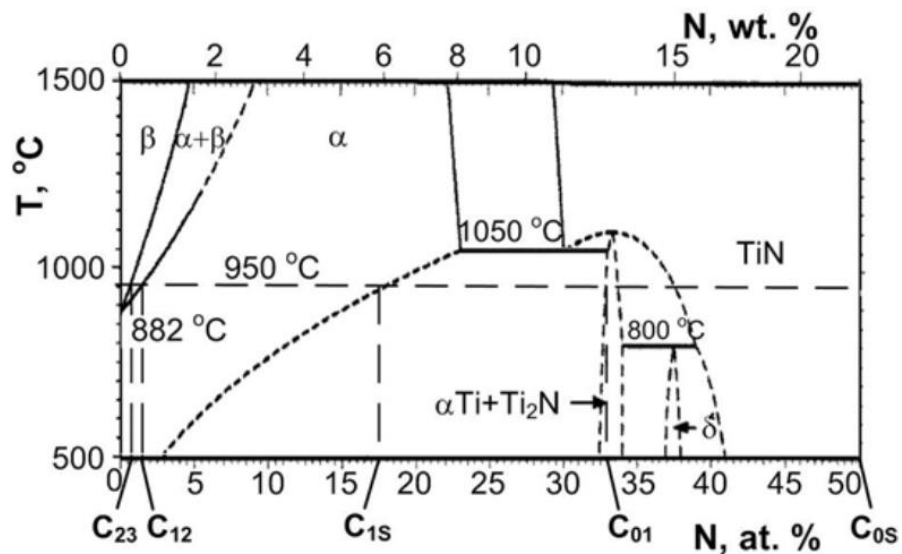
รูปที่ 2.4 Ellingham diagram [8]



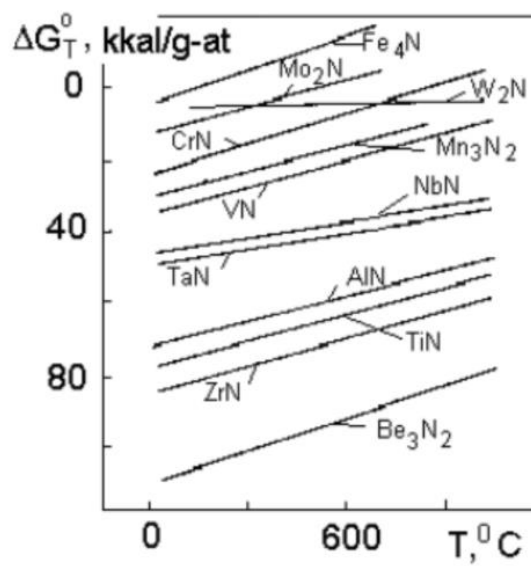
รูปที่ 2.5 เฟสไดอะแกรมของไทเทเนียมและออกซิเจน [9]

2.1.1.3 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนสามารถเกิดสารประกอบระหว่างไทเทเนียมได้ ทั่วไปพบในรูปของ Ti_2N และ TiN มีความแข็งสูงมาก เมื่อเกิดเป็นชั้นของไนไตรด์อยู่ที่ผิวของโลหะไทเทเนียม อาจทำให้ความแข็งผิวเพิ่มสูงได้ถึง 2000 HV จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาโดยเฉพาะในการตัดแผ่นโลหะไทเทเนียมด้วยเลเซอร์ เนื่องจากแก๊สช่วยตัดที่ใช้ในเครื่องตัดเลเซอร์จะใช้ไนโตรเจนเป็นหลักและเกิดความร้อนสูงในบริเวณที่ตัดด้วย จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดไนไตรด์ของไทเทเนียมปนอยู่ในบริเวณรอบรอยตัดและบริเวณหลอมละลาย ทำให้ชั้นหลอมละลายมีความสามารถในการต้านทานความล้าลดลงเนื่องจากผลึกของไนไตรด์ที่เกิดอาจเป็นศูนย์รวมความเค้นในบริเวณนั้นได้ ไนโตรเจนนั้นสามารถแพร่เข้าสู่ผิวของโลหะไทเทเนียมได้เช่นกัน แต่ช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับออกซิเจน และไม่พบการปนเปื้อนอย่างรุนแรง ไนโตรเจนสามารถใช้เป็นแก๊สคลุมในการขึ้นรูปโลหะไทเทเนียมได้ แต่อย่างไรก็ตามหากมีการละลายของไนโตรเจนในโลหะไทเทเนียมซึ่งละลายแบบ Interstitial จะส่งผลให้เฟส α มีความเสถียรเพิ่มขึ้นทำให้เกิดชั้น Alpha case ที่มีความแข็งและเปราะเช่นกัน



รูปที่ 2.6 เฟสไดอะแกรมของไทเทเนียมและไนโตรเจน [9]



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Gibbs Free energy ของปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบระหว่างไนโตรเจนกับธาตุต่าง ๆ [10]

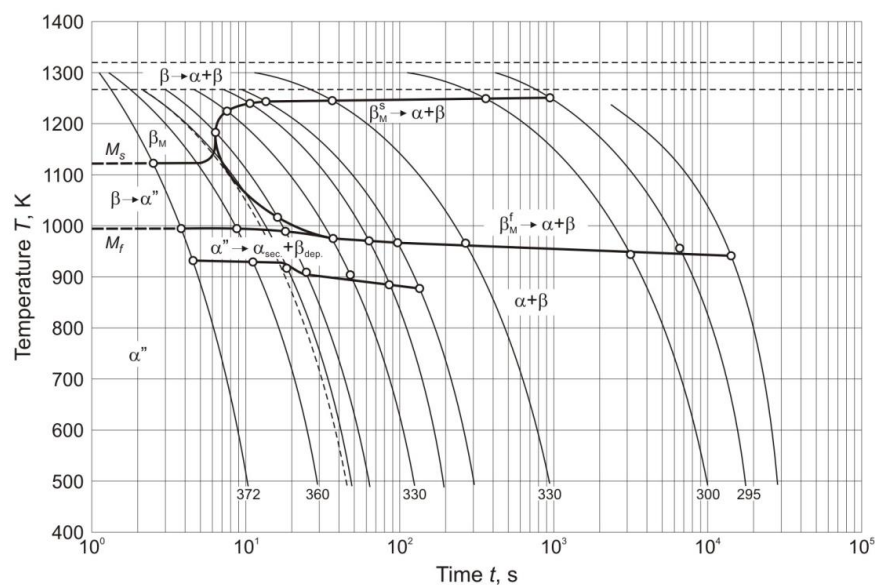
2.1.1.4 Ti-6Al-4V

ไทเทเนียมอัลลอยด์ที่มีส่วนผสมของ อะลูมิเนียม 6% และ วาเนเดียม 4% ทำให้มีโครงสร้างเป็นเฟส $\alpha + \beta$ เนื่องจากสมบัติของอะลูมิเนียมที่ช่วยเพิ่มความเสถียรเฟส α เพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงจากเฟส α เป็น β และวาเนเดียมที่เพิ่มความเสถียรเฟส β โลหะผสมไทเทเนียมชนิดนี้เป็นเกรดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในทางการแพทย์ เนื่องจากสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อมนุษย์ได้ดี แต่มีข้อเสียคือความแข็งแรงต่ำ สามารถเพิ่มความแข็งแรง ด้วยการทำให้เกิดออกไซด์ หรือ ไนไตรด์ที่ผิว ในการวิจัยนี้จะใช้ไทเทเนียม Ti-6Al-4V เป็นวัสดุหลักในการทดลอง

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติของไทเทเนียม Ti-6Al-4V [11]

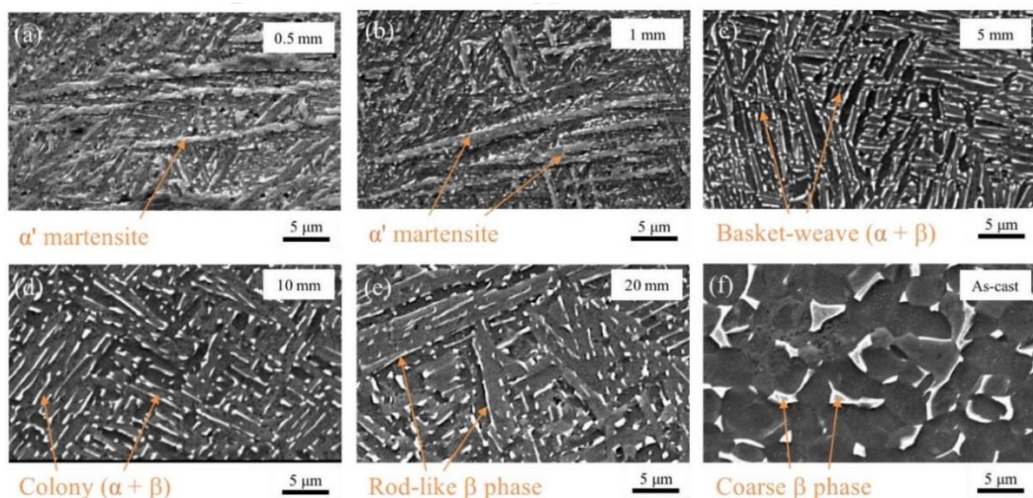
Hardness, Rockwell C	36
Hardness, Vickers	349
Tensile Strength, Ultimate	950 MPa
Tensile Strength, Yield	880 MPa
Elongation at Break	14 %
Modulus of Elasticity	113.8 GPa
Compressive Yield Strength	970 MPa
Notched Tensile Strength	1450 MPa
Charpy Impact	17 J
Fatigue Strength At 10^7 Cycles	240 MPa
Fatigue Strength Unnotched 10^7 Cycles	510 MPa
Fracture Toughness	75 MPa-m ^{1/2}
Shear Modulus	44 GPa
Ultimate Shear Strength	550 MPa
CTE, linear 20°C	8.6 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$
CTE, linear 500°C	9.7 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$
Specific Heat Capacity	0.5263 J/g $\cdot^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	6.7 W/m-K
Melting Point (Solidus to Liquidus)	1604 - 1660 °C
Beta Transus	980 °C

เนื่องจากผลของอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวจะส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะไทเทเนียมชนิดนี้เป็นอย่างมากโดยจะมีโครงสร้างและเฟสที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.8 และ รูปที่ 2.9 หากมีอัตราการเย็นตัวจากเฟส β ที่สูงพอจะทำให้เกิดเฟสที่มีลักษณะของโครงสร้าง Martensite ซึ่งเป็น Diffusionless transformation ที่เปลี่ยนแปลงมาจากโครงสร้าง BCC มีสมบัติที่มีความแข็งสูงและเปราะกว่าเฟสอื่น หากอัตราการเย็นตัวไม่สูงพอ จะพบเฟส $\alpha + \beta$ ที่มีลักษณะเป็น Basket-weave จากการโตของเฟส α บน slip plane ของ β และพบว่าขนาดของเฟสที่ใหญ่ขึ้นตามอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงเฟสต่าง ๆ ที่เกิดในโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่อัตราการเย็นตัวต่าง ๆ [12]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



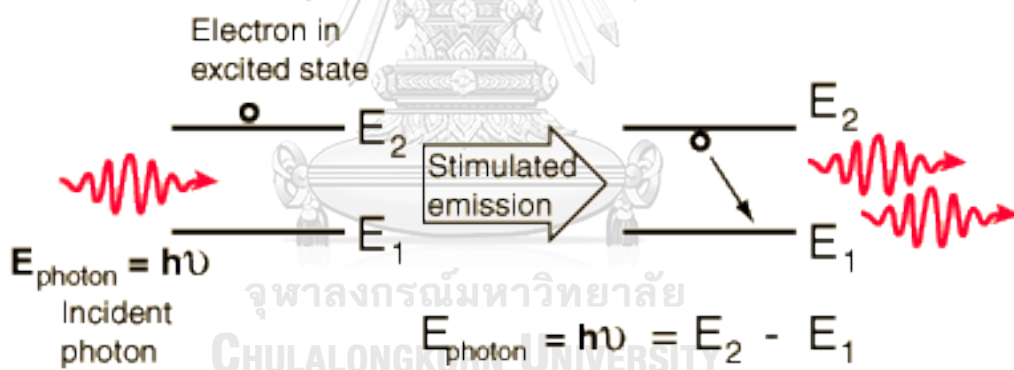
รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ Ti-6Al-4V ที่เกิดที่อัตราการเย็นตัวต่าง ๆ [13]

2.1.2 เทคโนโลยีเลเซอร์

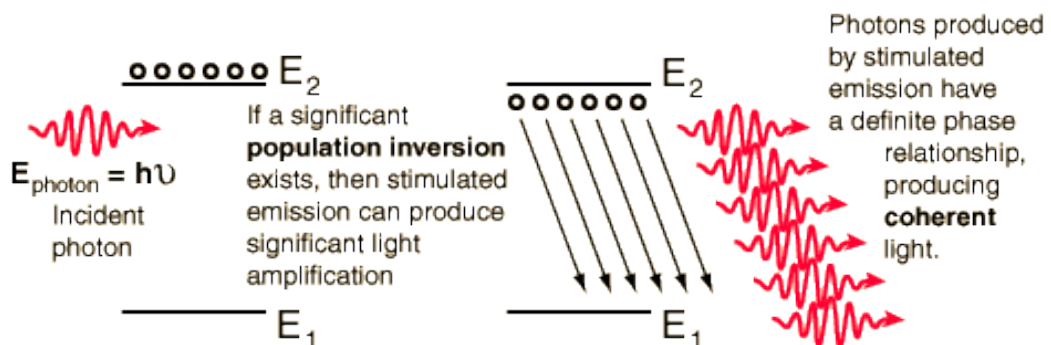
2.1.2.1 เลเซอร์คืออะไร

คำว่าเลเซอร์ (LASER) เป็นตัวย่อของ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation คือการสร้างคลื่นแสงจากการกระตุ้นอะตอมของธาตุให้เกิดการดูดซับพลังงานในรูปของแสงที่ป้อนเข้าไปทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานมีการเปลี่ยนชั้นของพลังงานไปยังชั้นที่มีพลังงานสูงขึ้นแต่ไม่เสถียร และปลดปล่อยกลับออกมาในรูปของพลังงานจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานกลับสู่สถานะเสถียรของอิเล็กตรอนในรูปของคลื่นแสง โดยคลื่นแสงที่ได้จากการกระตุ้นนี้จะมีเฟส โพลาริเซชัน และความถี่เดียวกัน จึงเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันส่งผลให้ได้คลื่นแสงที่มีพลังงานสูงมาก สมบัติของเลเซอร์ประกอบด้วย

1. เป็นแสงสีเดียว ความยาวคลื่นเท่ากันทั้งหมด
2. คลื่นแสงมีเฟสเดียวกัน
3. มีทิศทางที่แน่นอน
4. มีความเข้มสูง



รูปที่ 2.10 การเกิดแสงเลเซอร์จากการกระตุ้นอิเล็กตรอน [14]

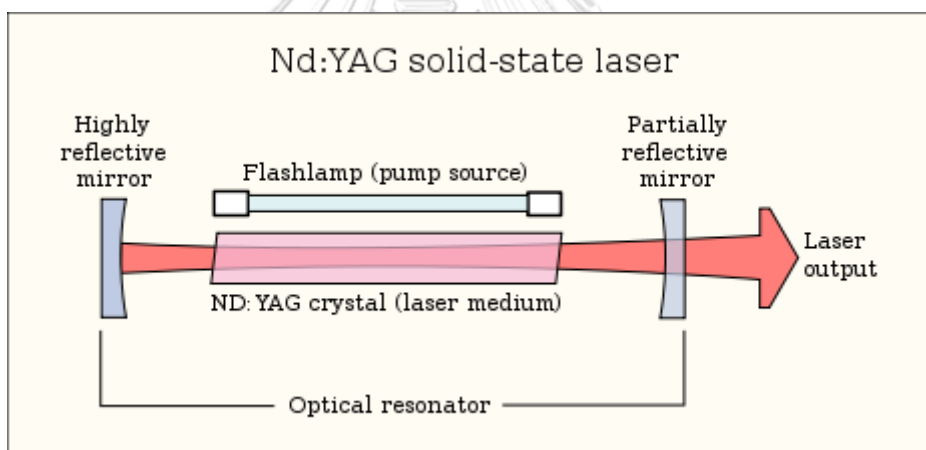


รูปที่ 2.11 การเกิดแสงเลเซอร์ที่มีเฟสตรงกัน [14]

2.1.2.2 ส่วนประกอบของเลเซอร์

การสร้างแสงเลเซอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย

1. ตัวกลางเลเซอร์ (Laser Medium) เป็นวัสดุที่จะถูกกระตุ้นเพื่อให้เกิดการปล่อยแสงเลเซอร์ออกมา อาจอยู่ในสถานะใดก็ได้
2. ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical resonator) เพื่อสะท้อนแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากตัวกลางให้กลับเข้าไปกระตุ้นอะตอมตัวอื่นเพื่อเพิ่มจำนวนอะตอมที่ถูกกระตุ้น โดยมากจะเป็นกระจกสองแผ่นที่มีอัตราสะท้อนแสงที่ต่างกันหันหน้าเข้าหากัน และมีตัวกลางเลเซอร์อยู่ตรงกลางระหว่างกระจกทั้งสอง โดยด้านที่มีค่าแสงเลเซอร์ออกมาคือด้านที่ยอมให้แสงส่องผ่านได้เล็กน้อย
3. แหล่งกำเนิดพลังงาน (Pump source) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้นอะตอม



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ [15]

2.1.2.3 ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

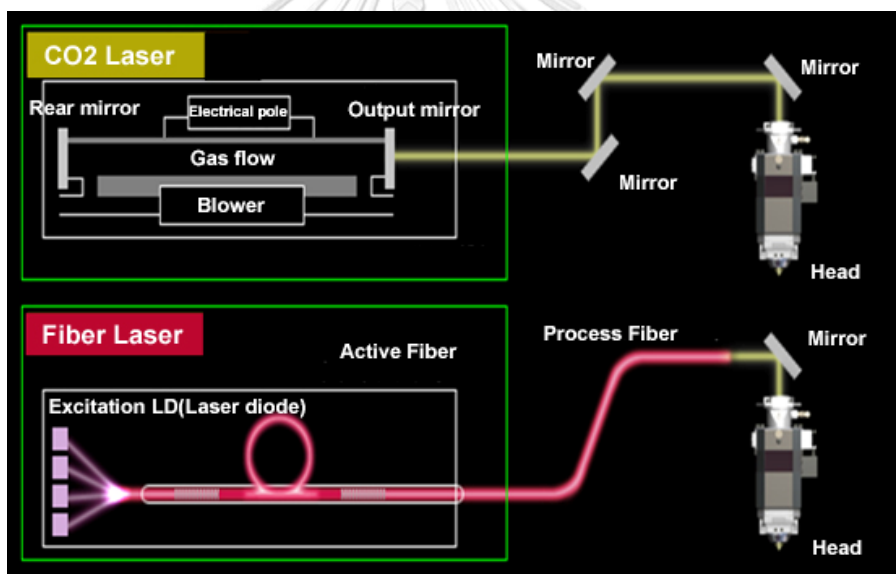
การแบ่งเลเซอร์ตามชนิดของตัวกลางแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. Gas Laser ใช้แก๊สเป็นตัวกลางเช่น CO₂ Laser, He-Ne Laser
2. Solid State Laser ใช้ตัวกลางเป็นของแข็งเช่น Ruby Laser, Nd:YAG
3. Dye Laser ตัวกลางเป็นของเหลว เช่นสารในกลุ่มสีย้อม Rhodamin6G
4. Semiconductor Laser ใช้ตัวกลางเป็นสารกึ่งตัวนำเช่น Diode Laser

2.1.3 การตัดด้วยเลเซอร์

2.1.3.1 หลักการทำงาน

เป็นการนำลำแสงเลเซอร์พลังงานสูงมาใช้เป็นแหล่งความร้อนในการหลอมโลหะอย่างรวดเร็วบริเวณตำแหน่งที่ต้องการ และเป่าน้ำโลหะที่หลอมเหลวให้หลุดออกไปด้วยแก๊สความดันสูง (Assist Gas) จึงเกิดร่องที่หลอมละลายและขาดออกจากกัน โดยทั่วไปการตัดด้วยเลเซอร์นี้จะต้องยึดหัวตัดเข้ากับเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC) เนื่องจากการตัดต้องทำอย่างแม่นยำและมีจุดโฟกัสที่ถูกต้อง ได้การตัดที่รวดเร็ว และป้องกันอันตรายจากแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกมา ในเครื่องจักรจะประกอบด้วยระบบทางเดินแสง เพื่อลำเลียงแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีขนาดใหญ่ไปยังตำแหน่งของหัวตัด อาจใช้ระบบกระจกหรือใยแก้วนำแสงก็ได้ และชุดโฟกัส เพื่อรวมแสงให้เป็นลำขนาดเล็กพลังงานสูง เพื่อให้มีความเข้มแสงมากพอที่จะตัดโลหะได้ ระบบนี้ยังช่วยตรวจสอบและปรับโฟกัสให้ถูกต้องตลอดเวลาอีกด้วย



รูปที่ 2.13 การลำเลียงแสงในระบบของเครื่องตัดด้วยเลเซอร์ [16]

2.1.3.2 ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการตัดด้วยเลเซอร์

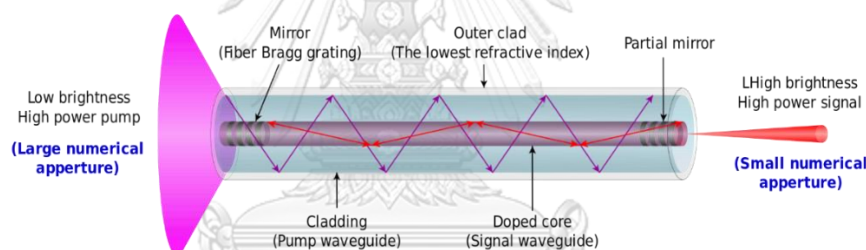
ในการตัดโลหะด้วยลำแสงเลเซอร์ มีความจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่มีกำลังสูงอยู่ในช่วงประมาณ 200 ถึง 6,000 วัตต์ จึงนิยมใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์หลักๆ สองชนิด คือ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฟเบอร์เลเซอร์ ซึ่งแต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

2.1.3.2.1 เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์

เป็นเลเซอร์ชนิดแรกๆ ที่นำมาใช้ในการตัดโลหะอยู่ในกลุ่มของเลเซอร์ที่ใช้แก๊สเป็นตัวกลาง ใช้ส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งกำเนิดลำแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ที่ 10,600 นาโนเมตร มีอายุใช้งานที่สั้นต้องใช้วัสดุสิ้นเปลืองและการดูแลที่มากกว่าไฟเบอร์เลเซอร์ เนื่องจากต้องใช้แก๊สหลายชนิดในการสร้างแสงเลเซอร์

2.1.3.2.2 ไฟเบอร์เลเซอร์

เลเซอร์ชนิดนี้ถูกคิดค้นขึ้นในภายหลังโดยพัฒนามาจาก Nd:YAG เลเซอร์ แต่จะใช้การผสมธาตุที่ใช้เป็นตัวกลางลงไปบนเส้นไฟเบอร์ออปติก และใช้ไดโอดเป็นแหล่งพลังงาน เนื่องจากเลเซอร์เกิดในเส้นไฟเบอร์ออปติก จึงสามารถลำเลียงลำแสงไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ทันที ไม่ต้องพึ่งระบบกระจก ในเลเซอร์ชนิดนี้จะให้คลื่นแสงที่มีความยาว 1,064 นาโนเมตร สั้นกว่าจากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ถึงสิบเท่า จึงสามารถโฟกัสได้เป็นจุดที่เล็กกว่าและมีพลังงานที่เข้มข้นกว่ามากซึ่งเป็นผลมาจากการแทรกสอดและเกิด Airy Disk ที่เล็กกว่าในกรณีของ CO₂ เลเซอร์ แต่ในทางกลับกัน กระจายของแสงจะมีความเข้มข้นมากกว่าจึงไม่เหมาะที่จะใช้ตัดโลหะที่มีความหนาเกิน 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดแสงเลเซอร์ในไฟเบอร์เลเซอร์ [17]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

1. ความเร็วการตัด คือ ความเร็วที่หัวตัดเคลื่อนที่ในขณะที่กำลังตัดชิ้นงานวัดเป็นหน่วย มิลลิเมตรต่อนาที
2. กำลังของเลเซอร์ คือ กำลังของลำแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน
3. ความดันและชนิดของแก๊สช่วยตัด คือ แก๊สความดันสูงที่ใช้ในการเป่า น้ำโลหะให้หลุดออกจากบริเวณรอยตัดและคลุมบริเวณรอยตัดไม่ให้ทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมด้วยในกรณีที่ใช้ในโตรเจนเป็นแก๊สช่วยตัด ส่วนในบางกรณีจะใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยตัดเพื่อตัดเหล็กที่มีความหนามาก ออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยากับเหล็กเกิดสารประกอบออกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน สามารถช่วยเพิ่มพลังงานในการตัดได้อีกด้วย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Arun Kumar Pandey และคณะ (2011) [18] พบว่าคุณภาพรอยตัดของไทเทเนียมจะมีคุณภาพสูงสุดเมื่อใช้แบบพัลส์ที่แคบ ๆ ความถี่ต่ำ ความเร็วการตัดสูง และแรงดันแก๊สปานกลางจะเหมาะสมที่สุด

Omer Ozgur Kardas (2013) [19] และคณะพบว่ารอยตัดด้วยเลเซอร์จะมีความเครียดตกค้างสูงเนื่องจากผลของการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว

Yang และคณะ (2010) [20] พบว่าการเพิ่มขนาดของจุดโฟกัสและลดความเร็วการตัดส่งผลโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของความกว้างและลึกของบริเวณที่เปลี่ยนแปลงจากการได้รับความร้อนของแผ่นโลหะที่ผ่านการตัดด้วยเลเซอร์

C.H Fu และคณะ (2015) [21] พบว่าการเพิ่มความเร็วการตัดจะส่งผลให้ ขนาดร่องตัด ความลึกของบริเวณที่ได้รับความร้อนและความเครียดตกค้างภายใต้ผิวรอยตัดลดลง

2.2.2 โครงสร้างทางจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงเฟส

D.P. Shidid และคณะ (2011) [22] พบว่าการใช้เลเซอร์เป็นแหล่งความร้อนช่วยในการพับโลหะไทเทเนียมนั้น ถ้าหากทำในบรรยากาศปรกติ จะเกิดขึ้นของสารประกอบไนไตรด์และออกไซด์ของไทเทเนียมในบริเวณที่โลหะมีอุณหภูมิเกินกว่า 200 องศาเซลเซียส และผลจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจะทำให้เนื้อโลหะมีความแข็งมากขึ้น และเปราะขึ้นด้วย

Hanadi G. Salem และคณะ (2007) [23] พบว่า การเพิ่มแรงดันของก๊าซออกซิเจนช่วยตัดไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณการเกิดออกไซด์ที่รอยตัด แต่การเพิ่มกำลังของเลเซอร์จะส่งผลต่อการเพิ่มของออกไซด์เนื่องจากพลังงานความร้อนที่มากเกินไป

I.A. Almeida และคณะ (2006) [24] พบว่า การใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยตัดในการตัดโลหะไทเทเนียมด้วยเลเซอร์จะเกิดการตกตะกอนของไทเทเนียมไนไตรด์บริเวณรอยตัดส่งผลให้ความแข็งแรงบริเวณรอยตัดสูงขึ้นกว่าส่วนอื่น

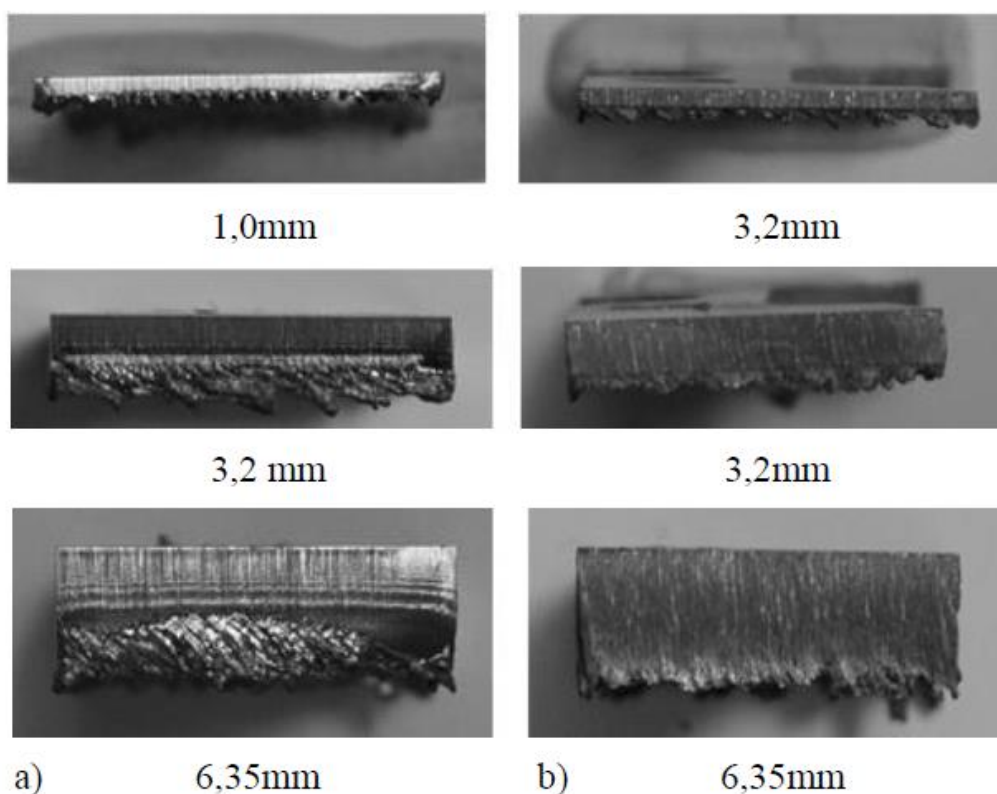
Lv. Shanjin และคณะ (2005) [20] พบว่า ในการตัดด้วยเลเซอร์ หากใช้แก๊สช่วยตัดเป็นอากาศ หรือไนโตรเจน จะเกิดขึ้นของออกไซด์ และไนไตรด์ขึ้น และพบรอยแตกขนาดเล็กบนผิว จึงไม่เหมาะกับงานที่ต้องนำไปเชื่อม หากใช้อาร์กอนจะให้คุณภาพรอยตัดสูงที่สุดเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับไทเทเนียม

L.D. Scintilla และคณะ [25] ทำการทดลองตัดแผ่นโลหะไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ด้วยไฟเบอร์เลเซอร์แล้วนำกลับมาเชื่อมติดกัน พบว่าการใช้ความดันแก๊สช่วยตัดที่ต่ำจะทำให้เมื่อนำชิ้นงานกลับมาเชื่อมติดกันด้วยเลเซอร์ รอยเชื่อมนั้นจะมีความแข็งแรงต่ำเนื่องจากรอยตัดมีความหยาบมาก

B. Yilbas และ S. Akhtar [26] ได้ทำการทดลองและพบว่า การตัดโลหะไทเทเนียมโดยใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยตัดจะทำให้เกิด ไทเทเนียมไนตรายด์บริเวณรอยตัด ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยตัดลดลง และยังเกิดรอยแตกขนาดเล็กที่ผิวอีกด้วย

Leonardo Daniele Scintilla และคณะ (2013) [27] พบว่า การใช้เลเซอร์ที่พลังงานต่ำจะทำให้รอยตัดที่มีคุณภาพต่ำกว่าเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงเนื่องจากโลหะเหลวบริเวณรอยตัดจะมีความหนืดมากกว่า ยากที่จะไล่น้ำโลหะออกไปได้

Nils Andersson และ Carl Granberg [28] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบตัดแผ่นโลหะไทเทเนียมความหนาต่าง ๆ โดยใช้แก๊สไนโตรเจน และอาร์กอน เป็นแก๊สช่วยตัด พบว่า การใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยตัดในการตัดแผ่นโลหะไทเทเนียมให้ผิวรอยตัดที่สม่ำเสมอมากกว่าการใช้อาร์กอนในทุกช่วงความหนาที่ทดสอบแต่ผิวรอยตัดที่ได้จากการใช้อาร์กอนจะไม่มีรอยเปลี่ยนสีและเงากว่า



รูปที่ 2.15 ผิวของรอยตัดด้วยเลเซอร์ที่ใช้อาร์กอน (ซ้าย) และไนโตรเจน (ขวา) เป็นแก๊สช่วยตัด [28]

บทที่ 3

ระเบียบและวิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในการวิจัยนี้จะใช้เครื่องตัดด้วยเลเซอร์ชนิดไฟเบอร์ขนาดกำลังสูงสุด 3000W ผลิตโดยบริษัท Bystronic รุ่น Fiber3000 ควบคุมการตัดโดยเครื่องตัด BySprint Fiber 3015 และใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยตัด

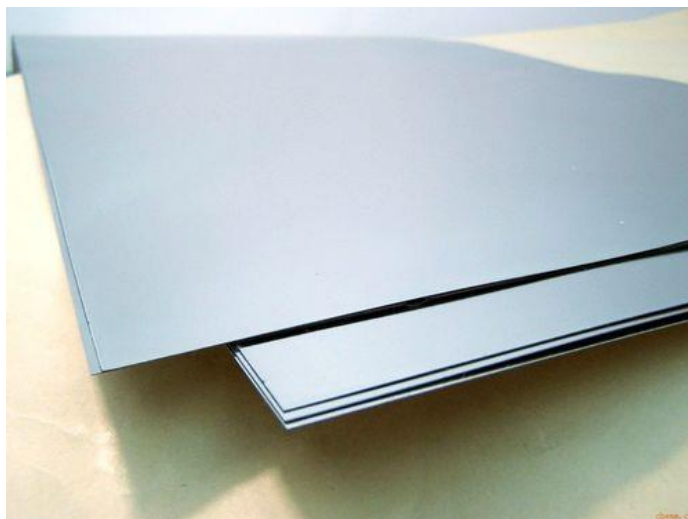
ตารางที่ 3.1 แสดงประสิทธิภาพของเครื่อง BySprint Fiber 3015 และ Fiber 3000 [29]

Maximum positioning speed parallel axis x, y	100 m/min
Maximum positioning speed simultaneous	140 m/min
Maximum axis acceleration	12 m/s ²
Positioning accuracy Pa*	± 0,1 mm
Repeatability Ps*	± 0,05 mm
Power	3000W
Wavelength	1064 nm
Polarization	unpolarized
Pulse frequency	1-2500 Hz



รูปที่ 3.1 เครื่อง BySprint Fiber 3015 และ Fiber 3000 [29]

วัสดุที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้คือแผ่นไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V หนา 2 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นเกรดและขนาดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดสามารถใช้ในการแพทย์ได้และมีคุณสมบัติที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป เป็นไทเทเนียมเกรดที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างกลางเมื่อเทียบกับไทเทเนียมเกรดต่าง ๆ ที่มีการผลิตใช้ในอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแผ่นไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V [30]

3.1.2 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมผิวชิ้นงาน

- กระดาษทราย
- เครื่องขัดผิวโลหะแบบจาน
- แบบหล่อทรงกระบอกเพื่อจับยึดชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร
- อีพอกซีเรซิน และ อะคริลิกเรซิน
- แผ่นขัด Neoprene
- สารแขวนลอย SiO₂ ขนาด 0.05 ไมครอน
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂)
- กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)
- กรดไนตริก (HNO₃)
- เอทานอล (C₂H₅OH)
- น้ำกลั่น (H₂O)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)
เพื่อตรวจสอบและศึกษาทั้งทางมหภาคและจุลภาคบริเวณผิวรอยตัด และวิเคราะห์บริเวณที่ได้รับการเปลี่ยนแปลงจากความร้อนโดยขีดผิวในแนวตั้งฉากกับรอยตัดและใช้เทคนิคแสงโพลาไรซ์ในการวิเคราะห์
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงและได้รูปที่คมชัด ใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้ร่วมกับเทคนิค EDS เพื่อวิเคราะห์ธาตุประกอบและเฟสที่เกิดขึ้น ชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จำเป็นต้องสามารถนำไฟฟ้าได้
- เครื่องพับแผ่นโลหะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ใช้เครื่องพับแผ่นโลหะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ผลิตโดยบริษัท Amada ในการวิจัยนี้จะนำมาใช้ในการทดสอบความเปราะของผิวบริเวณรอยตัดโดยการพับแผ่นโลหะในแนวตั้งฉากกับรอยตัดและตรวจสอบคุณภาพผิวรอยตัดบริเวณที่ถูกพับ



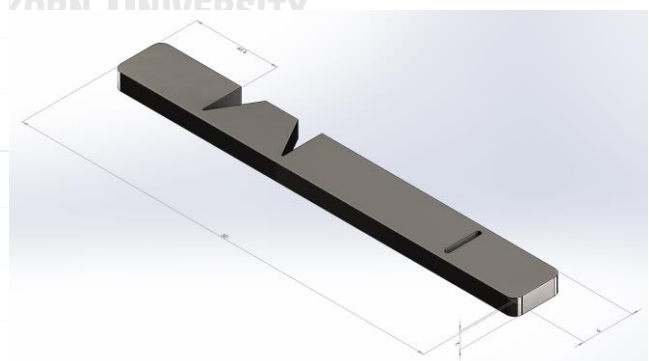
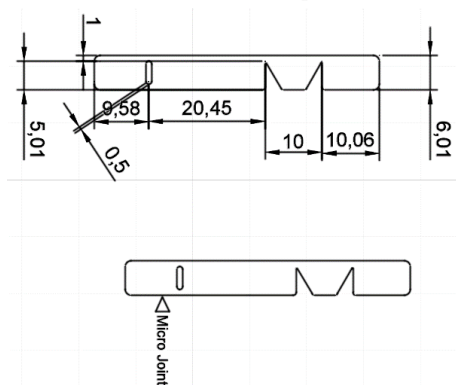
รูปที่ 3.3 เครื่องพับโลหะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ [31]

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุโลหะไทเทเนียม ชนิด Ti-6Al-4V ชนิดแผ่น ความหนา 2 มิลลิเมตร จะถูกออกแบบรูปทรงการตัดให้มีความยาวเพียงพอต่อการเร่งความเร็วของหัวตัดเพื่อให้จุดที่จะนำไปทดสอบความเร็วการตัดสามารถทำความเร็วได้ถึงค่าที่ต้องการและมีขนาดที่เหมาะสมสะดวกต่อการนำมาทดสอบ โดยในการวิจัยนี้จะกำหนดให้ระยะเร่งของหัวตัดเท่ากับ 2 เซนติเมตร ซึ่งตามข้อมูลจากผู้ผลิตเครื่องตัดด้วยเลเซอร์ เครื่องสามารถสร้างอัตราเร่งสูงสุดในแนวแกนเท่ากับ $12 \text{ m}^2/\text{sec}$ โดยเมื่อนำมาคำนวณตามสมการ $s = ut + \frac{1}{2}at^2$ และ $v = at$ โดยใช้ระยะเร่งคิดเพื่อระยะไว้ที่ 15 mm จะได้ว่า ความเร็วการตัดสูงสุดที่ตำแหน่งทดสอบจะมีค่าเท่ากับ 36000mm/min ชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดร่องสามเหลี่ยมไว้ที่ด้านล่างของชิ้นงานเพื่อให้สามารถตัดส่วนที่จะทำการทดสอบออกมาได้โดยง่ายและทำให้ส่วนที่จะใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากทำให้ลดเวลาในการขัดเตรียมผิวชิ้นงานและไม่สับสนฝังที่จะทำการทดสอบ ในการตัดชิ้นงานหนึ่งชิ้นจะสามารถแบ่งชิ้นงานออกได้ทั้งหมดสามส่วนคือ

1. ส่วนที่ทดสอบการตัดงอและวิเคราะห์พื้นผิวรอยตัด มีความยาว 20.45mm สูง 6mm และบริเวณที่ใช้จับชิ้นงานระหว่างการทดสอบ ยาว 9.58mm
2. ส่วนทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคสี่เหลี่ยมคางหมู มีขนาดความยาว 10mm สูง 6mm
3. ส่วนที่เว้นระยะเพื่อเพิ่มระยะทางการตัดซึ่งจะทิ้งไป ไม่ได้ใช้ในการทดสอบ ยาว 10.06mm



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการตัดชิ้นงานตัวอย่าง

เนื่องจากการวิจัยนี้ต้องการแสดงให้เห็นผลของพารามิเตอร์การตัดที่ส่งผลต่อคุณสมบัติและโครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการตัดด้วยเลเซอร์ จึงมีความจำเป็นต้องเลือกช่วงของพารามิเตอร์ให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริงและมีช่วงที่กว้างพอให้เห็นผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ได้อย่างชัดเจน การกำหนดช่วงของพารามิเตอร์ทั้งสามจึงอ้างอิงโดย

1. ความเร็วการตัดที่เลือกใช้จะใช้ไม่เกิน 100,000mm/min ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดของเครื่องและมากกว่าความเร็วสูงสุดที่ได้จากการคำนวณความเร็วจริงที่เครื่องสามารถทำได้ เนื่องจากระยะที่กำหนดไว้ในชิ้นงานทดสอบ ด้วยอัตราเร่งสูงสุดที่เครื่องจะสามารถทำได้ตามข้อมูลจากผู้ผลิต สามารถคำนวณความเร็วการตัดสูงสุดในตำแหน่งที่จะทำการวิเคราะห์ได้ประมาณ 41,000mm/min ที่จุดทดสอบห่างจากขอบชิ้นงาน 2 เซนติเมตร การเลือกช่วงกว้างเช่นนี้เพื่อต้องการยืนยันและแสดงให้เห็นผลจากอัตราเร่งที่ไม่เพียงพอของตัวเครื่องเองด้วย ดังนั้นช่วงของความเร็วการตัดที่เลือกจะอยู่ในช่วง 4,000mm/min ถึง 100,000mm/min

2. กำลังของเลเซอร์กำหนดจากกำลังเริ่มต้นที่สามารถตัดชิ้นงานได้สำเร็จที่ความเร็ว 4,000mm/min จนถึงกำลังสูงสุดที่เครื่องสามารถทำได้ ได้ทำการทดสอบเพื่อเลือกใช้พารามิเตอร์โดยการตัดชิ้นงานจริงที่ช่วงตั้งแต่ 600W ขึ้นไป ชิ้นงานเริ่มถูกตัดได้สำเร็จที่กำลัง 800W เมื่อใช้ความเร็วการตัดที่ 4,000mm/min ในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่วงกำลังของเลเซอร์ตั้งแต่ 800W จนถึงกำลังสูงสุดที่เครื่องสามารถทำได้ คือ 3,000W

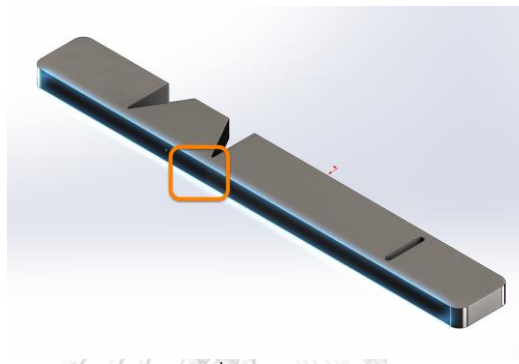
3. ความดันแก๊สช่วยใช้ตัด จะเลือกช่วงที่สามารถตัดได้สำเร็จที่ความเร็ว 4,000mm/min และกำลัง 800W ซึ่งจะสามารถตัดได้สำเร็จที่ประมาณ 1 bar และเพิ่มความดันจนถึง 200% ของความดันที่สามารถตัดได้โดยไม่มีหยดน้ำโลหะเหลือค้างขนาดใหญ่ที่ส่วนล่างของชิ้นงาน โดยจากการทดสอบจริงพบว่าชิ้นงานถูกตัดได้สำเร็จและมีคุณภาพที่ยอมรับได้ที่ประมาณ 8 bar ในการวิจัยนี้จึงได้กำหนดขอบเขตความดันแก๊สช่วยตัดไว้ที่ 1 bar ถึง 20 bar

ตารางที่ 3.2 ช่วงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัด

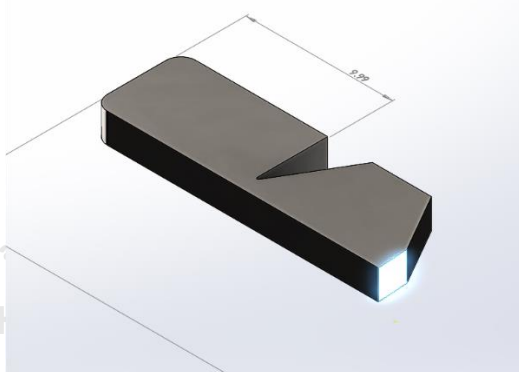
Parameters	Low	Hi	Unit
Pressure	1	20	bar
Power	800	3,000	Watt
Speed	4,000	100,000	mm/min

3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบชิ้นงาน

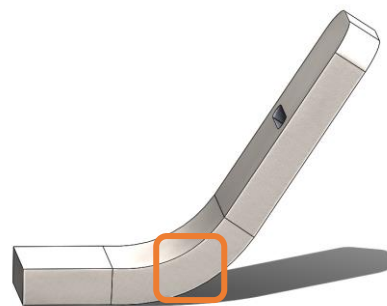
หลังจากตัดชิ้นตัวอย่างด้วยเลเซอร์ที่ค่าต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกถ่ายภาพพื้นผิวรอยตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังรูปที่ 3.9 และตัดในแนวตั้งฉากกับรอยตัดด้วยเลเซอร์ ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นเตรียมพื้นผิวเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาครวมถึงเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดร่วมกับเทคนิค EDS ส่วนชิ้นงานอีกชิ้นจะถูกพับด้วยมัมที่เหมาะสม และตรวจสอบรอยพับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อศึกษาตำหนิที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งที่จะทำการศึกษาลักษณะผิวรอยตัด



รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งที่จะทำการตัดชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค



รูปที่ 3.7 แสดงการพับชิ้นงานและตำแหน่งที่จะทำการศึกษาสมบัติของผิวรอยตัด

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน หลังจากทำการตัดด้วยเลเซอร์แล้ว ชิ้นงานจะถูกตัดออกเป็นสามส่วนโดยส่วนที่จะใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคจะเป็นส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูฝั่งที่ใกล้กึ่งกลางของชิ้นงาน โดยจะนำมาขึ้นรูปตัวเรือนในอีพอกซีเรซินและใช้คลิปหนีบชิ้นงาน เพื่อจับยึดชิ้นงานให้ได้ระนาบและอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ชิ้นงานจะถูกนำไปหล่อในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และปล่อยให้แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปขัดเพื่อให้ได้ระนาบด้วยเครื่องขัดอัตโนมัติและกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 320 ที่แรงกด 35N ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ในระหว่างการขัดต้องเปิดน้ำหล่อไว้เพื่อระบายความร้อนและล้างเศษที่เกิดขึ้นในระหว่างการขัดออก เมื่อผิวชิ้นงานได้ระนาบเสมอกันแล้วจึงค่อยเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายขึ้นเรื่อย ๆ และลดแรงกดลงตามลำดับดัง ตารางที่ 3.3 โดยก่อนจะเพิ่มความละเอียดกระดาษทรายนั้นต้องตรวจเช็คผิวขัดให้มั่นใจก่อนว่ารอยขีดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการขัดด้วยกระดาษทรายความละเอียดก่อนหน้านี้ได้ถูกขัดออกจนหมดแล้ว

ในขั้นตอนของการขัดละเอียด เนื่องจากไทเทเนียมเป็นโลหะที่เหนียวและเปลี่ยนรูปได้มากซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้าง HCP ของ Alpha Ti ทำให้ไม่สามารถขัดด้วยผงเพชรหรือผงอะลูมินาเหมือนเช่นโลหะทั่วไปได้เพราะจะส่งผลให้ผิวหน้าโลหะที่ถูกขัดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างมากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้ก็จะมีคุณภาพต่ำกว่าที่ควรจะเป็นและไม่สามารถเห็นลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่แท้จริงได้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้เทคนิค Chemo-Mechanic ในการขัดเงาขั้นตอนสุดท้าย ในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่น Porous Neoprene และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ผสมกับ 0.05um Colloidal Silica ในอัตราส่วน 1:1.5 เป็นสารขัด ใช้เครื่องขัดอัตโนมัติโดยเลือกใช้แรงกด 25N ที่ความเร็ว 150RPM เป็นระยะเวลา 6-8 นาทีจนได้ความเงาผิวที่ต้องการ (จนไม่พบรอยจากการขัดด้วยกระดาษทรายหรือรอยขีดข่วนต่าง ๆ) หลังสิ้นสุดการขัดจะเปิดน้ำล้างแผ่นขัดและชิ้นงานและขัดต่ออีก 30 วินาที ด้วยแรงกด 10N เพื่อล้างผิวหน้าชิ้นงานให้สารขัดหลุดออกจนหมด จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น และเอทานอล 98% แล้วจึงเป่าแห้งด้วยลมร้อน ชิ้นงานที่ได้นี้สามารถนำไปถ่ายภาพโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงด้วยเทคนิคแสงโพลาไรซ์ได้ทันที

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอน	ระยะเวลา	ความเร็วรอบต่อ นาที	แรงกด
SiC Paper 320	จนได้ระนาบ	300	35 N
SiC Paper 600	จนถึงจุดทดสอบ	300	30 N
SiC Paper 1000	1 นาที	300	25 N
SiC Paper 1500	1 นาที	300	25 N
SiC Paper 2500	1.5 นาที	300	25 N
Colloidal Silica + H ₂ O ₂	6 -8 นาที	150	25 N
Water	30 วินาที	300	10 N

3.2.4 การทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบลักษณะของรอยตัดโดยที่เลือกให้ค่าพารามิเตอร์สองตัวจากทั้งหมดสามตัวเป็นค่าคงที่ จากนั้นจึงเปรียบเทียบผลจากค่าพารามิเตอร์ตัวเดียวที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงค่าที่กำหนด ชิ้นงานทดสอบในแต่ละค่าพารามิเตอร์จะมีทั้งหมด 2 ชิ้นคือ

1. ชิ้นงานที่จะนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จากนั้นทดสอบดัดงอและตรวจหาสิ่งที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวรอยตัดเพื่อเปรียบเทียบลักษณะรอยตัดที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกัน รวมถึงใช้เทคนิค EDS เพื่อตรวจหาปริมาณและการกระจายตัวของไนโตรเจนและออกซิเจนบริเวณรอยตัดด้วย

2. ชิ้นงานที่จะใช้เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค หลังจากชิ้นงานถูกตัดและเตรียมพื้นผิวเรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปตรวจสอบหาลักษณะและวัดความลึกของชั้น HAZ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงด้วยเทคนิคโพลาไรซ์ หลังจากนั้นนำไปกัดผิวด้วยสารละลายผสมระหว่างกรดไนตริก (HNO₃) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และน้ำกลั่น ด้วยอัตราส่วน 3:1:46 ตามลำดับเป็นระยะเวลา 10 วินาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนเพื่อนำไปตรวจดูโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิค EDS เพื่อวิเคราะห์เฟสที่เกิดและโครงสร้างทางจุลภาคของรอยตัด หลังจากทำการทดสอบครบแล้ว ข้อมูลที่ได้จะถูกเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ต่อสมบัติและลักษณะของรอยตัด จากนั้นจึงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อสรุปค่าที่เหมาะสมที่สุดในการตัดชิ้นงานและวิเคราะห์คุณสมบัติของรอยตัดที่ได้เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมในการใช้งานรวมถึงข้อควรระวังในการปรับตั้งพารามิเตอร์เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้จริงในอนาคตต่อไป

3.2.5 แผนผังสรุปกระบวนการทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ส่วนผสมทางเคมีของแผ่นโลหะไทเทเนียม Ti-6Al-4V ที่ได้รับ

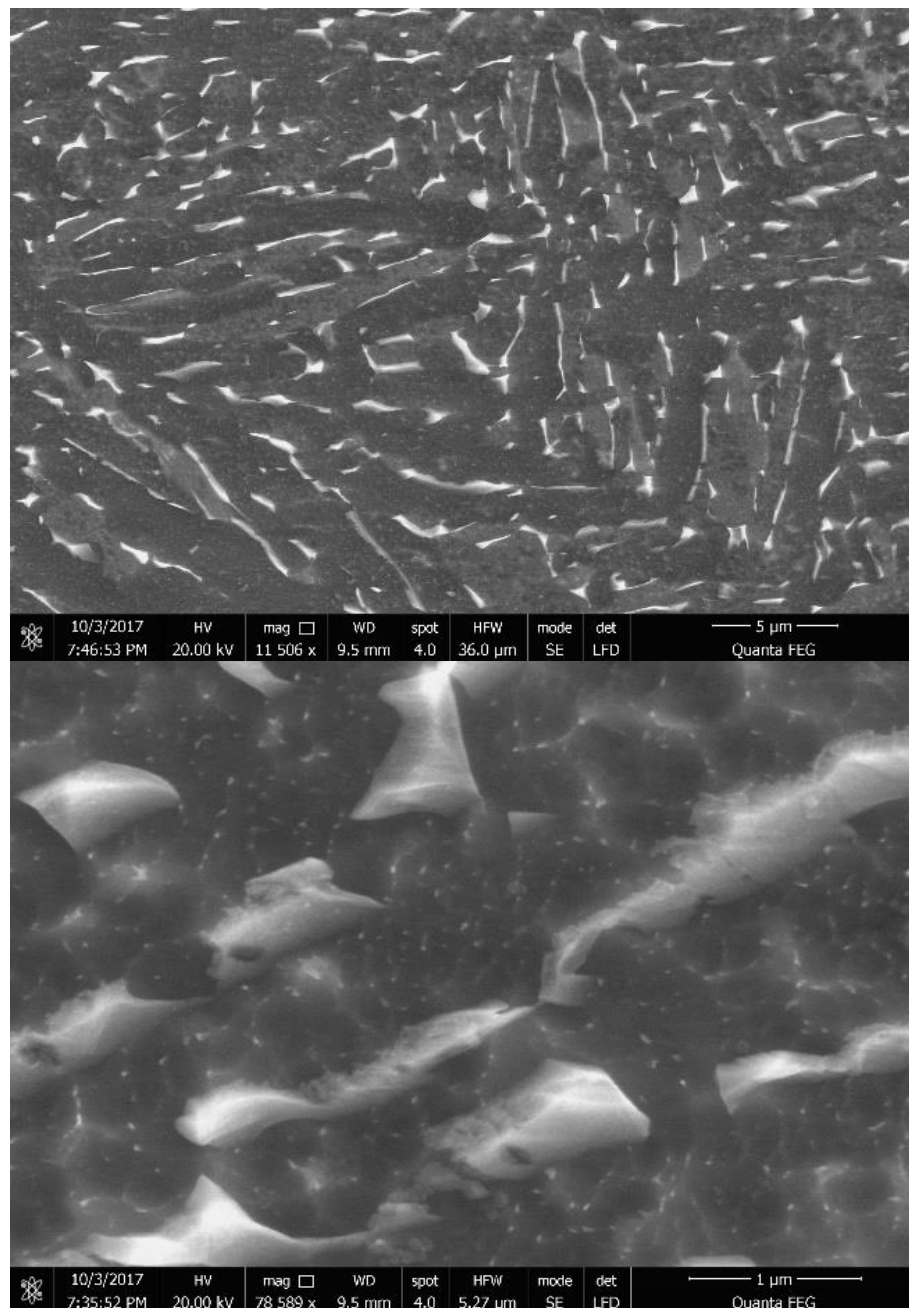
นำชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ได้รับไปทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุประกอบ (EDS : Energy-dispersive X-ray spectroscopy) พบว่ามีส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ ดัง ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ใช้ในการทดลอง

ธาตุประกอบ	Line Type	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม
Ti	K series	90.28	86.56
Al	K series	5.93	10.09
V	K series	3.69	3.33
W	L series	0.10	0.02
รวม		100.00	100.00

4.2 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะไทเทเนียม Ti-6Al-4V ที่ได้รับ

ชิ้นงานแผ่นโลหะไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ผ่านการรีดร้อนความหนา 2 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง 270 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยเฟส α และ β แบบหยาบ ดังแสดงในรูปที่ โดยจะพบว่ามีปริมาณของเฟส α มากกว่าเฟส β สาเหตุที่พบได้ทั้งสองเฟสนั้น เนื่องจากผลของธาตุผสม อะลูมิเนียม (Al) และ วาเนเดียม (V) ที่มีสมบัติเพิ่มความเสถียรของเฟส α และ β ตามลำดับ เมื่อใช้เทคนิค EDS วิเคราะห์ธาตุประกอบของทั้งสองเฟสจะพบว่า มีความแตกต่างของปริมาณธาตุผสมในแต่ละเฟส ดังตารางที่ ตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าในเฟส α จะมีปริมาณวาเนเดียมน้อยกว่าในเฟส β อย่างชัดเจน

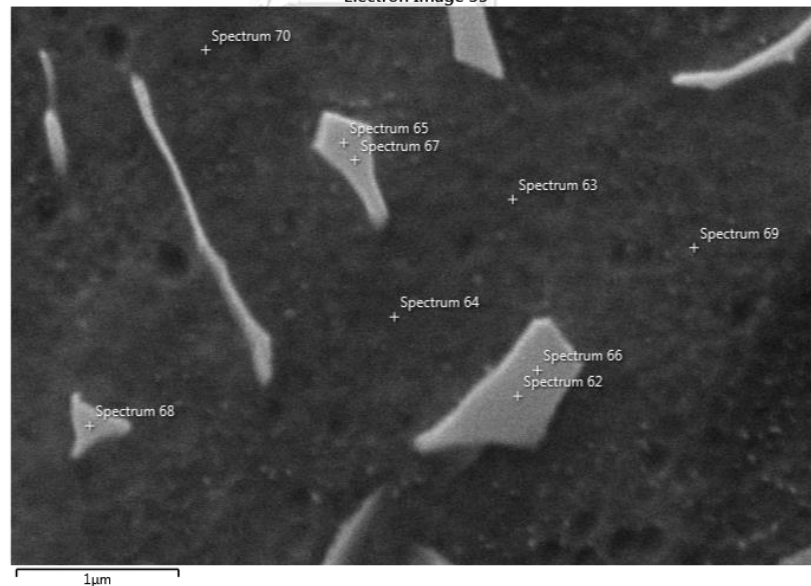


รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะไทเทเนียม Ti-6Al-4V ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุประกอบภายในเฟส α และ β จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

Element	Alpha		Beta	
	Spectrum	Atomic %	Spectrum	Atomic %
Al	63	10.62	62	10.17
V		2.93		4.42
Al	64	10.29	65	9.33
V		3.12		6.38
Al	69	10.51	66	10.24
V		2.98		5.07
Al	70	10.10	67	9.02
V		3.08		6.30
Al			68	10.09
V				5.06

Electron Image 33



รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงเฟส α (สีอ่อน) และ β (สีเข้ม) พร้อมตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิค EDS ใน ตารางที่ 4.2

4.3 กำลังของเลเซอร์ที่เริ่มตัดชิ้นงานได้สำเร็จต่อความเร็วการตัด

เมื่อทดสอบการตัดจริงด้วยค่าพารามิเตอร์ในช่วงค่าที่เลือกใช้ โดยเลือกใช้ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar ที่ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar เนื่องจากเป็นความดันที่ให้ลักษณะรอยตัดโดยรวมคุณภาพดีและไม่พบน้ำโลหะเหลือค้างบริเวณส่วนล่างของรอยตัด จะพบว่า กำลังของเลเซอร์ที่สามารถตัดชิ้นงานทดสอบได้สำเร็จที่ความเร็วการตัดต่าง ๆ มีค่าดังในตารางที่ 4.3 โดยบริเวณสีแดงในตารางจะแสดงช่วงพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถตัดชิ้นงานได้สำเร็จเนื่องจากกำลังของเลเซอร์ที่ใช้ไม่สูงพอที่จะเจาะทะลุชิ้นงานได้ รวมไปถึงชิ้นงานที่มีการตัดได้สำเร็จเพียงบางส่วน ในส่วนของบริเวณสีเขียวในตารางแสดงช่วงพารามิเตอร์ที่สามารถตัดชิ้นงานได้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

การตัดโลหะด้วยเลเซอร์นั้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต่ำสุดของเลเซอร์ที่สามารถตัดแผ่นโลหะได้สำเร็จที่ความเร็วใด ๆ ความสัมพันธ์ที่ได้ควรเป็นกราฟเส้นตรง เนื่องจากกำลังของเลเซอร์ที่ใช้ตัดจะมีความสัมพันธ์จากพลังงานที่ใช้ในการทำให้โลหะปริมาตรหนึ่ง ในบริเวณการตัดอุณหภูมิสูงขึ้นจนหลอมละลายซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากจนผลจากการถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณรอยตัดไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนไปของพลังงานและความเร็วการตัด ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ใช้ในการตัดได้สำเร็จต่อความเร็วการตัดที่เปลี่ยนไปนั้นจึงเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น

$$\square \square \square \square \square = \frac{1}{\square} \square \square \square \square (\square \square (\square \square - \square \square_0) + \square \square) + \square \square \square \square$$

- โดยที่
- กำลังของเลเซอร์ที่ใช้ ในหน่วย Watt
 - ค่าคงที่ของการดูดซับพลังงานคลื่นแสง
 - ความหนาแน่นของโลหะ ในหน่วย g/cm³
 - ความเร็วการตัดในหน่วย cm/sec
 - ความกว้างร่องตัดในหน่วย cm
 - ความหนาของแผ่นโลหะ ในหน่วย cm
 - ค่าความจุความร้อนจำเพาะของโลหะ ในหน่วย J/K·g
 - อุณหภูมิจุดหลอมเหลวในหน่วย K
 - 0 อุณหภูมิก่อนตัดในหน่วย K
 - ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของโลหะ J/g
 - พลังงานที่สูญเสียออกไปในรูปแบบต่าง ๆ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

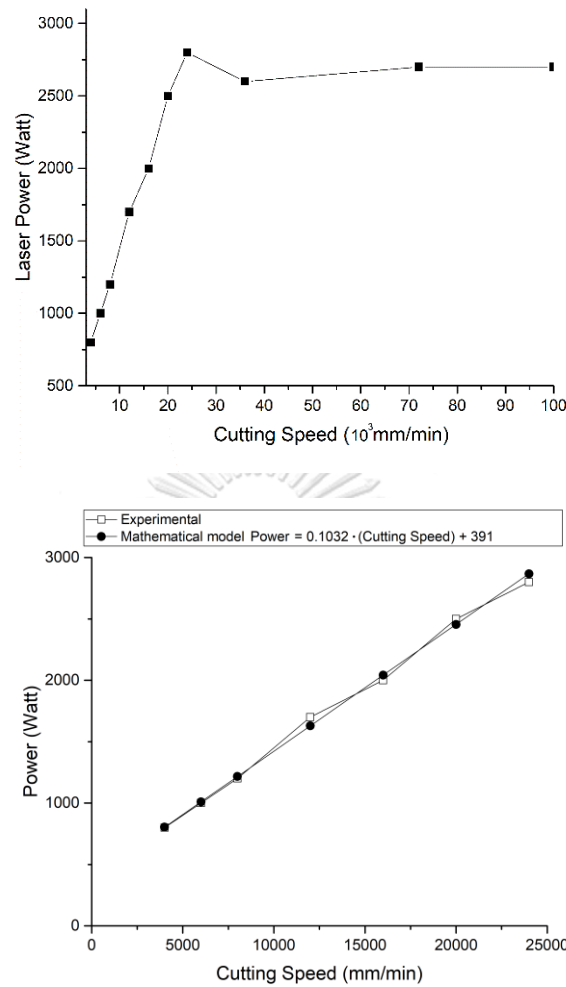
เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเลเซอร์และความเร็วการตัดคือ

$$P \propto V$$

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เส้นตรงแต่เมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบตัดจริงตามที่แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.3 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต่ำสุดของเลเซอร์ที่สามารถตัดชิ้นงานได้สำเร็จที่ความเร็วการตัดต่าง ๆ กลับพบว่า ที่ความเร็ว 36,000 mm/sec เป็นต้นไป ความเร็วการตัดที่เพิ่มขึ้นกลับไม่ได้ใช้กำลังของเลเซอร์ที่สูงขึ้นตามกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความแรงที่เครื่องตัดสามารถทำได้ในสภาวะการทดสอบจริงมีค่าจำกัดและน้อยกว่าข้อมูลจากผู้ผลิตที่ได้นำมาใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์การตัดในตอนแรก ส่งผลให้ความเร็วการตัดจริงที่เครื่องสามารถทำได้ในระยะทางที่ทำการทดสอบนั้นไม่ถึงความเร็วที่กำหนดไว้ในแผนการตัด ดังนั้นชิ้นงานทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคจะต้องเลือกใช้ความเร็วไม่เกิน 24,000mm/sec เท่านั้นเนื่องจากหากเกินช่วงความเร็วนี้ไป ชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์จะไม่ใช่ความเร็วจริงตามที่กำหนดค่าไว้

ตารางที่ 4.3 ผลการตัดด้วยความเร็วและกำลังต่าง ๆ ที่ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar แสดงช่วงที่ตัดสำเร็จ (บริเวณสีเขียว) และช่วงที่ตัดไม่สำเร็จ (บริเวณสีแดง)

Speed mm/min	Power (kW)																												
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3.0								
4000	E2 N	E3 N		A0			A5							B0					B5									D 0	
6000			E6 N	E5 N																									
8000				D 5	J0		D 6							E1					E6									F 1	
12000					B6 N	B7 N		B8 N	D 0 N	B9 N																			
16000							F7		J3	J4	J5								G 1									G 6	
20000																D 1 N	D 2 N		D 3 N										
24000																					D 4 N	D 5 N	E0 N						
36000														H 1	J6	J7	J8	J9	H 2	K0								H 3	
72000																												H 8	
100000																				K8	K7	K6	K5					I3	



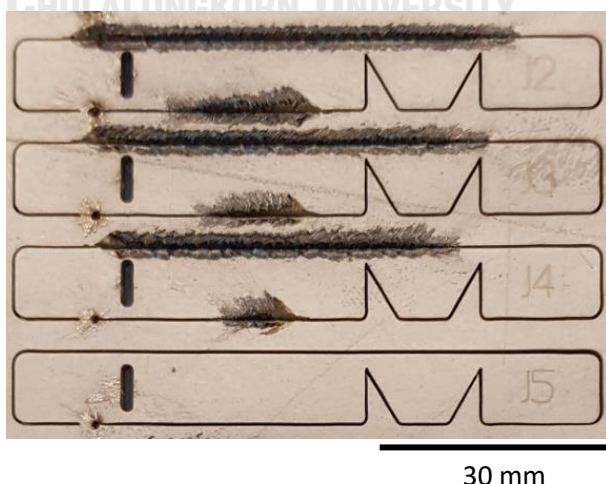
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัดและกำลังของเลเซอร์ที่เริ่มตัดสำเร็จ ช่วงชิ้นงานทดสอบทั้งหมด(บน) และ ช่วงที่ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (ล่าง)

เมื่อแทนค่าคงที่ $\rho = 0.4$, $\rho = 4.45 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 0.022 \text{ cm}$, $\rho = 0.2 \text{ cm}$, $\rho = 0.56 \text{ J/g}\cdot\text{K}$, $\rho = 1900 \text{ K}$, $\rho_0 = 293 \text{ K}$, $\rho = 365 \text{ J/g}$ ในสมการที่ได้และนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นจะพบว่า ความชันของการพหุนามมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการทดลองมาก ดังรูปที่ 4.3 (ล่าง) ช่วยยืนยันสมมุติฐาน

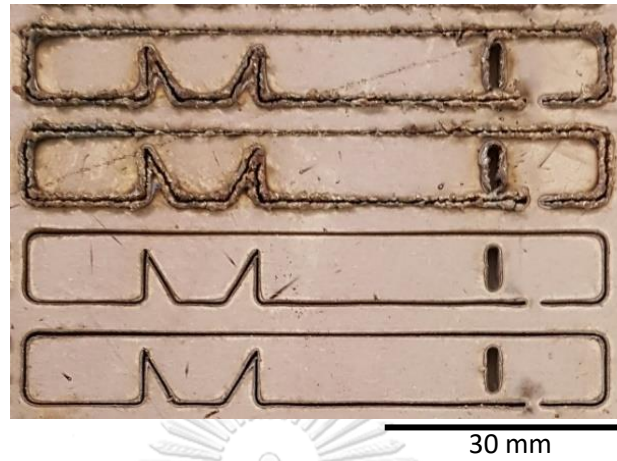
4.4 ลักษณะบริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์

ได้ทำการตรวจสอบลักษณะภายนอกของรอยตัด พบว่าร่องตัดมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.21 ถึง 0.27 มิลลิเมตร แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วการตัดหรือกำลังของเลเซอร์ยกเว้นในกรณีที่กำลังของเลเซอร์ต่ำเกินไป จะพบว่าน้ำโลหะไหลย้อนกลับขึ้นมาสู่ส่วนบนของรอยตัดดัง รูปที่ 4.4 พบความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สช่วยตัด โดยในบริเวณด้านล่างของรอยตัดซึ่งเป็นส่วนที่โลหะเหลวถูกแก๊สช่วยตัดผลักออกมาผ่านบริเวณนี้เป็นจุดสุดท้ายจะพบว่า มีครีบขนาดใหญ่ความสูงประมาณ 1 มิลลิเมตรและรอยไหม้บริเวณรอบ ๆ เกิดขึ้นเมื่อใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำกว่า 4bar เนื่องจากเมื่อแรงดันแก๊สช่วยตัดต่ำเกินไปน้ำโลหะที่ถูกแก๊สช่วยตัดเป่าไล่ออกจากร่องตัดจะเหลือค้างอยู่บริเวณส่วนล่างของรอยตัดและยังพบว่าผิวบริเวณภายในร่องตัดเองนั้นมีขนาดร่องที่ใหญ่และลึกกว่าชิ้นงานที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดสูงและยังพบสีที่เปลี่ยนไปจากการเกิดออกไซด์และไนไตรด์ของไทเทเนียม เช่นเดียวกับชิ้นงานที่ใช้กำลังของเลเซอร์ต่ำซึ่งพบลักษณะของน้ำโลหะเหลือค้างในบริเวณส่วนล่างของรอยตัดเช่นเดียวกัน ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความเร็วการตัดนั้น ยังไม่พบผลที่ชัดเจนเมื่ออ้างอิงจากตำแหน่งนี้

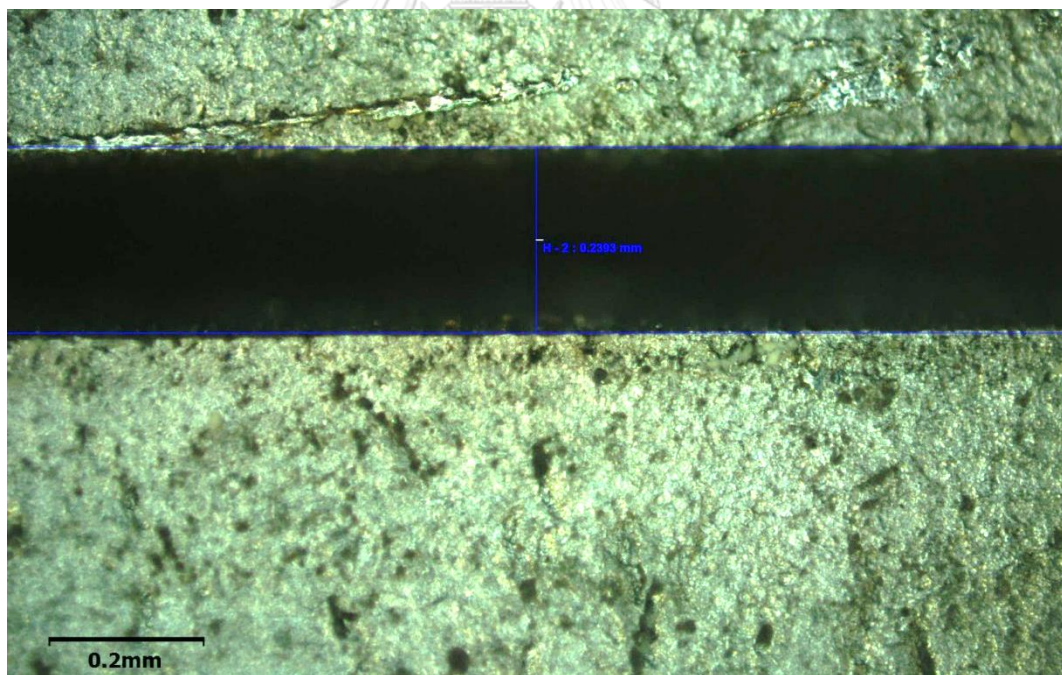
เมื่อตรวจสอบบริเวณนี้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจะเห็นได้ว่า ลักษณะโครงสร้างที่ทำให้เกิดความหยาบผิวบริเวณรอยตัดนั้น คือหยดของน้ำโลหะที่ถูกไล่ออกจากรอยตัด และพบลักษณะของผิวที่เคลือบด้วยเฟสบางอย่างทำให้เกิดลักษณะคล้ายถุงหุ้มหยดน้ำโลหะไว้ คาดว่าเกิดจากน้ำโลหะไทเทเนียมที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการตัด จึงเกิดฟิล์มของไนไตรด์บนผิวของน้ำโลหะในระหว่างการตัดหุ้มน้ำโลหะด้วยโครงสร้างคล้ายถุงที่ทำให้ผิวมีความหยาบและเป็นร่อง ดังรูปที่ 4.8



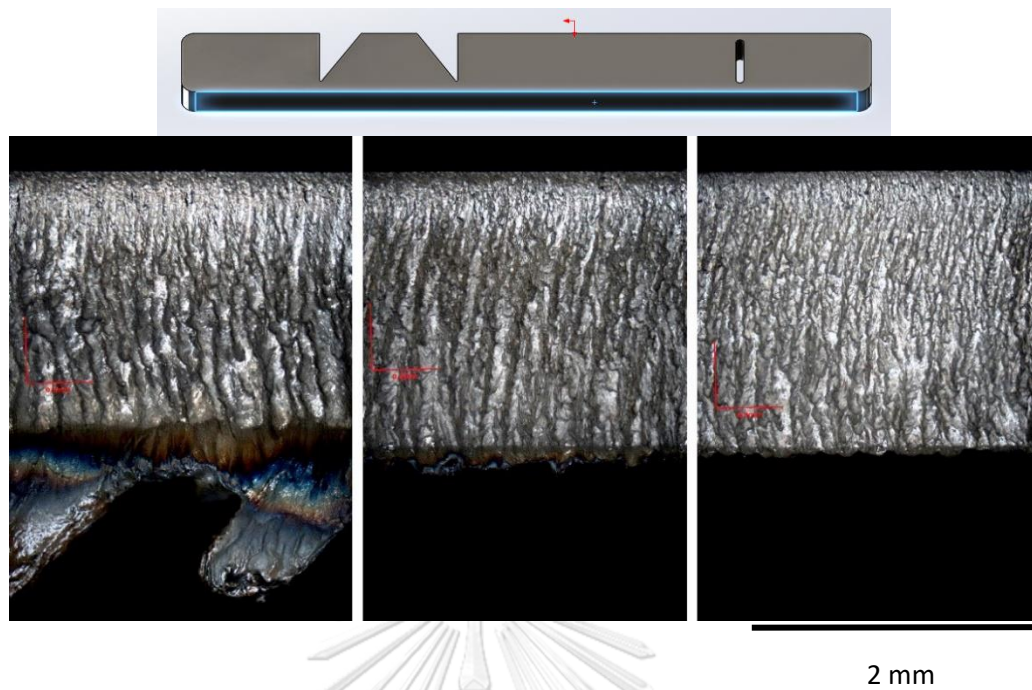
รูปที่ 4.4 บริเวณด้านบนของรอยตัด แสดงชิ้นงานที่ตัดไม่สำเร็จเนื่องจากกำลังของเลเซอร์ต่ำไป (3 ชิ้นจากบน) และชิ้นงานที่สามารถตัดได้สำเร็จ (ชิ้นล่าง)



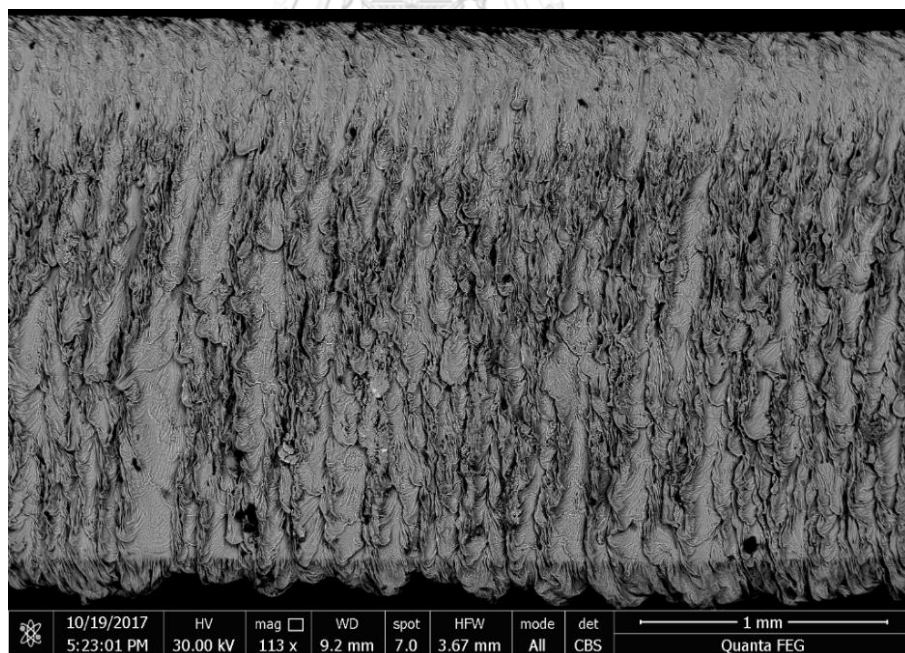
รูปที่ 4.5 บริเวณด้านล่างของรอยตัด แสดงชิ้นงานที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดต่ำเกินไป (2 ชิ้นจากบน) และชิ้นงานที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดมากพอ (2 ชิ้นจากล่าง)



รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงร่องตัดขนาด 0.24 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.7 ลักษณะบริเวณผิวรอยตัดเมื่อใช้ความดันแก๊สช่วยตัดที่ 1 , 4 และ 16 bar



รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงลักษณะโครงสร้างคล้ายถุงหุ้มน้ำโลหะในบริเวณผิวรอยตัด

4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการตัดด้วยเลเซอร์

4.5.1 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคภายในรอยตัดด้วยเลเซอร์

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่พบซึ่งเกิดจากการตัดด้วยเลเซอร์ซึ่งเป็นผลของความร้อนจากการดูดซับพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการตัด จะมีโครงสร้างหลักๆทั้งหมด 3 ชั้น เป็นลักษณะที่เกิดตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยตัดเข้าสู่เนื้อพื้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิที่ระดับความลึกต่างกันจะมีอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันโดยที่ชั้นที่หลอมละลายจะมีอุณหภูมิสูงสุดและลดลงไปตามความลึกจากผิวที่เพิ่มขึ้น การแบ่งชั้นตามโครงสร้างทางจุลภาคที่พบได้จะนับตั้งแต่ผิวรอยตัดเข้าไป โดยในงานวิจัยนี้จะเรียกแต่ละชั้นตามปรากฏการณ์ที่เกิดประกอบด้วย

1. ชั้นที่เกิดการหลอมละลายของโลหะ (RC : Recast Layer)

ชั้นนี้เริ่มต้นจากที่บริเวณผิวของรอยตัดเป็นส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว และเกิดการหลอมละลาย $T > T_m$ ซึ่งเมื่อทำการเย็นย่นธาตุประกอบด้วยเทคนิค EDS พบออกไซด์และไนโตรเจนของไทเทเนียมปกคลุมพื้นผิวทั่วบริเวณของชั้นนี้ซึ่งไนโตรเจนที่พบนั้นเกิดระหว่างการตัดจากผลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้เป็นแก๊สช่วยตัด ส่วนออกไซด์ที่พบนั้นเกิดภายหลังในช่วงท้ายของการตัดเมื่อแสงเลเซอร์และแก๊สคลูมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่ถูกตัดไปแล้วผิวของไทเทเนียมยังคงมีอุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดชั้นออกไซด์ปกคลุมทั่วบริเวณ

ภายในชั้นพบลักษณะของเนื้อพื้นที่เป็นเฟส Martensite ของไทเทเนียมที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และเฟสที่มีปริมาณของไนโตรเจนสูง (Nitrogen rich phase) ซึ่งพบเป็นผลึกเรียงตัวกันเป็นชั้นบาง ๆ ฝังอยู่ภายในเนื้อพื้นที่ของชั้นหลอมละลาย ด้วยลักษณะทั้งหมดนี้ทำให้ชั้นนี้มีความแข็งสูงและเปราะกว่าชั้นอื่น ๆ

2. ชั้นที่เกิดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากความร้อน (HAZ : Heat Affected Zone)

ชั้นของ HAZ นี้อยู่ถัดจากชั้นหลอมละลายเข้ามา ความร้อนที่ได้รับน้อยกว่าในชั้น RC จึงไม่เกิดการหลอมละลายแต่ก็ยังมีอุณหภูมิที่สูงพอทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นเฟส β $T_m > T > T_{\beta}$ และเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดในบริเวณรอยตัดนั้นส่วนใหญ่จะเป็นการถ่ายเทด้วยการนำความร้อนสู่เนื้อโลหะรอบ ๆ ซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณรอยตัดแทบทั้งหมด มีการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีและพาความร้อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น[32] การนำความร้อนอย่างรวดเร็วสู่เนื้อพื้นที่เย็นกว่านี้เองส่งผลให้เกิดลักษณะของเฟสมาร์เทนไซต์โครงสร้างรูปเข็มที่พบได้ในสภาวะที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับเนื้อพื้นที่ของชั้น RC แต่มีขนาดที่ใหญ่กว่ามาก

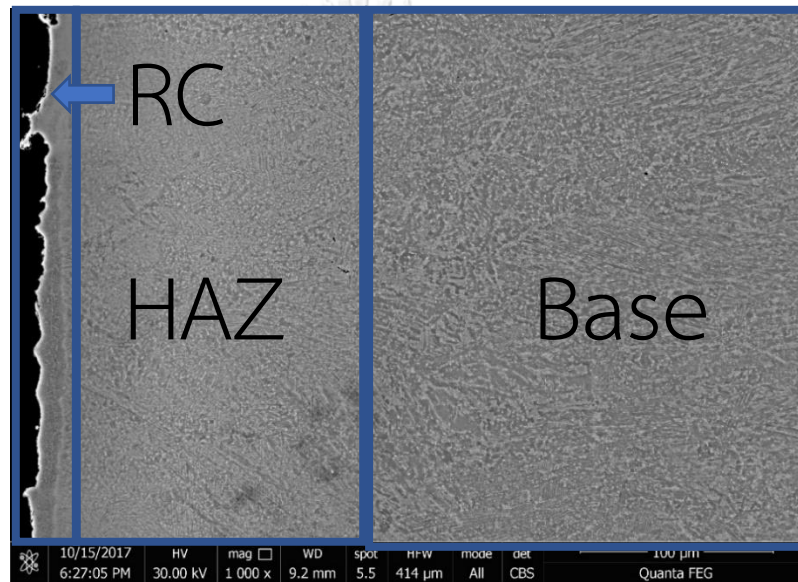
ด

ง

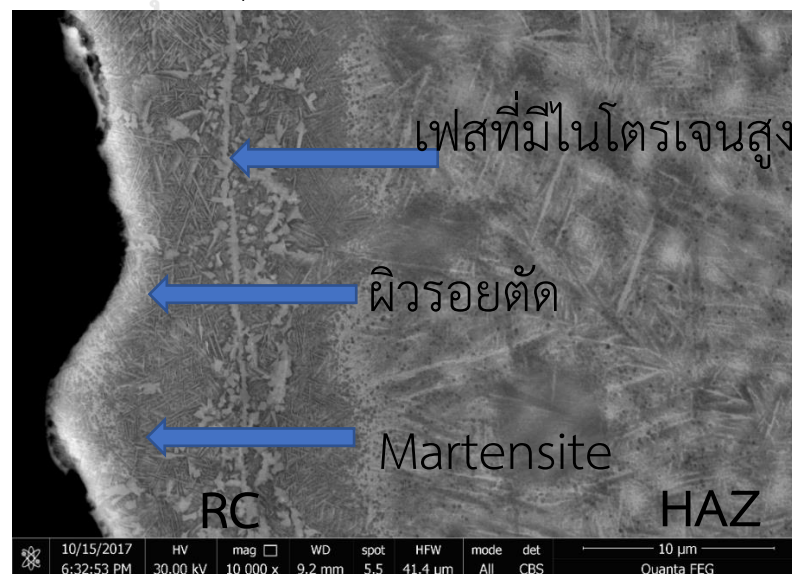
รูปที่ 4.9 บริเวณนี้จึงมีความแข็งที่สูงขึ้นกว่าเนื้อพื้น

3. ชั้นเนื้อพื้นเดิมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค (Base)

ถัดเข้ามาจากชั้น HAZ คือส่วนที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค เนื่องจากอยู่ห่างจากบริเวณรอยตัดมากจึงมีอุณหภูมิไม่สูงพอให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส $T_{\text{Beta}} > T$ และด้วยระยะเวลาที่ได้รับความร้อนเป็นเพียงช่วงสั้นๆ ด้วยนั้น จึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ซึ่งบริเวณนี้มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟส α และ β ขนาดใหญ่เช่นเดียวกับเนื้อพื้นโลหะเดิม ก่อนการทดสอบการตัดด้วยเลเซอร์



รูปที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด แสดงชั้นของรอยตัด



รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด แสดงลักษณะ
ของชั้น RC และชั้น HAZ

เมื่อตรวจสอบบริเวณหยดน้ำโลหะที่ค้างอยู่บริเวณส่วนปลายของรอยตัดในชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดที่ 8bar ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW พบลักษณะของชั้น alpha case ที่โตจากบริเวณผิวนอกซึ่งสัมผัสกับออกซิเจนจากบรรยากาศภายนอกเนื่องจากอยู่นอกเหนือบริเวณที่มีแก๊สไนโตรเจนคลุมและเป็นจุดที่เย็นตัวช้าที่สุดเฟสที่พบนั้นเกิดจากสมบัติที่ช่วยเพิ่มความเสถียรของเฟส α ของออกซิเจน และพบเดนไดรต์ของไทเทเนียมไนไตรด์โตจากผิวนอกเข้าสู่ภายในดัง รูปที่ 4.12 ถึง รูปที่ 4.14

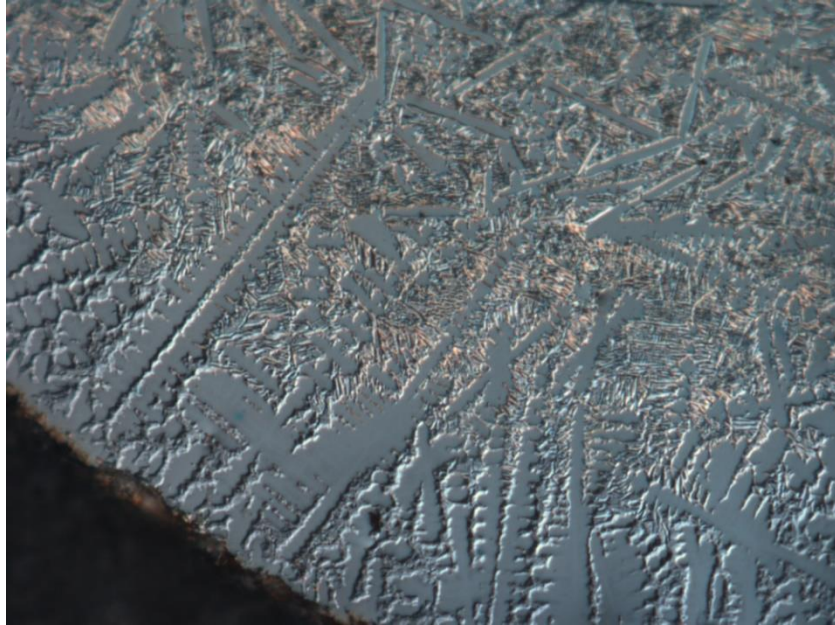


รูปที่ 4.11 ชิ้นงานที่ A1 ความดันแก๊สช่วยตัดที่ 8bar ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW

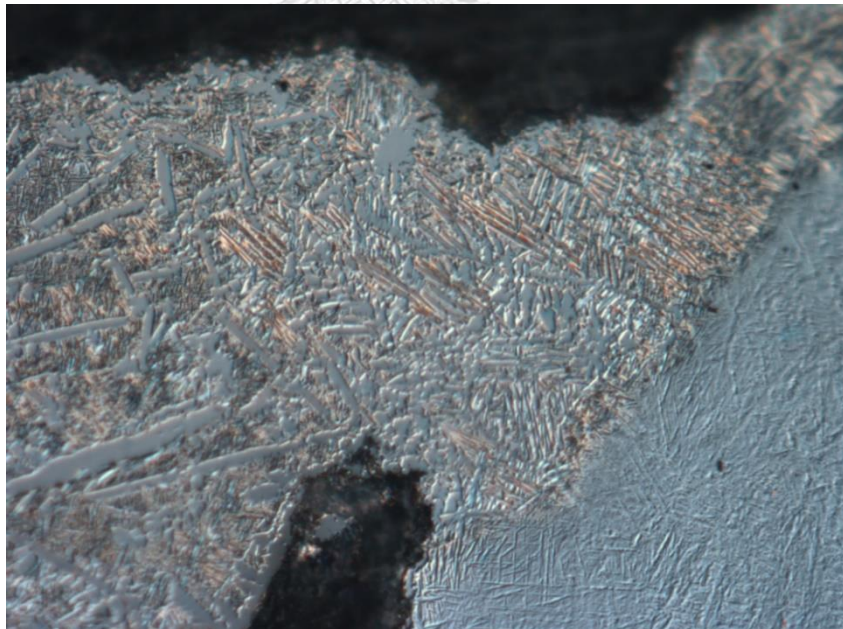
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.12 หยดน้ำโลหะที่ค้างอยู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานที่ A1 ความดันแก๊สช่วยตัดที่ 8bar
ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW



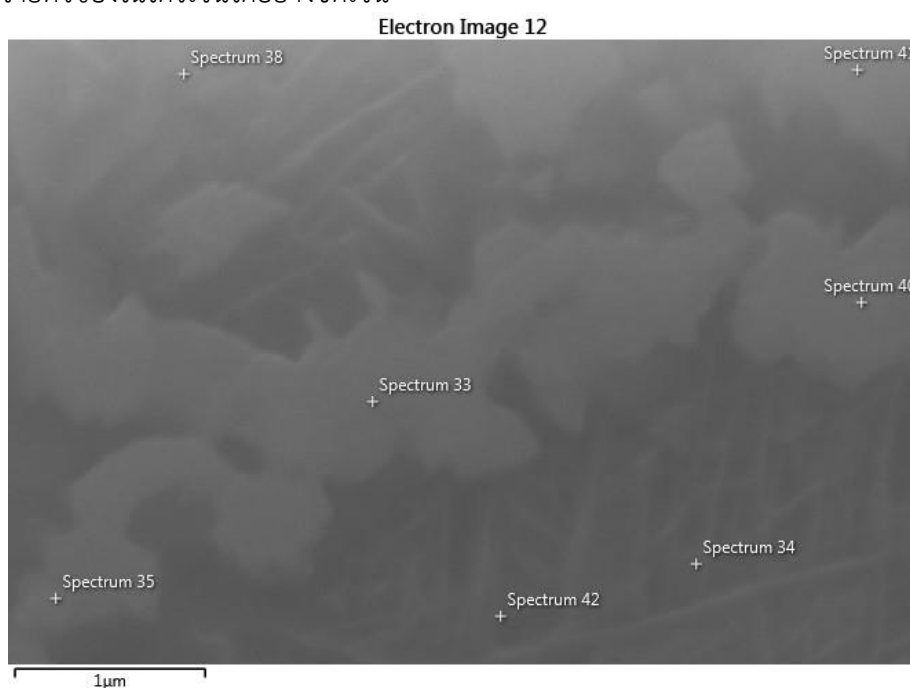
รูปที่ 4.13 หยดน้ำโลหะที่ค้างอยู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานที่ A1 ความดันแก๊สช่วยตัดที่ 8bar
ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW ด้วยเทคนิค DIC



รูปที่ 4.14 หยดน้ำโลหะที่ค้างอยู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานที่ A1 ความดันแก๊สช่วยตัดที่ 8bar
ความเร็วการตัด 4000mm/sec กำลังของเลเซอร์ 1kW ด้วยเทคนิค DIC

4.5.2 การกระจายตัวของธาตุและเฟสที่เกิด

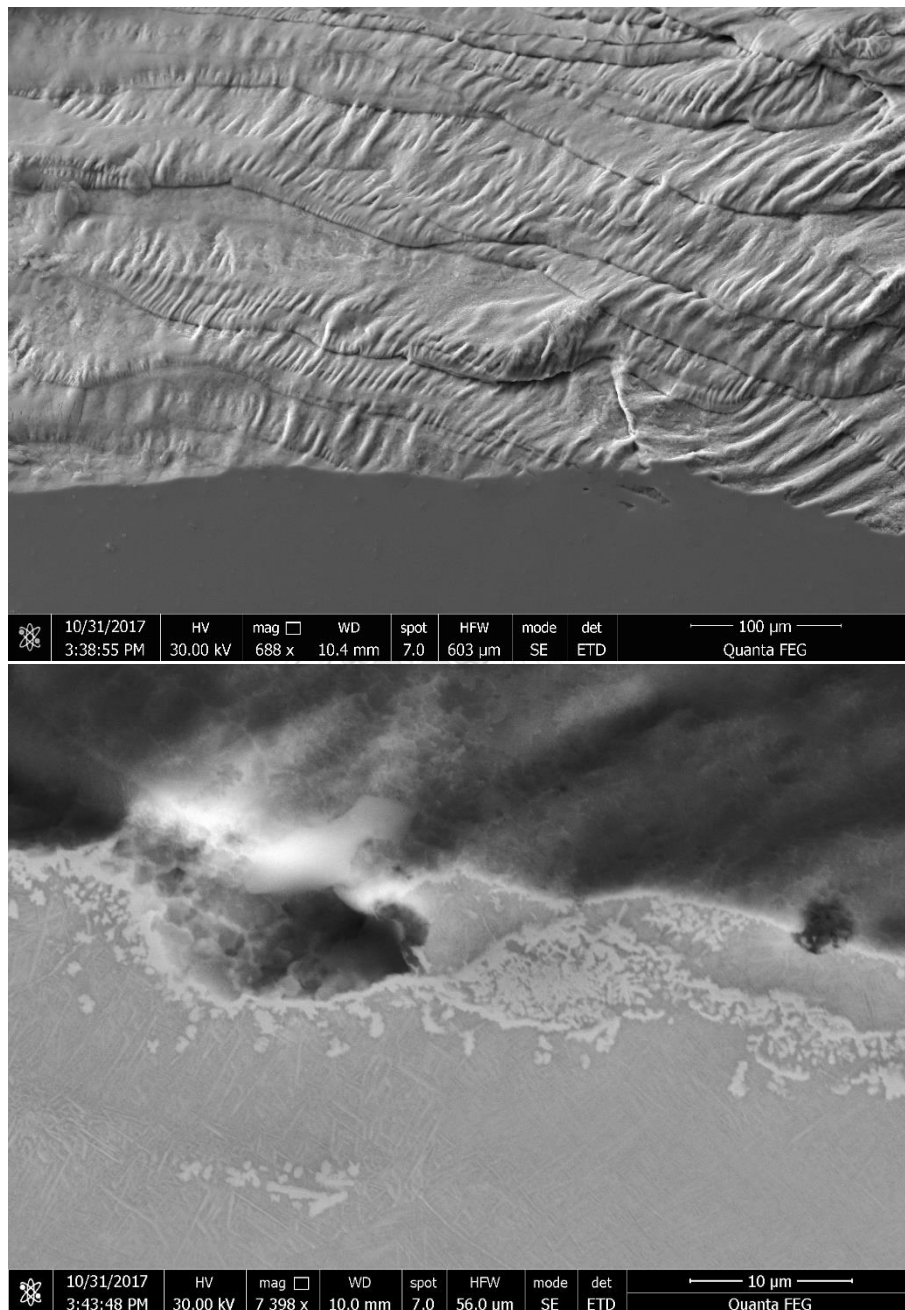
ผลจากเทคนิค EDS วิเคราะห์ปริมาณธาตุประกอบและการกระจายตัวของธาตุ บริเวณเฟสที่พบภายในชั้นหลอมละลายพบว่าเฟสดังกล่าวมีปริมาณธาตุไนโตรเจน 10 At% และออกซิเจน 0.8 At% เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อพื้นรอบ ๆ ภายนอกเฟสที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างของ มาร์เทนไซต์พบว่าปริมาณธาตุไนโตรเจน 0.7 At% และออกซิเจน 3.2 At% จึงสรุปได้ว่าเฟสที่พบ นั้นมีปริมาณของไนโตรเจนมากกว่าและออกซิเจนน้อยกว่าเนื้อพื้นโดยรอบ โดยที่การกระจายตัวของ ธาตุในบริเวณภายในและรอบๆเฟสดังกล่าว มีลักษณะดัง รูปที่ 4.3 และเห็นความแตกต่าง การกระจายตัวของไนโตรเจนได้อย่างชัดเจน



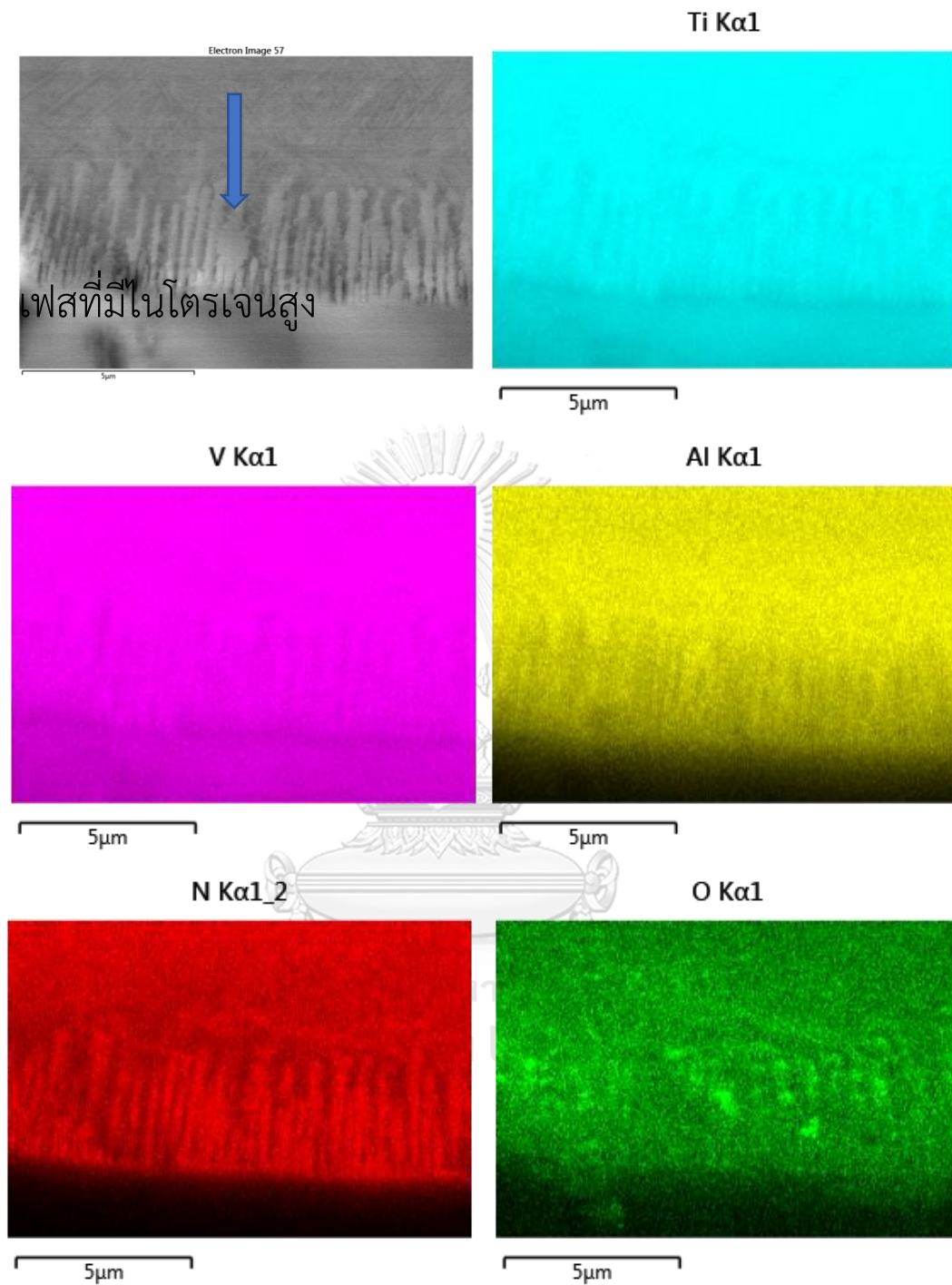
รูปที่ 4.15 ตำแหน่งที่วิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิค EDS บริเวณเนื้อพื้นของชั้นหลอมละลาย

ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุประกอบบริเวณชั้น RC และเฟสอื่นที่พบ

Element	เฟสที่พบภายในชั้น RC		เนื้อพื้นชั้น RC	
	Spectrum	Atomic %	Spectrum	Atomic %
Ti	33	77.8	34	82.7
Al		8.5		10.1
V		2.6		3.2
N		10		0.7
O		0.8		3.2

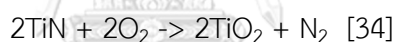


รูปที่ 4.16 การเกิดเฟสที่มีไนโตรเจนสูงภายในชั้นหลอมละลาย

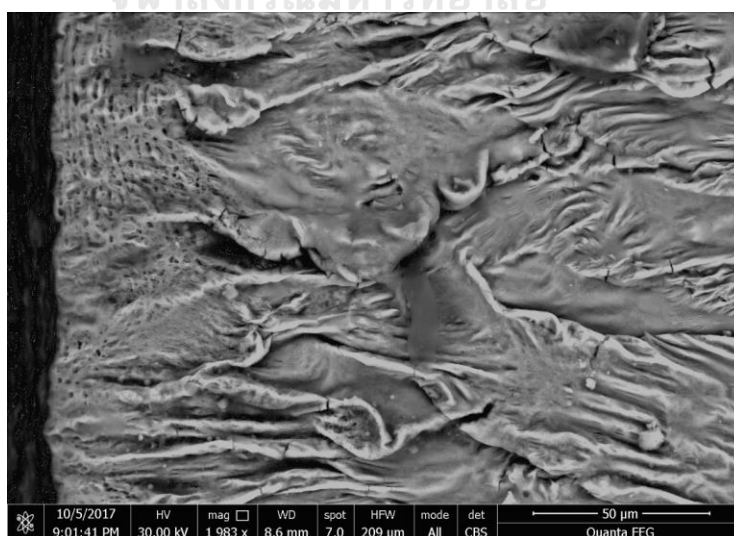


รูปที่ 4.17 ภาพจากเทคนิค EDS Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ บริเวณผิวรอยตัด และเดนไดรต์ของเฟสที่มีไนโตรเจนสูง

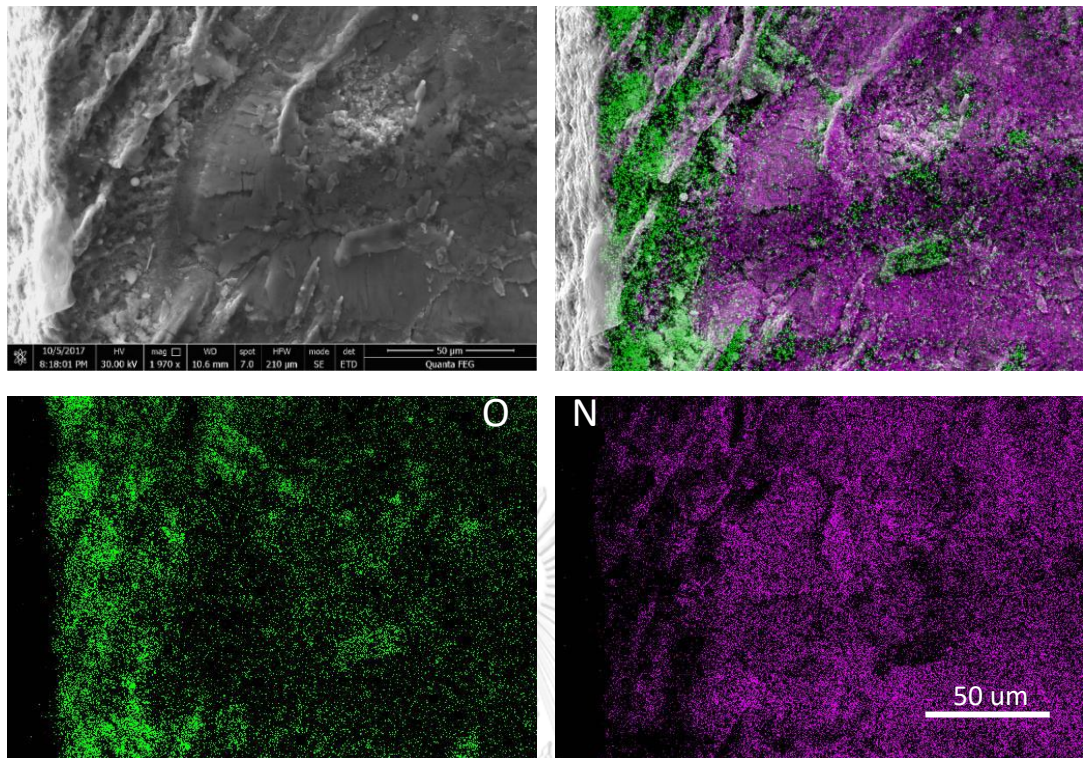
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS Mapping บริเวณขอบของรอยตัดพบการกระจายตัวของ ออกซิเจนและไนโตรเจนในบริเวณที่แตกต่างกันโดยจะพบว่าบริเวณขอบบนและขอบล่างของรอยตัด สามารถพบออกซิเจนได้มากกว่าบริเวณส่วนกลางของรอยตัดและในทางกลับกันพบไนโตรเจนบริเวณ ส่วนกลางของรอยตัดมากกว่าบริเวณขอบบนและขอบล่างของรอยตัดดังรูปที่ 4.19 ซึ่งการที่พบ ออกซิเจนบริเวณขอบบนนั้นเกิดขึ้นในระหว่างการตัด ซึ่งหัวตัดและแก๊สช่วยตัดซึ่งทำหน้าที่เป็นแก๊สคลุม ป้องกันบริเวณผิวรอยตัดจากแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศภายนอกเมื่อหัวตัดเคลื่อนผ่านบริเวณจุดที่ ตัดเสร็จไปแล้วแต่ส่วนร่องตัดยังมีอุณหภูมิสูงอยู่เมื่อไม่มีแก๊สไนโตรเจนปกคลุมออกซิเจนจึงสามารถ เข้าถึงบริเวณขอบของร่องตัดได้ แต่ในบริเวณภายในรอยตัดตรงกลางนั้นออกซิเจนสามารถเข้าถึงได้ ยากเนื่องจากร่องตัดมีขนาดเล็กและแคบจึงพบออกซิเจนได้น้อยกว่า การเกิดปฏิกิริยาของไนตรารายต์ กับแก๊สออกซิเจนและเปลี่ยนเป็นออกไซด์นี้เกิดขึ้นในขณะที่บริเวณรอยตัดอุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส (เริ่มเกิดได้ตั้งแต่ 450 องศาเซลเซียสแต่เกิดซ้ำมากโดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น[33]) ไทเทเนียมไนตรารายต์ที่เกิดขึ้นจากแก๊สไนโตรเจนในระหว่างการตัดจะไม่ เสถียรในบรรยากาศที่มีออกซิเจน เนื่องจากค่า Gibbs Free Energy ของปฏิกิริยา $Ti + O_2 \rightarrow TiO_2$ มีค่าต่ำกว่า $Ti + N \rightarrow TiN$ กว่า 10 เท่า TiN จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็น ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้โดยปฏิกิริยา



ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดในภายหลังนั้นจะพบลักษณะของพื้นผิวที่มีรูพรุน การแก้ไขไม่ให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นต้องใช้แก๊สคลุมเพิ่มเติมหลังจากหัวตัดผ่านจุดตัดไปแล้วเพื่อกันไม่ให้ ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวจนกว่าอุณหภูมิจะต่ำเพียงพอที่จะไม่เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว

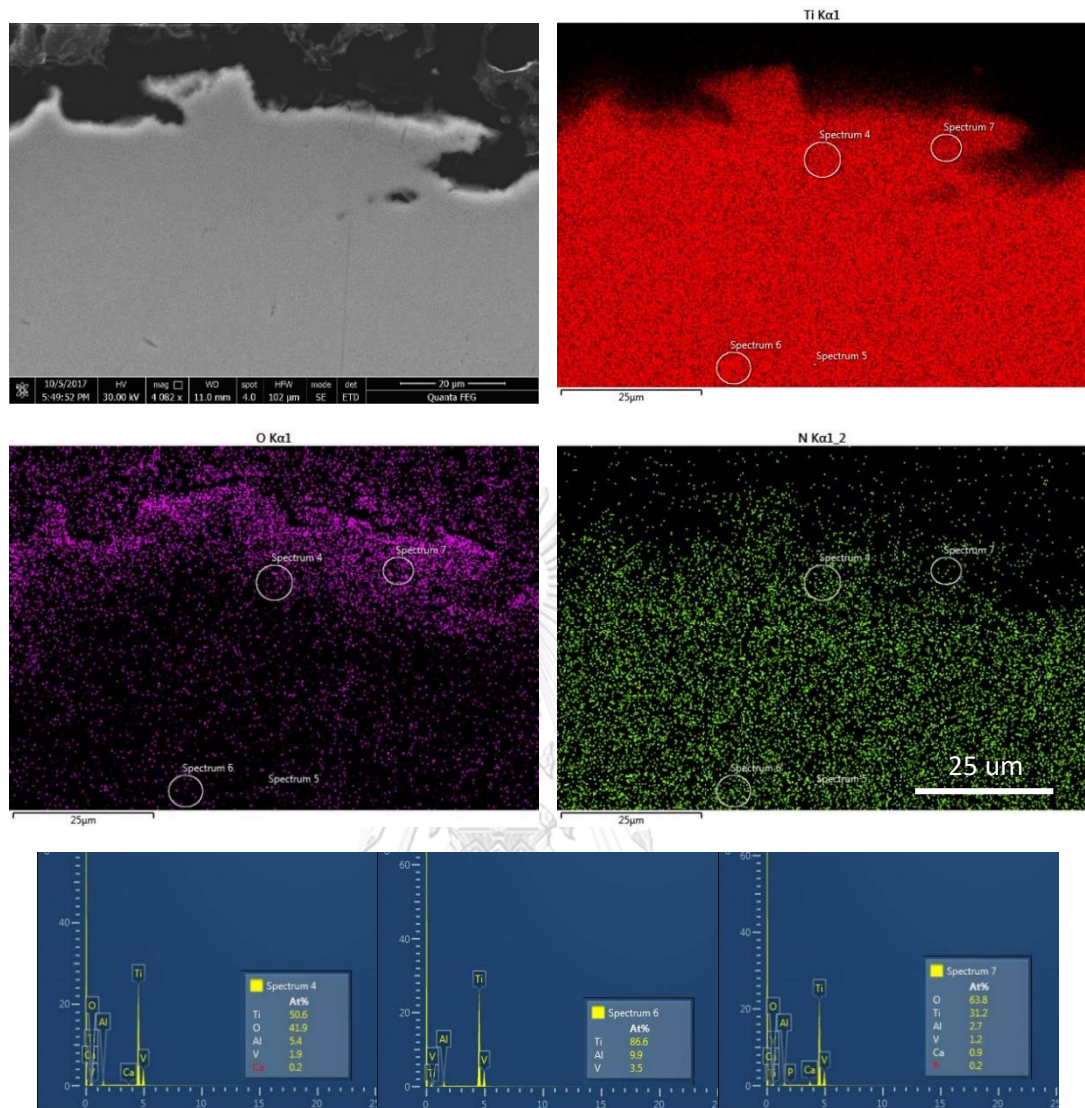


รูปที่ 4.18 ผิวรอยตัด แสดงบริเวณที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่พบรูพรุน



รูปที่ 4.19 ภาพแสดงพื้นผิวบริเวณรอยตัดที่วิเคราะห์ด้วย EDS Mapping

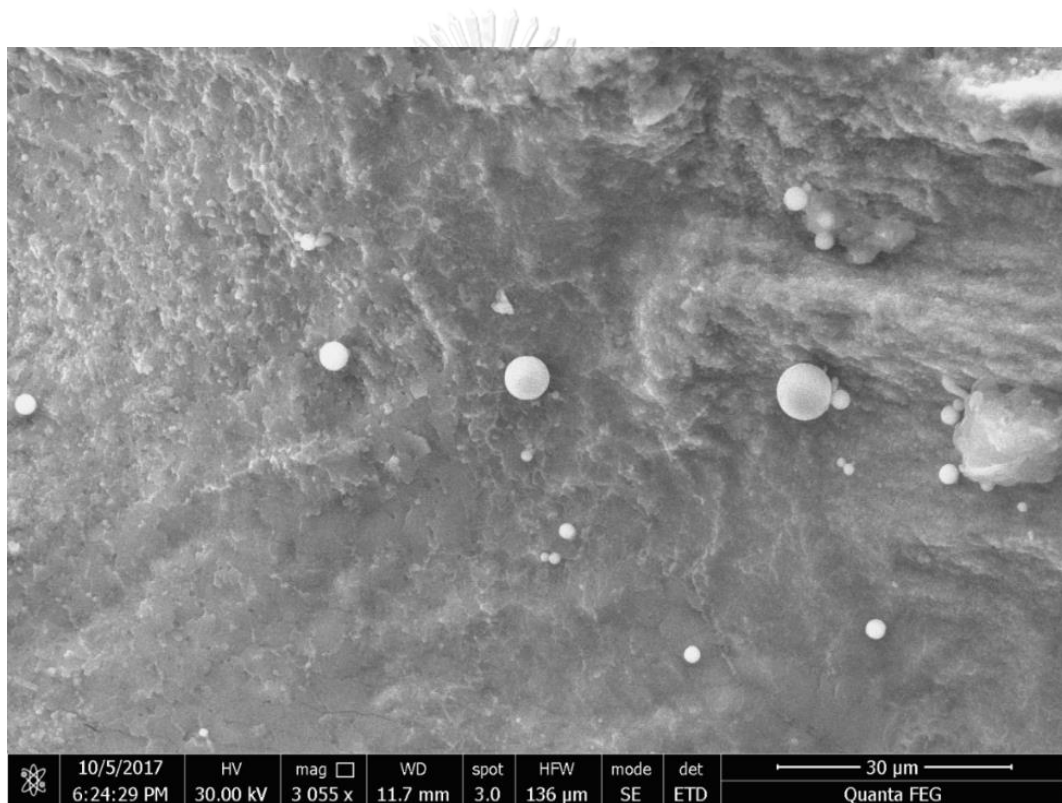
เมื่อวิเคราะห์การแพร่เข้าของออกซิเจนในตำแหน่งใกล้ขอบรอยตัดด้วยเทคนิค EDS พบการแพร่เข้าของออกซิเจนเข้ามาภายในเนื้อของชั้นหลอมละลายด้วยความลึกประมาณ 15 ไมครอน ซึ่งทำให้เกิดชั้นของ Alpha case ในบริเวณนี้ และที่ตำแหน่งใกล้ผิวรอยตัด พบปริมาณออกซิเจนสูงถึง 63.8 At% เมื่อเทียบกับปริมาณไทเทเนียมที่ตำแหน่งเดียวกัน 31.2 At% ดังนั้นจึงสามารถระบุได้ว่า บริเวณผิวของชั้นหลอมละลายนั้นประกอบด้วยออกไซด์ของไทเทเนียม และไม่พบไนโตรเจนในบริเวณดังกล่าวคาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาที่ไนตรายด์เกิดออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงตามปฏิกิริยาเคมีที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ เมื่อวิเคราะห์ในบริเวณใกล้ส่วนกลางของร่องตัดแทบไม่พบออกซิเจนแพร่เข้าภายในเนื้อของชั้นหลอมละลาย และพบการกระจายตัวไนโตรเจนที่บริเวณผิวมากกว่าอย่างชัดเจน



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.20 ภาพจากเทคนิค SEM Secondary Electron แสดงบริเวณชั้นหลอมละลายที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS Mapping (ซ้ายบน), ภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม (ขวาบน), ภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุออกซิเจน (ซ้ายกลาง), ภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุไนโตรเจน (ขวากลาง) และกราฟแสดงปริมาณของธาตุที่ตรวจพบในบริเวณภายใน

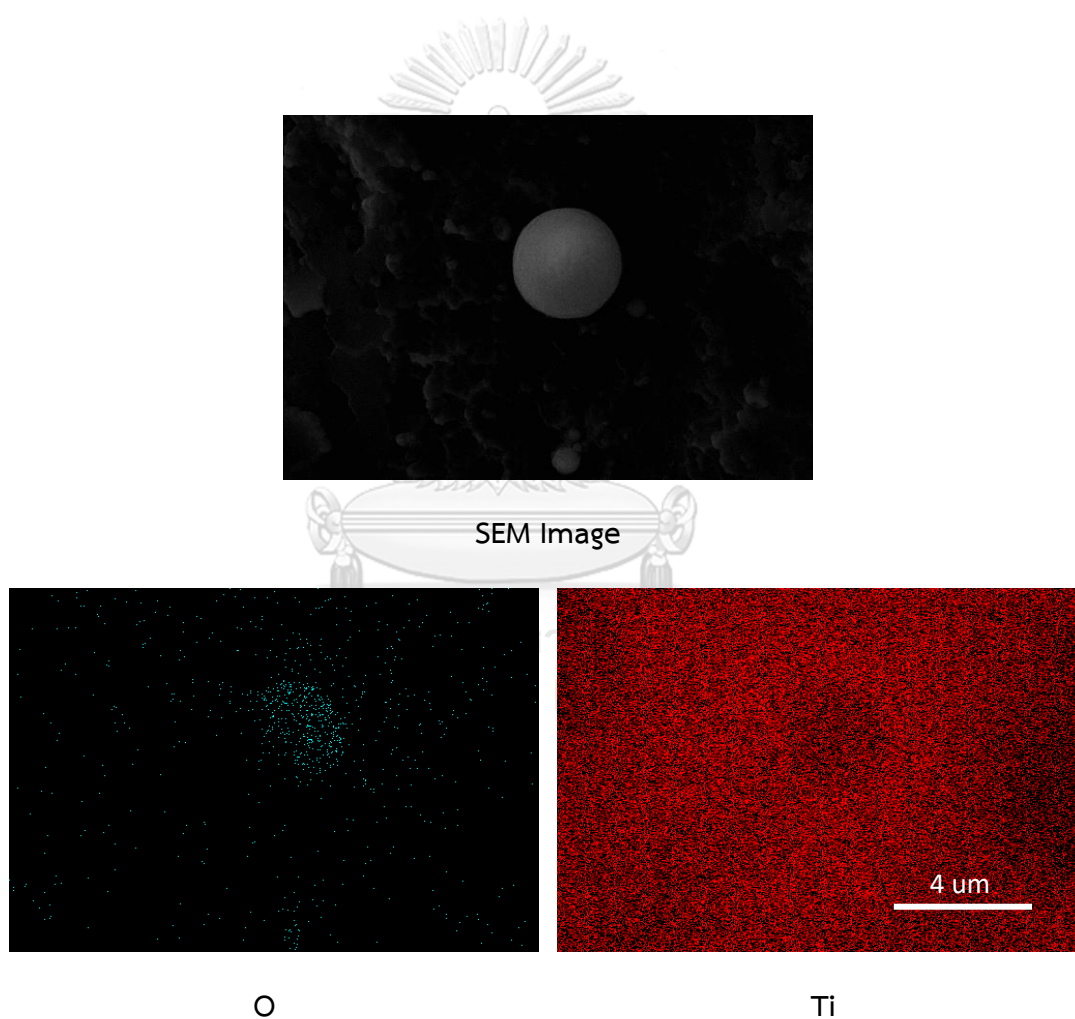
เมื่อใช้เทคนิค EDS Mapping บริเวณหยดของโลหะไทเทเนียมที่เกิดในระหว่างการตัดจะสามารถพบธาตุออกซิเจนได้มากกว่าผิวรอยตัดในบริเวณเดียวกัน สาเหตุเพราะลักษณะทรงกลมของหยดโลหะนี้จะเย็นตัวช้ากว่าบริเวณอื่นเนื่องจากมีจุดสัมผัสกับเนื้อพื้นที่น้อยมากไม่สามารถนำความร้อนสู่เนื้อพื้นได้รวดเร็วเหมือนบริเวณผิวรอยตัด จึงพบออกซิเจนบริเวณผิวของหยดไทเทเนียมทรงกลมนี้มากกว่าบริเวณผิวข้างใต้ที่ตำแหน่งเดียวกันเพราะมีระยะเวลาที่มีอุณหภูมิสูงพอจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้นานกว่าบริเวณอื่น โดยจากธาตุประกอบที่วัดได้ทำให้ทราบว่าบริเวณผิวของทรงกลมนี้เป็นออกไซด์ของไทเทเนียม



รูปที่ 4.21 หยดน้ำโลหะทรงกลมที่พบบริเวณผิวรอยตัด

ตารางที่ 4.5 ส่วนผสมทางเคมีของทรงกลมของหยดน้ำโลหะที่พบบนผิวรอยตัด

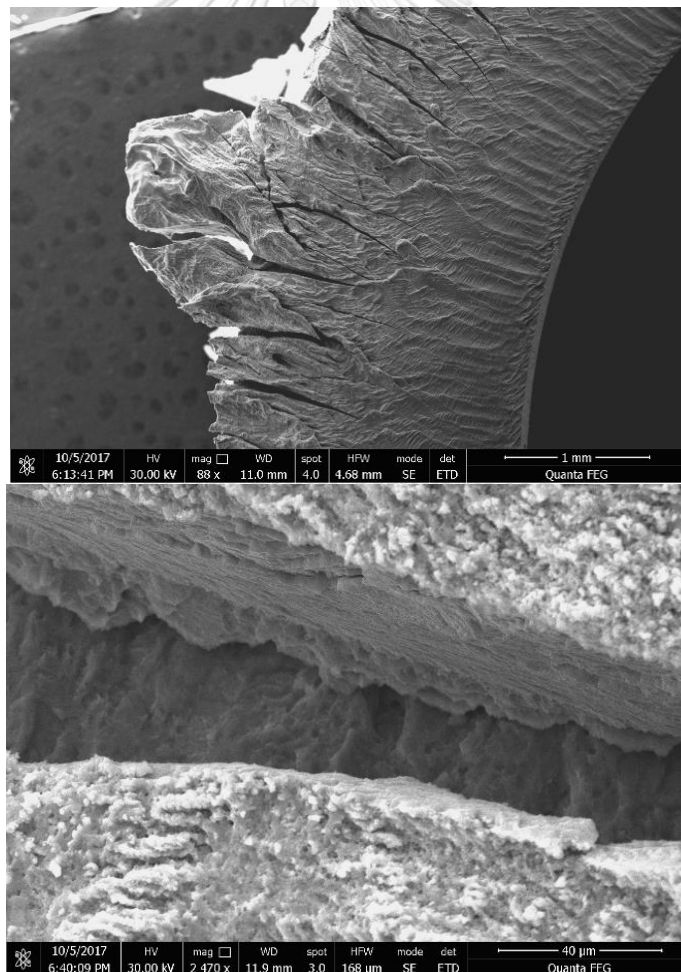
ธาตุประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม
Ti	39.71
Al	4.88
V	1.23
O	53.38



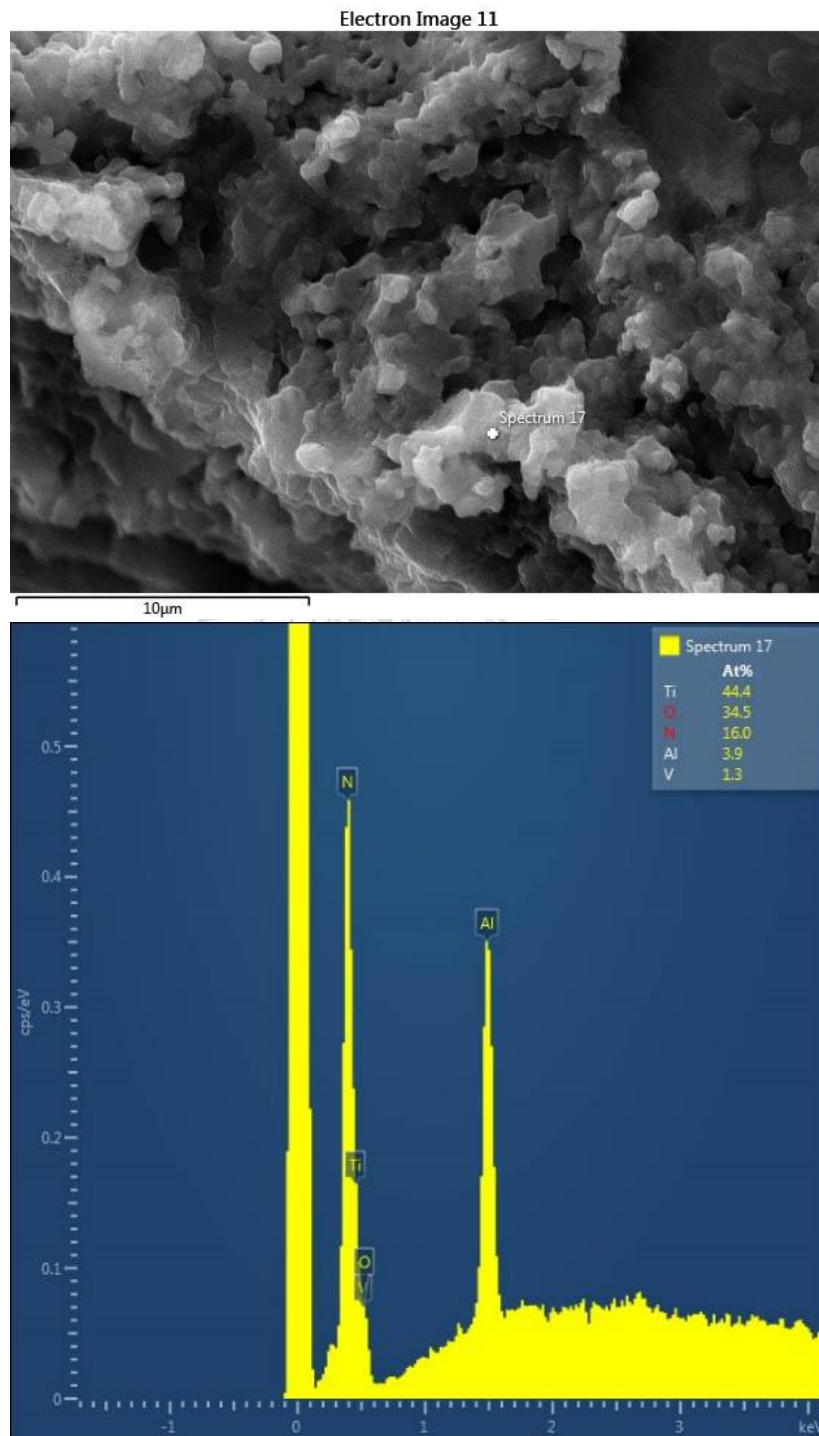
รูปที่ 4.22 ภาพแสดงทรงกลมของหยดน้ำโลหะบนผิวรอยตัดที่วิเคราะห์ด้วย EDS Mapping

4.5.3 การทดสอบการดัดงอ

ในกรณีของชิ้นงานที่ผ่านดัดงอนั้น พบรอยแตกจำนวนมากในบริเวณของชั้นหลอมละลายซึ่งตรวจพบออกไซด์ของไทเทเนียมบริเวณผิวรอยตัดด้านนอก รวมไปถึงเฟสที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงจำนวนมากภายในชั้นนี้และเนื้อที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง ภายใต้รอยแตกนี้พบว่าชั้นหลอมละลาย (RC) ที่เกิดการแตกหลุดร่อนแยกตัวออกจากชั้น HAZ เนื่องจากชั้น HAZ มีความเหนียวสูงกว่าสามารถเปลี่ยนรูปได้มากกว่าโดยไม่แตกออกเมื่อถูกดัดงอด้วยรัศมีการดัดตามที่ได้ทำการทดสอบ เมื่อใช้เทคนิค EDS วิเคราะห์ธาตุประกอบบริเวณพื้นผิวของชั้นที่เกิดรอยแตกพบว่า มีปริมาณธาตุไทเทเนียม 44.4 At% ออกซิเจน 34.5 At% ไนโตรเจน 16.0 At% ซึ่งหมายถึงผิวของชั้นนี้ประกอบด้วย ออกไซด์ของไทเทเนียม(Ti_xO_y) และ ไนไตรต์ของไทเทเนียม(Ti_xN_y) เป็นส่วนใหญ่ สารประกอบเหล่านี้เป็นเซรามิกซึ่งมีความแข็งสูงและเปราะ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งของการแตกที่เกิดขึ้นในชั้นนี้ด้วย การเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ยังส่งผลให้บริเวณผิวที่เกิดมีการเพิ่มขึ้นของปริมาตรและพบรูพรุนอีกด้วย



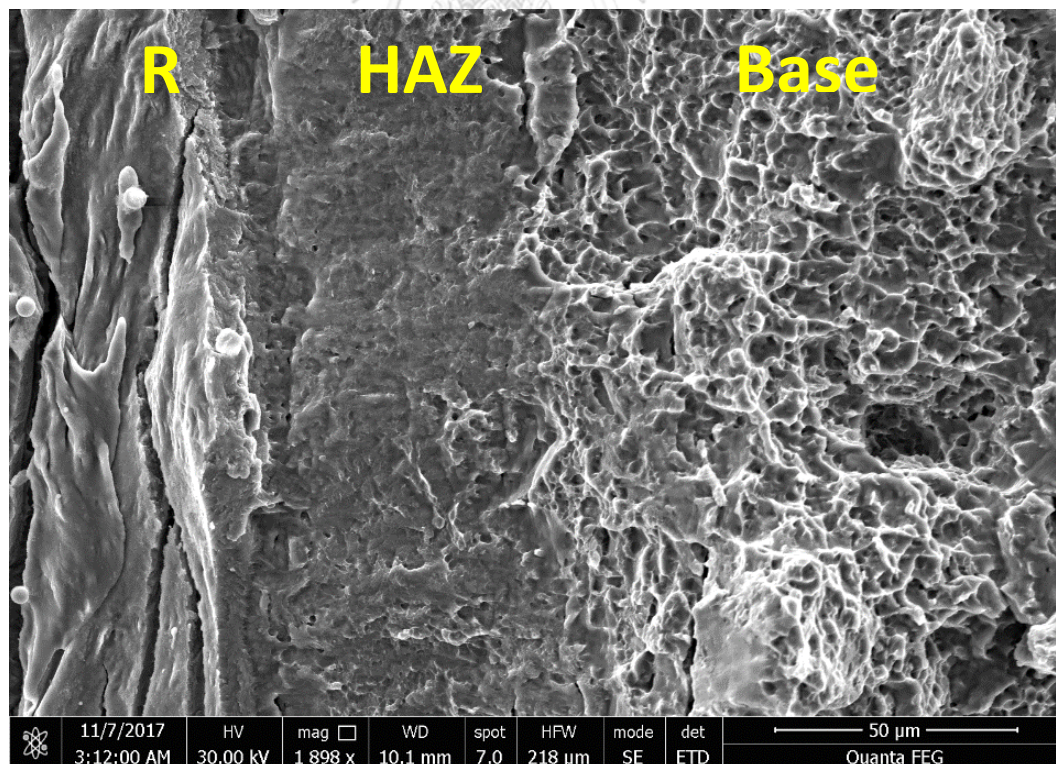
รูปที่ 4.23 รอยแตกบริเวณชั้นหลอมละลายของชิ้นงานที่ผ่านการดัดงอ (ซ้าย) และรอยแยกระหว่างชั้นหลอมละลายและชั้น HAZ (ขวา)



รูปที่ 4.24 สเปกตรัมที่วัดได้จากเทคนิค EDS โดยใช้เครื่อง Oxford X-act (ซ้าย) และภาพจากเทคนิค SEM Secondary Electron แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS (ขวา)

4.5.4 การทดสอบการแตกหัก

จากการทดสอบหักชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับทิศการตัดและระนาบผิวโลหะแผ่นเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการแตกในแต่ละชั้น ดังรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นการแตกของชั้น RC ที่สามารถแยกความแตกต่างออกจากชั้น HAZ ได้อย่างชัดเจน และชั้นของเนื้อพื้นที่แสดงพื้นผิวที่มีลักษณะโครงสร้างการแตกที่ต่างจากสองชั้นก่อนหน้า สาเหตุของลักษณะการแตกที่พบ เกิดจากโครงสร้างที่ต่างกันในแต่ละชั้น โดยส่วนของชั้น RC พบการแตกแบบเปราะ ตรงกับสมบัติของเฟสและโครงสร้างทางจุลภาคที่พบและได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้าที่พบว่าชั้นดังกล่าวเป็นชั้นที่ประกอบด้วยผิวที่เป็น Alpha case ของออกซิเจนและไนโตรเจน เนื้อพื้นที่เป็นเฟสมาร์เทนไซต์ของไทเทเนียม และเฟสที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงซึ่งฝังเป็นชั้น ๆ อยู่ภายในเนื้อของชั้นนี้ ทั้งหมดนี้ล้วนเป็นเฟสและโครงสร้างที่มีความแข็งสูงและเปราะจึงทำให้เกิดลักษณะการแตกแบบเปราะที่พบ ในส่วนของชั้น HAZ เกิดการแตกแบบเหนียวแต่น้อยกว่าเนื้อพื้นที่เป็นผลจากเฟสมาร์เทนไซต์ที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว แต่ไม่พบเฟสอื่นแทรกอยู่ภายในชั้นดังกล่าวรวมไปถึงการแพร่เข้าของไนโตรเจนหรือออกซิเจน ดังนั้นชั้นนี้จึงมีแข็งที่ต่ำกว่าและความเหนียวสูงกว่าชั้น RC เห็นได้จากการทดสอบดังข้อที่ไม่พบการแตกหรือหลุดร่อนของชั้นนี้เมื่อถูกทำให้เปลี่ยนรูปในปริมาณต่ำ ที่บริเวณเนื้อพื้นพบลักษณะการแตกแบบเหนียวที่ตรงตามสมบัติของไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ประกอบด้วยเฟส α และ β

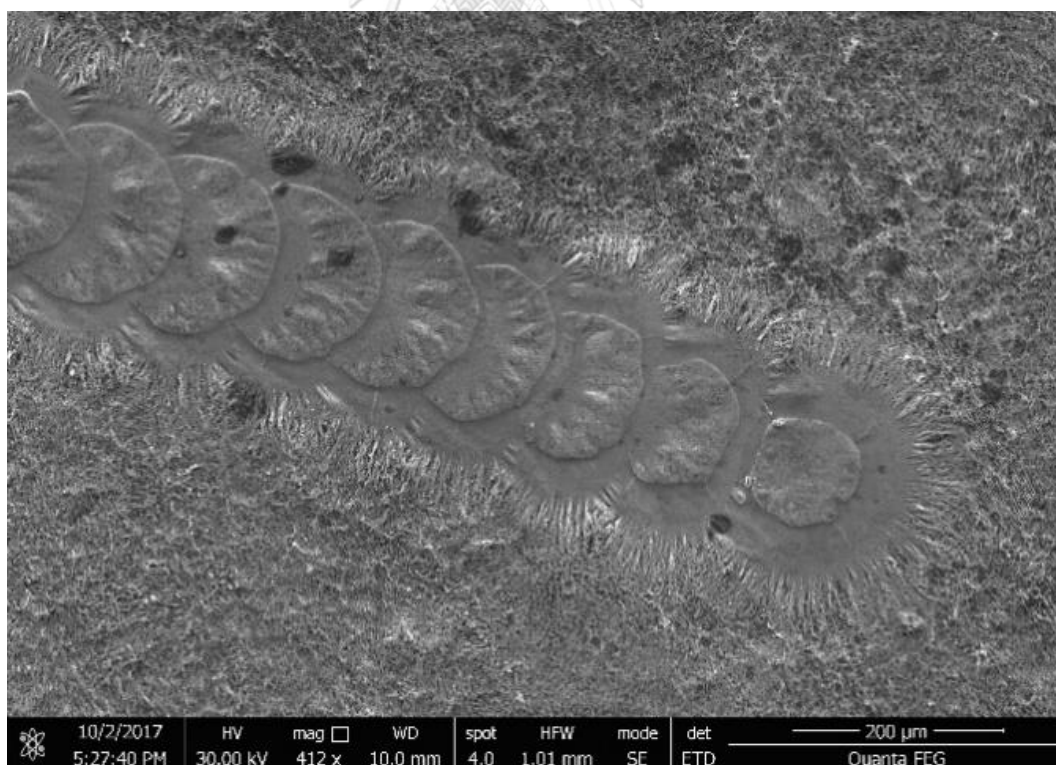


รูปที่ 4.25 พื้นผิวที่เกิดการแตกหักแสดงการแยกตัวระหว่างชั้น RC, HAZ และเนื้อพื้นเดิม (Base)

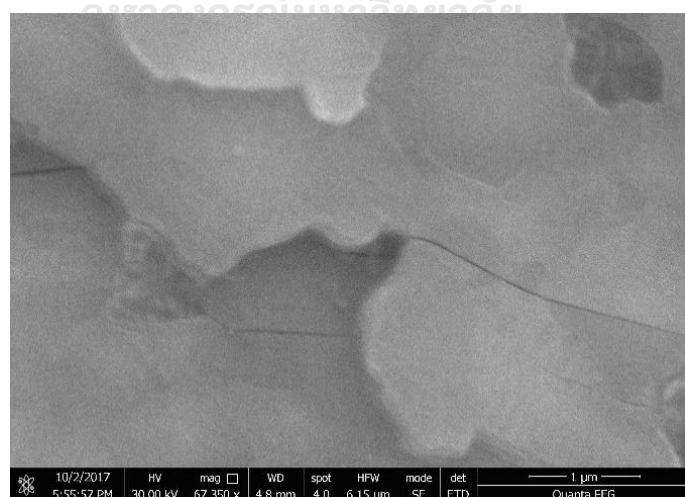
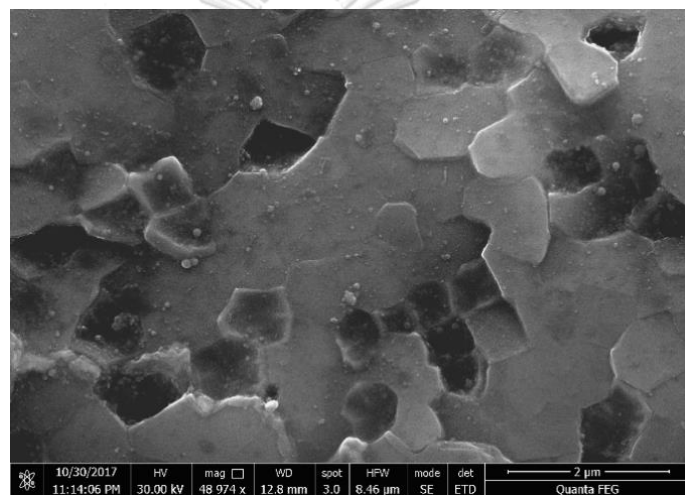
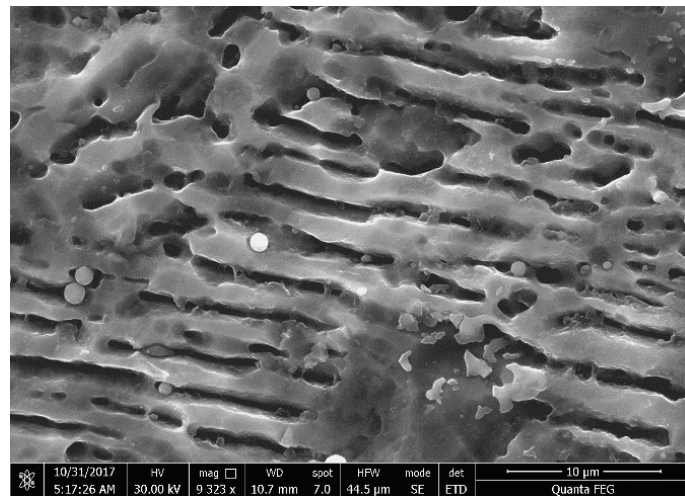
4.5.5 การทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

เพื่อช่วยยืนยันสมมติฐานว่าออกซิเจนที่พบ เกิดภายหลังจากแก๊สช่วยตัดผ่านไป แล้ว และผิวของรอยตัดได้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในชั้นบรรยากาศในขณะที่ผิวรอยตัดยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงได้ทำการทดสอบยิงลำแสงเลเซอร์ ลงบนบริเวณผิวหน้าของแผ่นไทเทเนียมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเช่นเดียวกับในขั้นตอนการตัดแต่ในสภาวะที่อยู่ภายใต้แก๊สไนโตรเจนคลุมตลอดเวลาที่ทดสอบ พบว่าบริเวณที่ทดสอบเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาตรและพบผลลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ซ้อนกันเป็นชั้นมีรอยแตกขนาดเล็กบนผิว

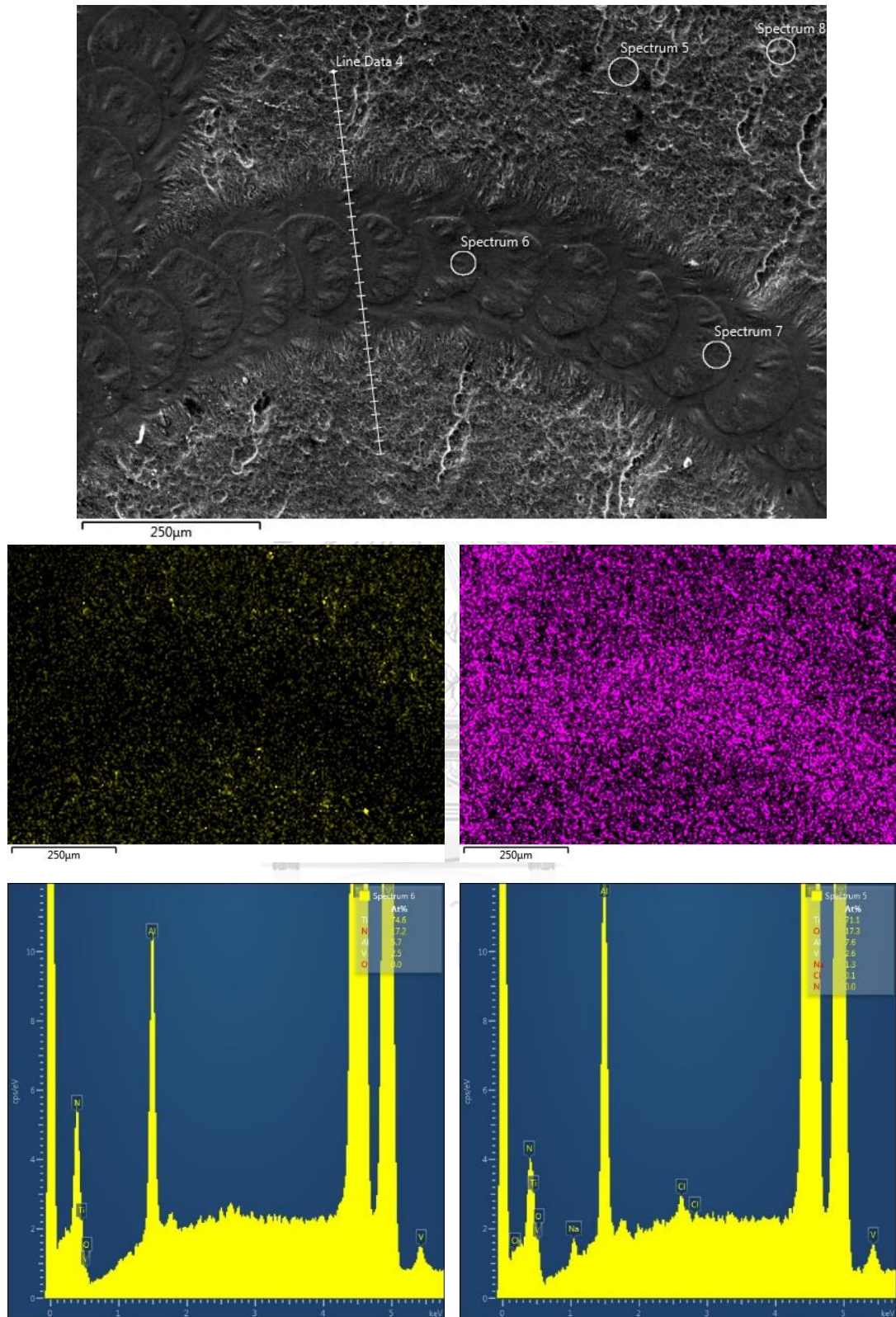
เมื่อทำการตรวจวัดธาตุประกอบด้วยเทคนิค EDS พบว่าบริเวณตำแหน่งที่ทดสอบยิงลำแสงเลเซอร์มีธาตุประกอบที่แตกต่างจากผิวดั้งเดิมของแผ่นไทเทเนียมซึ่งพบ ออกซิเจน 17.3 At% ไนโตรเจน 0 At% แต่บริเวณที่ได้รับพลังงานจากเลเซอร์รวมไปถึงบริเวณรอบ ๆ กลับพบ ออกซิเจน 0 At% ไนโตรเจน 17.2 At% แสดงให้เห็นว่าระหว่างที่บริเวณที่ถูกแสงเลเซอร์ได้รับพลังงานจนมีอุณหภูมิสูงจนถึงช่วงที่เย็นตัวลง หากตลอดช่วงเวลายังคงมีแก๊สไนโตรเจนปกคลุมอยู่จะไม่พบออกไซด์ในบริเวณนั้น จึงสามารถช่วยยืนยันได้ว่า ออกซิเจนที่พบบริเวณรอยตัดนั้น เกิดขึ้นในภายหลังจากช่วงที่หัวตัดและแก๊สคลุมเคลื่อนที่ผ่านไปแล้ว ไม่ใช่ในระหว่างการตัด



รูปที่ 4.26 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด แสดงรอยจากการยิงเลเซอร์



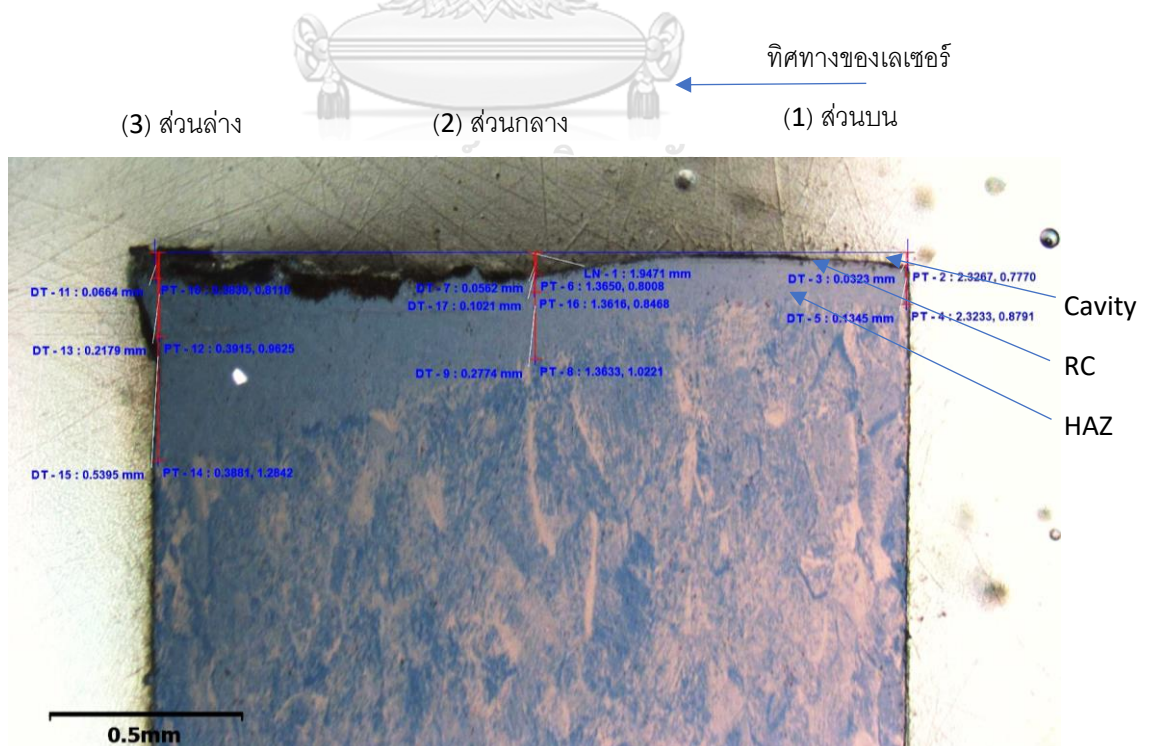
รูปที่ 4.27 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงผิวเดิมก่อนการทดสอบยิงเลเซอร์ (บน), เฟสที่เกิดจากการยิงด้วยเลเซอร์ภายใต้แก๊สไนโตรเจน (กลาง) และ รอยแตกขนาดเล็กรบริเวณ เฟสที่เกิด (ล่าง)



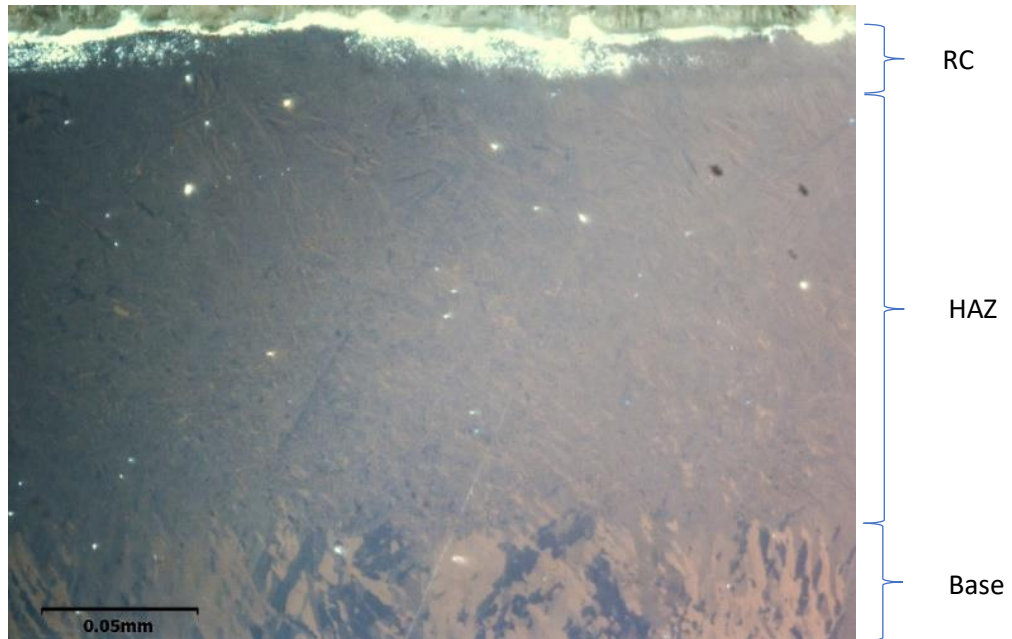
รูปที่ 4.28 ภาพจากเทคนิค EDS Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุ ไนโตรเจนและ ออกซิเจน บริเวณรอยจากการยิงเลเซอร์

4.6 การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้น HAZ

เนื่องจากการตัดด้วยเลเซอร์นั้นบริเวณรอยตัดจะเกิดอุณหภูมิที่สูงและมีอัตราการเย็นตัวที่สูงด้วย ทั้งสองสิ่งนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะไทเทเนียม และมีผลกระทบต่อสมบัติของบริเวณดังกล่าว เนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคที่แตกต่างกันย่อมมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน การใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันในการตัดจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยตัดเช่น อุณหภูมิระยะเวลา รวมไปถึงปริมาณของน้ำโลหะที่ตกค้าง ระยะทางของบ่อหลอมละลายและจากปัจจัยอื่น ๆ ทำให้ชั้นของบริเวณรอยตัดที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากความร้อน (HAZ) มีขนาดและลักษณะที่แตกต่างกันไป ซึ่งชั้นดังกล่าวสามารถตรวจพบได้ง่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ เนื่องจากเทคนิคนี้ทำให้สามารถมองเห็นลักษณะและทิศทางของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถแยกแยะบริเวณของ HAZ ออกจากเนื้อพื้นที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคได้ ในขั้นตอนนี้จะวัดความลึกของชั้น HAZ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ Huvitz โดยใช้เทคนิคแสงโพลาไรซ์และโปรแกรม Panasis เพื่อวัดจากเส้นอ้างอิงที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงานและทิศทางการตัด และวัดทั้งหมดสามตำแหน่งคือ ส่วนบน ส่วนล่าง และส่วนกลาง ของชิ้นงาน รูปที่ 4.29 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเชิงผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 คือ 1.กำลังของเลเซอร์ 2.ความดันแก๊สช่วยตัด 3.ความเร็วการตัด ต่อความลึกและลักษณะของชั้น HAZ ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.29 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดความลึกชั้น HAZ



รูปที่ 4.30 ภาพจากเทคนิคโพลาไรซ์แสดงชั้น RC, HAZ และ เนื้อพื้นเดิม

4.7 ผลของความดันแก๊สช่วยตัดต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ

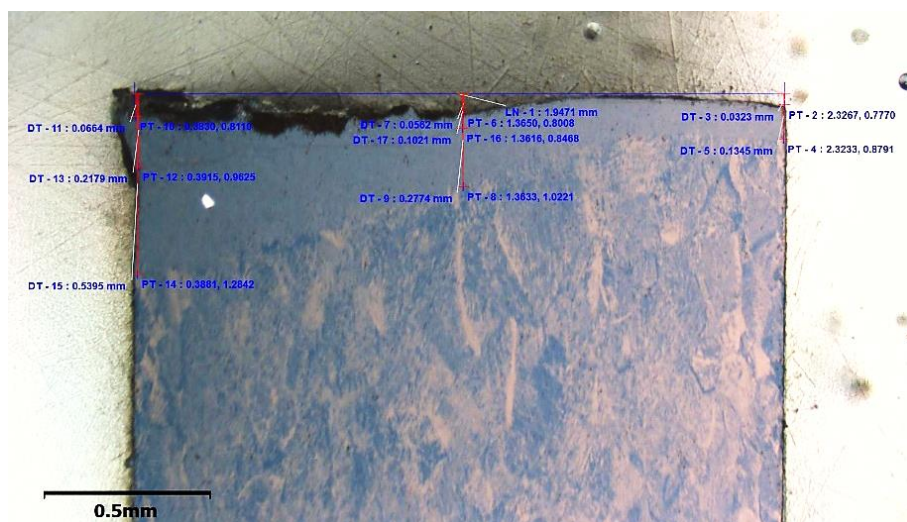
4.7.1 ชิ้นงานทดสอบผลของความดันแก๊สช่วยตัด

4.7.1.1 ชิ้นงานที่ D4

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 1 bar



รูปที่ 4.31 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D4

ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D4

	ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)		
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.0664	0.0562	0.0323
RC	0.2179	0.1021	
HAZ	0.5395	0.2774	0.1345

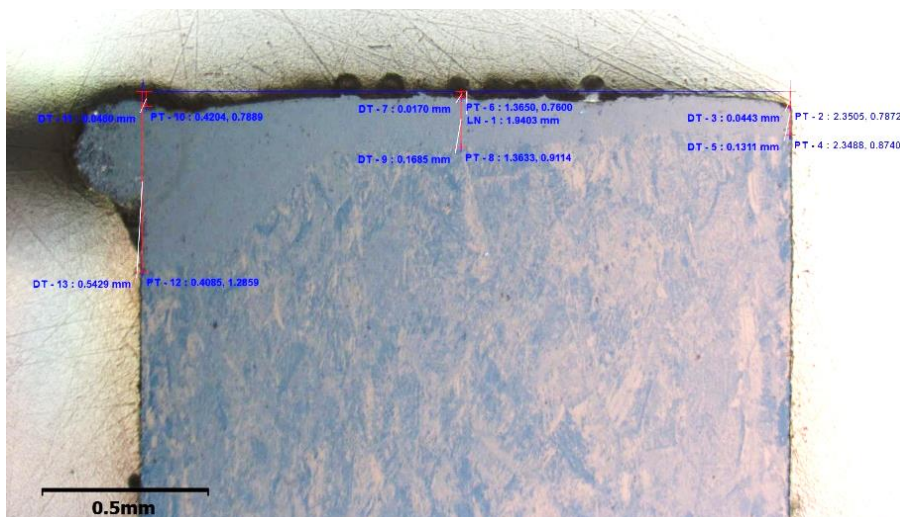
เมื่อใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดต่ำ ลักษณะของชั้น HAZ ที่ส่วนล่างของรอยตัดจะลึกและเกิดเป็นบริเวณกว้าง โดยที่มีชั้นหลอมละลายเหลือค้างอยู่ด้านล่างของรอยตัด เนื่องจากความดันของแก๊สช่วยตัดไม่สูงพอที่จะไล่น้ำโลหะจนหมด น้ำโลหะที่มีอุณหภูมิสูงจึงถ่ายเทความร้อนให้น้ำโลหะบริเวณรอบ ๆ เกิดชั้น HAZ ที่ลึกกว่าในส่วนอื่น ๆ และนอกจากนั้นเนื่องจากน้ำโลหะที่ไหลช้า มีระยะเวลานานเพียงพอที่จะถ่ายเทความร้อนสู่เนื้อพื้นทำให้เนื้อพื้นบางส่วนเกิดการหลอมละลายไปด้วยจึงพบลักษณะของผิวชิ้นงานที่เป็นหลุมเว้าเข้าไปและไม่ได้ระนาบกับรอยตัดตามที่ควรจะเป็น

4.7.1.2 ชิ้นงานที่ D2

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 4 bar



รูปที่ 4.32 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D2

ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D2

	ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)		
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.46		0.044
RC		0.017	
HAZ	0.543	0.168	0.131

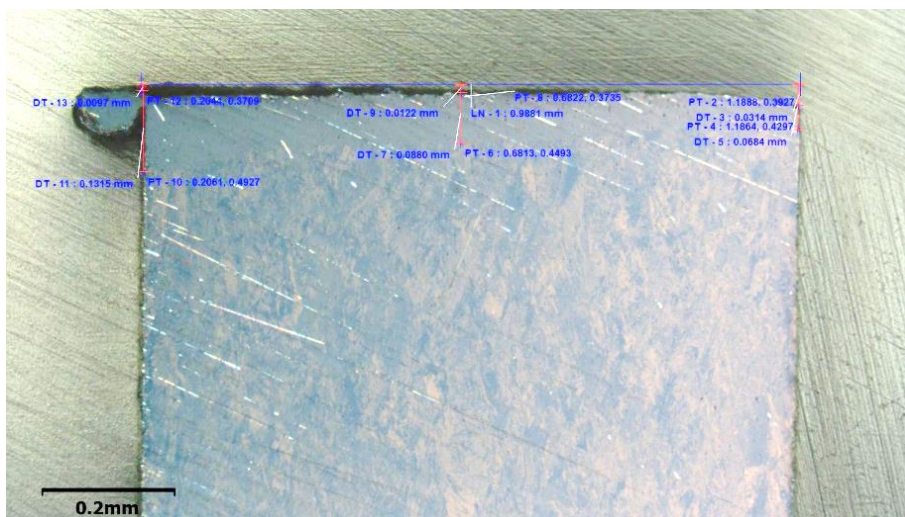
เมื่อเพิ่มความดันแก๊สช่วยตัดเป็น 2 bar ชั้น HAZ ที่บริเวณส่วนกลางของรอยตัดจะบางลง และมีชั้นหลอมละลายเหลือค้ำที่ลดลงด้วย แต่ยังคงพบหยดของน้ำโลหะเหลือค้ำบริเวณส่วนล่างของชิ้นงาน ซึ่งส่งผลให้ชั้น HAZ ในส่วนล่างหนากว่าส่วนอื่น ๆ และพบว่าในส่วนล่างของรอยตัด บริเวณหลุมที่เกิดจากเนื้อพื้นหลอมละลายเนื่องจากน้ำโลหะค้ำอยู่เป็นเวลานาน มีความลึกที่ลดลงตามไปด้วย

4.7.1.3 ชิ้นงานที่ A6N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 6 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.33 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A6N

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A6N

	ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)		
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.019	0.024	0.063
RC			
HAZ	0.244	0.176	0.137

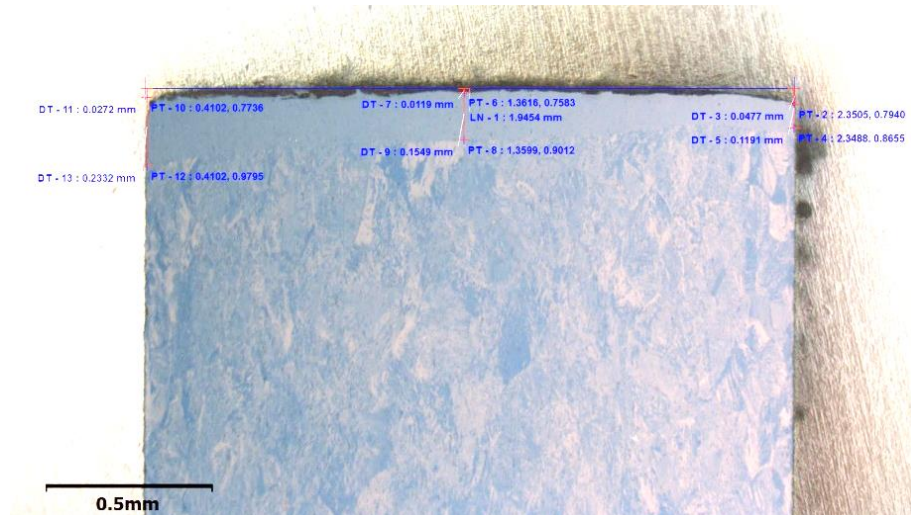
ที่ความดันแก๊สช่วยตัด 6 bar พบว่า ลักษณะของ HAZ ในส่วนล่างที่ลึกเนื่องจากน้ำโลหะที่เหลือค้างบริเวณส่วนล่างของรอยตัดแทบจะหมดไปแล้ว เหลือเพียงหยดน้ำโลหะขนาดเล็กติดอยู่ที่ปลายรอยตัดเท่านั้น และ ชั้น HAZ โดยรวมมีความสม่ำเสมอขึ้นอย่างชัดเจน

4.7.1.4 ชิ้นงานที่ D1

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.34 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D1

ตารางที่ 4.9 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D1

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.0272		0.048
RC		0.012	
HAZ	0.233	0.155	0.119

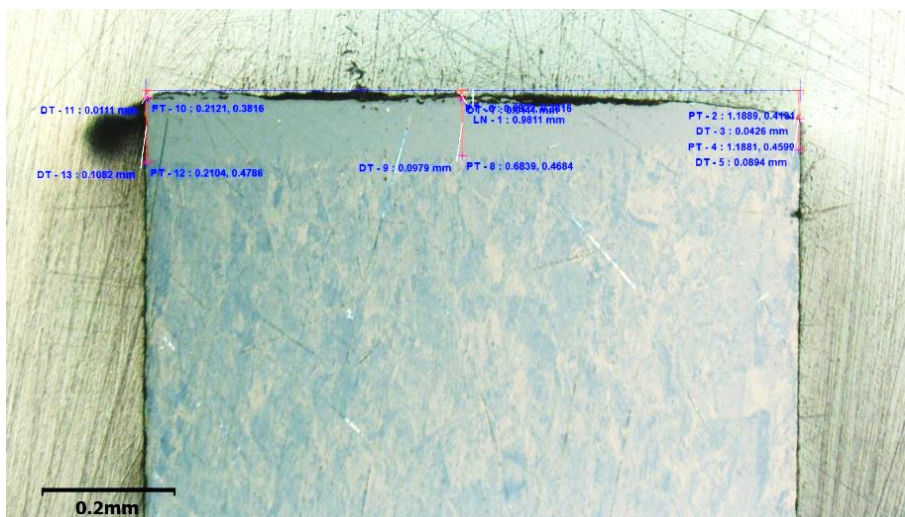
ที่ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar พบว่า HAZ ที่เกิดมีความสม่ำเสมอ และส่วนของผิวรอยตัดได้ระนาบสม่ำเสมอ โดยมีชั้นของน้ำโลหะเหลือค้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.7.1.5 ชิ้นงานที่ A7N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 12 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.35 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A7N

ตารางที่ 4.10 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A7N

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.022	0.023	0.085
RC			
HAZ	0.216	0.196	0.179

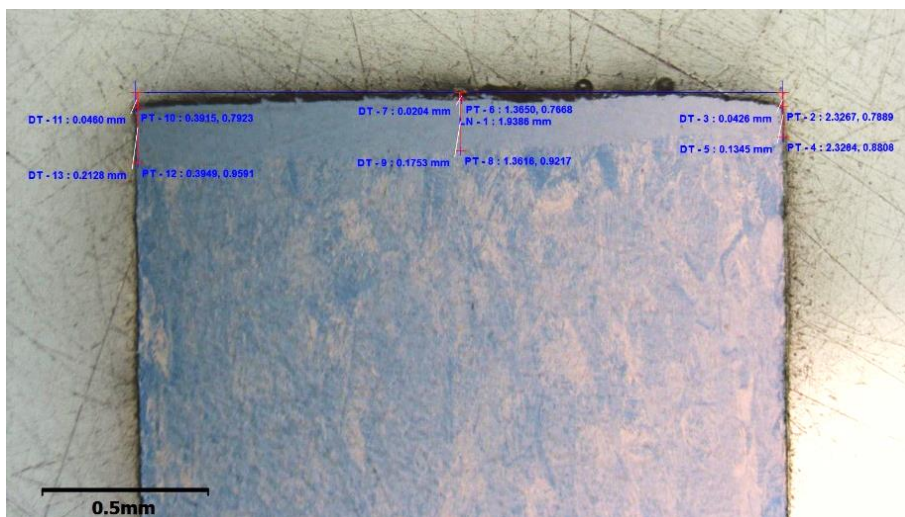
ที่ความดันแก๊สช่วยตัด 12 bar ไม่พบความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar และมีลักษณะและความสม่ำเสมอของชั้น HAZ ที่ใกล้เคียงกัน

4.7.1.6 ชิ้นงานที่ D0

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.36 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D0

ตารางที่ 4.11 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D0

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.046		0.043
RC		0.020	
HAZ	0.213	0.175	0.135

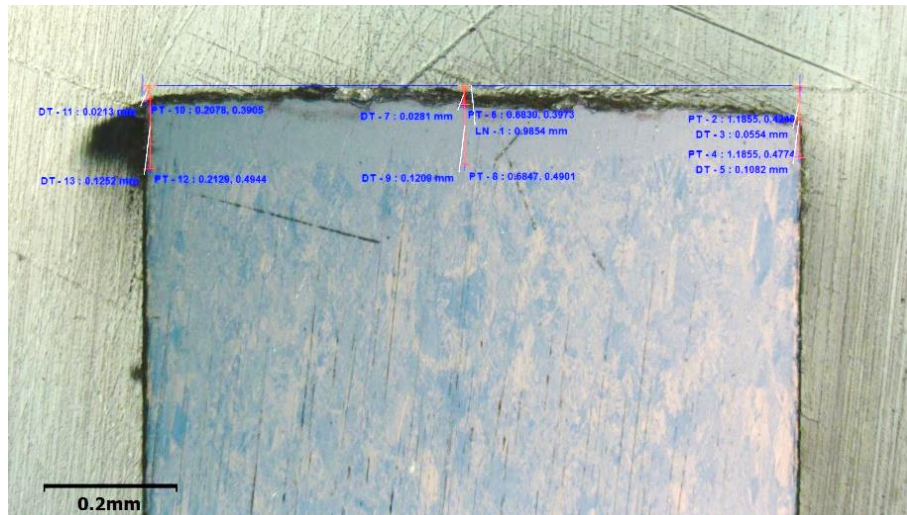
เช่นเดียวกับที่ 8 และ 12 bar ไม่พบความแตกต่างอย่างชัดเจนของชั้น HAZ หรือลักษณะของพื้นผิวรอยตัด

4.7.1.7 ชิ้นงานที่ A8N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 20 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.37 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A8N

ตารางที่ 4.12 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A8N

	ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)		
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.043	0.056	0.111
RC			
HAZ	0.250	0.242	0.217

ที่ความดันสูง 20bar จะเห็นได้ว่า บริเวณผิวของรอยตัดไม่เรียบเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำกว่า พบหลุมและการฉีกขาดของเนื้อโลหะขนาดเล็กบริเวณผิวรอยตัด เนื่องจากความดันแก๊สที่สูงขึ้นและสูงเกินไป ซึ่งเมื่อถึงความเร็วการไหลที่มากพอ แก๊สที่ไหลด้วยความเร็วสูงเกินไปจะทำให้เกิดการไหลที่ปั่นป่วน (Turbulence) และส่งผลเช่นเดียวกันต่อการไหลของน้ำโลหะ เกิดการกัดเซาะของผิวรอยตัด ผิวรอยตัดจึงมีคุณภาพและความเรียบผิวที่ลดลง

4.7.2 วิเคราะห์ผลของความดันแก๊สช่วยตัดต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ

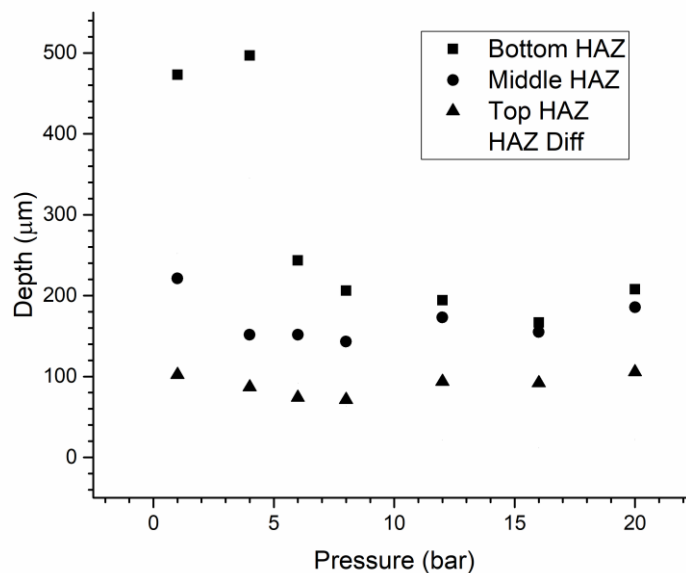
จากลักษณะและความลึกของ HAZ ที่เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สช่วยตัด พบว่าเกิดความแตกต่างอย่างชัดเจนในบริเวณส่วนล่างของรอยตัดจะลึกขึ้นเมื่อความดันแก๊สช่วยตัดลดลง ค่าความลึกของชั้น HAZ ที่วัดได้นี้จะเปรียบเทียบความแตกต่างได้โดยคำนวณหาค่าทั้งหมด 3 ชุด คือ

1. Bottom HAZ, Middle HAZ, Top HAZ คือ ความลึกจริงของชั้น HAZ แต่ละส่วนที่วัดได้
2. HAZ Diff คือ ผลต่างระหว่างความลึกของชั้น HAZ บริเวณส่วนล่างกับส่วนกลางของรอยตัด
3. HAZ Sum ผลรวมของความลึกชั้น HAZ ทั้ง 3 ชั้น

เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ใช้พารามิเตอร์แตกต่างกันพบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สช่วยตัดจะทำให้ชั้นหลอมละลายมีความหนาลดลงและสม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากความดันแก๊สที่มากขึ้นทำให้ความเร็วการไหลของแก๊สที่บริเวณร่องตัดมีความเร็วที่สูงขึ้นจึงสามารถไล่น้ำโลหะหลอมเหลวออกไปได้มากและรวดเร็วขึ้นนั่นเอง และยังส่งผลกับชั้น HAZ ในทิศทางเดียวกันโดยในกรณีของชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำ จะพบว่าบริเวณส่วนล่างของรอยตัด ชั้น HAZ จะมีความลึกมากกว่าบริเวณอื่น ซึ่งเกิดจากการตกค้างของโลหะเหลวที่ส่วนล่างถ่ายเทความร้อนลงสู่เนื้อพื้นมากกว่าส่วนอื่นนั่นเอง นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำมากจะพบว่าผิวรอยตัดจะแห้วออกในส่วนล่างของรอยตัดอีกด้วย เป็นผลจากการถ่ายเทความร้อนจากโลหะเหลวที่ตกค้างและไหลเข้าเกินไปเช่นกัน แต่เมื่อใช้ความดันแก๊สช่วยตัดสูงมากจะพบการฉีกขาดขนาดเล็กกระหว่างรอยต่อของชั้น HAZ และชั้นที่เกิดการหลอมละลาย และชั้นนี้ยังมีความสม่ำเสมอที่ลดลงเป็นผลเนื่องจากความดันแก๊สช่วยตัดที่สูงเกินไปทำให้เกิดการไหลเวียนที่เร็วและปั่นป่วนจึงเกิดการกัดเซาะอย่างรุนแรงในบริเวณนี้

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความลึกชั้น HAZ ที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สช่วยตัด เมื่อใช้กำลังของเลเซอร์ 3000 W และ ความเร็วการตัด 4000 mm/min

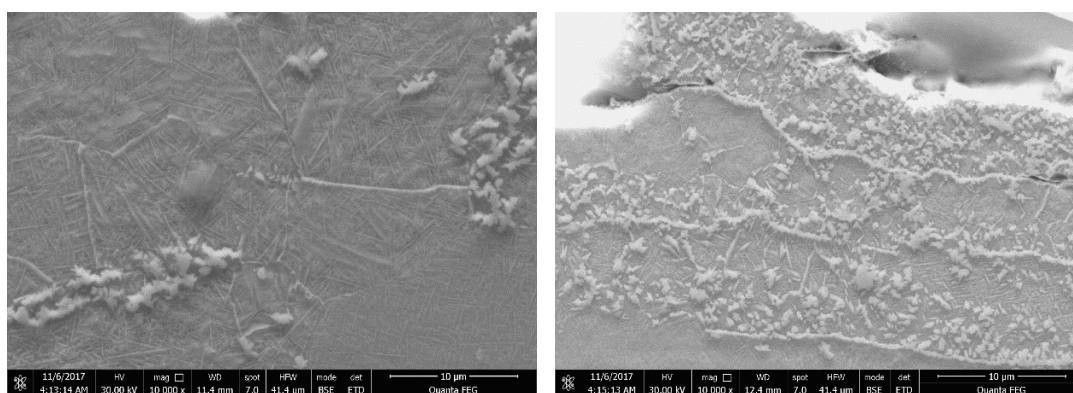
No.	Pressure (bar)	Bottom HAZ (mm)	Middle HAZ (mm)	Top HAZ (mm)	HAZ Diff (mm)	HAZ Sum (mm)
<u>D4</u>	1	0.473	0.221	0.102	0.252	0.797
<u>D2</u>	4	0.497	0.152	0.087	0.345	0.735
<u>A6N</u>	6	0.244	0.152	0.074	0.092	0.469
<u>D1</u>	8	0.21	0.143	0.071	0.063	0.420
<u>A7N</u>	12	0.194	0.173	0.094	0.021	0.461
<u>D0</u>	16	0.167	0.155	0.092	0.012	0.414
<u>A8N</u>	20	0.208	0.186	0.106	0.022	0.499



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้น HAZ เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สช่วยตัด

เมื่อเปรียบเทียบชั้น HAZ ตาม รูปที่ 4.38 จะพบว่าไม่เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างความลึกของชั้น HAZ ในบริเวณส่วนกลางและส่วนบนของรอยตัดในทุกช่วงของความดันแก๊สช่วยตัดที่ใช้ แต่ความแตกต่างอย่างชัดเจนเกิดขึ้นในส่วนล่างของรอยตัดซึ่งเป็นปากทางไหลออกของน้ำโลหะในระหว่างการตัด ของชิ้นงานทดสอบที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดในช่วง 1 - 6 bar ลักษณะที่พบสามารถช่วยยืนยันได้ว่า ผลของกำลังแก๊สช่วยตัดต่ำที่มีผลให้ชั้น HAZ ในบริเวณส่วนล่างของรอยตัดมีความลึกมากขึ้นนั้น เกิดจากน้ำโลหะเหลือค้างที่ติดอยู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานนั่นเอง เนื่องจากความดันแก๊สช่วยตัดต่ำเกินไปไม่เพียงพอที่จะไล่น้ำโลหะส่วนเกินออก ในชิ้นงานที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัด 6 bar แรงดันแก๊สช่วยตัดเริ่มมากพอที่จะทำให้หยดน้ำโลหะหลุดจากรอยตัดจนเกือบหมดแล้ว แต่ยังมีเหลือติดอยู่เพียงเล็กน้อย และด้วยจุดเชื่อมต่อระหว่างส่วนปลายของรอยตัดและหยดน้ำโลหะที่มีขนาดเล็กมาก ความร้อนจากหยดน้ำโลหะจึงถ่ายเทกลับสู่เนื้อพื้นด้วยอัตราที่ต่ำ ผลของการเปลี่ยนแปลงในบริเวณชั้น HAZ ส่วนล่างของรอยตัดจึงไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในชิ้นงานนี้เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำกว่า

ในส่วนของชั้นลักษณะชั้น RC พบว่า ในกรณีของชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำจะพบเฟสที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงได้น้อยกว่า ชั้น RC ของชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.39 ทางด้านซ้ายเป็นของชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัด 1 bar จะพบปริมาณของเฟสดังกล่าวน้อยกว่าภาพทางด้านขวาที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar อย่างชัดเจน ความแตกต่างที่พบนี้คาดว่าเกิดจากผลของความปั่นป่วนในการไหลของน้ำโลหะในบริเวณรอยตัด ในกรณีที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำแก๊สช่วยตัดไหลช้า การทบและกระจายตัวของเฟสดังกล่าวจึงเกิดน้อยกว่าการใช้ความดันแก๊สช่วยตัดสูง แต่ในทางกลับกันชิ้นงานที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดต่ำก็มีชั้น RC ที่หนากว่าชิ้นงานที่ใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดสูงอย่างชัดเจนเช่นกัน



รูปที่ 4.39 ลักษณะชั้น RC ของชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัด 1 bar (ซ้าย) และ 16 bar (ขวา)

4.8 ผลของกำลังของเลเซอร์ต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ

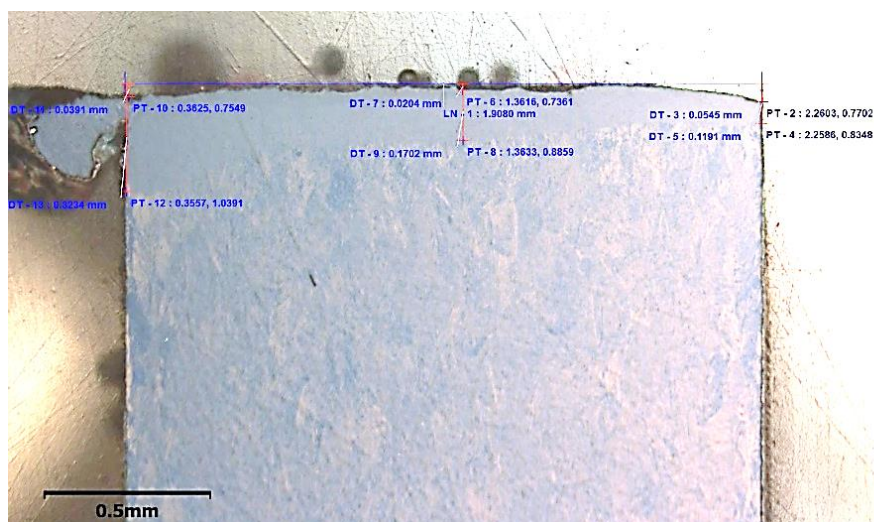
4.8.1 ชิ้นงานทดสอบผลของกำลังของเลเซอร์

4.8.1.1 ชิ้นงานที่ A1

กำลังของเลเซอร์ 1000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.40 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A1

ตารางที่ 4.14 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A1

	ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)		
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.039		0.055
RC		0.020	
HAZ	0.324	0.170	0.119

พบลักษณะของ HAZ ส่วนล่างที่มีความลึกกว่าบริเวณอื่นและมีหยดน้ำโลหะขนาดใหญ่ที่ส่วนล่างเนื่องจากผลของกำลังเลเซอร์ที่ต่ำ ทำให้น้ำโลหะบริเวณบ่อหลอมละลายมีอุณหภูมิต่ำและมีความหนืดสูงจึงไหลออกจากรอยตัดได้ยากกว่าน้ำโลหะที่มีความหนืดต่ำและเกิดการคั่งที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงาน คล้ายกับเหตุการณ์ที่เกิดในกรณีที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำ ดังนั้น หากใช้ความดันแก๊สที่เท่ากัน การตัดด้วยกำลังของเลเซอร์ที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับรอยตัดที่ใช้กำลังของเลเซอร์ที่สูง จะพบว่าชิ้นงานที่ใช้กำลังของเลเซอร์ต่ำจะมีลักษณะของ HAZ คล้ายชิ้นงานที่ใช้ความดันแก๊สช่วยตัดต่ำกว่าแต่ใช้กำลังของเลเซอร์เท่ากัน

4.8.1.2 ชิ้นงานที่ B4N

กำลังของเลเซอร์ 1500 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.41 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B4N

ตารางที่ 4.15 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ B4N

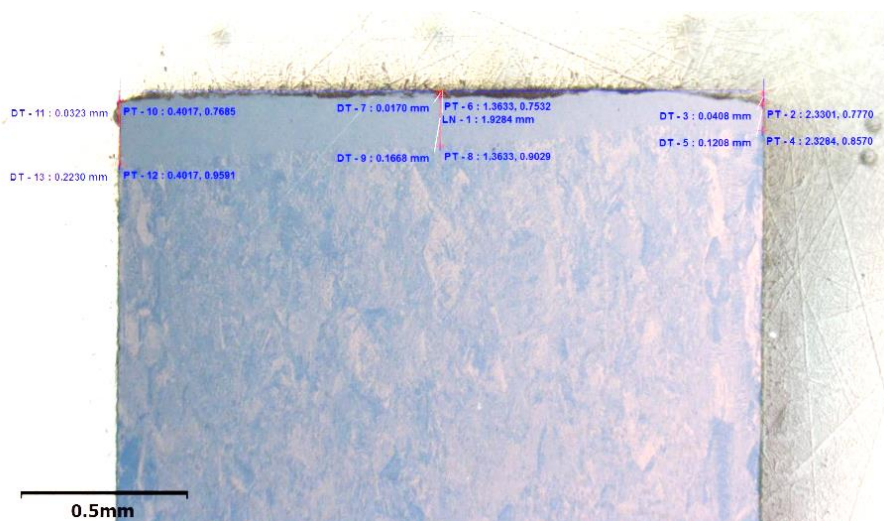
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.037		0.063
RC		0.017	
HAZ	0.378	0.170	0.150

4.8.1.3 ชิ้นงานที่ B1

กำลังของเลเซอร์ 2000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.42 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B1

ตารางที่ 4.16 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ B1

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.032		0.048
RC		0.017	
HAZ	0.223	0.167	0.121

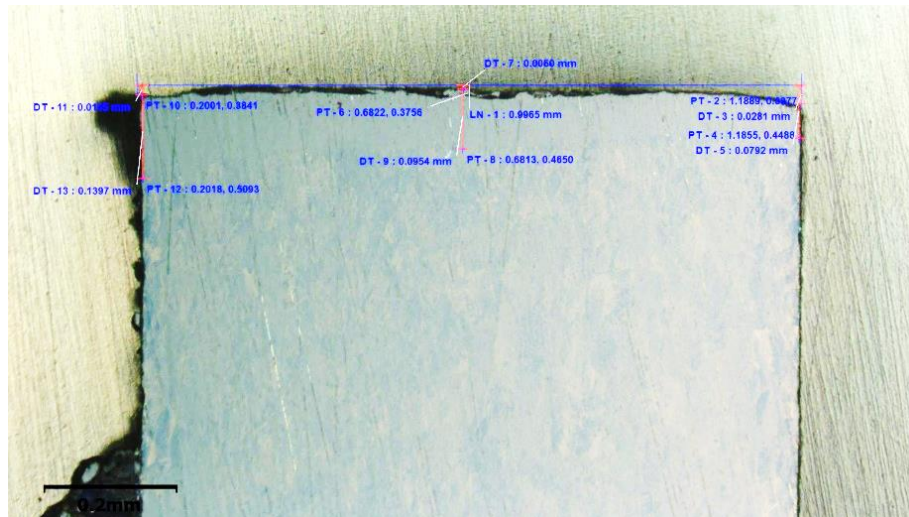
เมื่อเพิ่มกำลังของเลเซอร์จนสูงพอ ลักษณะของ HAZ ที่ลึกกว่าในบริเวณส่วนล่างของรอยตัดที่พบในชิ้นงานก่อนหน้าที่ใช้กำลังของเลเซอร์ต่ำกว่านี้ซึ่งเกิดเนื่องจากการคั่งของน้ำโลหะบริเวณส่วนปลายของรอยตัดจึงหมดไป

4.8.1.4 ชิ้นงานที่ B5N

กำลังของเลเซอร์ 2500 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.43 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B5N

ตารางที่ 4.17 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ B5N

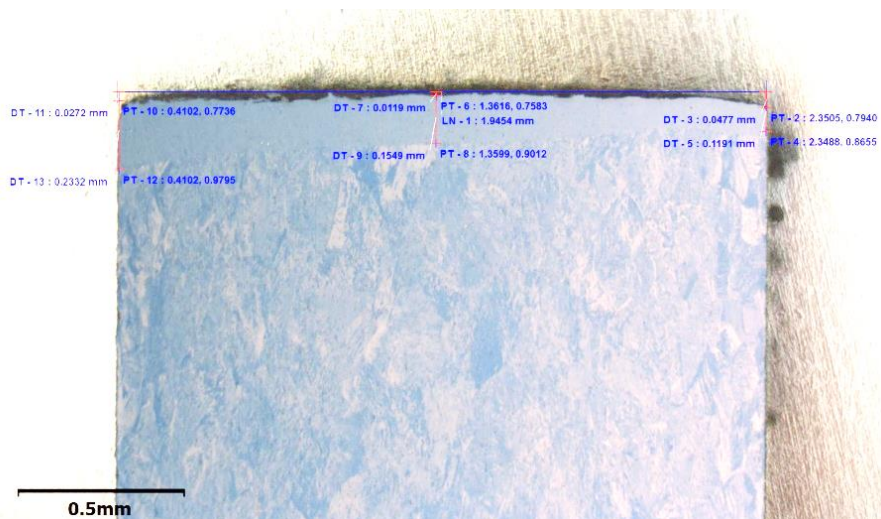
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.029		0.056
RC		0.012	
HAZ	0.279	0.191	0.158

4.8.1.5 ชิ้นงานที่ D1

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.44 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D1

ตารางที่ 4.18 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D1

	ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)		
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.027		0.048
RC		0.012	
HAZ	0.233	0.155	0.119

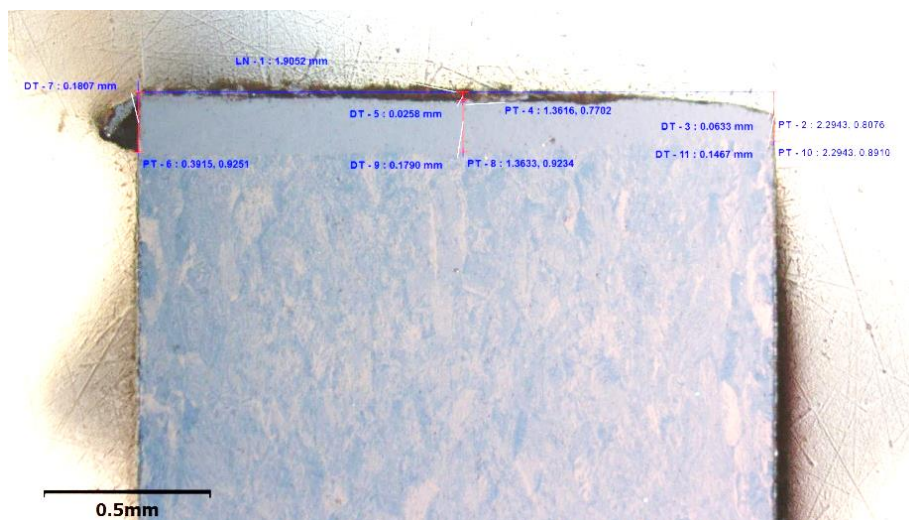
เมื่อเพิ่มกำลังของเลเซอร์ขึ้น และเปรียบเทียบชิ้นงานในกลุ่มที่ใช้กำลังของเลเซอร์ 2000-3000W ไม่พบความแตกต่างของลักษณะชั้น HAZ แต่อย่างใด

4.8.1.6 ชิ้นงานที่ A0

กำลังของเลเซอร์ 1000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.45 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A0

ตารางที่ 4.19 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A0

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity			0.063
RC		0.026	
HAZ	0.181	0.179	0.147

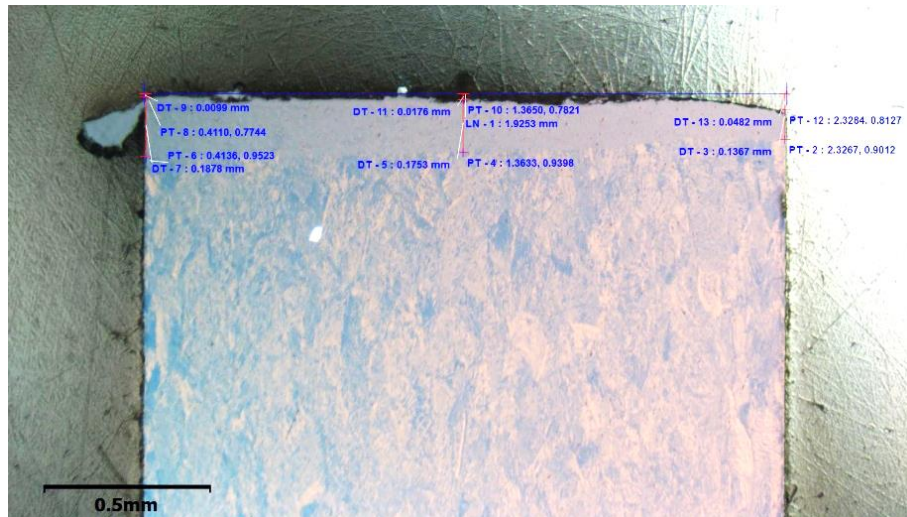
ที่ความดันแก๊สช่วยตัดสูง ถึงแม้ว่าจะใช้กำลังของเลเซอร์ต่ำแต่ HAZ ยังคงมีความสม่ำเสมอ เนื่องจากกำลังของแก๊สช่วยตัดมากพอที่จะไล่น้ำโลหะที่มีความหนืดสูงออกจากรอยตัดได้

4.8.1.7 ชิ้นงานที่ A5

กำลังของเลเซอร์ 1500 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.46 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A5

ตารางที่ 4.20 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A5

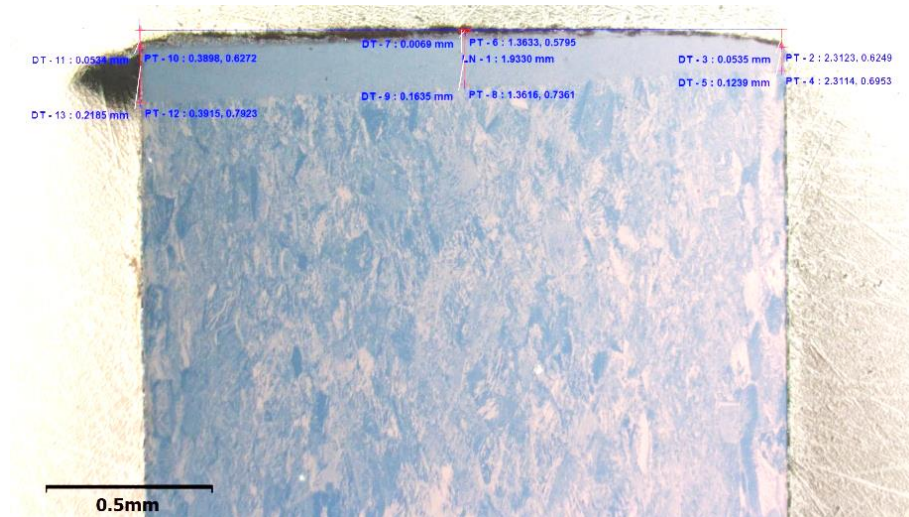
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity			0.048
RC	0.010	0.018	
HAZ	0.188	0.175	0.137

4.8.1.8 ชิ้นงานที่ B0

กำลังของเลเซอร์ 2000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.47 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B0

ตารางที่ 4.21 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ B0

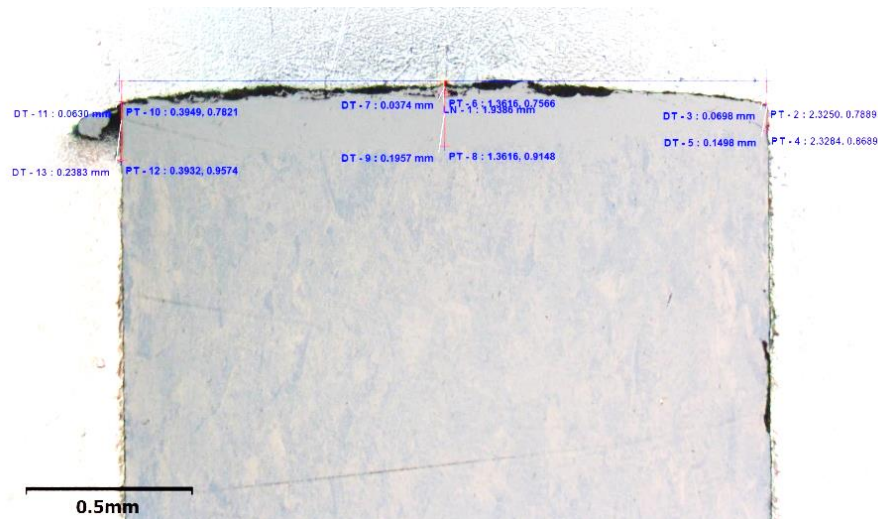
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.053		0.054
RC		0.007	
HAZ	0.219	0.164	0.124

4.8.1.9 ชิ้นงานที่ B5

กำลังของเลเซอร์ 2500 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.48 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B5

ตารางที่ 4.22 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ B5

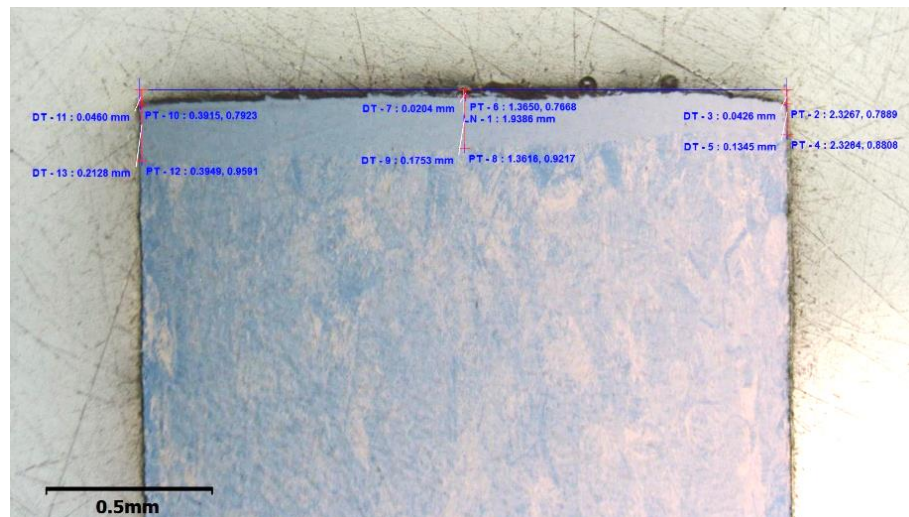
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.063		0.070
RC		0.037	
HAZ	0.238	0.196	0.150

4.8.1.10 ชิ้นงานที่ D0

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.49 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D0

ตารางที่ 4.23 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D0

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.046		0.043
RC		0.020	
HAZ	0.213	0.175	0.135

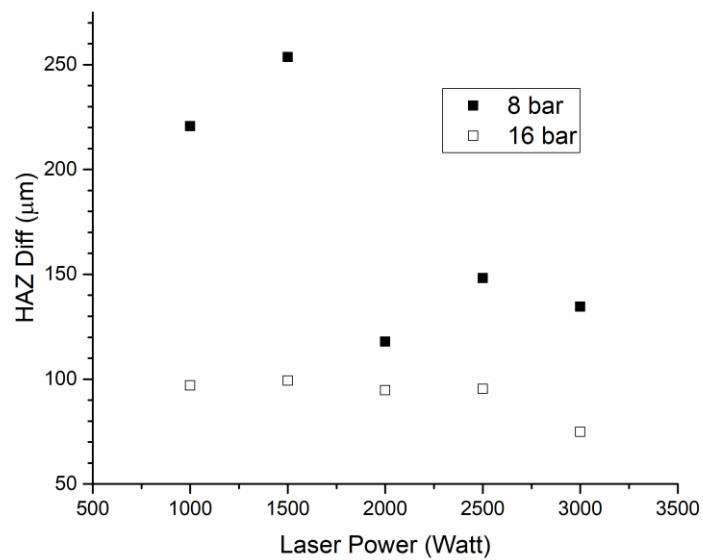
4.8.2 วิเคราะห์ผลของกำลังของเลเซอร์ต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ

เมื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ต่อความลึกของชั้น HAZ นั้นพบว่าเมื่อใช้กำลังที่สูงขึ้นกลับไม่ได้ส่งผลให้ชั้น HAZ โดยรวมมีความลึกเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด เมื่อใช้กำลังของเลเซอร์ที่สูงจะส่งผลให้น้ำโลหะบริเวณบ่อหลอมละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้นและบ่อหลอมละลายกว้างขึ้นแต่น้ำโลหะส่วนใหญ่ถูกแก๊สช่วยตัดเป่าให้หลุดออกจากผิวหน้ารอยตัดในทันทีเหลือเพียงแค่ว่าชั้นบาง ๆ ที่ยังติดอยู่เท่านั้น และการที่อุณหภูมิสูงขึ้นนั้นไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้ชั้น HAZ ที่วัดได้หนาขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็จะเกิดบริเวณที่เนื้อโลหะหลอมเหลวและหลุดออกไปมากขึ้นเช่นกัน ตำแหน่งเมื่อวัดจากกึ่งกลางร่องตัดที่ควรจะเป็นชั้น HAZ ในกรณีที่ใช้กำลังของเลเซอร์ต่ำก็จะกลายเป็นชั้นหลอมละลายแทน ดังนั้นจึงไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อความหนา HAZ โดยรวมที่ตรวจวัดได้ แต่ความแตกต่างที่พบได้นั้นเกิดจากน้ำโลหะบริเวณบ่อหลอมละลายของรอยตัดที่อุณหภูมิต่ำมีความหนืดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่น้ำโลหะที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นเมื่อน้ำโลหะในบริเวณบ่อหลอมละลายโดยเฉพาะส่วนปลายซึ่งสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนสู่เนื้อพื้นไปมาก เนื่องจากระยะทางการไหลผ่านที่ไกลที่สุดน้ำโลหะจึงหนืดมากและไหลออกยากเกิดการตกค้างของน้ำโลหะอยู่ที่ส่วนล่างของรอยตัด น้ำโลหะจึงค้างอยู่บริเวณผิวรอยตัดมากและนานกว่าการตัดโดยใช้เลเซอร์ที่กำลังสูง ส่งผลให้เกิดผลต่างระหว่าง HAZ ด้านบนและด้านล่างมากขึ้น เมื่อเพิ่มความดันแก๊สช่วยตัดผลจากความหนืดของน้ำโลหะจึงลดลง ทำให้ความสม่ำเสมอของชั้น HAZ เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยของ Leonardo Daniele Scintilla และคณะ (2013) [27] พบว่า “การใช้เลเซอร์ที่พลังงานต่ำจะให้รอยตัดที่คุณภาพต่ำกว่าเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงเนื่องจากโลหะเหลวบริเวณรอยตัดจะมีความหนืดมากกว่ายากที่จะไล่น้ำโลหะออกไปได้” ดังนั้นเมื่อใช้กำลังของเลเซอร์ต่ำความแตกต่างระหว่างความลึกของชั้น HAZ ระหว่างส่วนบนและส่วนล่างของชิ้นงานจะมากขึ้น แต่การเพิ่มความดันแก๊สช่วยตัดสามารถลดผลกระทบจากการไหลออกยากและตกค้างของน้ำโลหะลงได้

No.	Power (Watt)	Pressure (bar)	Bottom HAZ (mm)	Middle HAZ (mm)	Top HAZ (mm)	HAZ Diff (mm)
A1	1000	8	0.285	0.149	0.066	0.221
B4N	1500	8	0.341	0.154	0.087	0.254

B1	2000	8	0.110	0.150	0.073	0.118
B5N	2500	8	0.250	0.188	0.102	0.148
D1	3000	8	0.206	0.143	0.071	0.135
A0	1000	16	0.181	0.153	0.084	0.097
A5	1500	16	0.188	0.158	0.089	0.099
B0	2000	16	0.165	0.157	0.070	0.095
B5	2500	16	0.175	0.158	0.080	0.095
D0	3000	16	0.167	0.155	0.092	0.075

ตารางที่ 4.24 ค่าความลึกชั้น HAZ ที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ ที่ความเร็วการตัด 4000mm/min



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความแตกต่างของชั้น HAZ เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์

4.9 ผลของความเร็วกการตัดต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ

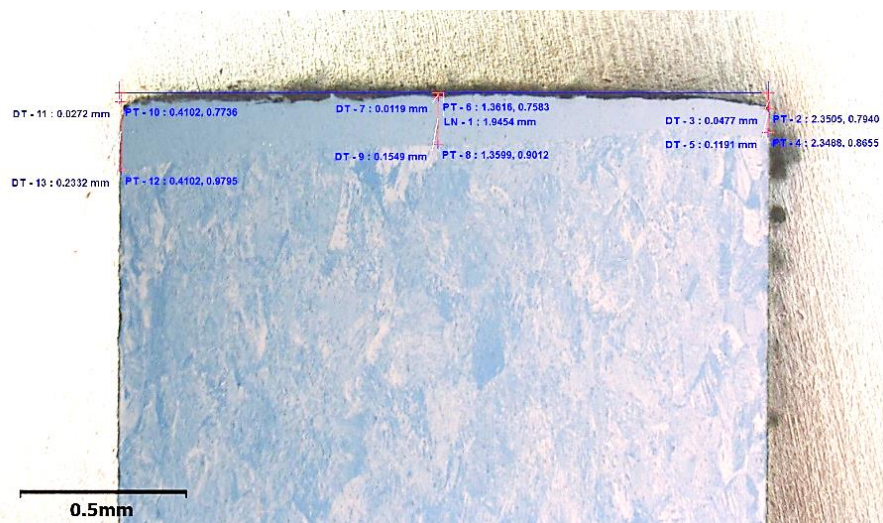
4.9.1 ชิ้นงานทดสอบผลของความเร็วกการตัด

4.9.1.1 ชิ้นงานที่ D1

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วกการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.51 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D1

ตารางที่ 4.25 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D1

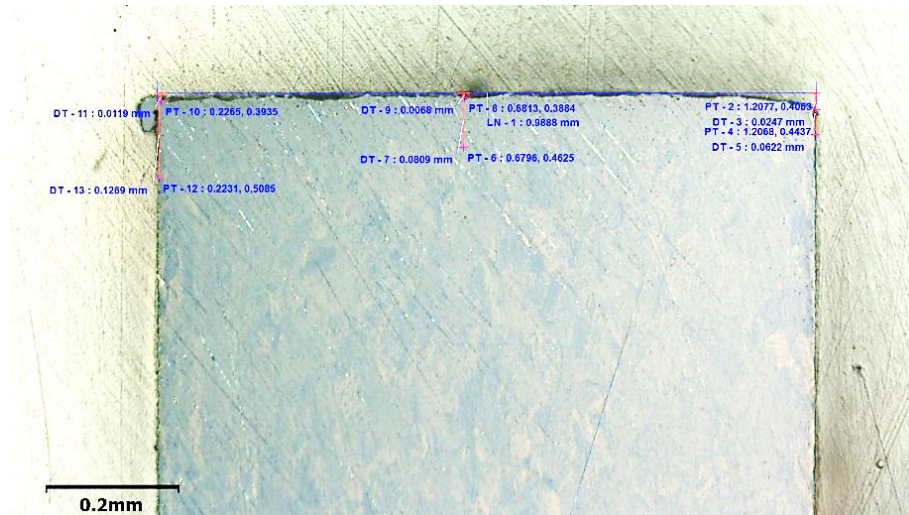
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.027		0.048
RC		0.012	
HAZ	0.233	0.155	0.119

4.9.1.2 ชิ้นงานที่ B3N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 6000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.52 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B3N

ตารางที่ 4.26 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ B3N

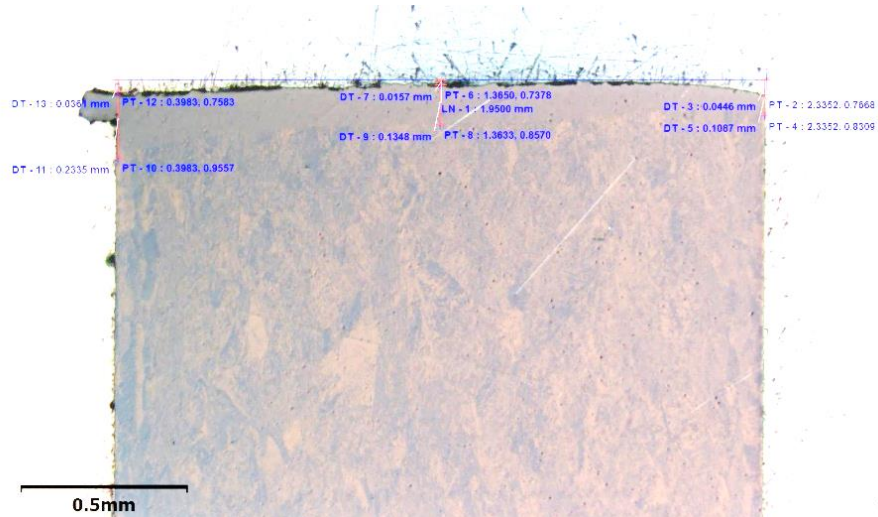
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.024		0.050
RC		0.014	
HAZ	0.254	0.162	0.124

4.9.1.3 ชิ้นงานที่ F2

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 8000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.53 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ F2

ตารางที่ 4.27 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ F2

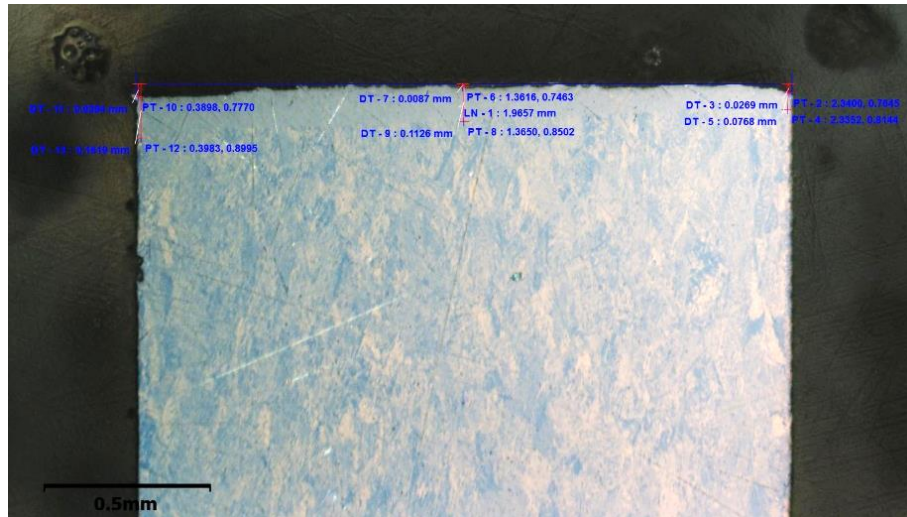
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.036	0.016	0.045
RC			
HAZ	0.234	0.135	0.109

4.9.1.4 ชิ้นงานที่ B1N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 12000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.54 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B1N

ตารางที่ 4.28 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ B1N

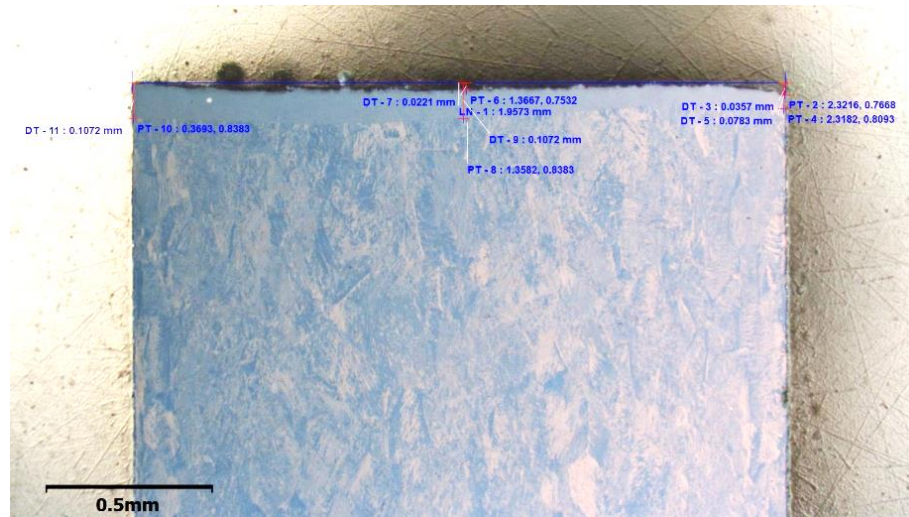
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.039	0.009	0.027
RC			
HAZ	0.162	0.113	0.079

4.9.1.5 ชิ้นงานที่ G7

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 16000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.55 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ G7

ตารางที่ 4.29 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ G7

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity		0.022	0.036
RC			
HAZ	0.107	0.107	0.078

4.9.1.6 ชิ้นงานที่ BON

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 20000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.56 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ BON

ตารางที่ 4.30 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ BON

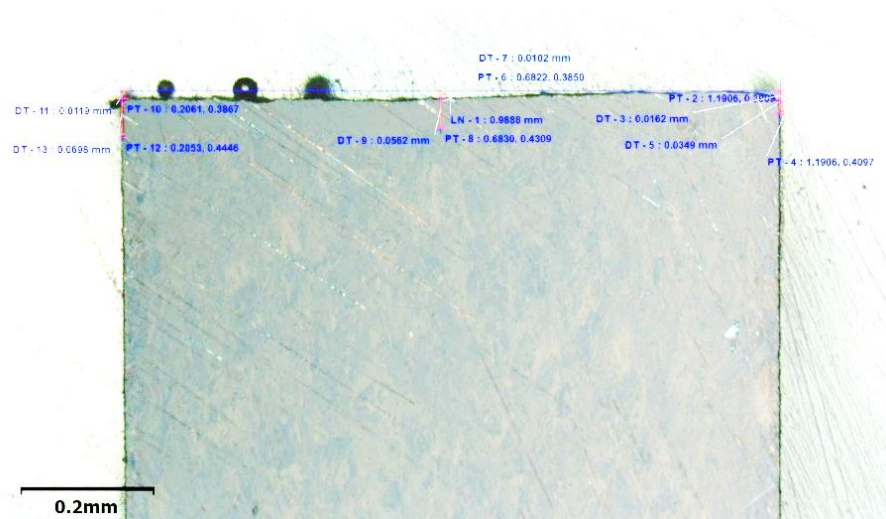
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.019	0.031	0.041
RC			
HAZ	0.133	0.132	0.080

4.9.1.7 ชิ้นงานที่ A9N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 24000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.57 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A9N

ตารางที่ 4.31 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A9N

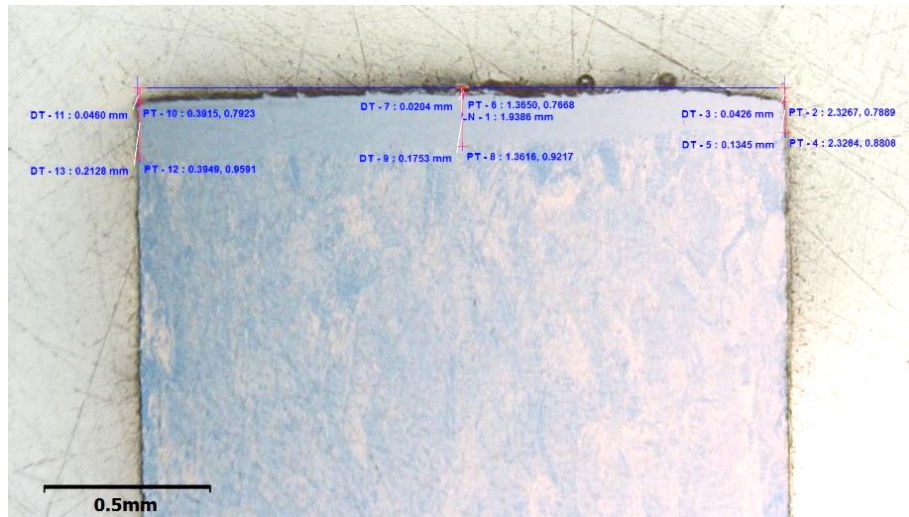
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.024	0.020	0.032
RC			
HAZ	0.140	0.112	0.070

4.9.1.8 ชิ้นงานที่ D0

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 4000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.58 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ D0

ตารางที่ 4.32 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ D0

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.046		0.043
RC		0.020	
HAZ	0.213	0.175	0.135

4.9.1.9 ชิ้นงานที่ B2N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 6000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.59 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ B2N

ตารางที่ 4.33 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ B2N

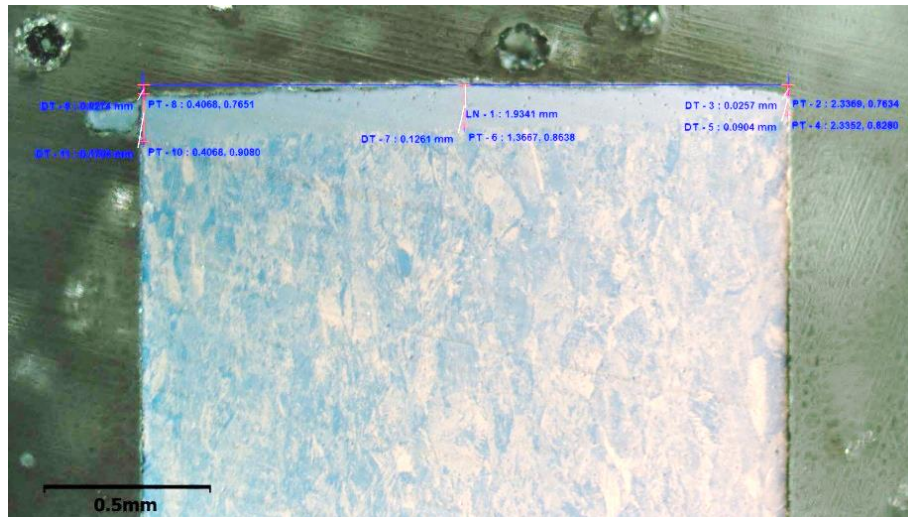
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.034		0.043
RC			
HAZ	0.192	0.162	0.119

4.9.1.10 ชิ้นงานที่ F1

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 8000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.60 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ F1

ตารางที่ 4.34 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ F1

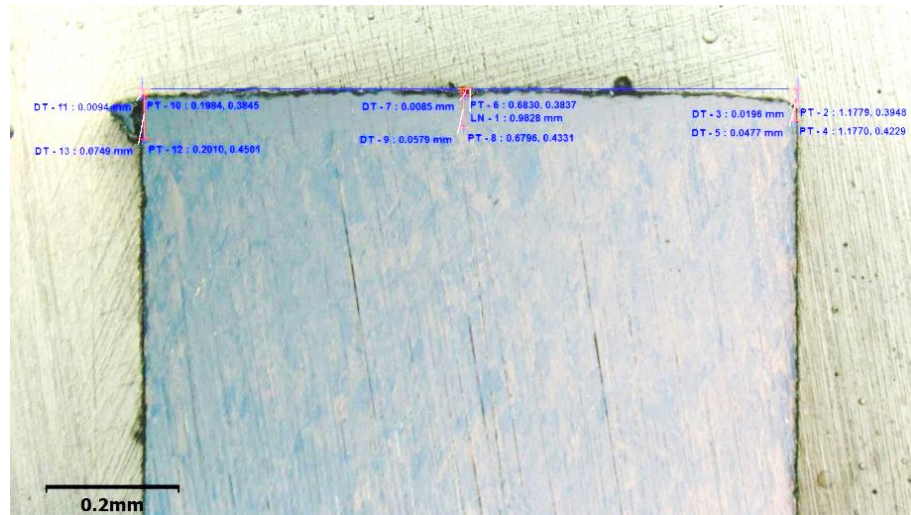
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.027		0.026
RC			
HAZ	0.170	0.126	0.090

4.9.1.11 ชิ้นงานที่ A5N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 12000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.61 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A5N

ตารางที่ 4.35 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A5N

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.019		0.039
RC		0.017	
HAZ	0.150	0.116	0.095

4.9.1.12 ชิ้นงานที่ G6

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 16000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



รูปที่ 4.62 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ G6

ตารางที่ 4.36 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ G6

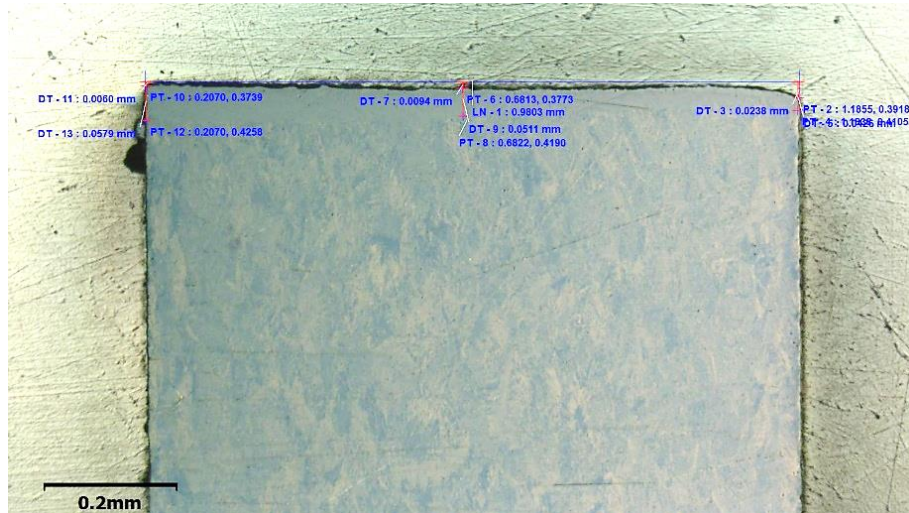
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.044	0.027	0.037
RC			
HAZ	0.157	0.107	0.080

4.9.1.13 ชิ้นงานที่ A4N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 20000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.63 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A4N

ตารางที่ 4.37 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A4N

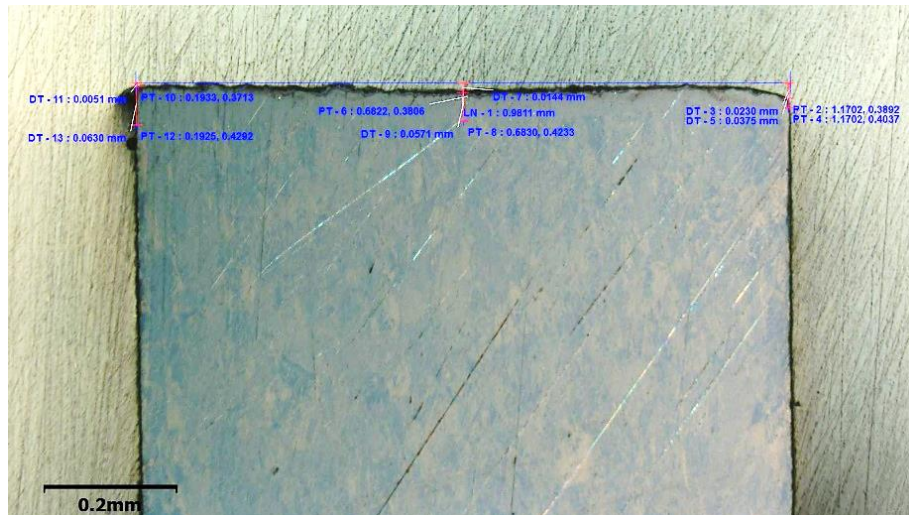
ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.012		0.048
RC		0.019	
HAZ	0.116	0.102	0.062

4.9.1.14 ชิ้นงานที่ A3N

กำลังของเลเซอร์ 3000 W

ความเร็วการตัด 24000 mm/min

ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar



*ค่าที่วัดได้จากกล้องต้องคูณสองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องตามจริง

รูปที่ 4.64 ลักษณะชั้น HAZ ของชิ้นงานที่ A3N

ตารางที่ 4.38 ตำแหน่งความลึกของชั้นต่าง ๆ ที่วัดได้จากชิ้นงานที่ A3N

ระยะจากระนาบรอยตัด (mm)			
	ส่วนล่าง	ส่วนกลาง	ส่วนบน
Cavity	0.010	0.029	0.046
RC			
HAZ	0.126	0.114	0.075

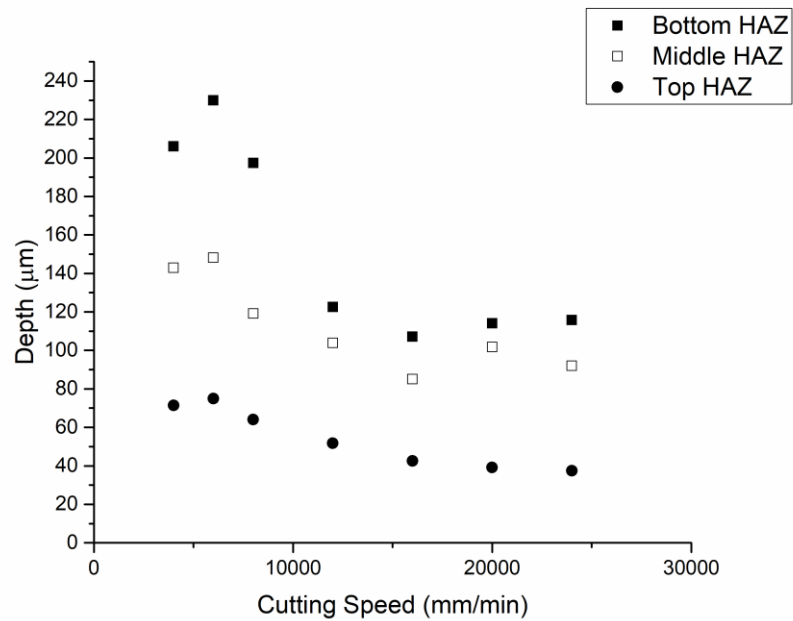
4.9.2 วิเคราะห์ผลของความเร็วการตัดต่อลักษณะความลึกของชั้น HAZ

เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วการตัดจะพบว่า ความหนาของชั้น HAZ นั้นเปลี่ยนไปอย่างชัดเจนในทุกตำแหน่งของรอยตัด โดยที่เมื่อเพิ่มความเร็วการตัดจะส่งผลให้ความหนาชั้น HAZ ลดลงในทุกกรณี ที่ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar ความแตกต่างระหว่างความหนาของชั้น HAZ บริเวณส่วนล่างเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนกลางและส่วนบนของรอยตัดจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วการตัดด้วย

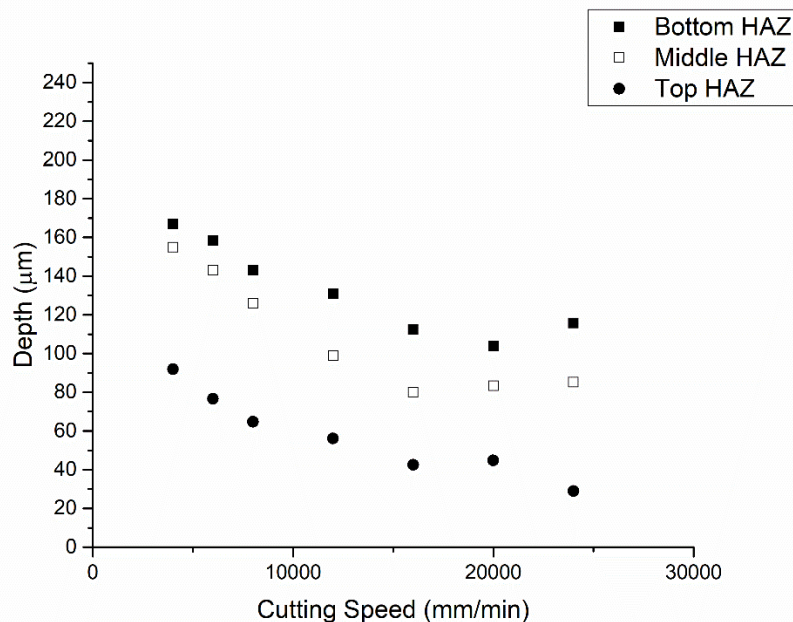
เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างสภาวะการตัดที่ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar และ 16 bar ความแตกต่างทุกช่วงความเร็วและทุกตำแหน่งการวัดนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นความหนา HAZ ในบริเวณส่วนล่างของรอยตัดที่ช่วงความเร็วการตัด 4,000 – 8,000 mm/min เท่านั้นที่ความหนาเพิ่มขึ้นมาอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.39 แสดงค่าความลึกชั้น HAZ ที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วการตัดเมื่อใช้กำลังของเลเซอร์ 3000 Watt

No.	Feed (mm/min)	Power (Watt)	Pressure (bar)	Bottom HAZ (mm)	Middle HAZ (mm)	Top HAZ (mm)
A9N	24000	3000	8	0.116	0.092	0.037
B0N	20000	3000	8	0.114	0.102	0.039
G7	16000	3000	8	0.107	0.085	0.043
B1N	12000	3000	8	0.123	0.104	0.052
F2	8000	3000	8	0.197	0.119	0.064
B3N	6000	3000	8	0.230	0.148	0.075
D1	4000	3000	8	0.206	0.143	0.071
A3N	24000	3000	16	0.116	0.085	0.030
A4N	20000	3000	16	0.104	0.083	0.045
G6	16000	3000	16	0.112	0.080	0.043
A5N	12000	3000	16	0.131	0.099	0.056
F1	8000	3000	16	0.143	0.126	0.065
B2N	6000	3000	16	0.158	0.143	0.077
D0	4000	3000	16	0.167	0.155	0.092



รูปที่ 4.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัดและความลึกของชั้น HAZ ที่กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



รูปที่ 4.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัดและความลึกของชั้น HAZ ที่กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

เนื่องจากกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์นั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติของโลหะไทเทเนียมอย่างมาก บริเวณรอยตัดพบชั้นหลอมละลายที่เปราะมาก สามารถแตกและหลุดออกจากเนื้อพื้นได้เมื่อชิ้นงานถูกตัดงอ ผิวภายนอกประกอบด้วยออกไซด์และไนไตรด์ของไทเทเนียม และภายในชั้นมีเฟสที่มีไนโตรเจนละลายอยู่มากล้อมรอบด้วยเฟสของ Martensite ขนาดเล็กซึ่งชั้นนี้มีความหนาประมาณไม่เกิน 30 ไมครอน เท่านั้น และมีความหนาลดลงเมื่อใช้ความดันแก๊สช่วยตัดที่สูงขึ้น ชั้นหลอมละลายนี้ไม่สามารถกำจัดออกด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้เนื่องจากมีการแพร่ของออกซิเจนและไนโตรเจนเข้าสู่ชั้นนี้ ซึ่งความลึกการแพร่เข้าของออกซิเจนที่ส่งผลให้เกิดชั้นของ alpha case นั้นพบว่าลึกจากผิวรอยตัดประมาณ 10 ไมครอน และไนไตรด์และออกไซด์ที่พบเป็นเพียงชั้นผิวบาง ๆ ด้านนอกเท่านั้นจึงไม่ได้ก่อให้เกิดปัญหาและความยุ่งยากในการกำจัดชั้นนี้ออกโดยวิธีทางกล

บริเวณถัดเข้ามาจากชั้นหลอมละลายคือชั้น HAZ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็น Martensite เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้ความสามารถในการต้านทานความล้าลดลงและเปราะมากขึ้น ดังนั้นจึงควรเลือกใช้พารามิเตอร์ที่ทำให้ชั้นนี้มีความลึกที่น้อยที่สุดโดยเลือกใช้ความเร็วการตัดที่สูงที่สุดเท่าที่จะใช้ได้กับชิ้นงานนั้น ความลึกของ HAZ เกิดขึ้น ในส่วนที่ใช้ความเร็วการตัดต่ำที่สุดวัดได้ประมาณ 200 ไมครอน และลงเมื่อใช้ความเร็วการตัดที่สูงขึ้น แต่เนื่องจากความเร็วการตัดที่เกิดขึ้นจริงในการตัดชิ้นงานนั้นไม่เหมือนกันเป็นผลจากอัตราเร่งในแต่ละแนวแกนของเครื่องตัดมีจำกัด เมื่อเริ่มตัดหรือเปลี่ยนทิศทางการตัดจะทำให้ช่วงนั้นมีความเร็วการตัดที่ลดลง จึงส่งผลให้ความลึกของชั้น HAZ ไม่สามารถควบคุมได้ในบางบริเวณ การใช้ความดันแก๊สที่เหมาะสมไม่สูงหรือต่ำเกินไปให้ความสม่ำเสมอและคุณภาพรอยตัดดีที่สุดเนื่องจากหากความดันต่ำไปจะเกิดการค้ำของน้ำโลหะในบริเวณส่วนกลางของรอยตัดและส่งผลต่อความเรียบผิวและการเพิ่มขึ้นของความหนาชั้น HAZ บริเวณส่วนกลางของรอยตัด แต่หากความดันแก๊สช่วยตัดสูงไปจะเกิดความปั่นป่วนในการไหลของน้ำโลหะและพบการฉีกขาดขนาดเล็กบริเวณผิวรอยตัดได้คุณภาพผิวรอยตัดจึงลดลงและสิ้นเปลืองแก๊สช่วยตัดโดยไม่จำเป็น ในส่วนของกำลังของเลเซอร์นั้นโดยทั่วไปไม่พบผลการเปลี่ยนแปลงต่อชั้นที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน แต่พบผลกระทบเมื่อใช้กำลังของเลเซอร์ต่ำมากเนื่องจากน้ำโลหะที่อุณหภูมิต่ำมีความหนืดสูงกว่าจึงค้ำอยู่บริเวณรอยตัดมากกว่าส่งผลให้ความลึกของชั้นดังกล่าวเปลี่ยนไป การเพิ่มความดันแก๊สช่วยตัดสามารถลดผลกระทบนี้ได้ หากต้องการกำจัดชั้น HAZ ออก ต้องใช้การขัดผิว

บริเวณรอยตัดออกเป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะบริเวณเหลี่ยมมุม ที่จะเกิดการสะสมของความร้อนในระหว่างการผลิตสูงกว่าส่วนอื่น แต่ผลจากการตรวจสอบบริเวณชั้น HAZ นั้น ไม่พบการแพร่เข้าของไนโตรเจนและออกซิเจน รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของธาตุผสม มีเพียงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากอัตรการเย็นตัวที่สูง เนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนสู่เนื้อพื้นที่เท่านั้น ดังนั้น หากต้องการกำจัดชั้น HAZ สามารถทำได้โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดชั้นหลอมละลายออกแล้วนำไป Annealing ในบรรยากาศอาร์กอนหรือสุญญากาศ

ดังนั้นการที่จะนำเทคนิคการตัดด้วยเลเซอร์มาใช้ในการผลิตชิ้นงานไทเทเนียมที่มีคุณภาพสูงและมีการผลิตจำนวนมากจึงต้องเลือกใช้ความเร็วการตัดที่สูงที่สุดที่เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงาน แรงดันแก๊สช่วยตัดที่สูงเพียงพอ (8-16 bar) และกำลังของเลเซอร์ที่เหมาะสมกับความเร็วการตัด และนำชิ้นงานที่ได้ไปกำจัดชั้นหลอมละลายออกโดยการกำจัดผิวรอยตัดออกอย่างน้อย 20-30 ไมครอน หลังจากนั้นหากต้องการกำจัดชั้น HAZ ออก จะต้องนำไป Annealing และปล่อยให้เย็นตัวตามอัตราที่จะได้โครงสร้างและเฟสตามต้องการจากข้อมูลในแผนภาพ CCT

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ตรวจสอบและยืนยันโครงสร้างผลึกและเฟสที่เกิดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)
2. ศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้แก๊สช่วยตัดชนิดอื่น ๆ

รายการอ้างอิง

1. Titanium Industries, I. *What is Titanium?* [cited 2015; Available from: <http://titanium.com/technical-data/what-is-titanium/>].
2. Materials, A., *Titanium Alloys - Physical Properties* 2002: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1341>.
3. Weiss, F.H.F., D. Eylon and G. E. Welsh, Modification of Alpha Morphology in Ti-6Al-4V by Thermomechanical Processing, *Met. Trans.*, 1986.
4. Poh, *Materials science*.
5. R. Pederson, O.B., F. Skystedt & R. Warren, Use of high temperature X-ray diffractometry to study phase transitions and thermal expansion properties in Ti-6Al-4V, *Materials Science and Technology* 2003, vol. 19(11), pp. 1533-1538.
6. Semiatin, S.L., V. Seetharaman and I. Weiss, The thermomechanical processing of alpha/beta titanium alloys, *JOM*, 1997, vol. 49(6), pp. 33-39.
7. READE, *Titanium Dioxide (TiO₂) / Titanium Oxide (TiO) (Anatase Grade)*.
8. T., E.H.J. 1944, *J Soc Chem Ind (London)*.
9. Herausgeber: Fromm, E., Gebhardt, E. (Hrsg.), *Gase und Kohlenstoff in Metallen*. 1976.
10. Levinskiy, K. 1972.
11. ASM Aerospace Specification Metals, I., *Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed*.
12. Sieniawski, J., W. Ziaja, K. Kubiak and M. Motyk, *Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Two-Phase Titanium Alloys*, 2013.
13. Toh, W., P. Wang, X. Tan, M. Nai, E. Liu and S. Tor, *Microstructure and Wear Properties of Electron Beam Melted Ti-6Al-4V Parts: A Comparison Study against As-Cast Form*, *Metals*, 2016, vol. 6(11), pp. 284.
14. Goswami, P.D., *Ultrafast Laser Virtual Lab*. <http://home.iitk.ac.in/~dgoswami/vlab/index.php>.
15. Lakkasuo, *Schematic diagram of a Nd:YAG laser, for laser construction*. 2010.
16. SOHO, J.

17. Danielsoh8, *Schematic diagram of high power fiber laser using a double-clad fiber.*
18. Kumar Pandey, A. and A. Kumar Dubey, Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics & Laser Technology*, 2012,vol. 44(6), pp. 1858-1865.
19. Kardas, O.O., O. Keles, S. Akhtar and B.S. Yilbas, Laser cutting of rectangular geometry in 2024 aluminum alloy: Thermal stress analysis, *Optics & Laser Technology*, 2014,vol. 64, pp. 247-256.
20. Shanjin, L. and W. Yang, An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics and Lasers in Engineering*, 2006,vol. 44(10), pp. 1067-1077.
21. Chenhao Fu, Y.B.G., *Laser Cutting Simulation Of Nitinol Stent Alloy With Moving Heat Flux*, in *The International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies American Society for Metals*. 2014.
22. Shidid, D.P., M.H. Gollo, M. Brandt and M. Mahdavian, Study of effect of process parameters on titanium sheet metal bending using Nd: YAG laser, *Optics & Laser Technology*, 2013,vol. 47, pp. 242-247.
23. Salem, H.G., M.S. Mansour, Y. Badr and W.A. Abbas, CW Nd:YAG laser cutting of ultra low carbon steel thin sheets using O₂ assist gas, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008,vol. 196(1-3), pp. 64-72.
24. Almeida, I.A., W. de Rossi, M.S.F. Lima, J.R. Berretta, G.E.C. Nogueira, N.U. Wetter and N.D. Vieira, Optimization of titanium cutting by factorial analysis of the pulsed Nd:YAG laser parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006,vol. 179(1-3), pp. 105-110.
25. Scintilla, L.D., G. Palumbo, D. Sorgente and L. Tricarico, Fiber laser cutting of Ti6Al4V sheets for subsequent welding operations: Effect of cutting parameters on butt joints mechanical properties and strain behaviour, *Materials & Design*, 2013,vol. 47, pp. 300-308.
26. Yilbas, B., S. Akhtar and O. Keles, Laser straight cutting of Ti-6Al-4V alloy: Temperature and stress fields, 2012, pp. 243-265.
27. Scintilla, L.D., L. Tricarico, A. Wetzig and E. Beyer, Investigation on disk and CO₂ laser beam fusion cutting differences based on power balance equation,

- International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013,vol. 69, pp. 30-37.
28. NILS ANDERSSON, C.G., *Laser cutting in Ti-6Al-4V sheet: DOE and evaluation of process parameters Informative*, in *Department of Materials and Manufacturing Technology*. 2015, Chalmers University of Technology: Gothenburg, Sweden.
 29. Bystronic. 2015, Bystronic
<http://www.bystronic.com/>.
 30. Baoji Jiemoon Industry & Trade Co., L., *Industrial CP Ti 6AL-4V Grade 5 Titanium Sheet/Plate/Slab Seller* Baoji Jiemoon Industry & Trade Co., Ltd.:
<https://www.tradeindia.com/>.
 31. Amada. Amada.
 32. Pawan Kumar, K.P.K., Sham H Mankar, Sanjay Kumar, Prediction of Heat Affected Zone and Effect of Heat Input in GTA Welded Al Alloy 6061, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 2015,vol. 4(6).
 33. Zhang, Y., G.-R. Ma, X.-C. Zhang, S. Li and S.-T. Tu, Thermal oxidation of Ti-6Al-4V alloy and pure titanium under external bending strain: Experiment and modelling, *Corrosion Science*, 2017,vol. 122, pp. 61-73.
 34. Woodwars, F.H.P.a.P., *The Stability and Chemical Reactivity of Titanium Nitride and Titanium Carbide*, 1949.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางผนวก จ-1 ความลึกชั้น HAZ ของชิ้นงานทดสอบ

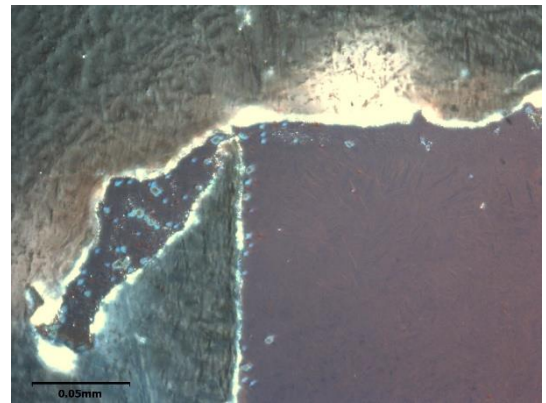
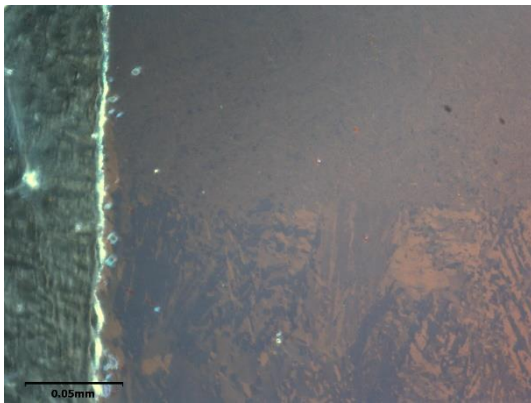
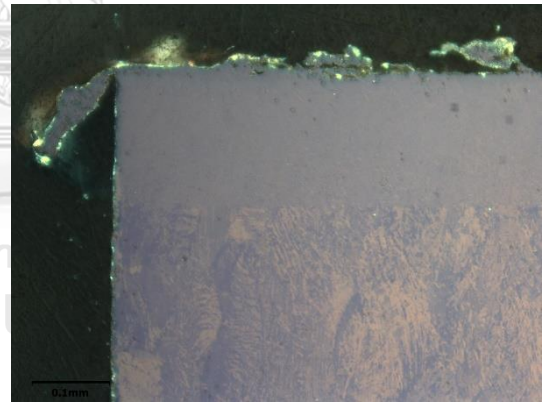
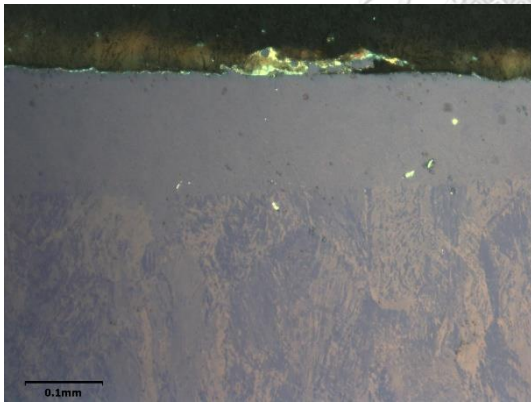
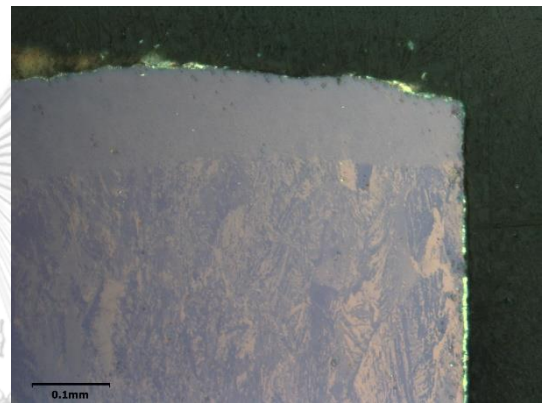
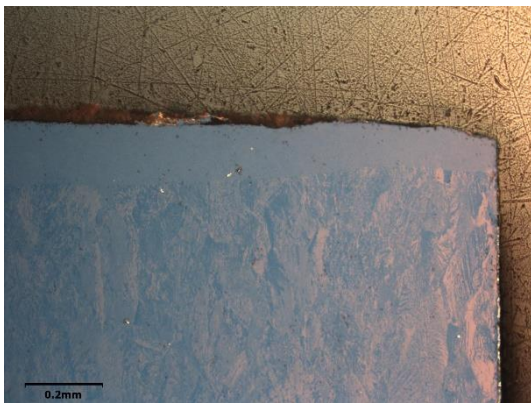
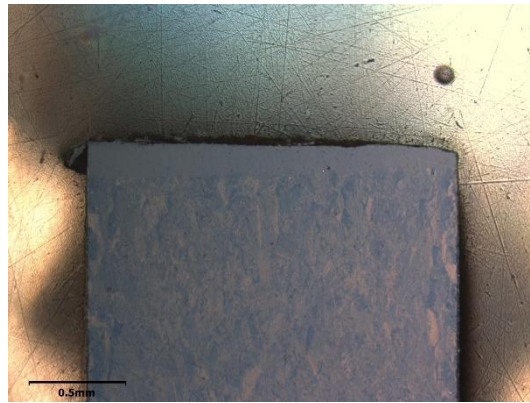
No.	Power (W)	Speed (mm/min)	Pressure (bar)	Bottom HAZ (mm)	Middle HAZ (mm)	Top HAZ (mm)
A1	1000	4000	8	0.285	0.150	0.065
A0	1000	4000	16	0.181	0.153	0.084
B4N	1500	4000	8	0.341	0.153	0.088
A5	1500	4000	16	0.188	0.158	0.089
B1	2000	4000	8	0.198	0.150	0.073
B0	2000	4000	16	0.165	0.157	0.070
B5N	2500	4000	8	0.250	0.179	0.102
B5	2500	4000	16	0.175	0.158	0.080
D4	3000	4000	1	0.473	0.221	0.102
D2	3000	4000	4	0.497	0.152	0.087
A6N	3000	4000	6	0.244	0.152	0.074
D1	3000	4000	8	0.206	0.143	0.071
A7N	3000	4000	12	0.194	0.173	0.094
D0	3000	4000	16	0.167	0.155	0.092
A8N	3000	4000	20	0.208	0.186	0.106
B3N	3000	6000	8	0.230	0.148	0.075
B2N	3000	6000	16	0.158	0.143	0.077
F5	3000	8000	1	0.262	0.170	0.073
F2	3000	8000	8	0.197	0.119	0.064
F1	3000	8000	16	0.143	0.126	0.065
B1N	3000	12000	8	0.123	0.104	0.052
A5N	3000	12000	16	0.131	0.099	0.056
G7	3000	16000	8	0.291	0.162	0.078
J5	3000	16000	8	0.291	0.162	0.078
G6	3000	16000	16	0.112	0.080	0.043
B0N	3000	20000	8	0.114	0.102	0.039
A4N	3000	20000	16	0.104	0.083	0.045
A9N	3000	24000	8	0.116	0.092	0.037
A3N	3000	24000	16	0.116	0.085	0.029
H7	3000	36000	1	0.199	0.148	0.034
H4	3000	36000	8	0.109	0.081	0.039
H3	3000	36000	16	0.090	0.082	0.034
H9	3000	72000	8	0.102	0.078	0.041
H8	3000	72000	16	0.092	0.083	0.043
I7	3000	100000	1	0.123	0.111	0.039
I4	3000	100000	8	0.106	0.082	0.034
I3	3000	100000	16	0.107	0.083	0.044

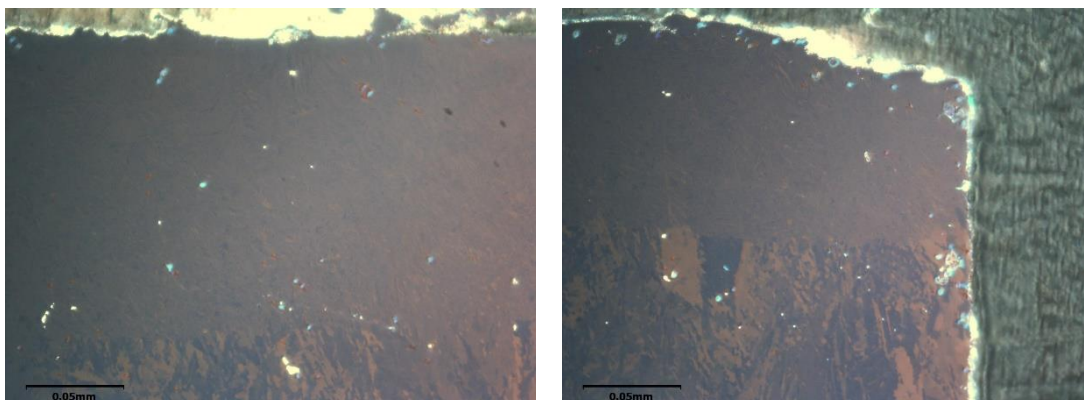


ภาคผนวก ข

(ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงด้วยเทคนิคโพลาไรซ์ของชิ้นงานต่าง ๆ)

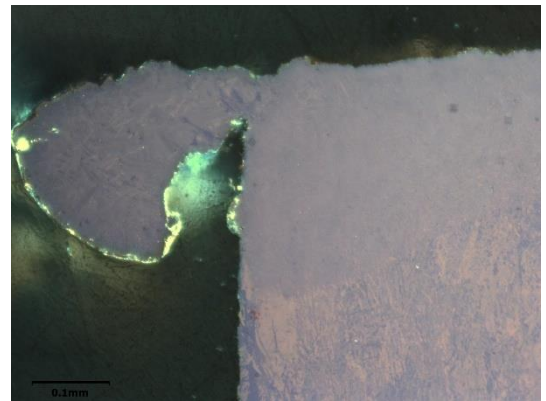
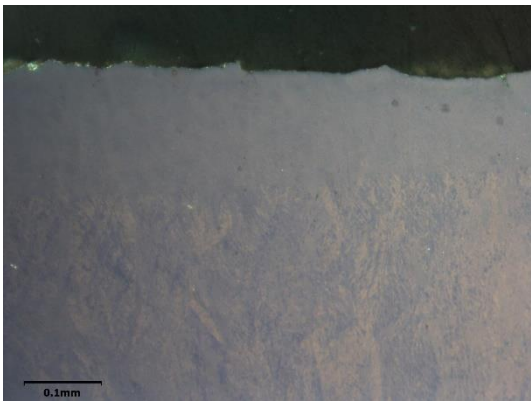
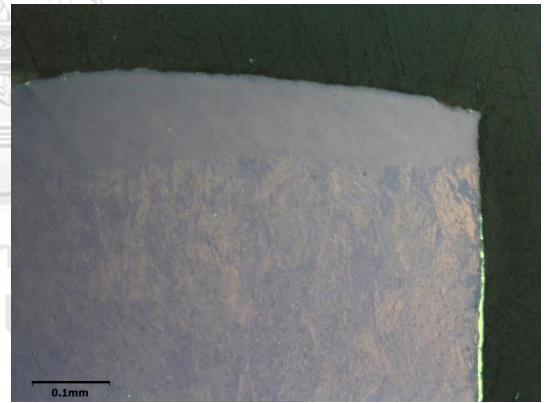
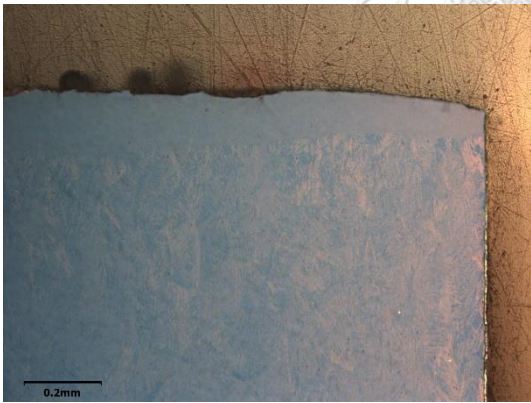
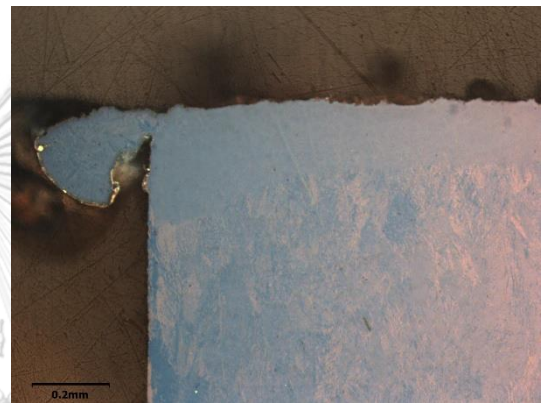
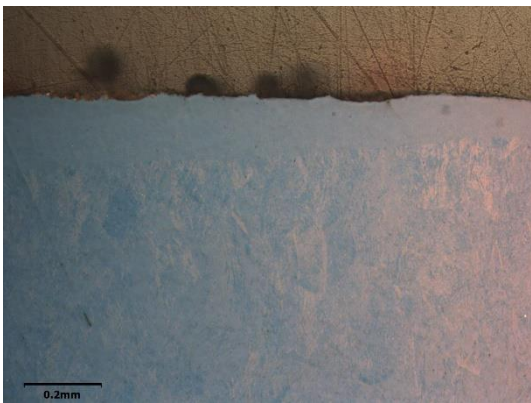
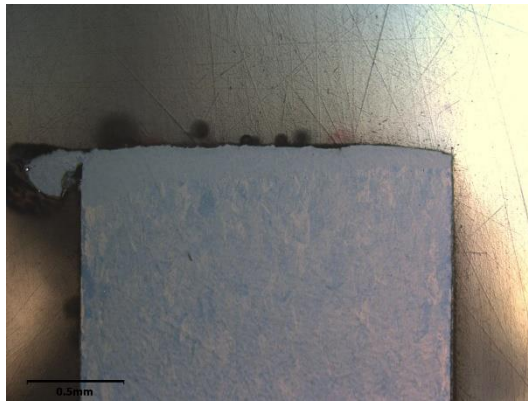
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

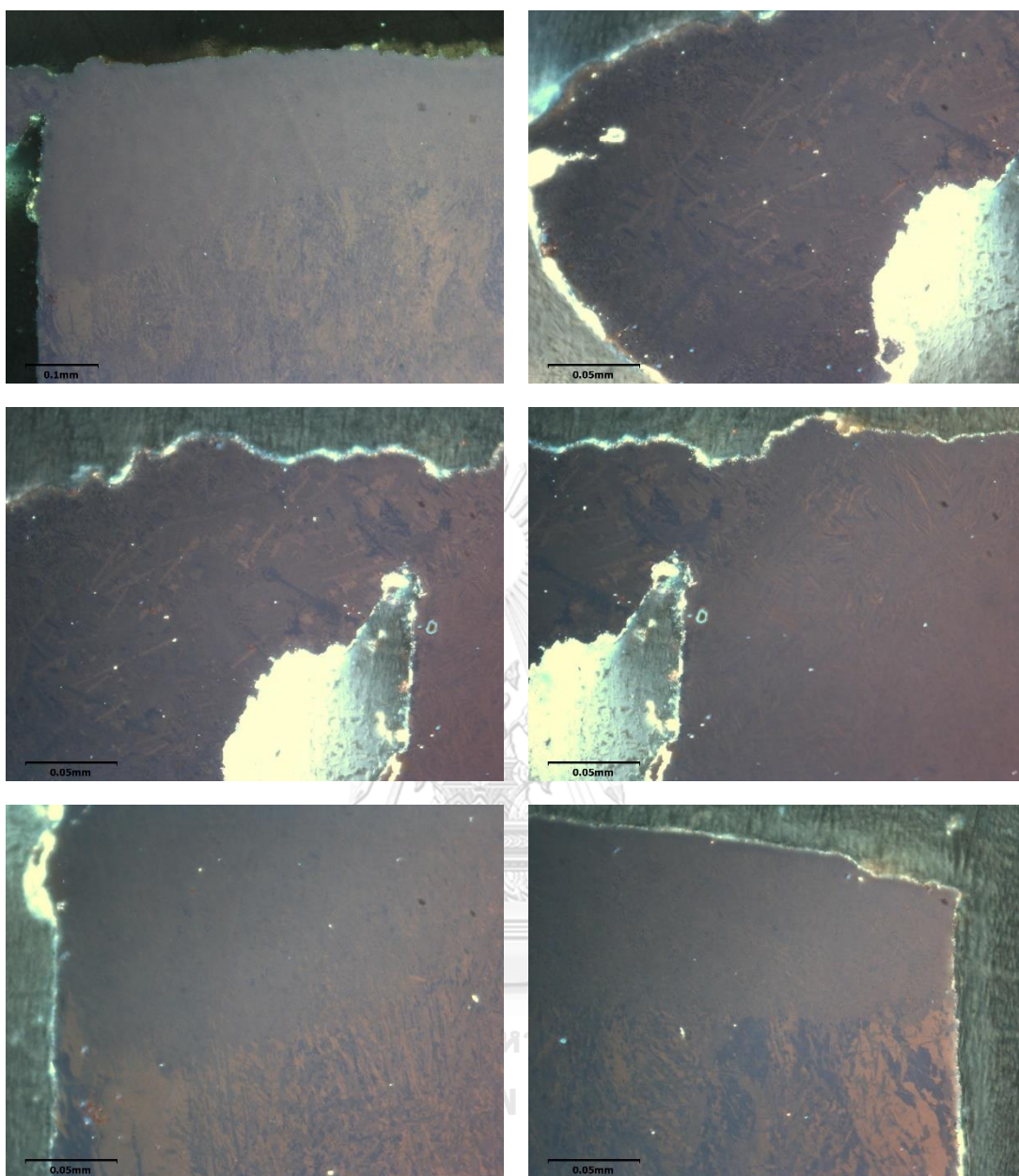




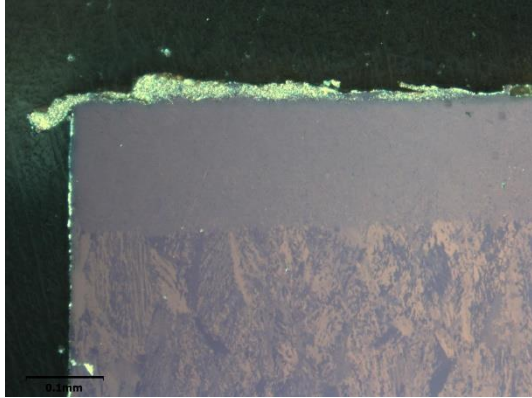
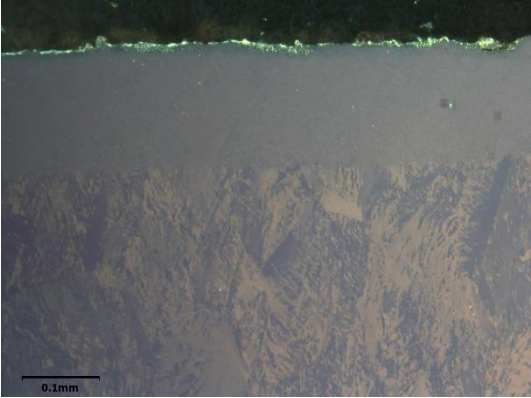
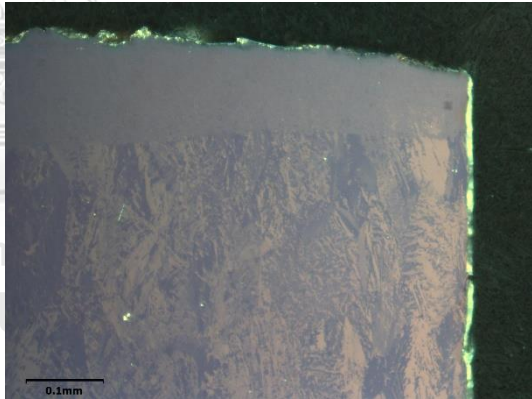
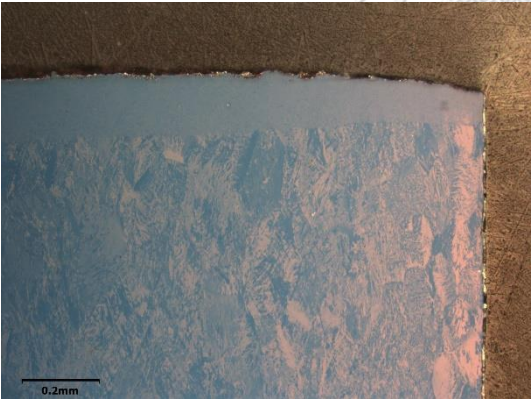
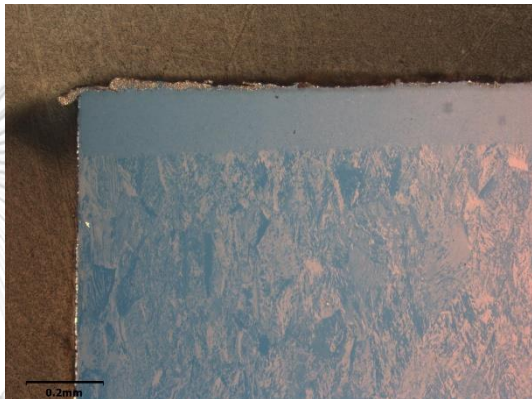
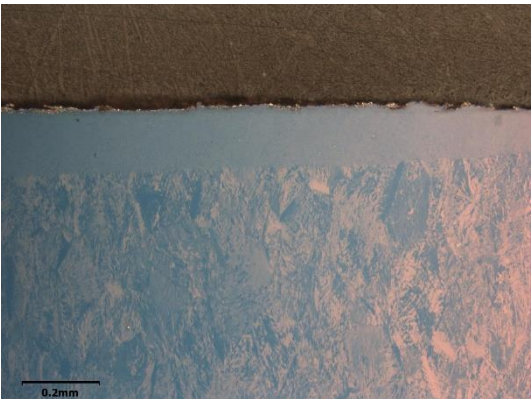
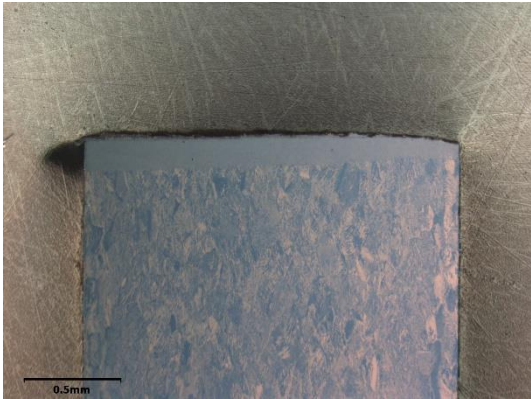
รูปที่ ข-1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ A0 กำลังของเลเซอร์ 1,000 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar

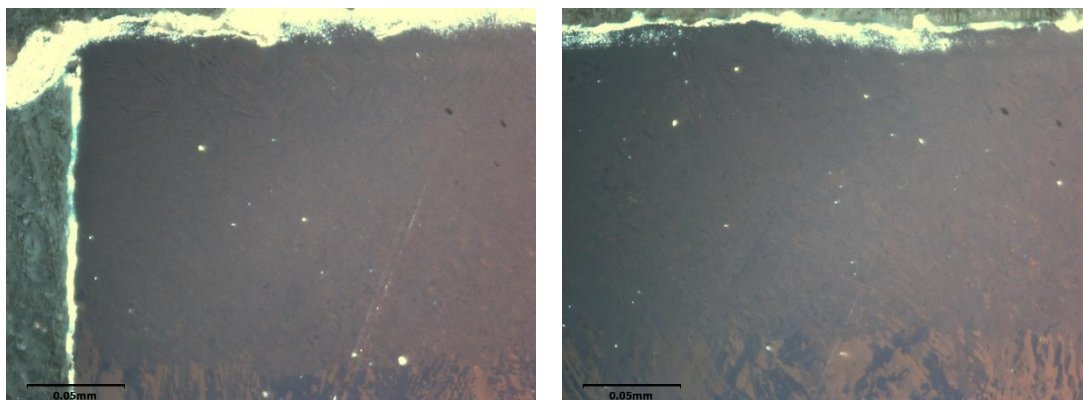






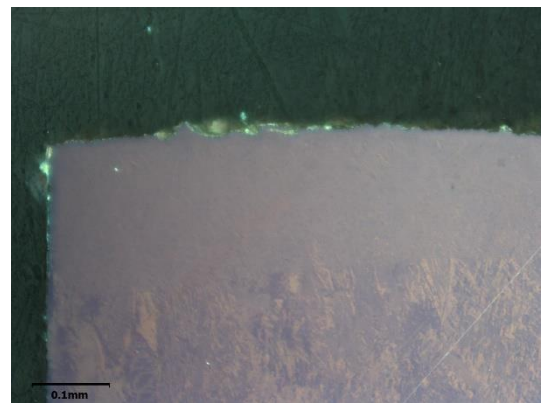
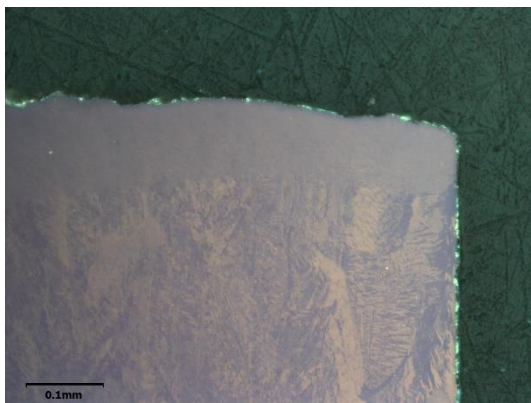
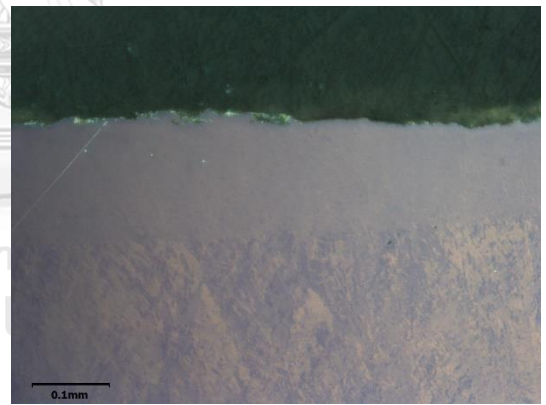
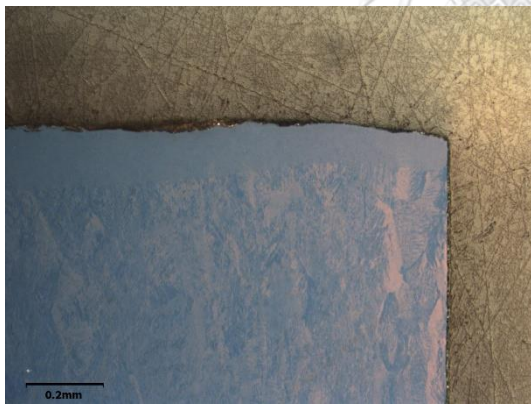
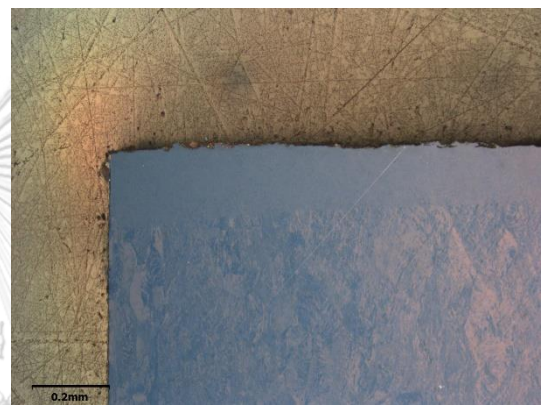
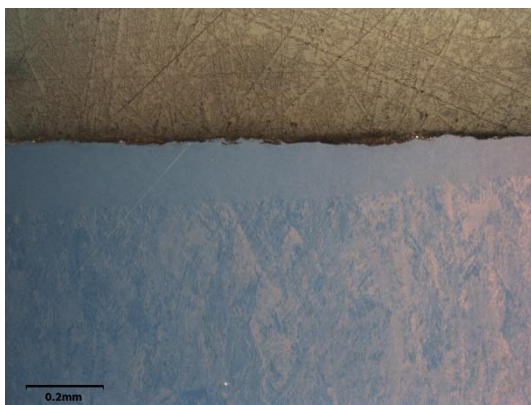
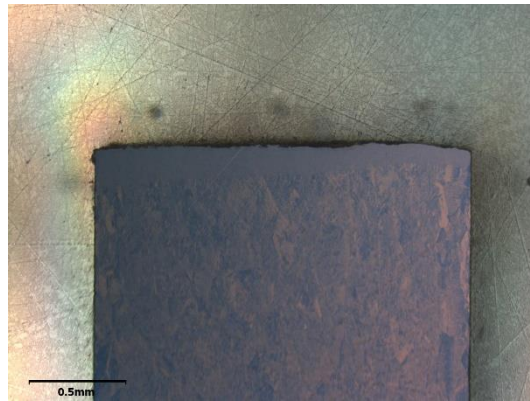
รูปที่ ข-2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ A1 กำลังของเลเซอร์ 1,000 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar

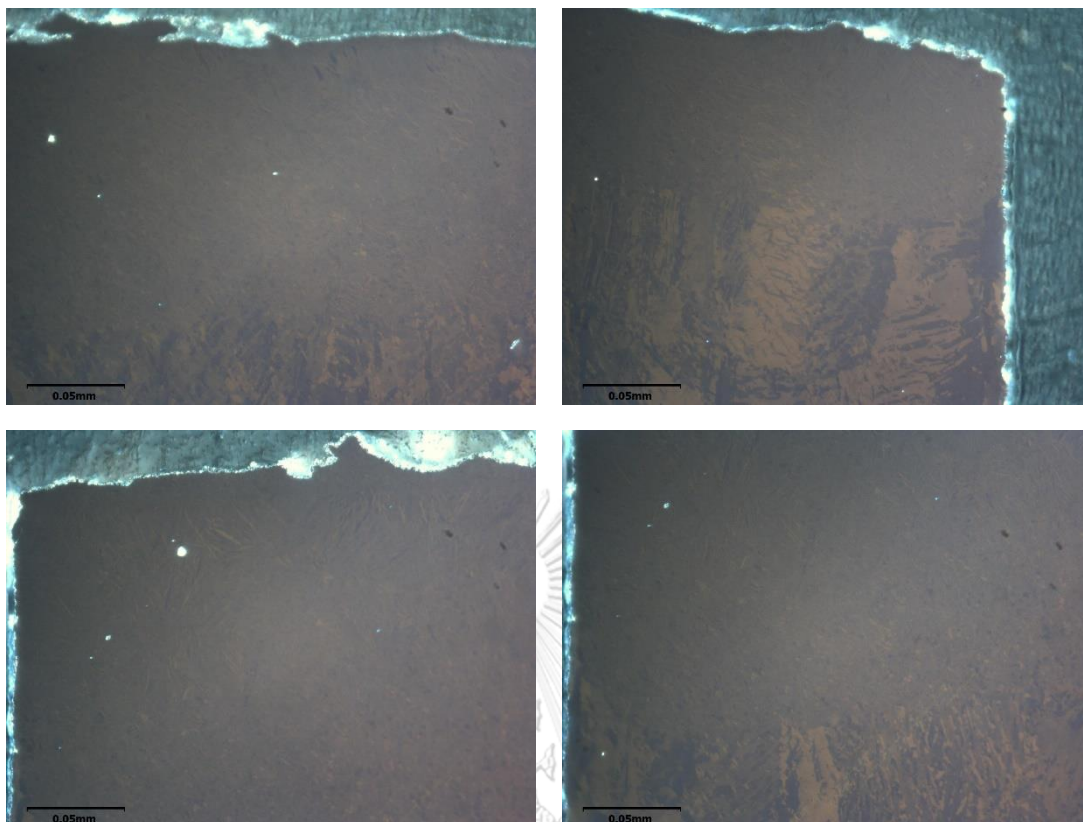




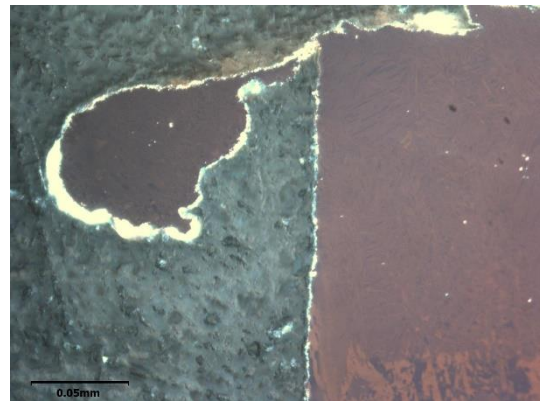
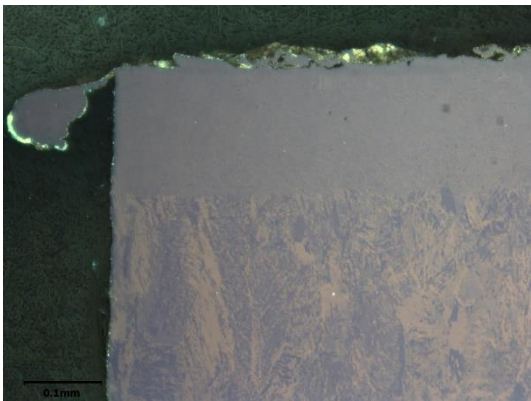
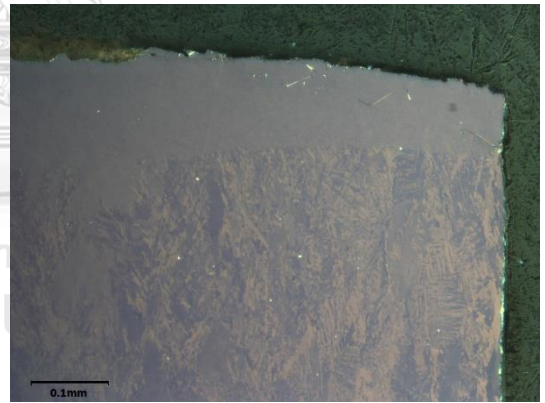
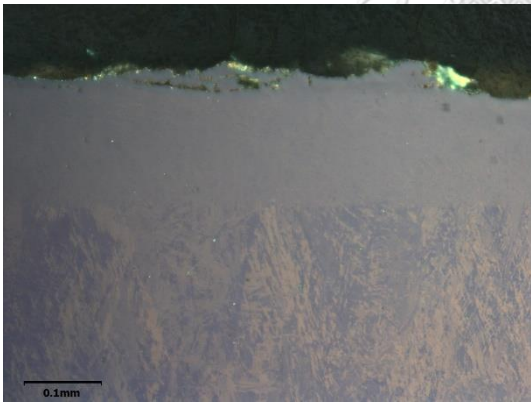
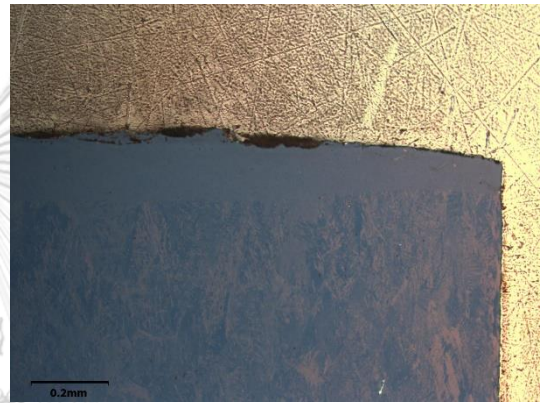
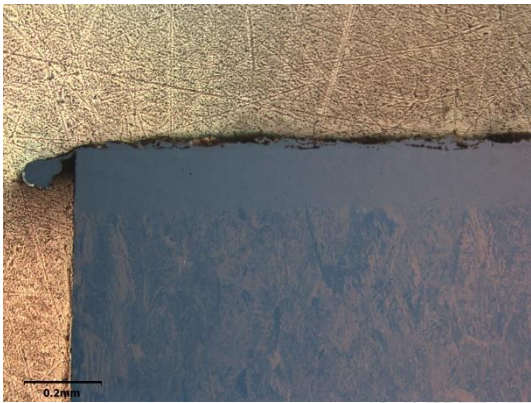
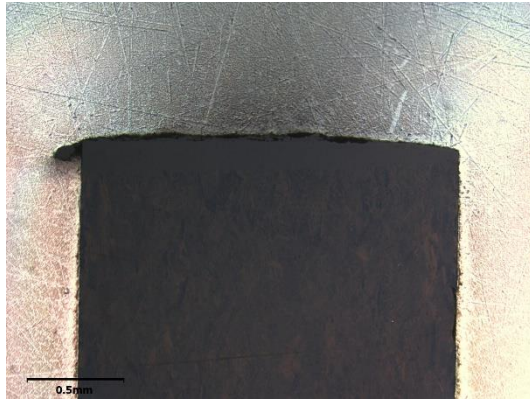
รูปที่ ข-3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ B0 กำลังของเลเซอร์ 2,000 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar

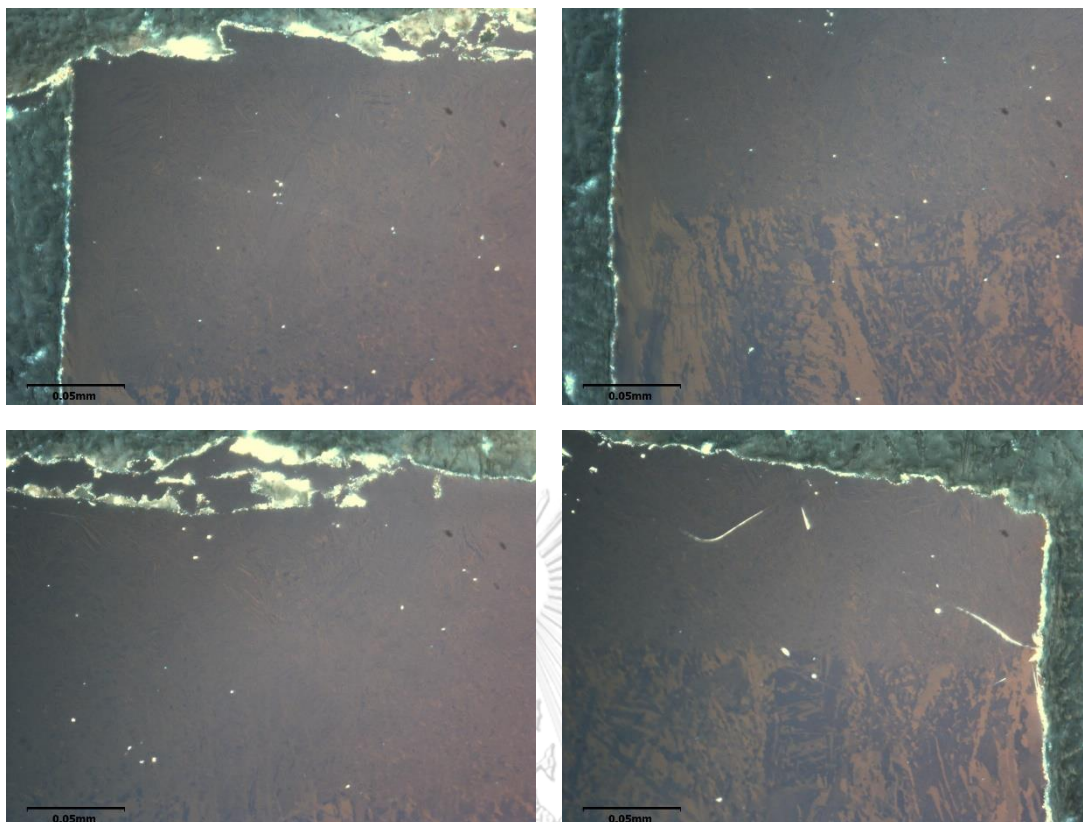




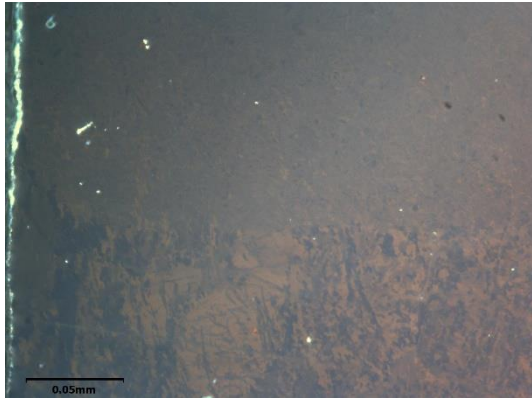
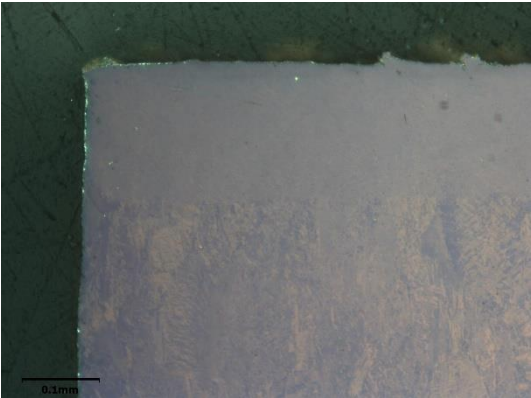
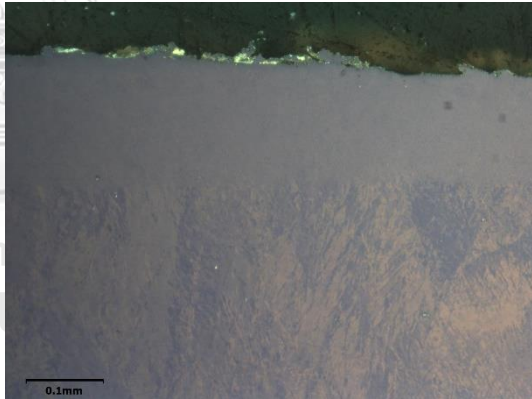
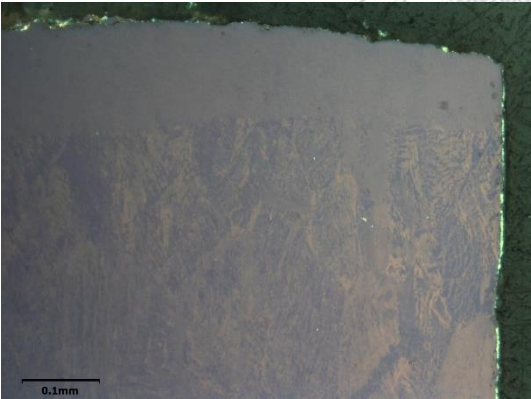
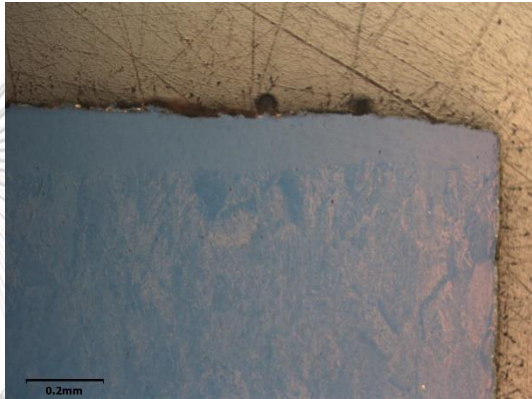
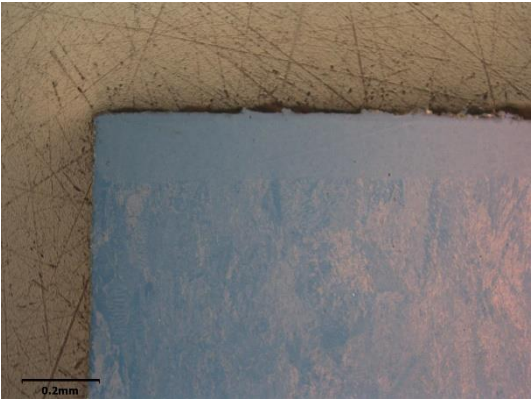
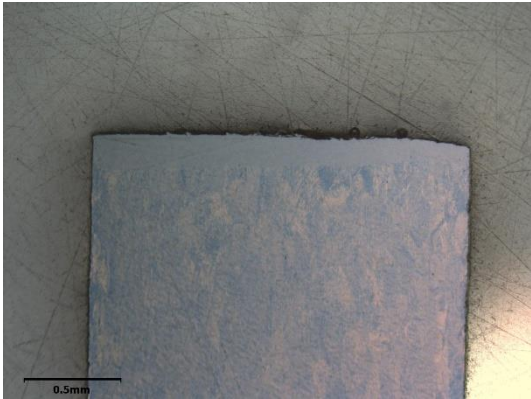


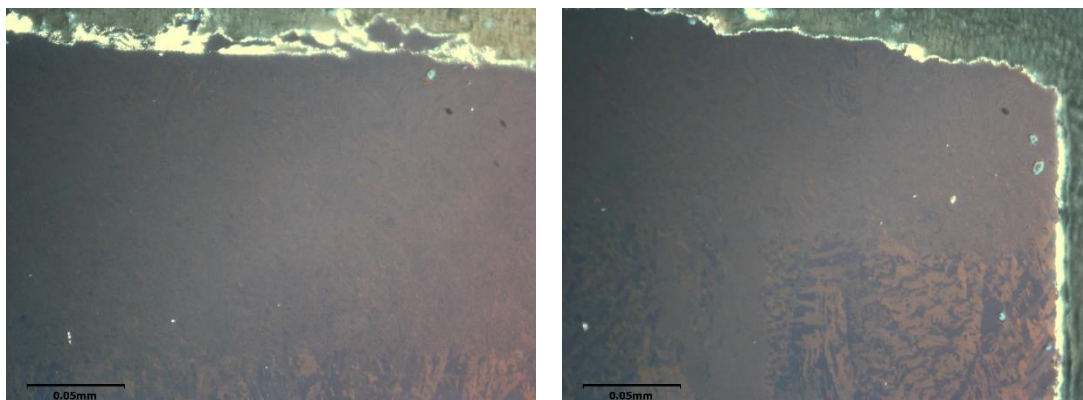
รูปที่ ข-4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ B1 กำลังของเลเซอร์ 2,000 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar





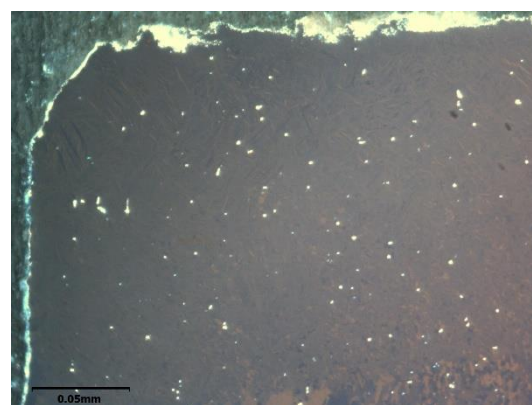
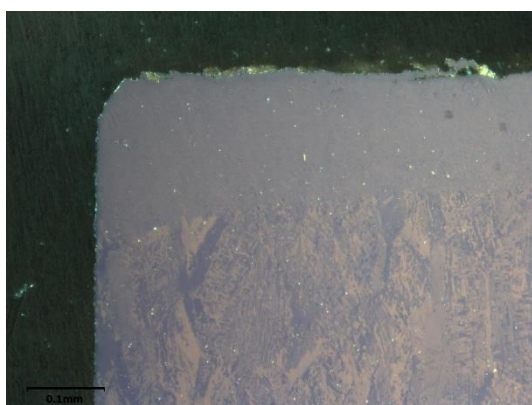
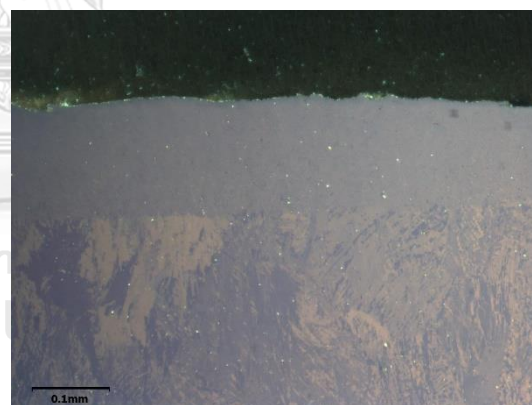
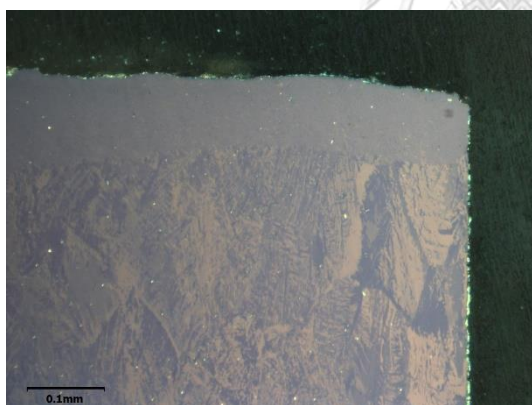
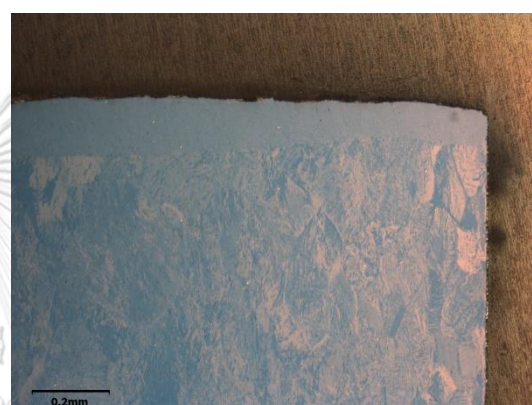
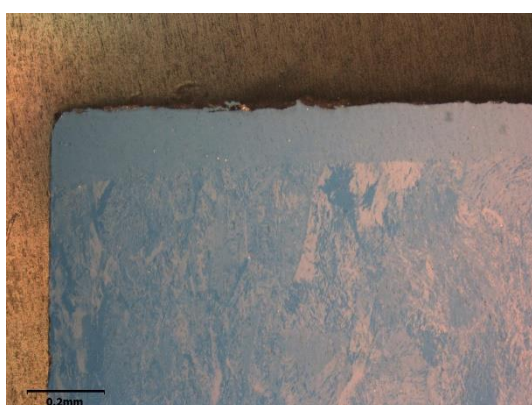
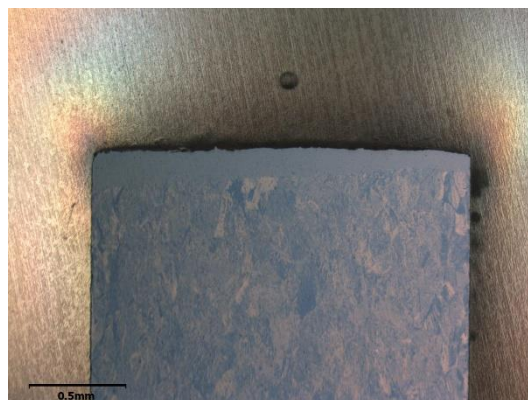
รูปที่ ข-5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ B5 กำลังของเลเซอร์ 2,500 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar

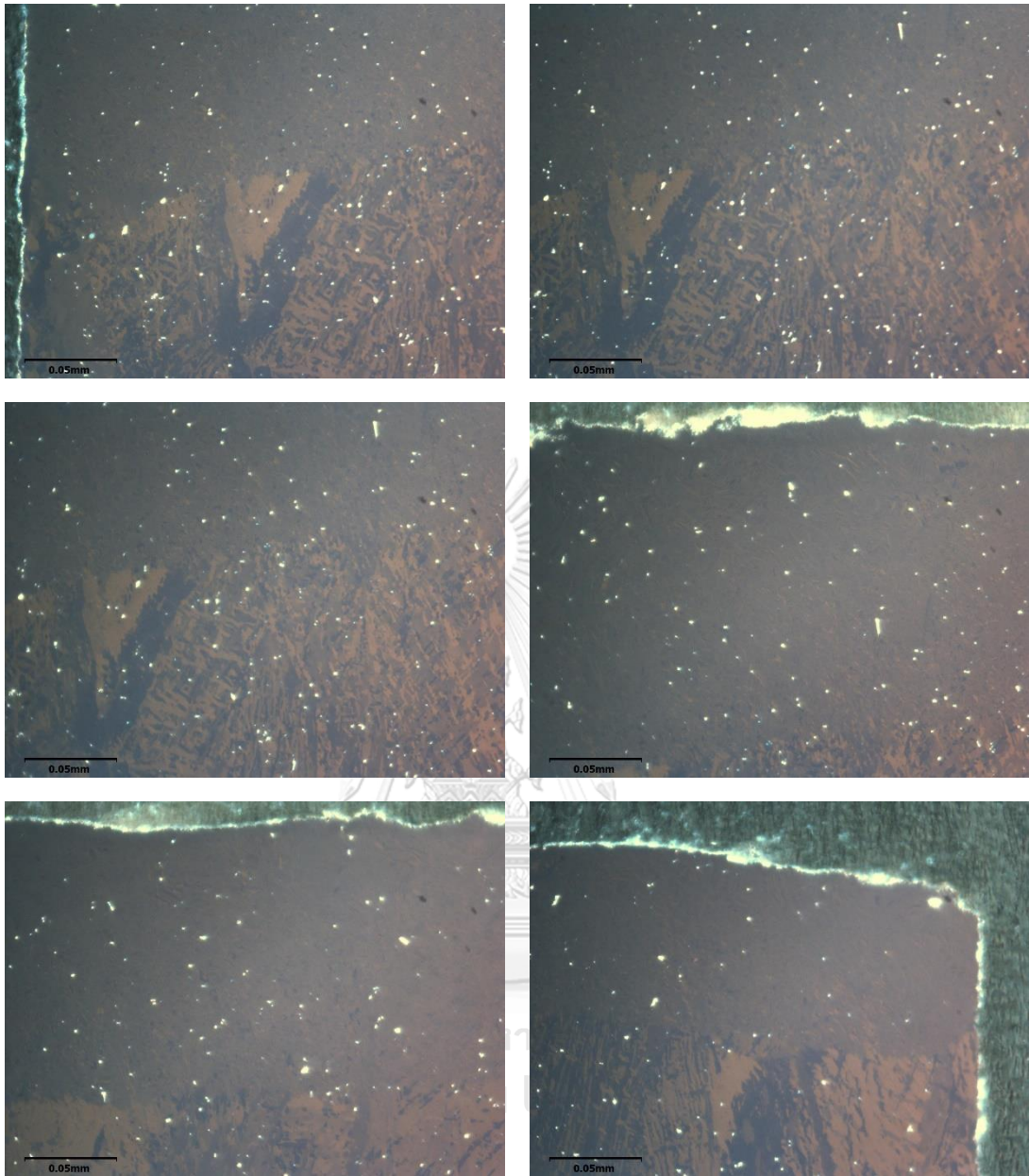




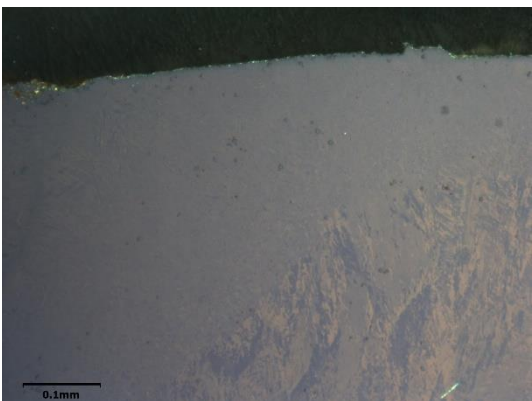
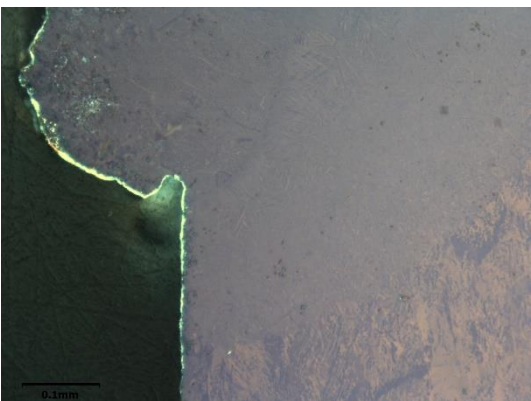
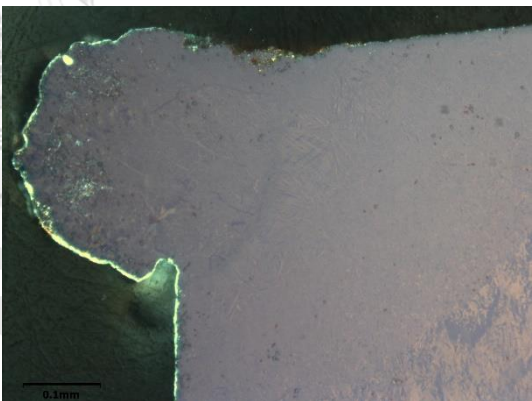
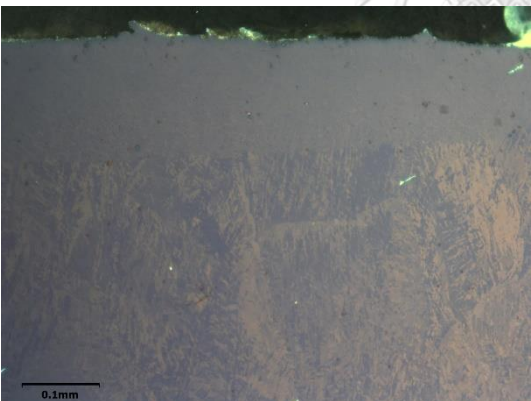
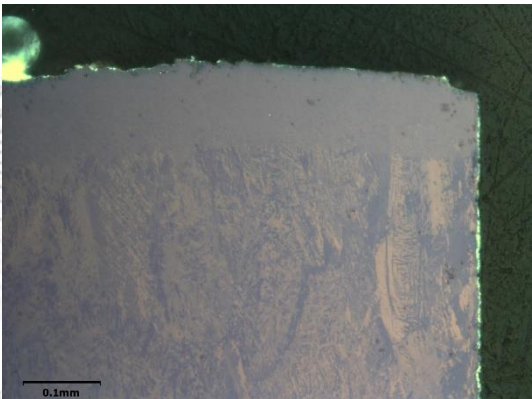
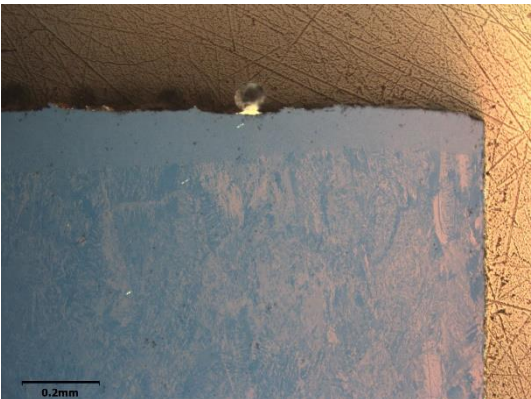
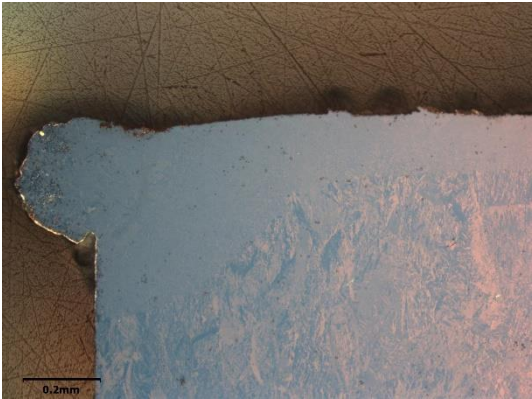
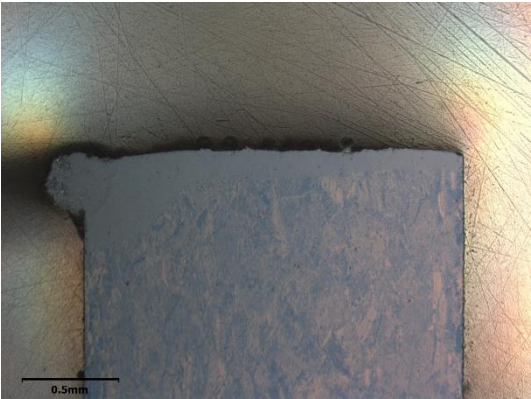
รูปที่ ข-5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์ของชิ้นงานที่ D0 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar

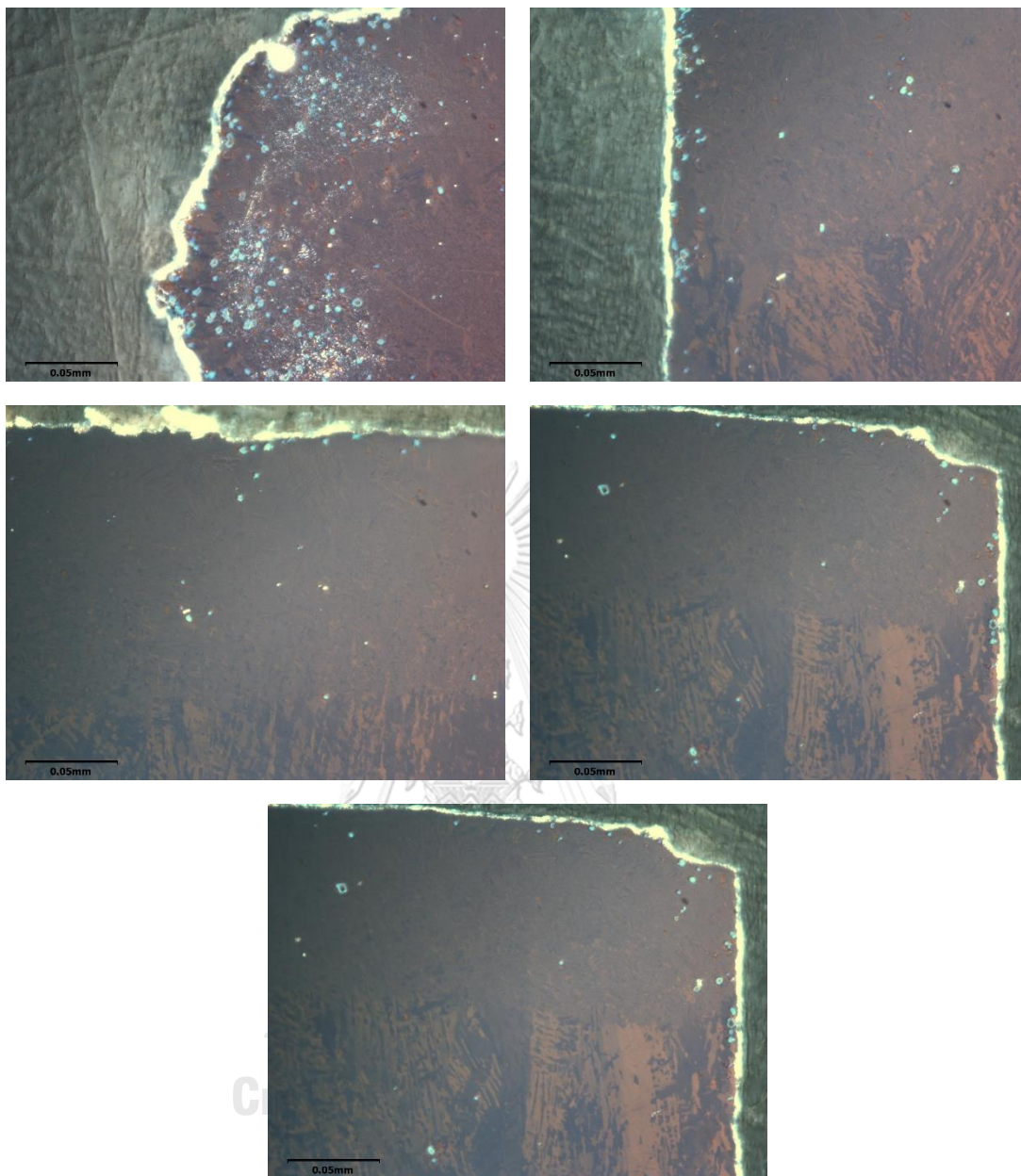




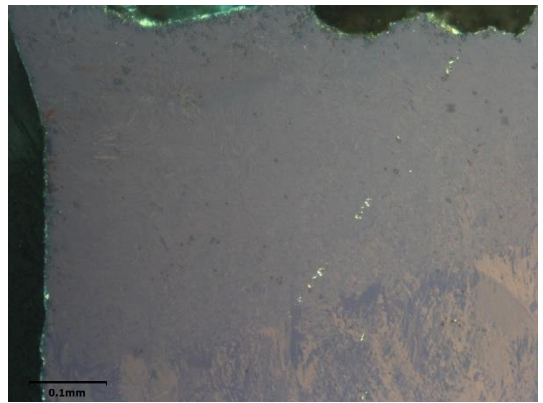
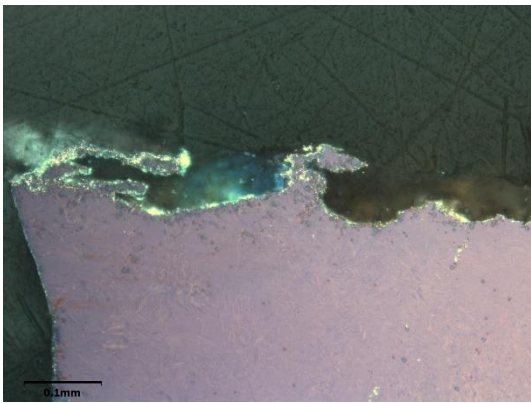
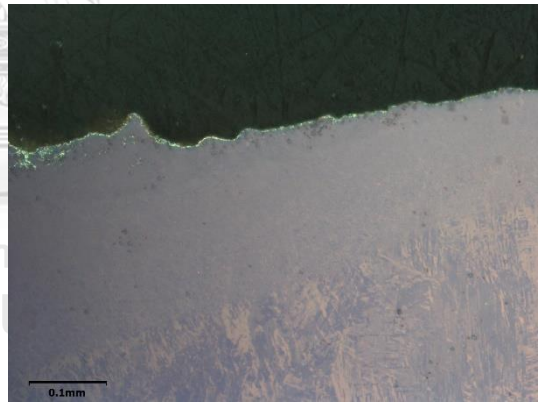
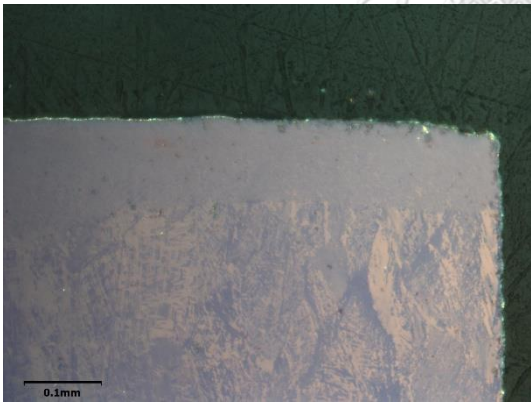
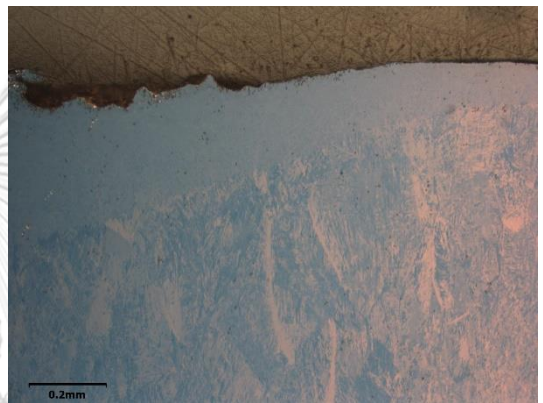
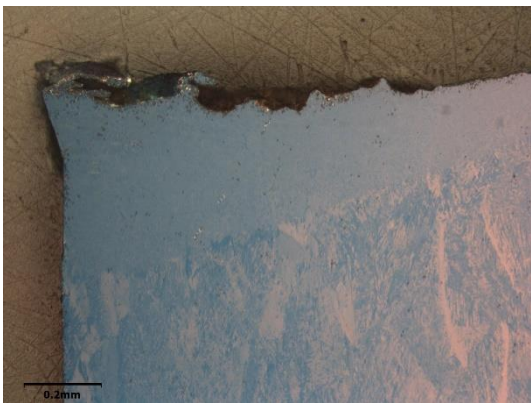
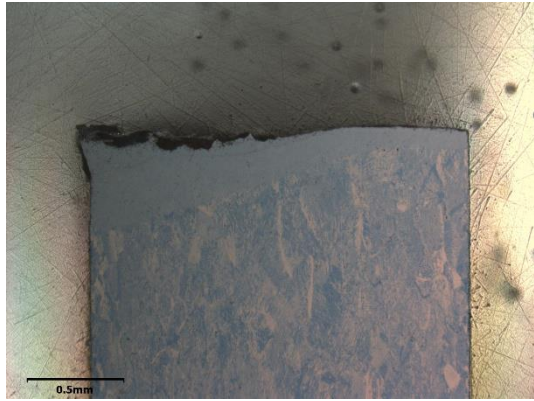


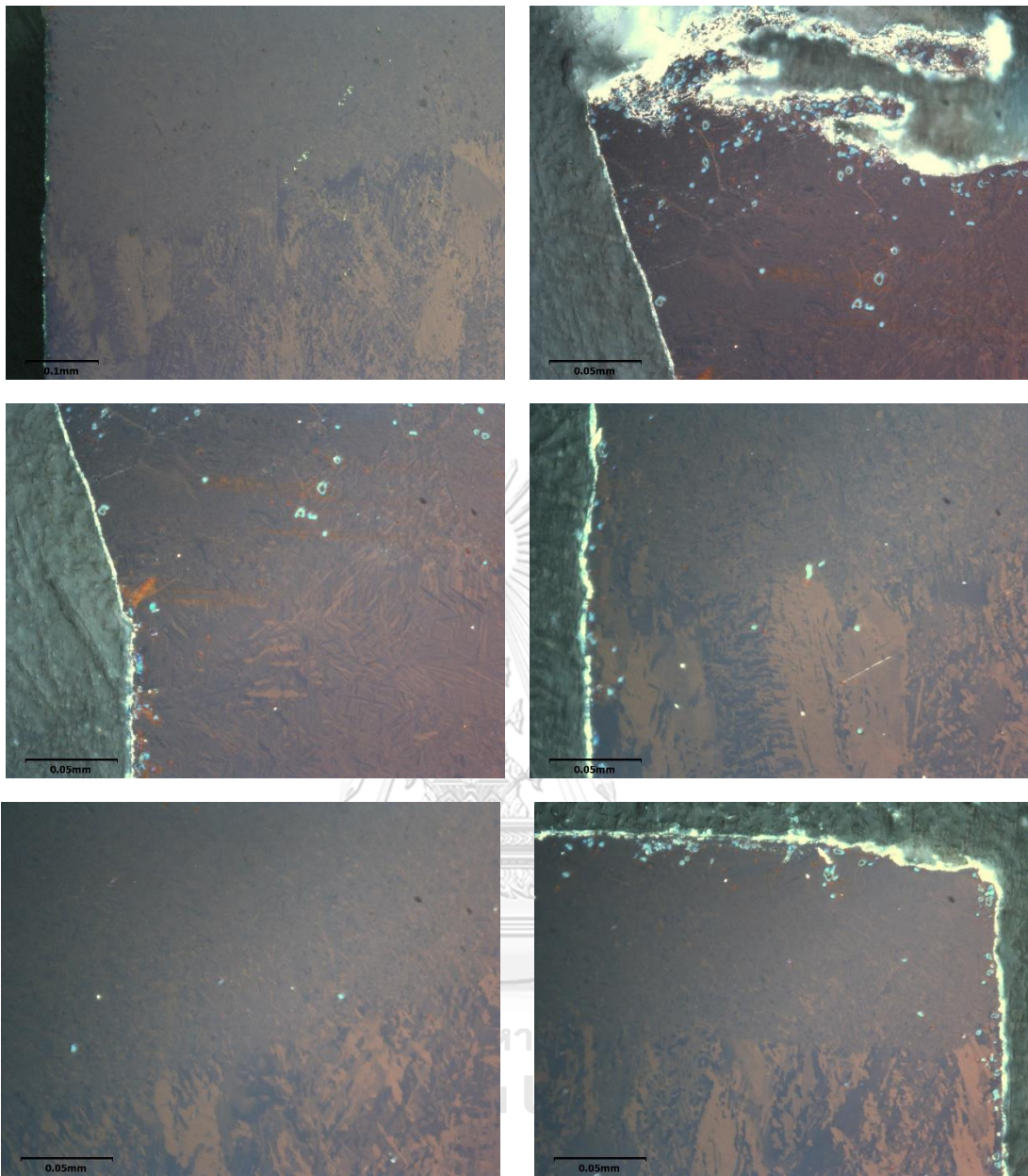
รูปที่ ข-6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ D1 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar



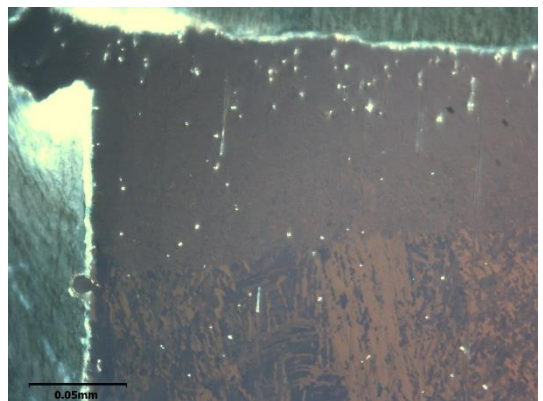
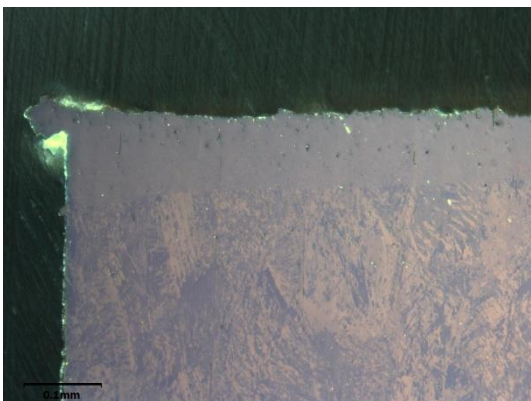
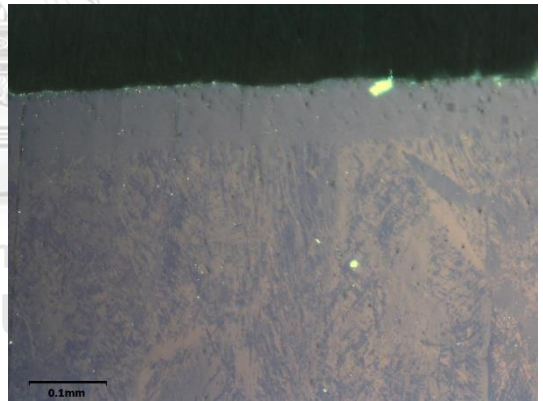
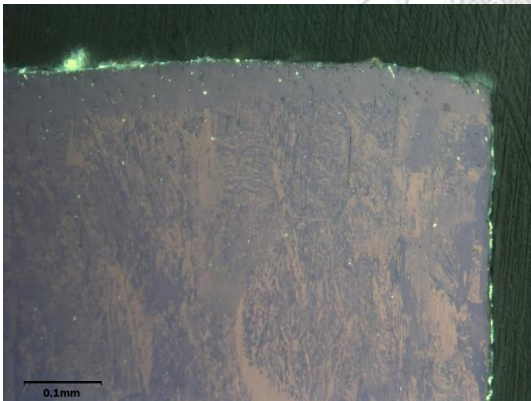
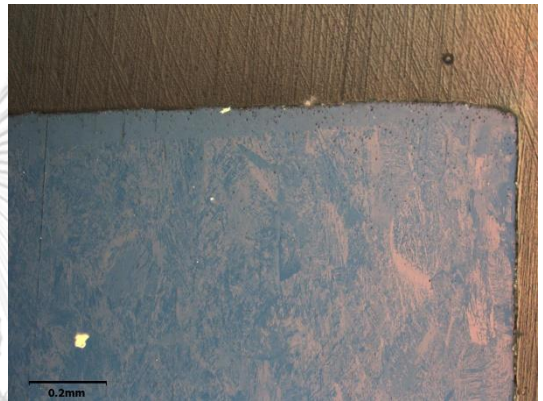
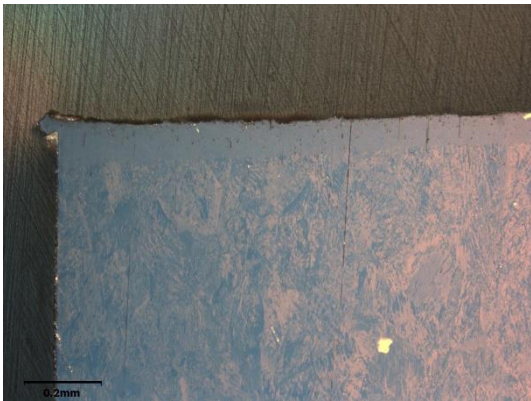
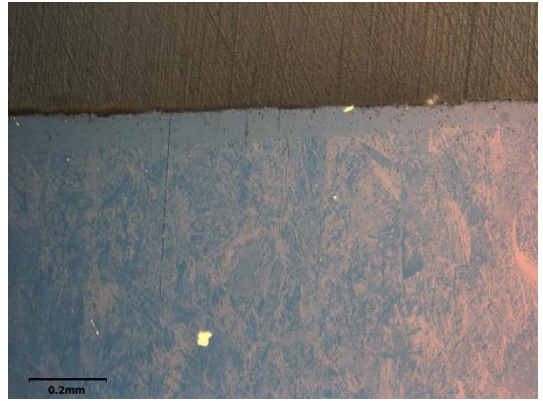
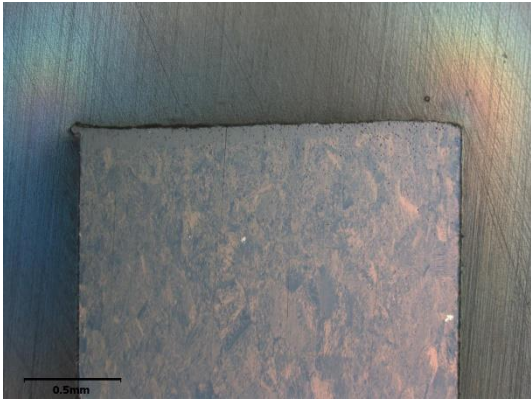


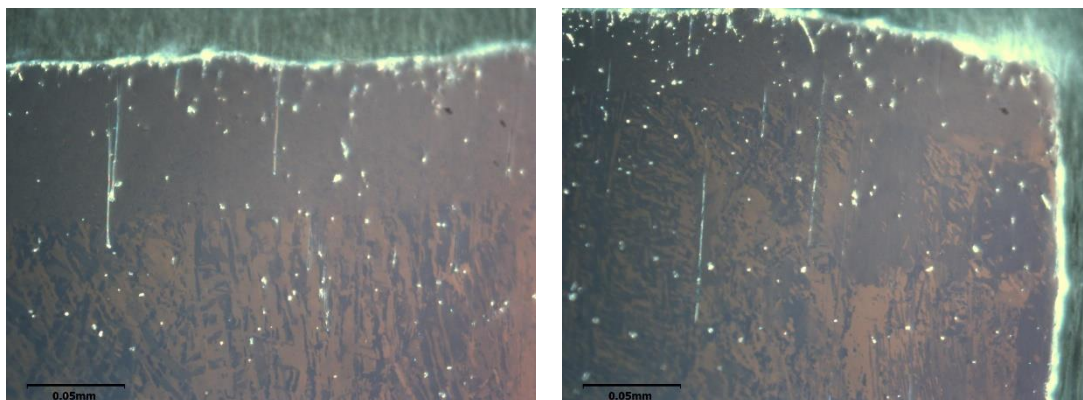
รูปที่ ข-7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ D2 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 4 bar





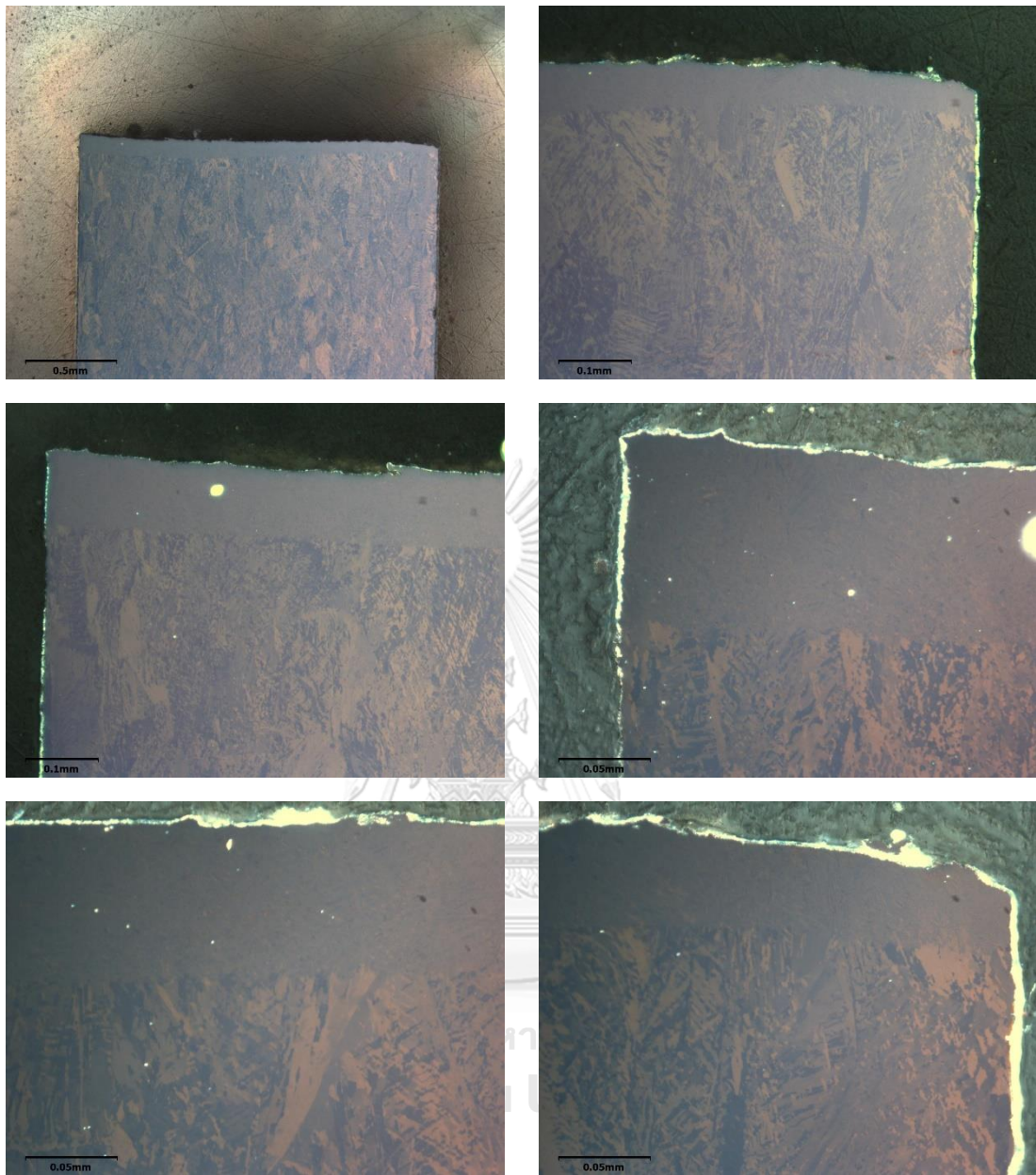
รูปที่ ข-8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ D4 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 4,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 1 bar



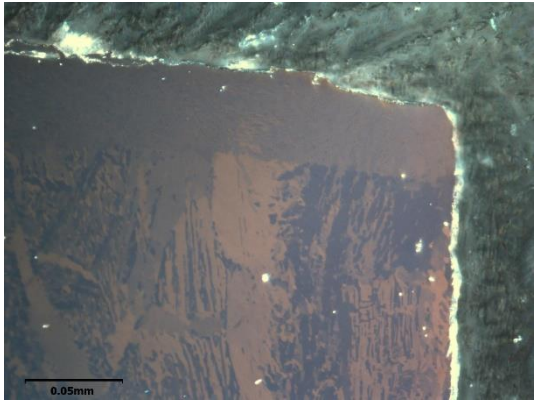
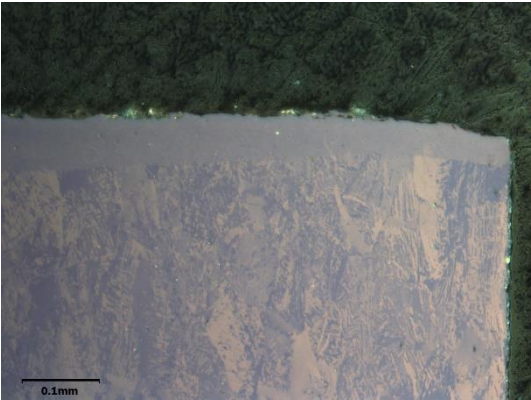
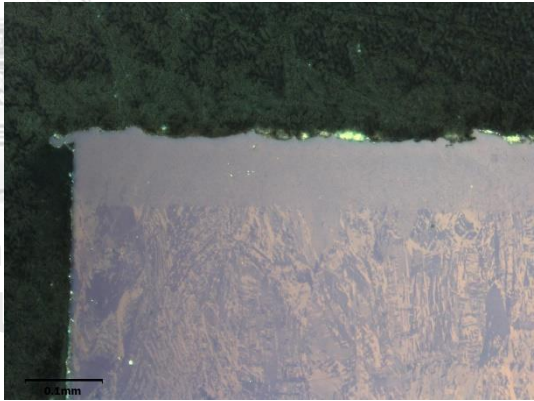
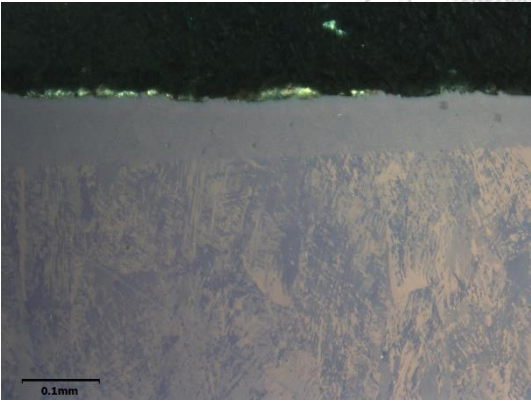
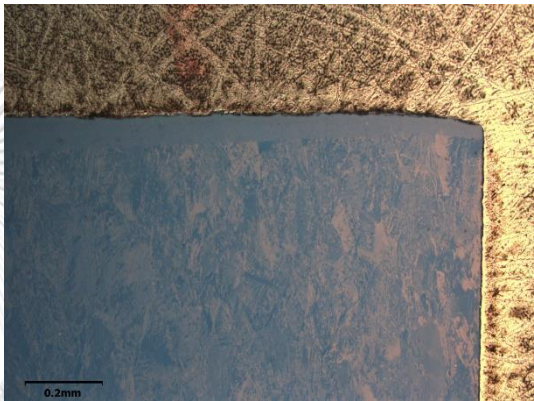
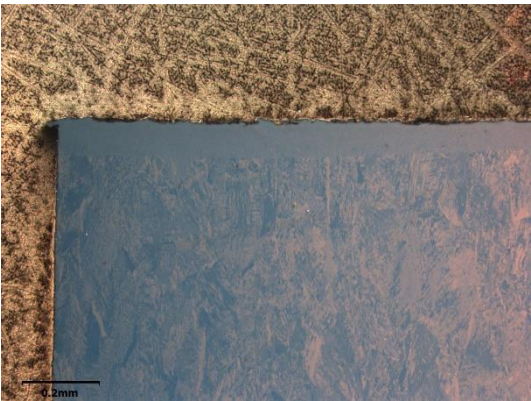
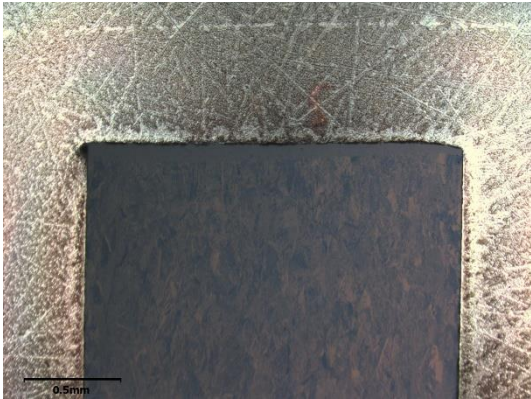


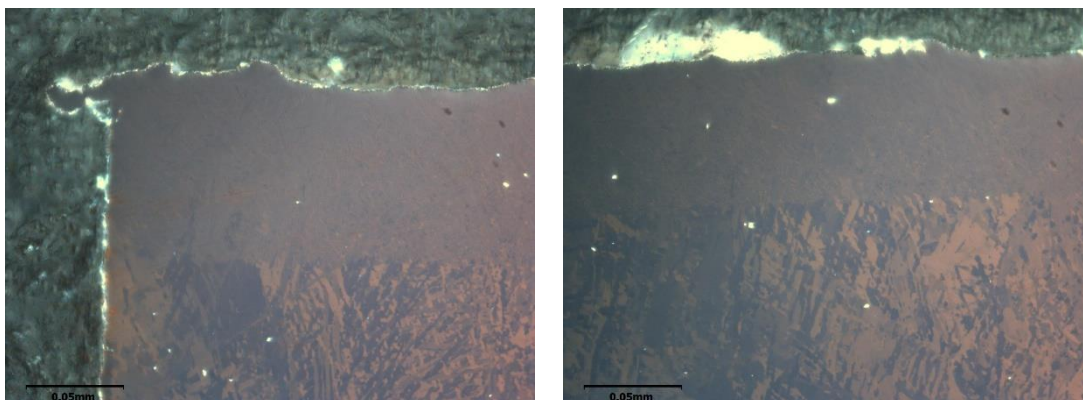
รูปที่ ข-9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ G6 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 16,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar





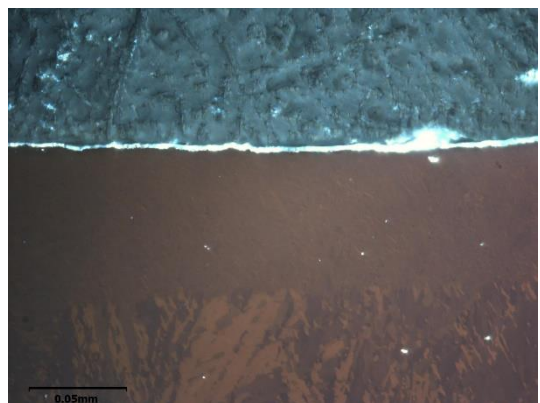
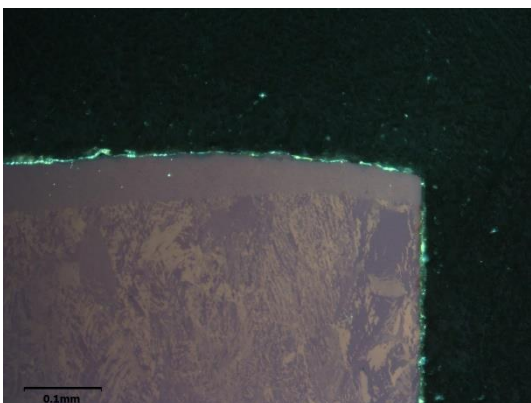
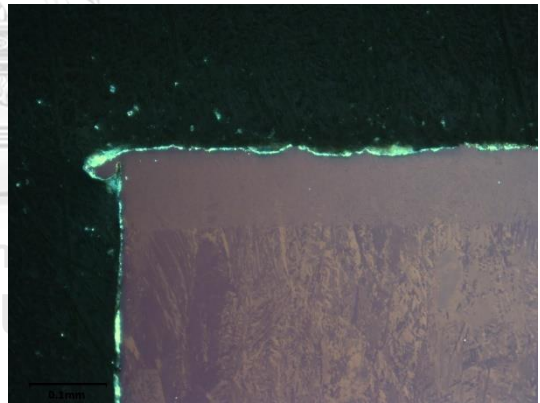
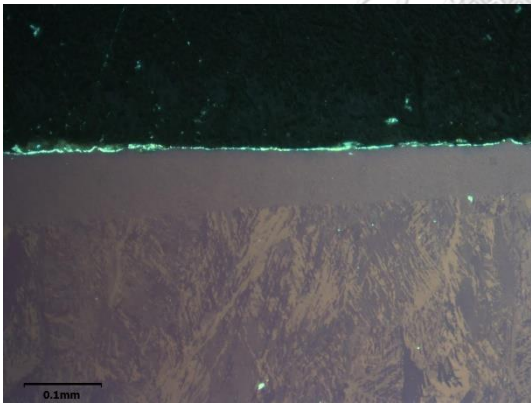
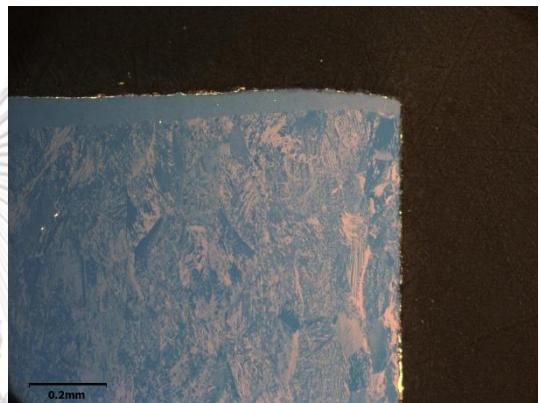
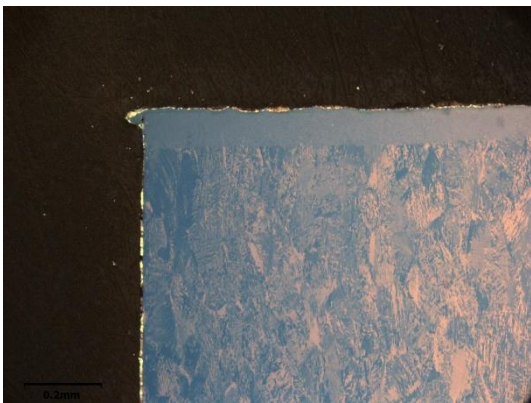
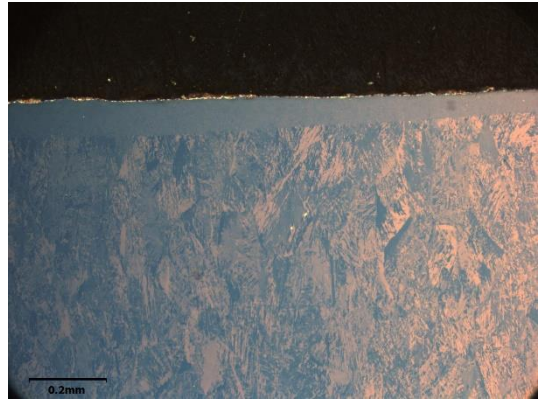
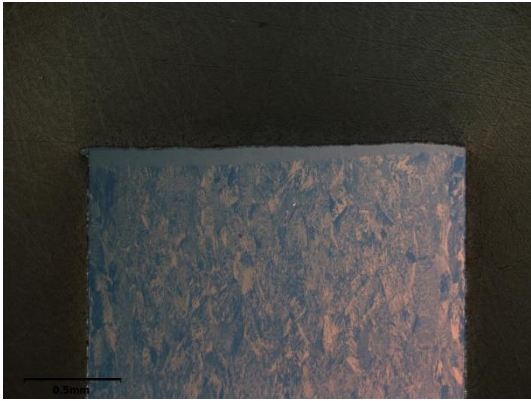
รูปที่ ข-10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ G7 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 16,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar

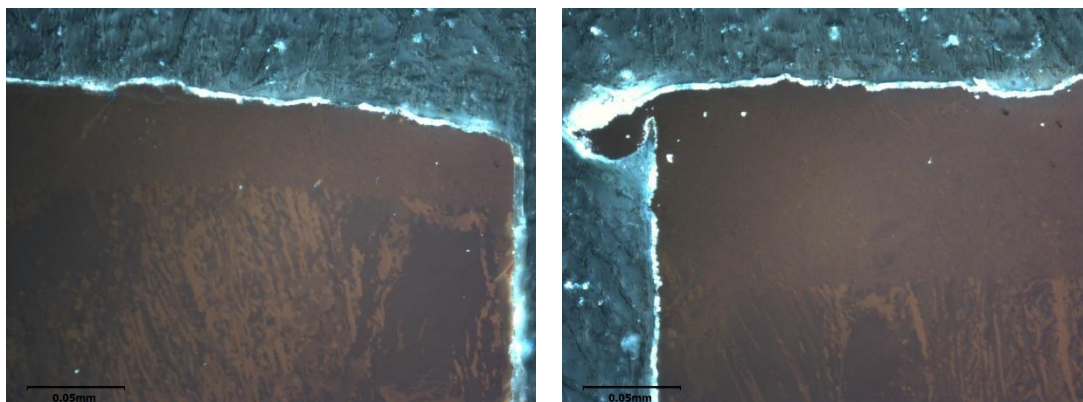




รูปที่ ข-11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์ของชิ้นงานที่ H3 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 36,000 mm/min ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar (ความเร็วจริงไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้)

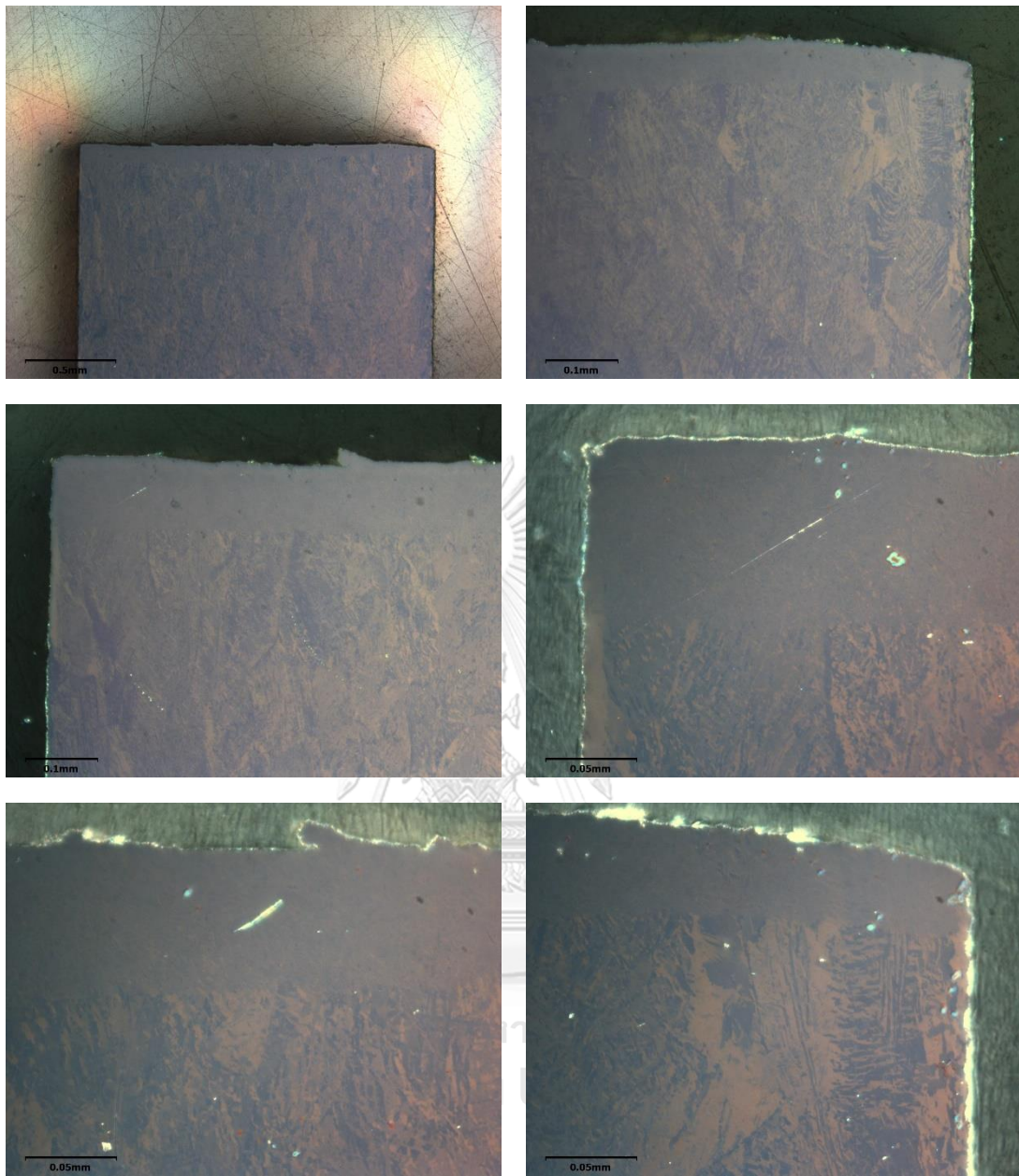




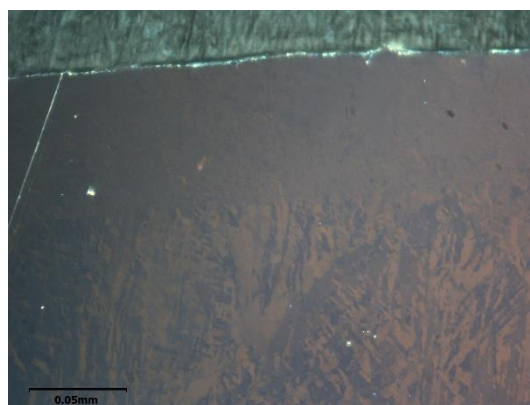
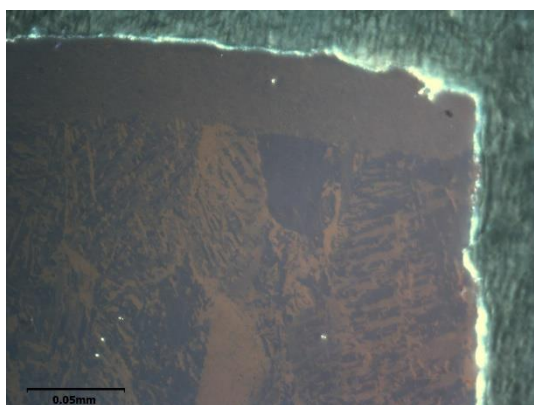
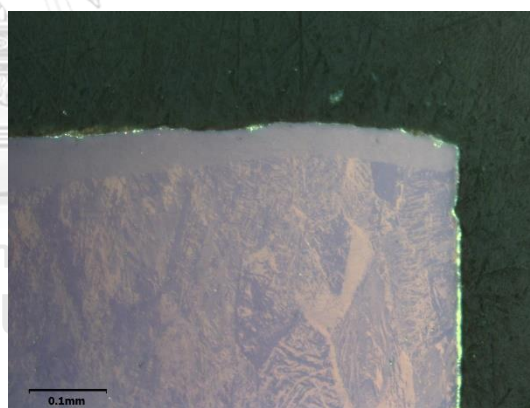
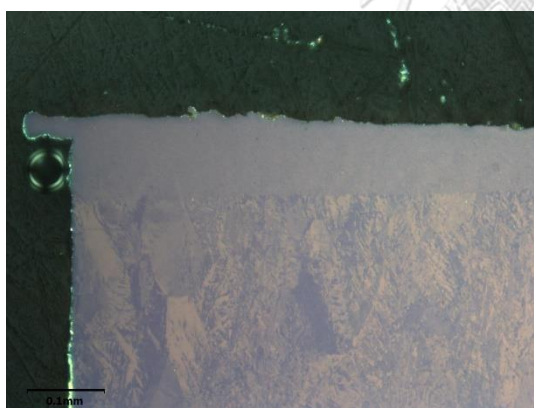
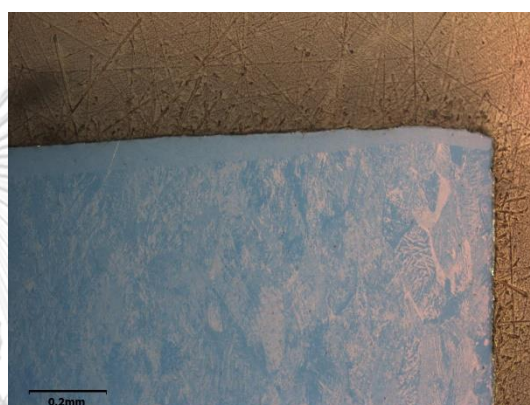
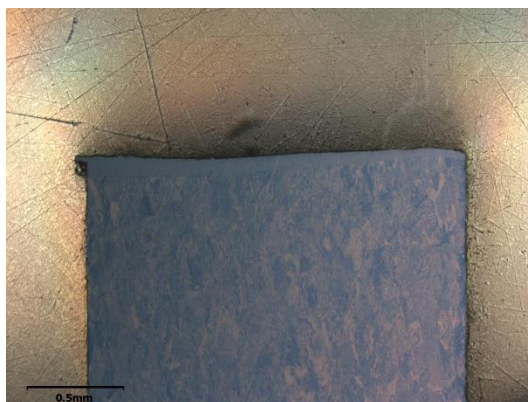


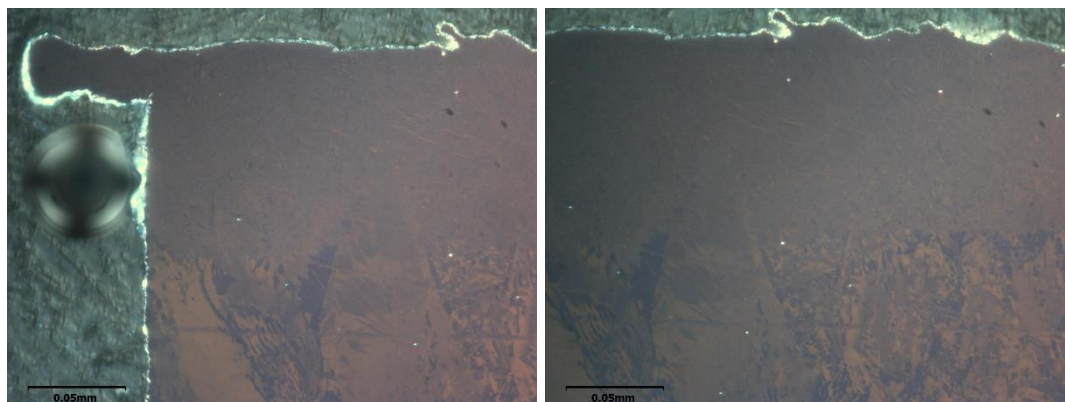
รูปที่ ข-12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์ของชิ้นงานที่ H8 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 72,000 mm/min ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar (ความเร็วจริงไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้)





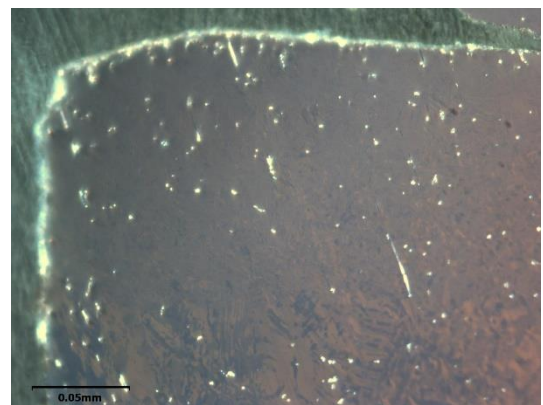
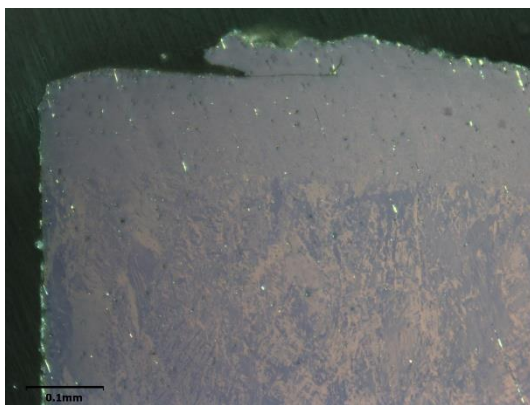
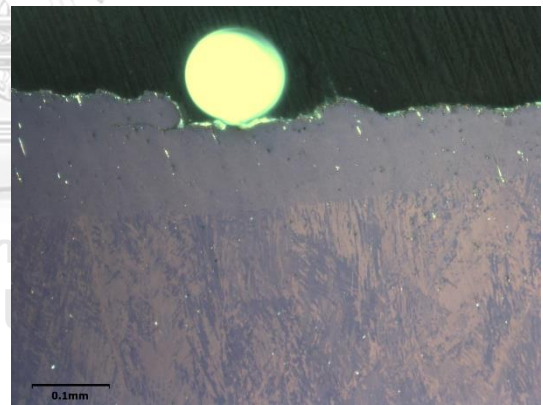
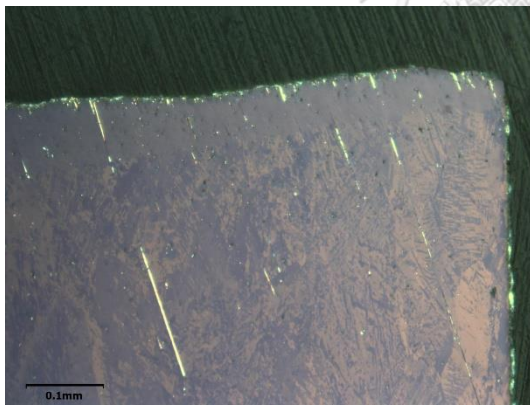
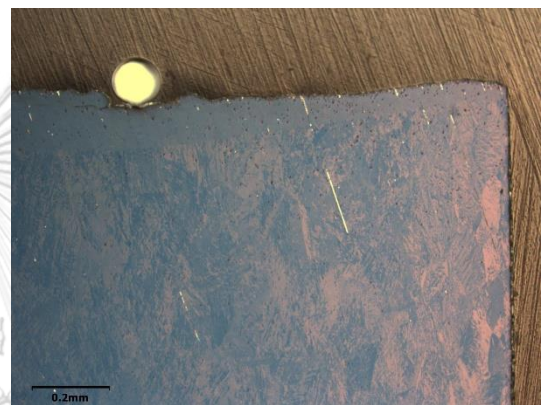
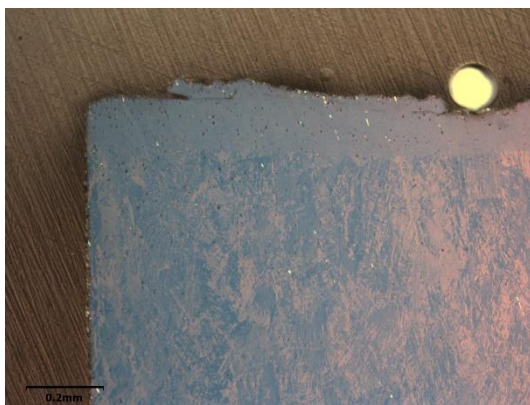
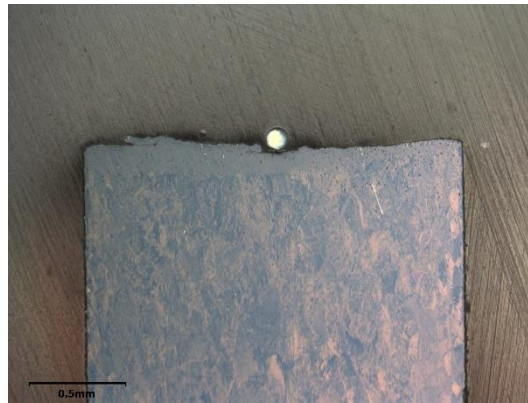
รูปที่ ข-13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ 13 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 100,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar (ความเร็วจริงไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้)

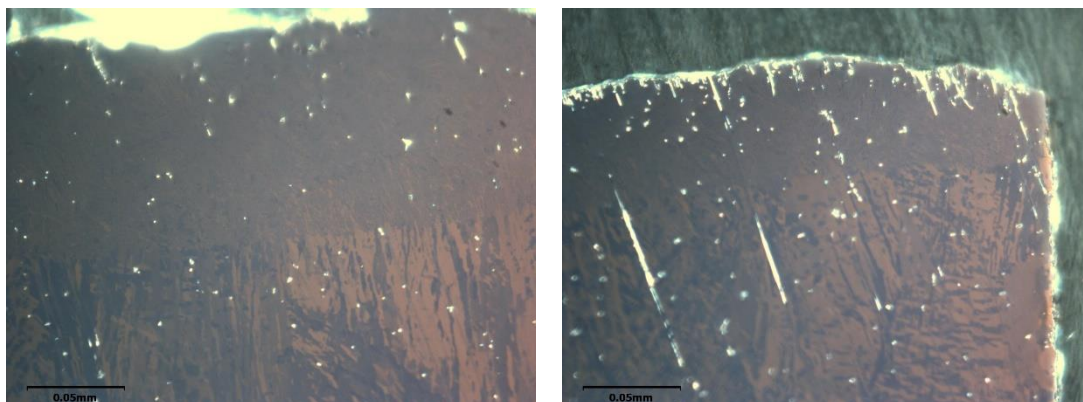




รูปที่ ข-14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์ของชิ้นงานที่ 14 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 72,000 mm/min ความดันแก๊สช่วยตัด 8 bar (ความเร็วจริงไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้)

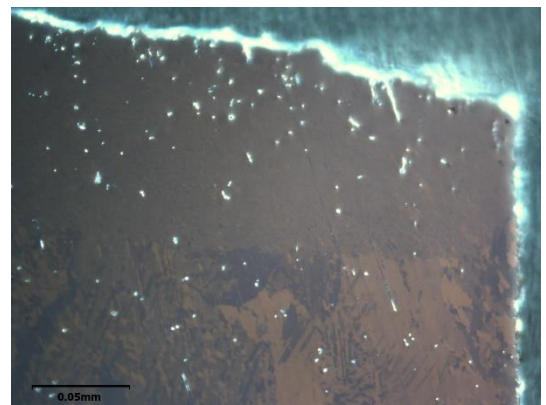
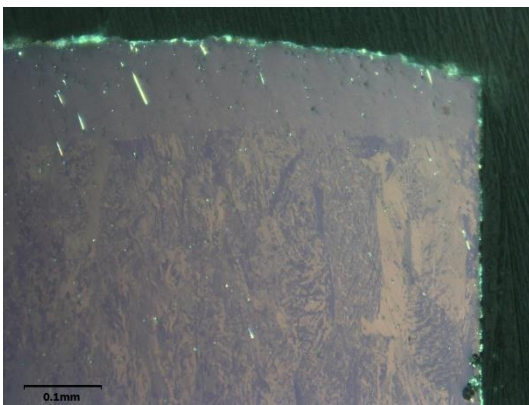
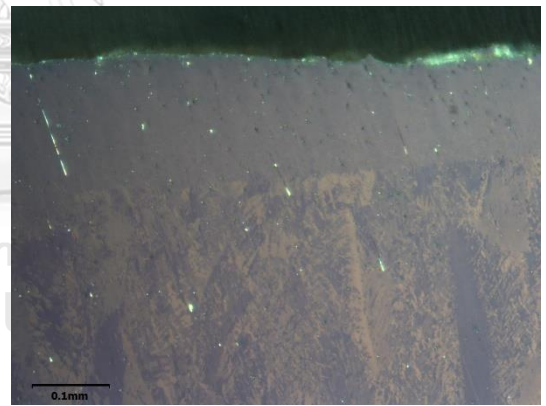
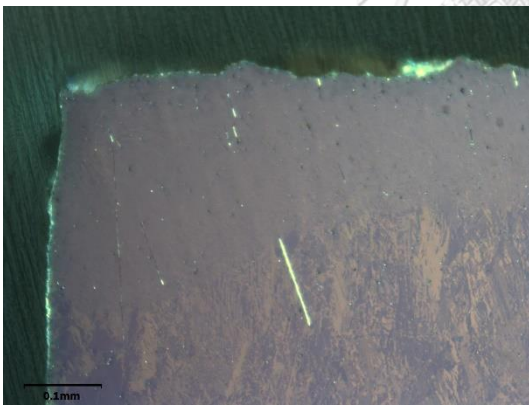
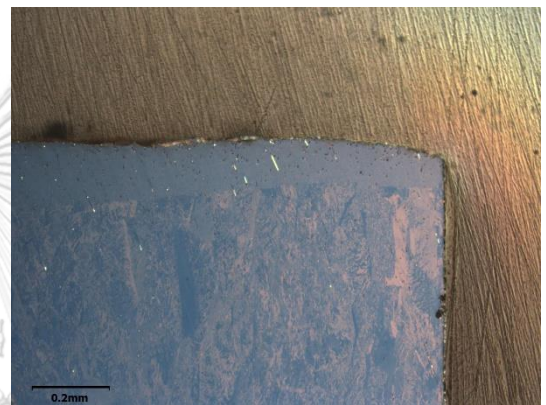
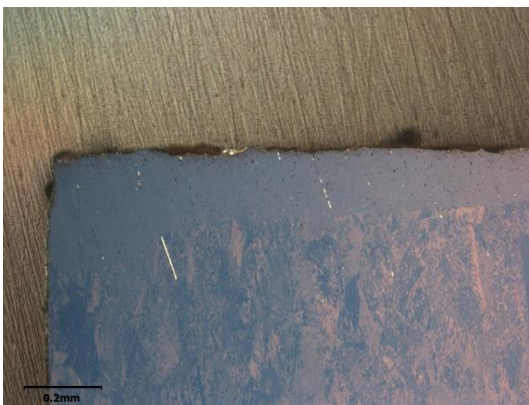
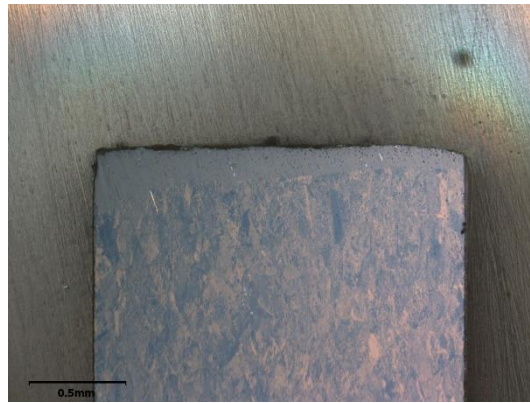


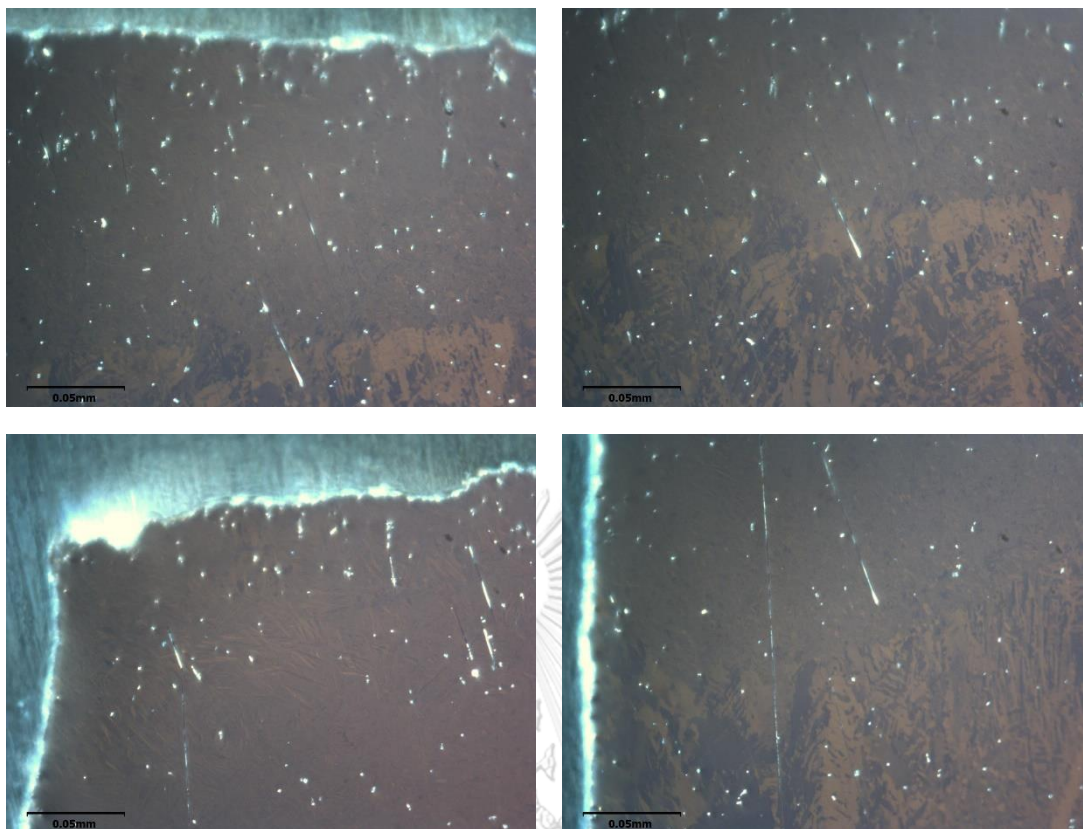




รูปที่ ข-15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ 17 กำลังของเลเซอร์ 3,000 W ความเร็วการตัด 100,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 1 bar (ความเร็วจริงไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้)







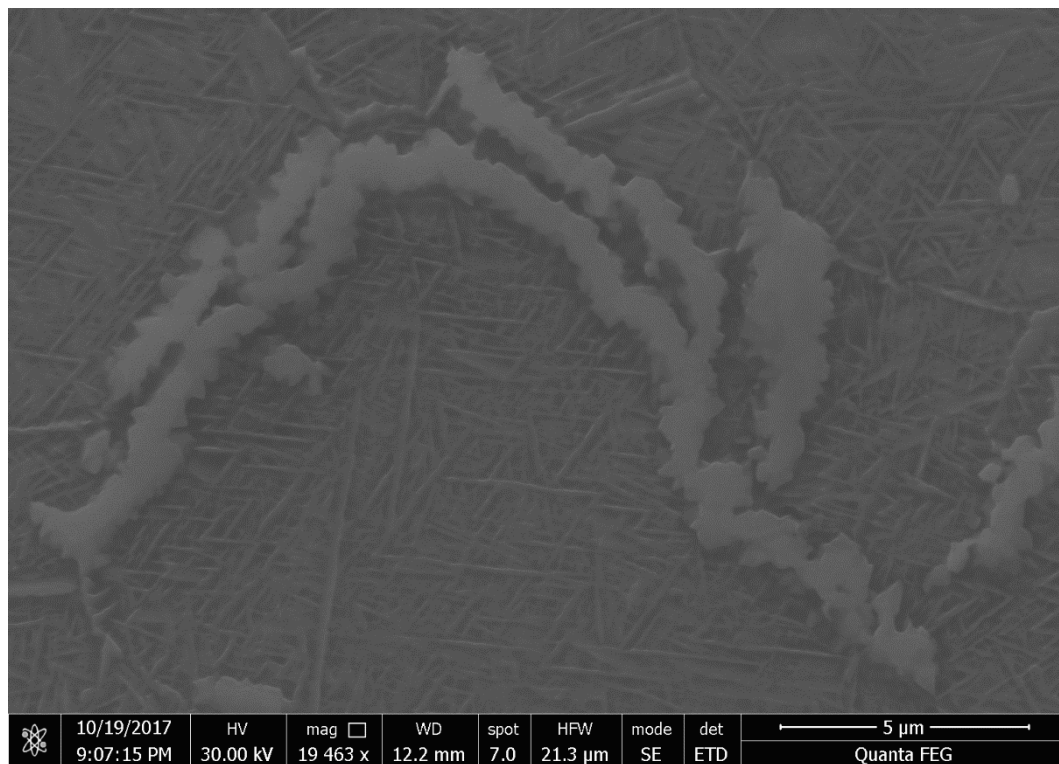
รูปที่ ข-16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะชั้นต่าง ๆ บริเวณรอยตัดด้วยเลเซอร์
ของชิ้นงานที่ J5 กำลังของเลเซอร์ 2,000 W ความเร็วการตัด 16,000 mm/min
ความดันแก๊สช่วยตัด 16 bar (ความเร็วจริงไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้)



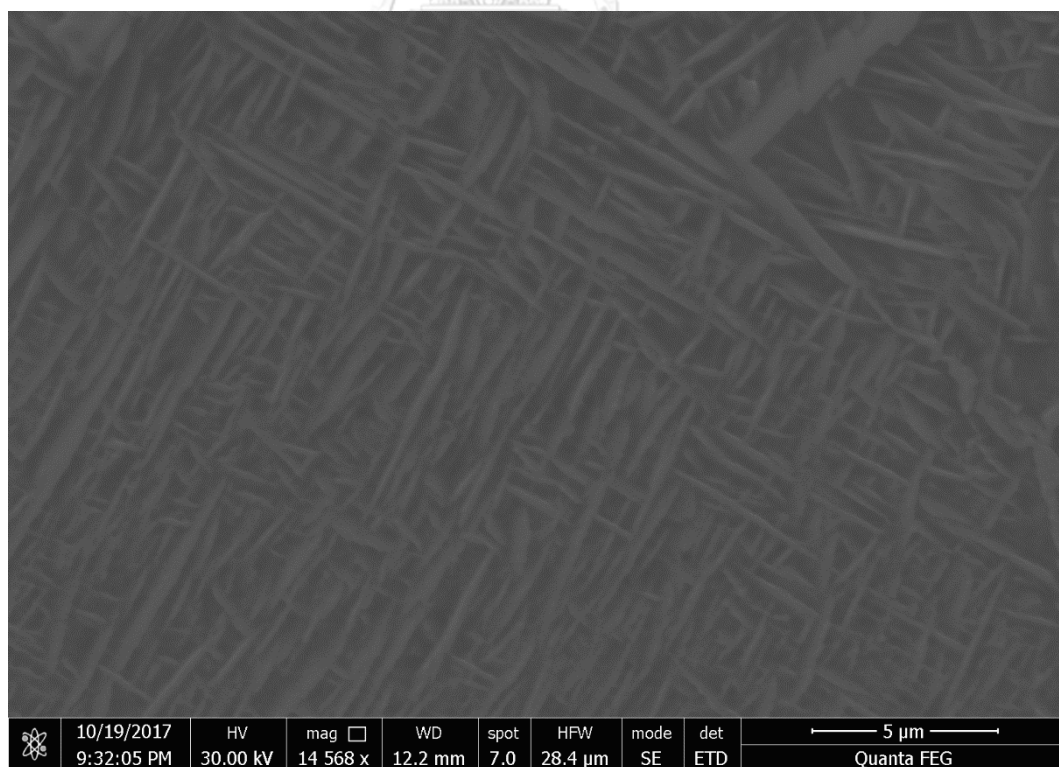
ภาคผนวก ค

(ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่พบ)

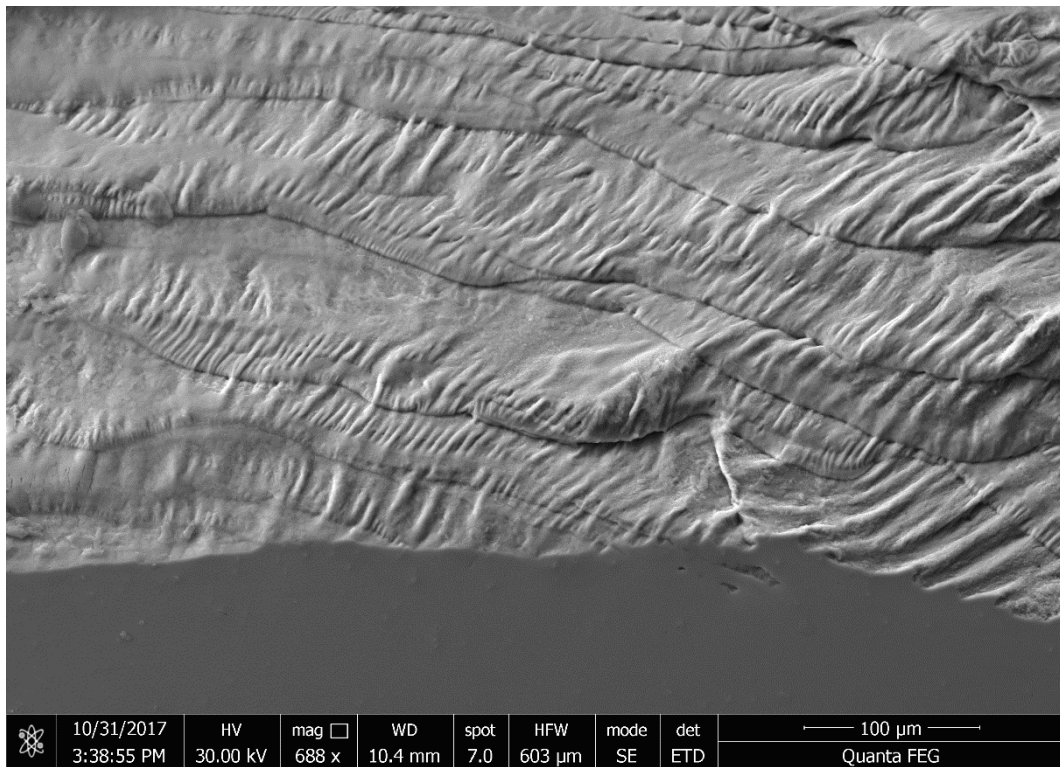
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



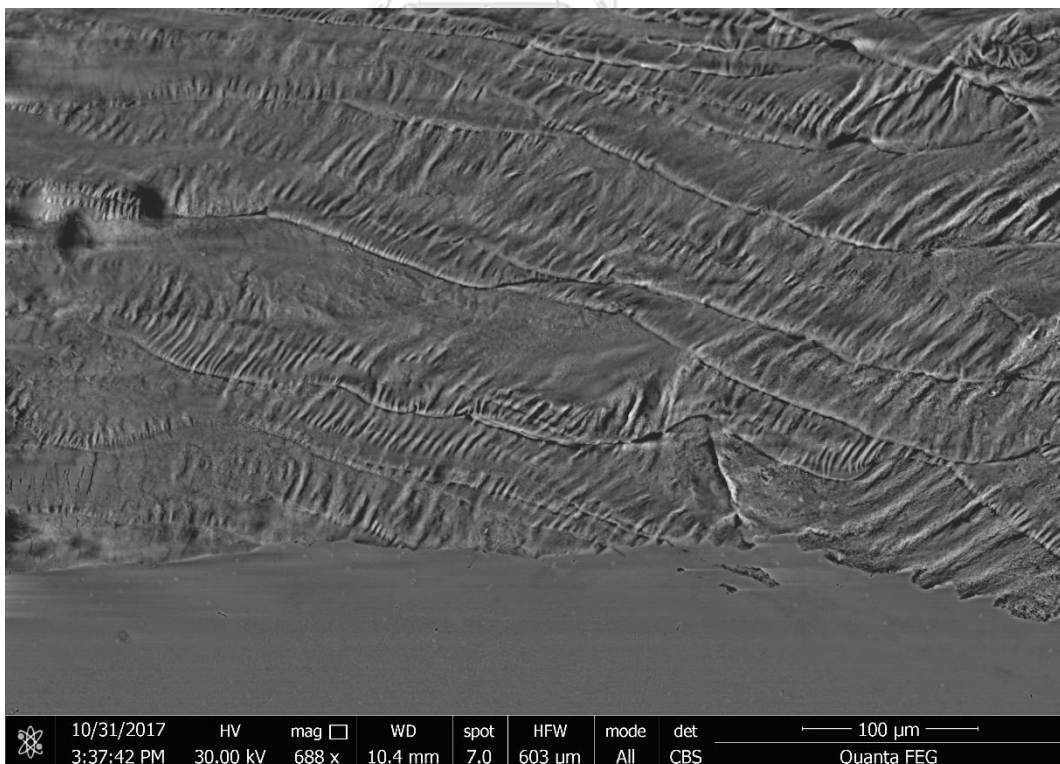
รูปที่ ค-1 เฟสที่มีไนโตรเจนสูงภายในชั้นหลอมละลาย



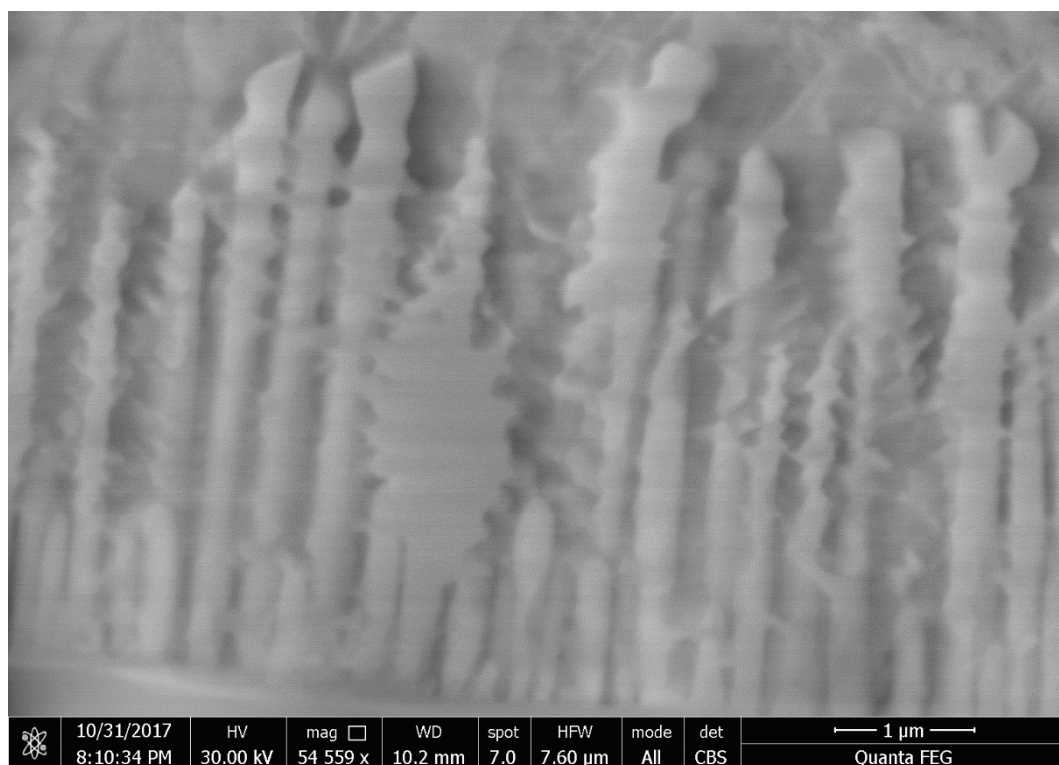
รูปที่ ค-2 เฟสมาเทนไซด์ของชั้นหลอมละลาย



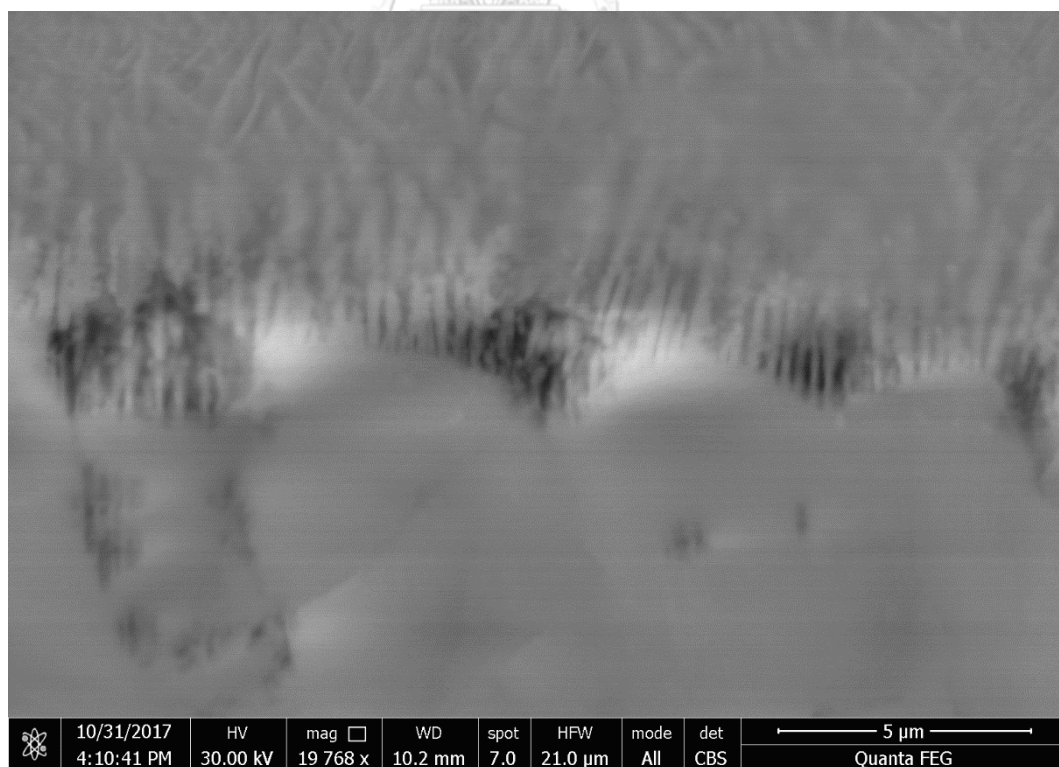
รูปที่ ค-3 ลักษณะการซ้อนทับของผิวชั้นหลอมละลาย



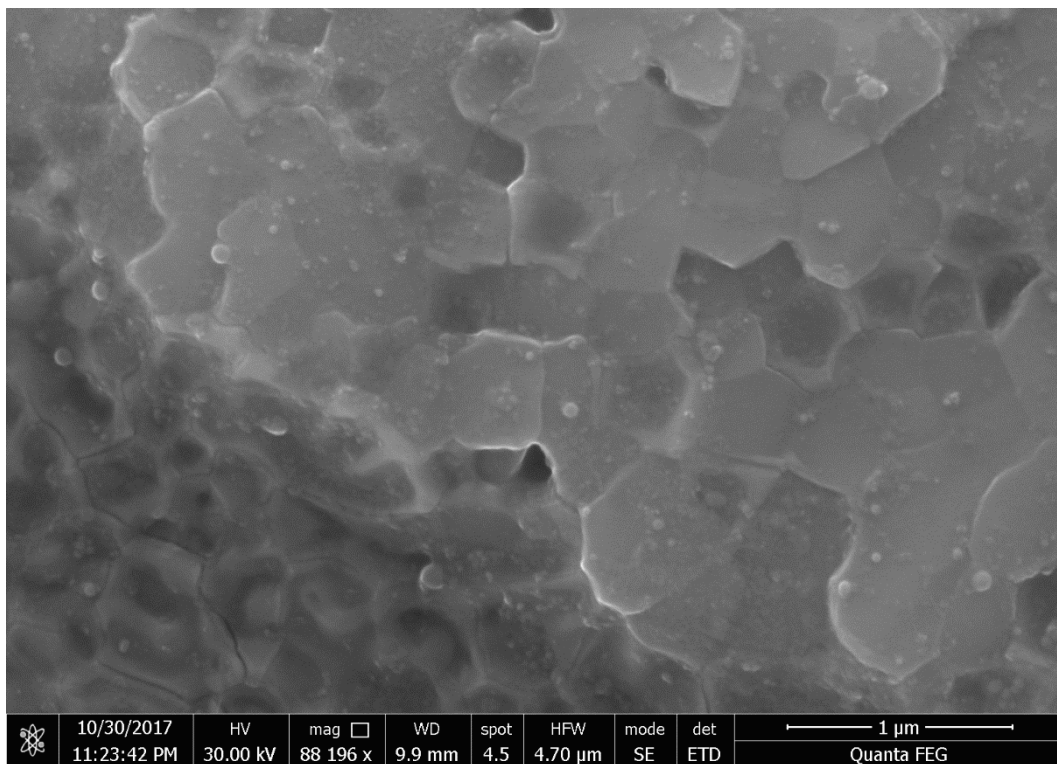
รูปที่ ค-4 ลักษณะการซ้อนทับของผิวชั้นหลอมละลาย



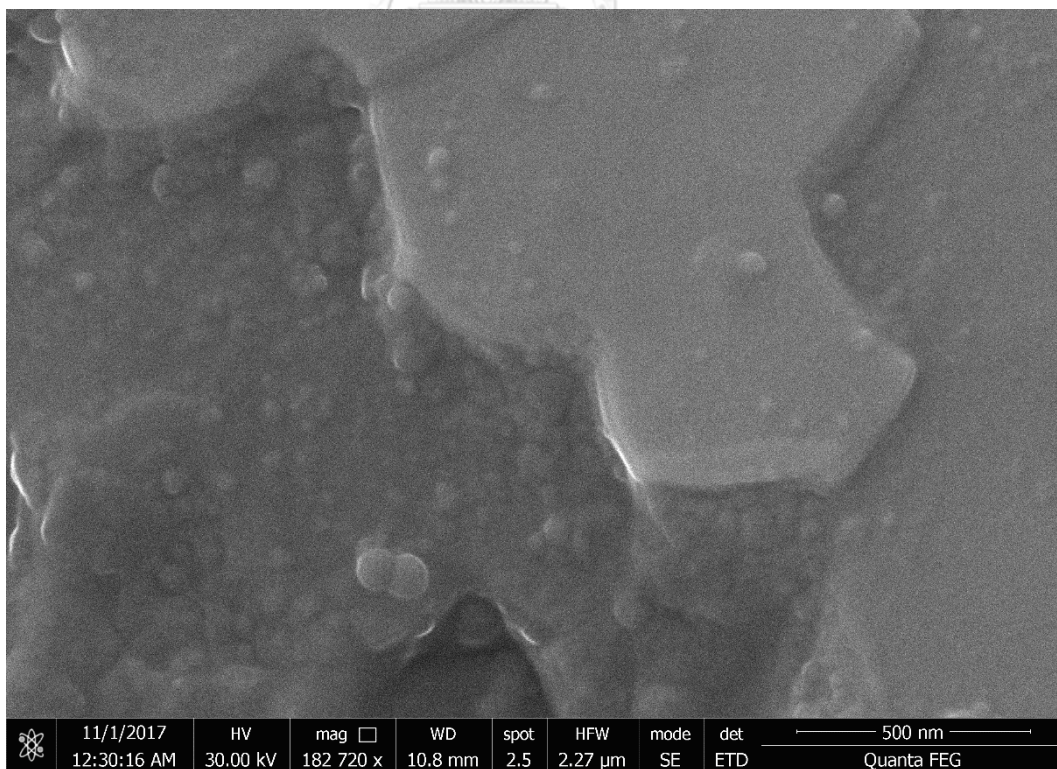
รูปที่ ค-5 เคนไดรต์บริเวณผิวชั้นหกลมละลาย



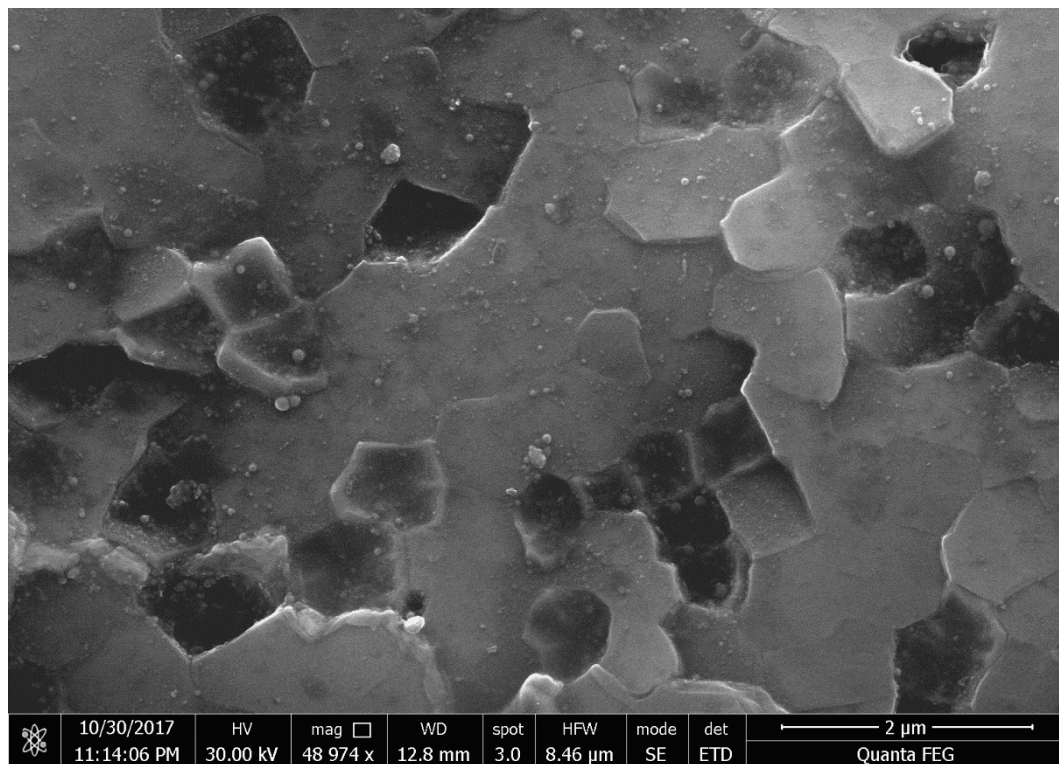
รูปที่ ค-6 เคนไดรต์บริเวณผิวชั้นหกลมละลาย



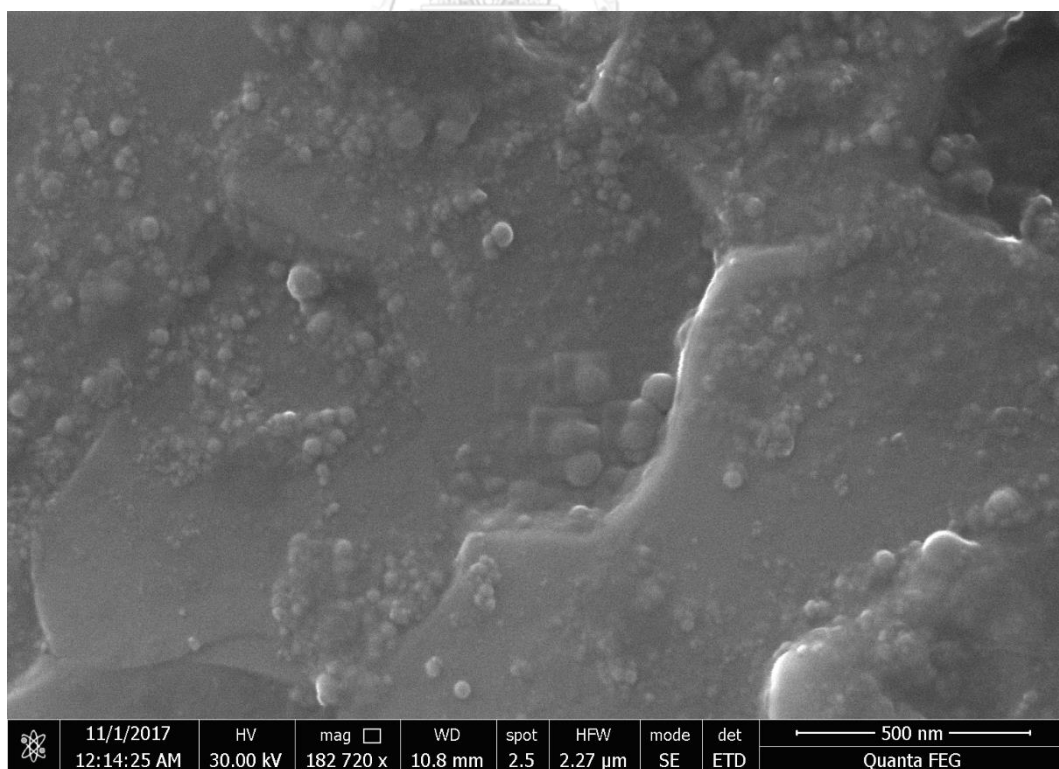
รูปที่ ค-7 เฟสที่เกิดบริเวณที่ทดสอบยิงเลเซอร์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



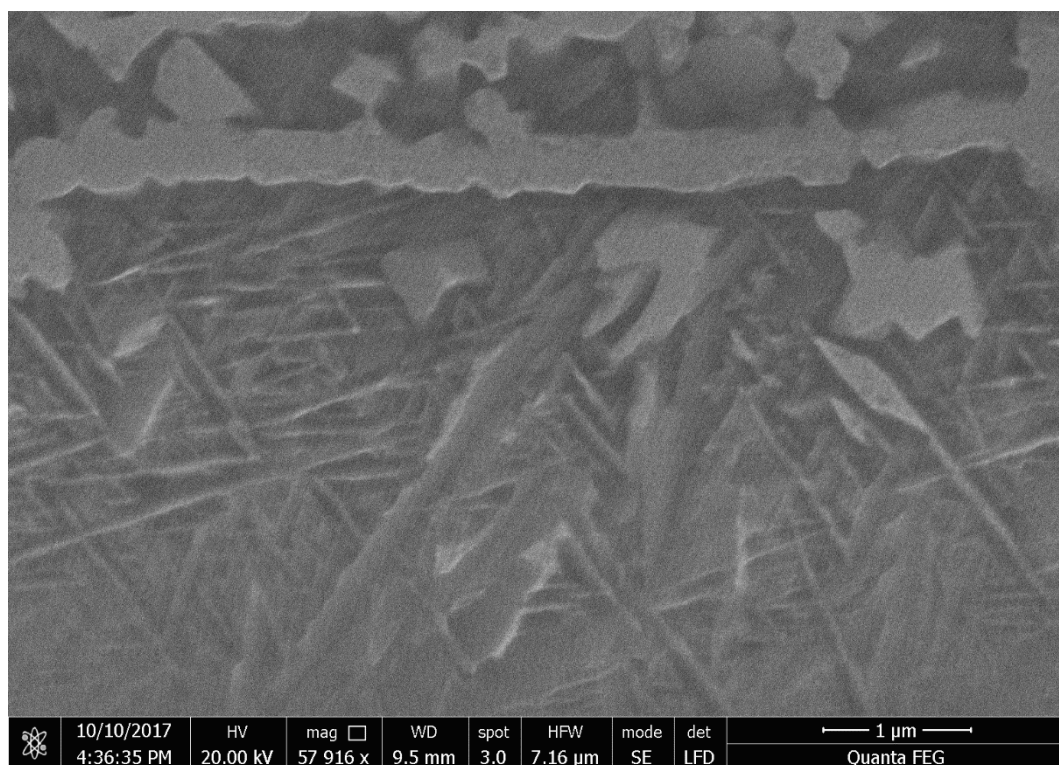
รูปที่ ค-8 เฟสที่เกิดบริเวณที่ทดสอบยิงเลเซอร์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



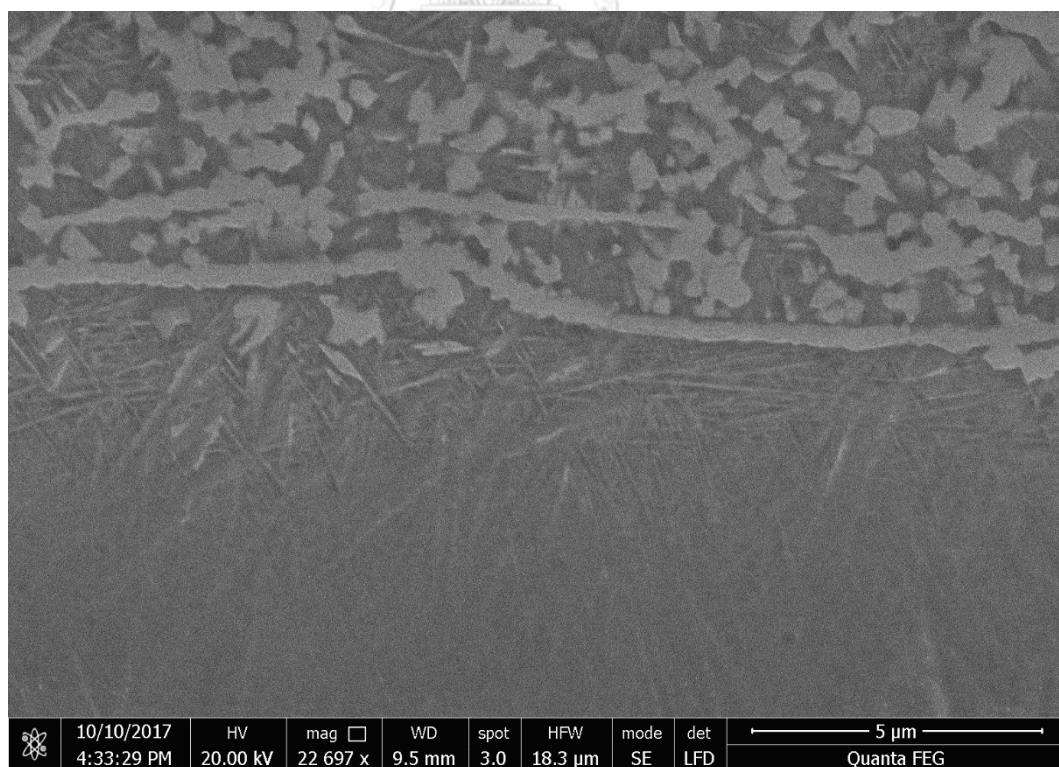
รูปที่ ค-9 เฟสที่เกิดบริเวณที่ทดสอบยิงเลเซอร์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



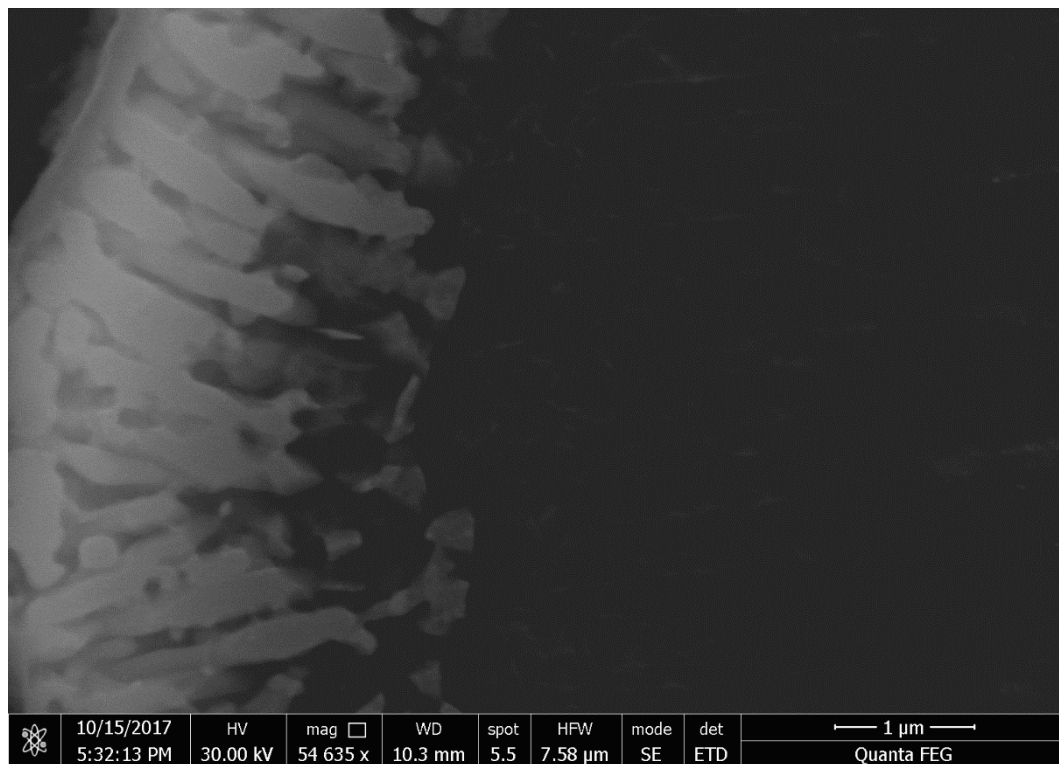
รูปที่ ค-10 เฟสที่เกิดบริเวณที่ทดสอบยิงเลเซอร์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



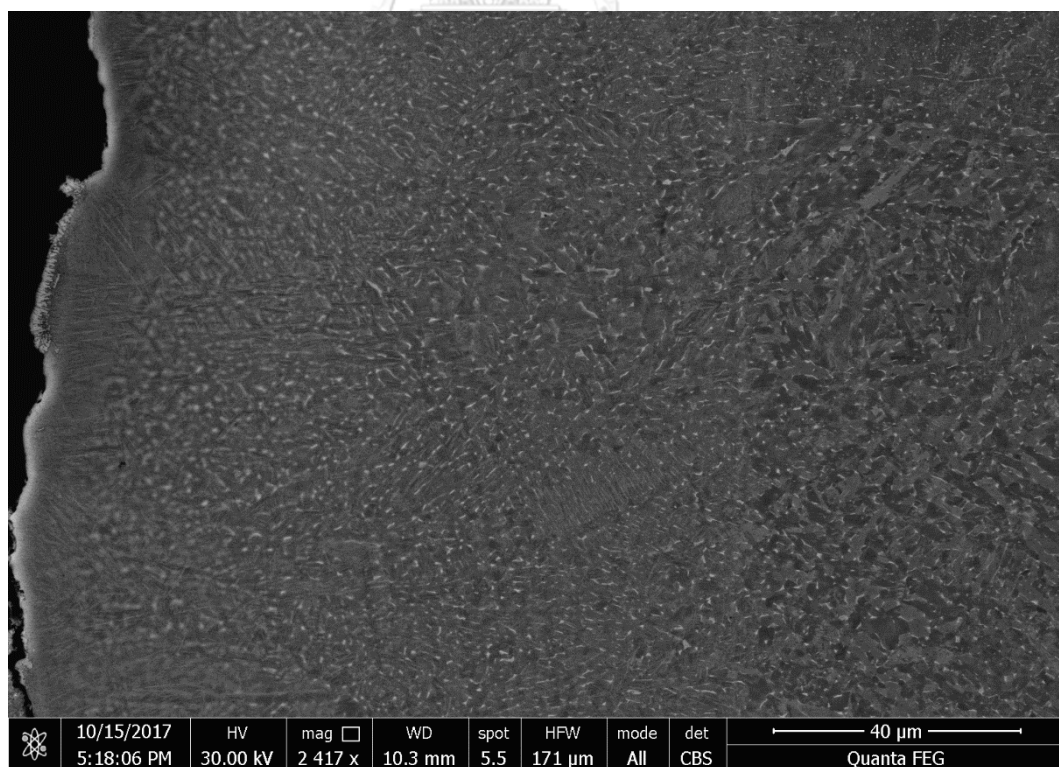
รูปที่ ค-11 เฟสที่มีไนโตรเจนสูงภายในชั้นหลอมละลาย



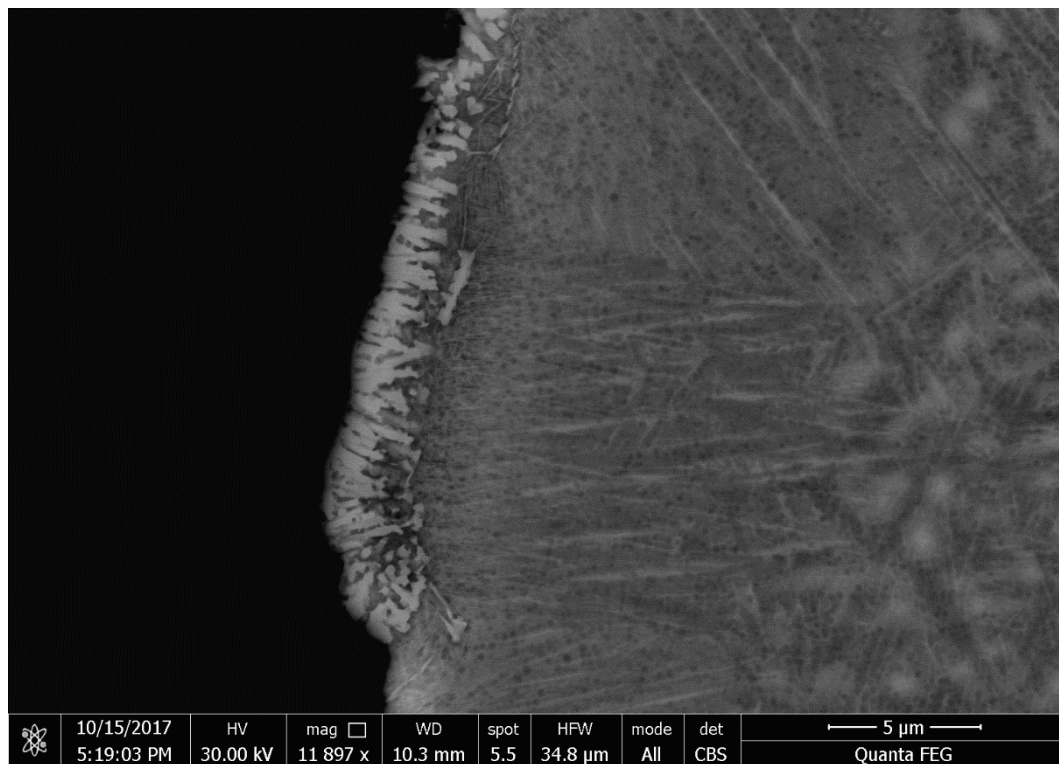
รูปที่ ค-12 เฟสที่มีไนโตรเจนสูงภายในชั้นหลอมละลาย



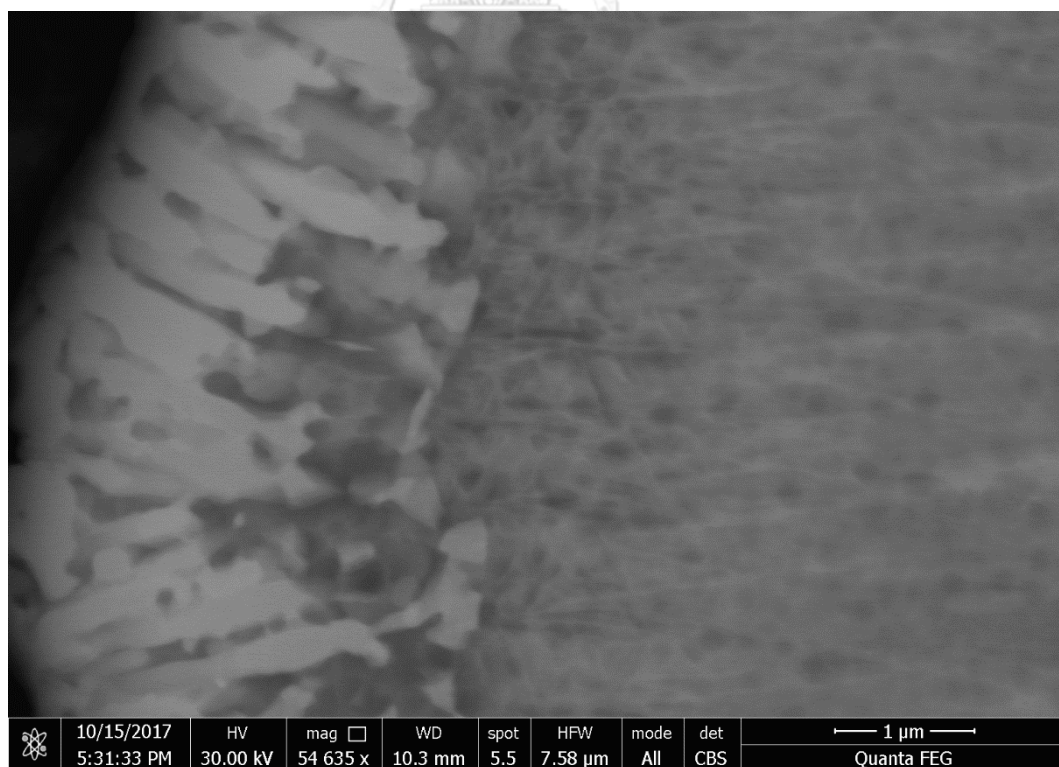
รูปที่ ค-13 เคนไครต์บริเวณผิวชั้นหกลมละลาย



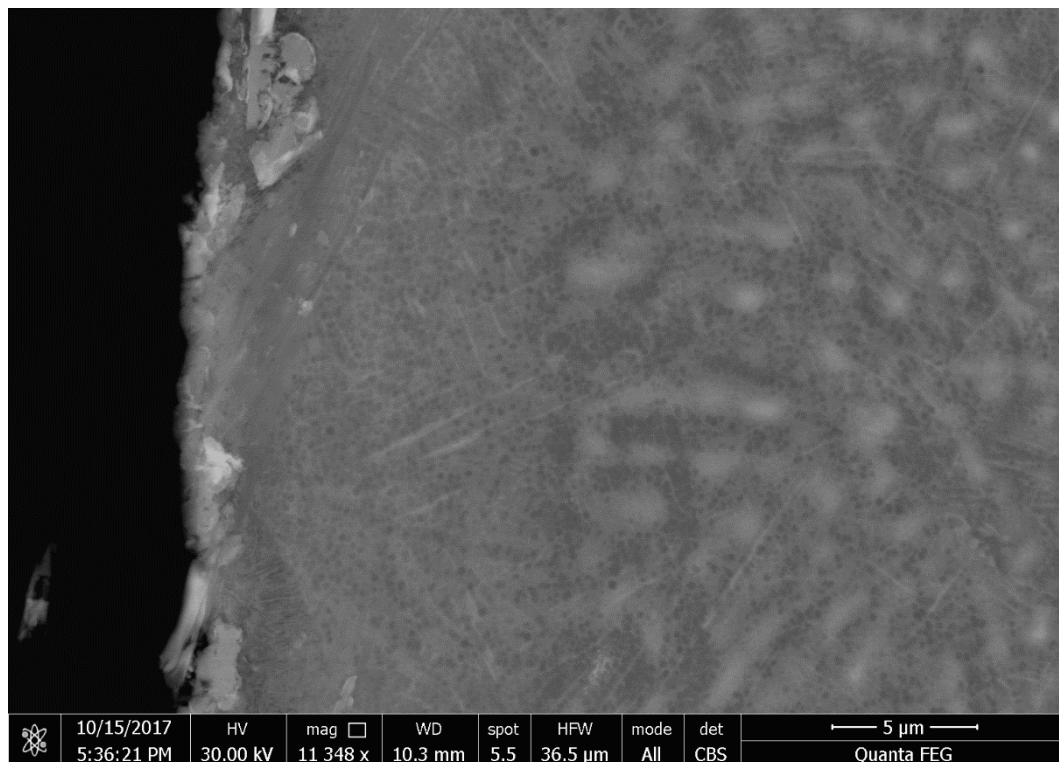
รูปที่ ค-14 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยตัด



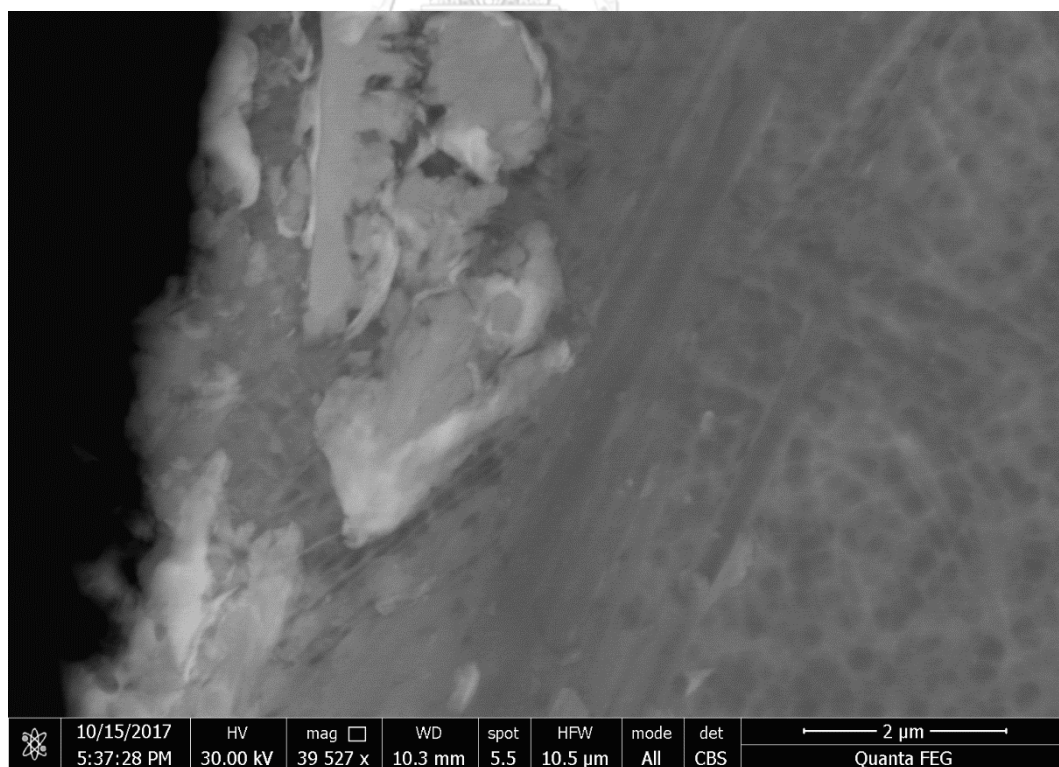
รูปที่ ค-15 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยตัด



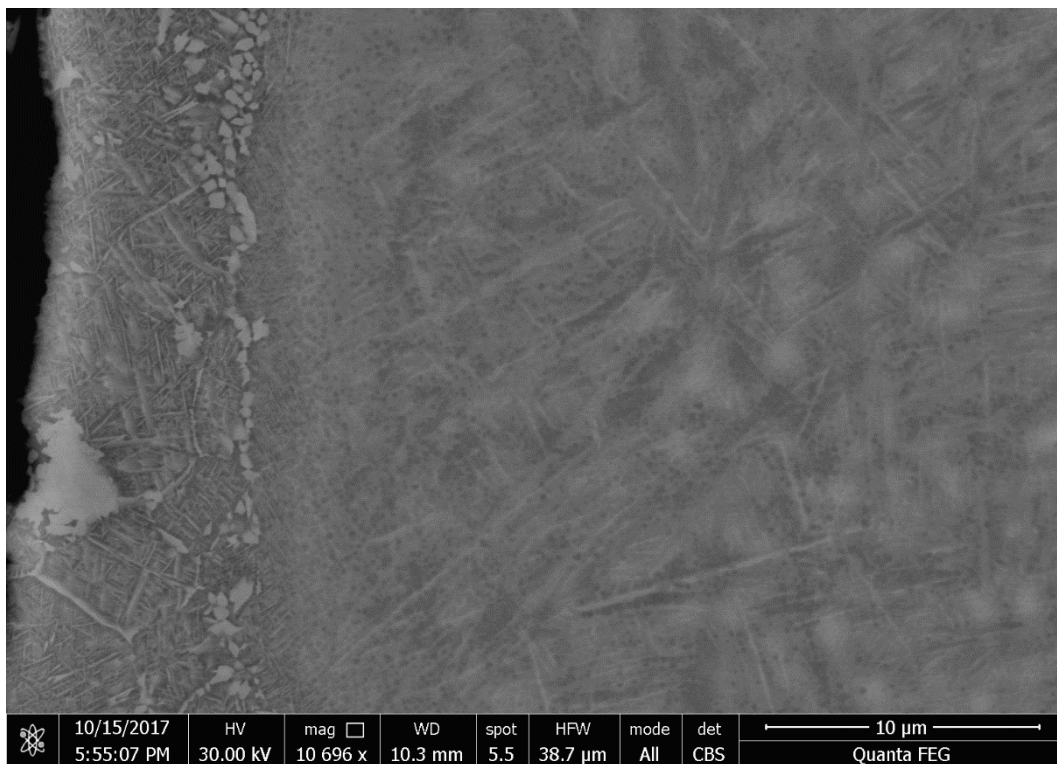
รูปที่ ค-16 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยตัด



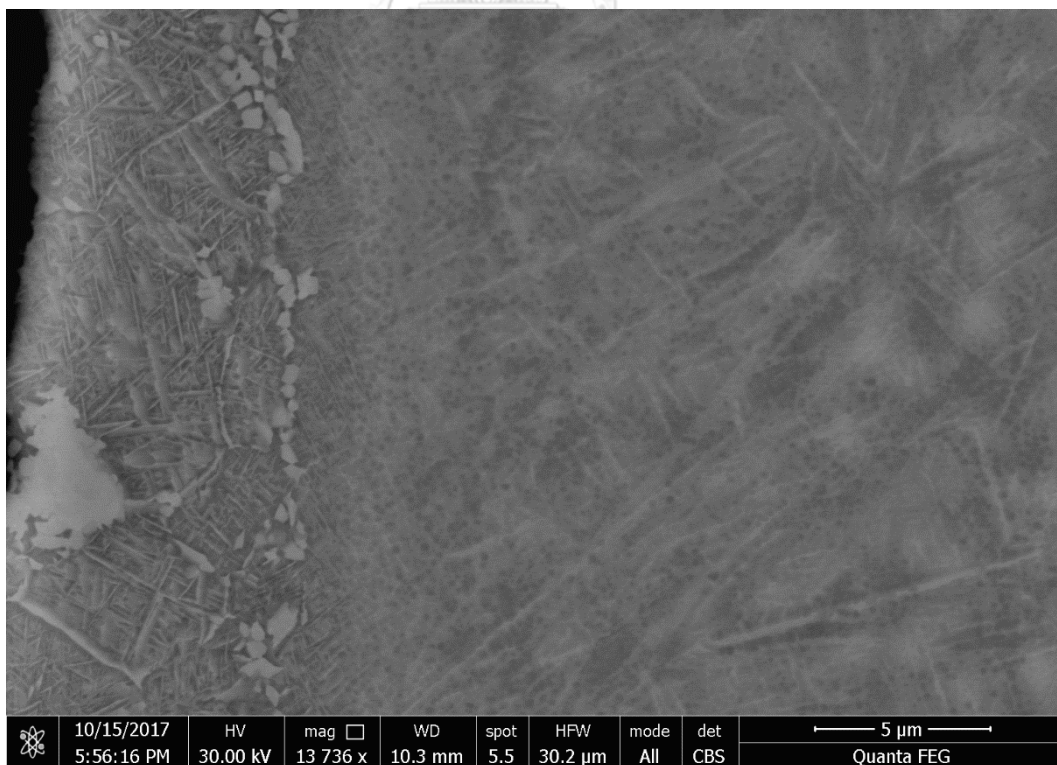
รูปที่ ค-17 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยตัด แสดงเฟสที่บนเป็นเหล็ก



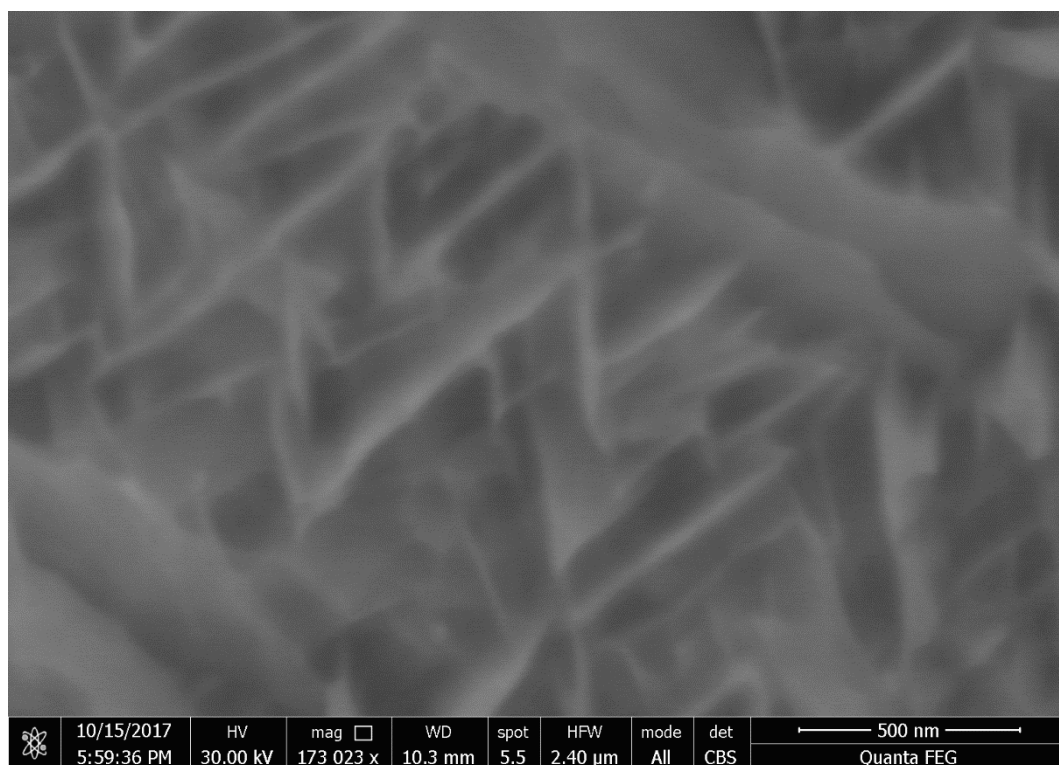
รูปที่ ค-18 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยตัด แสดงเฟสที่บนเป็นเหล็ก



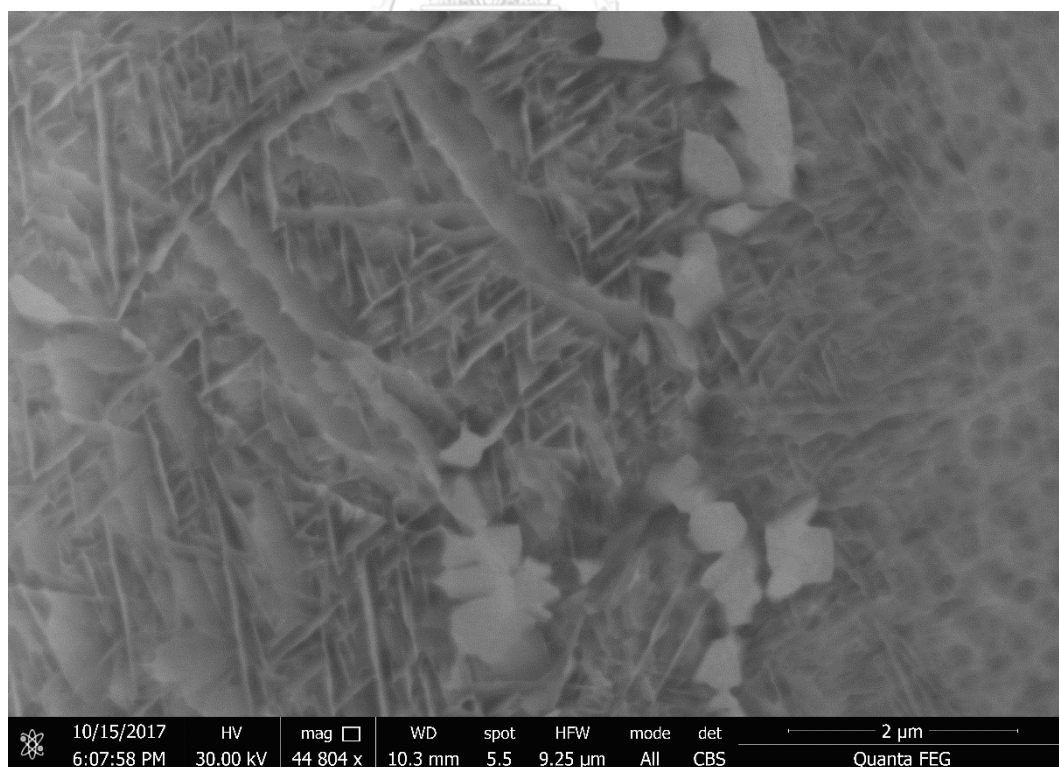
รูปที่ ค-19 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยตัด แสดงชั้น RC และ HAZ



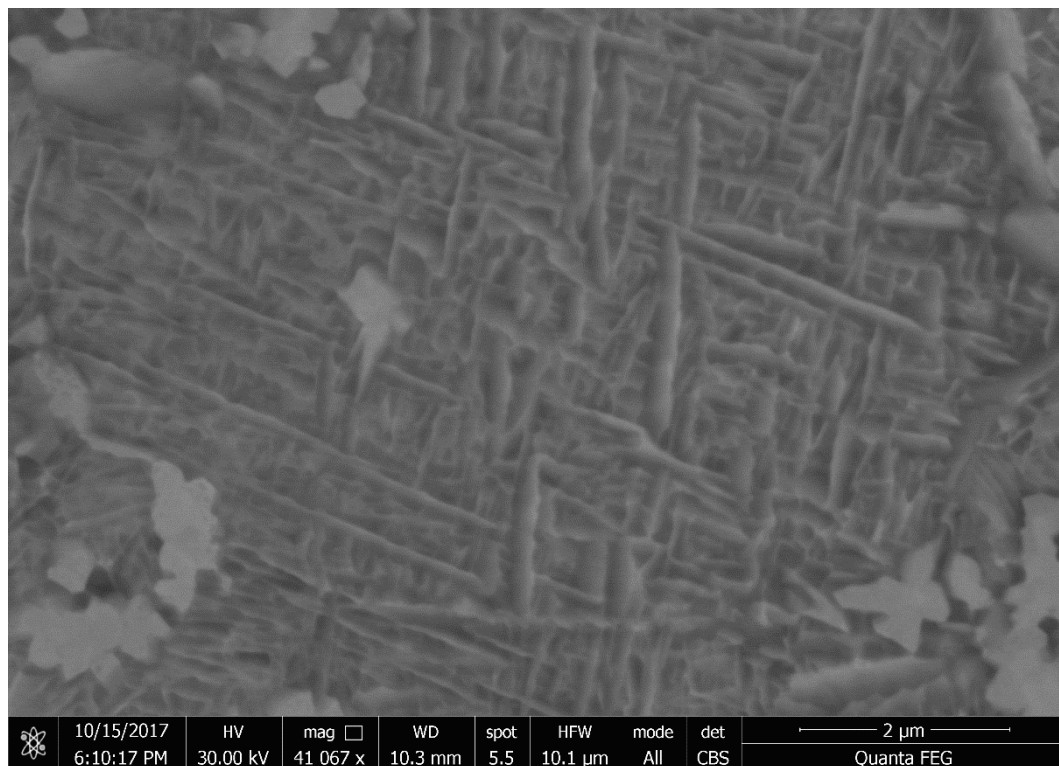
รูปที่ ค-20 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยตัด แสดงชั้น RC และ HAZ



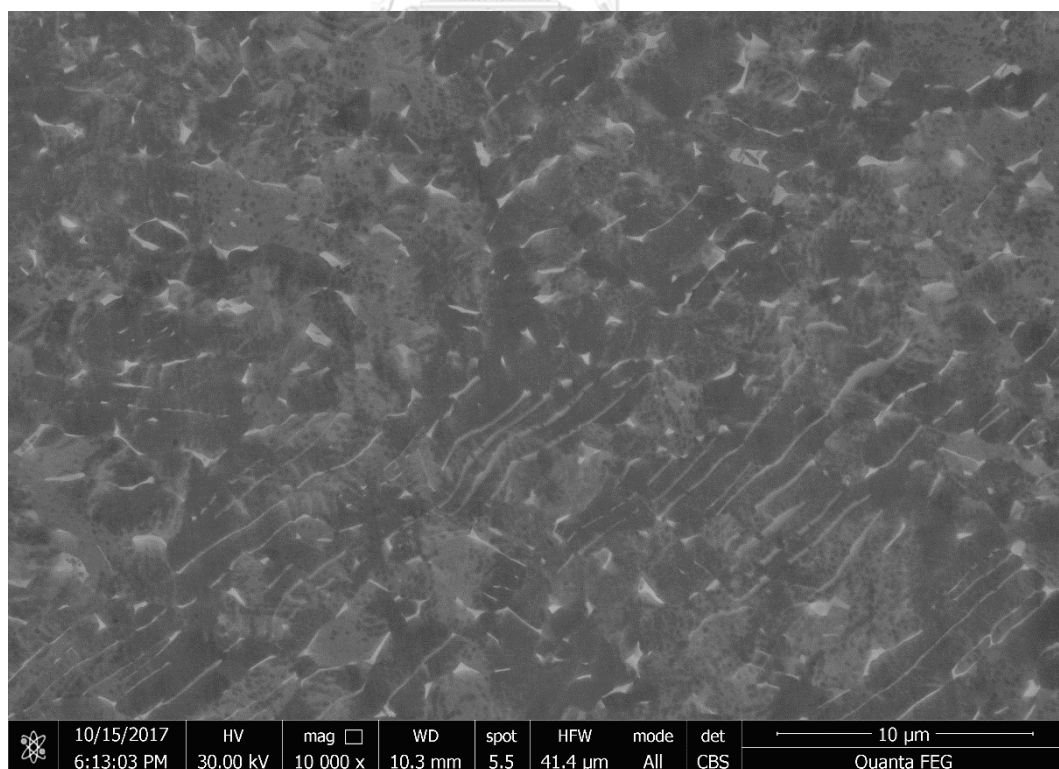
รูปที่ ค-21 เฟสมาร์เทนไซต์บริเวณชั้น RC



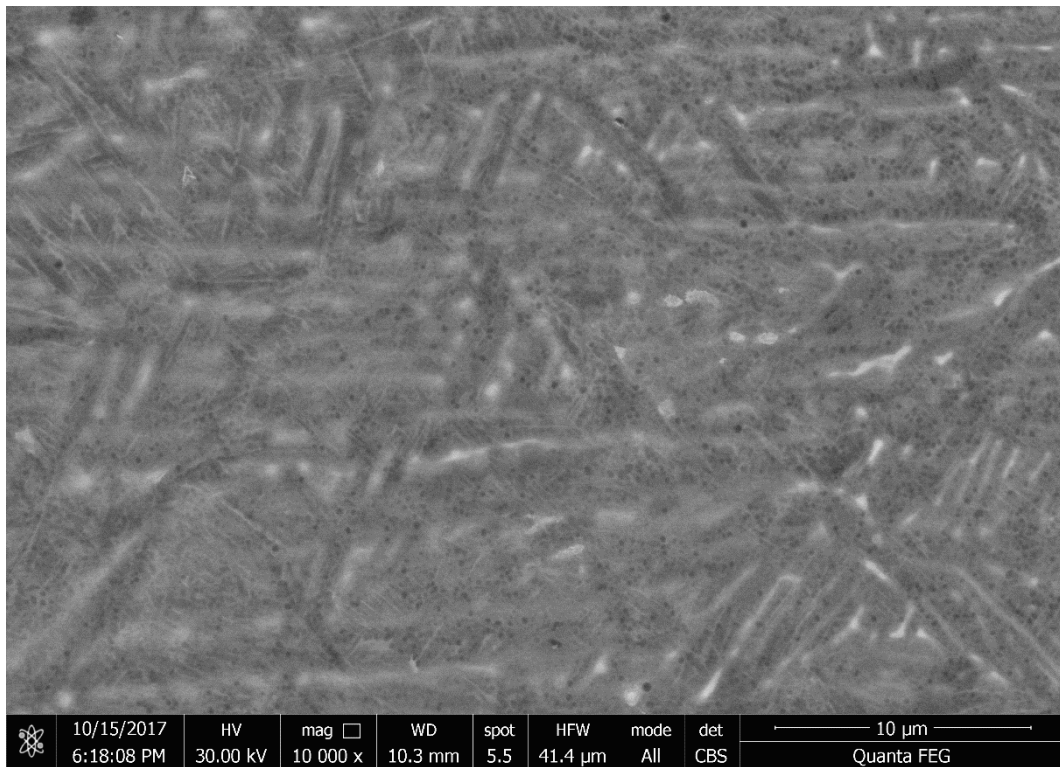
รูปที่ ค-22 รอยต่อระหว่างชั้น RC และ HAZ



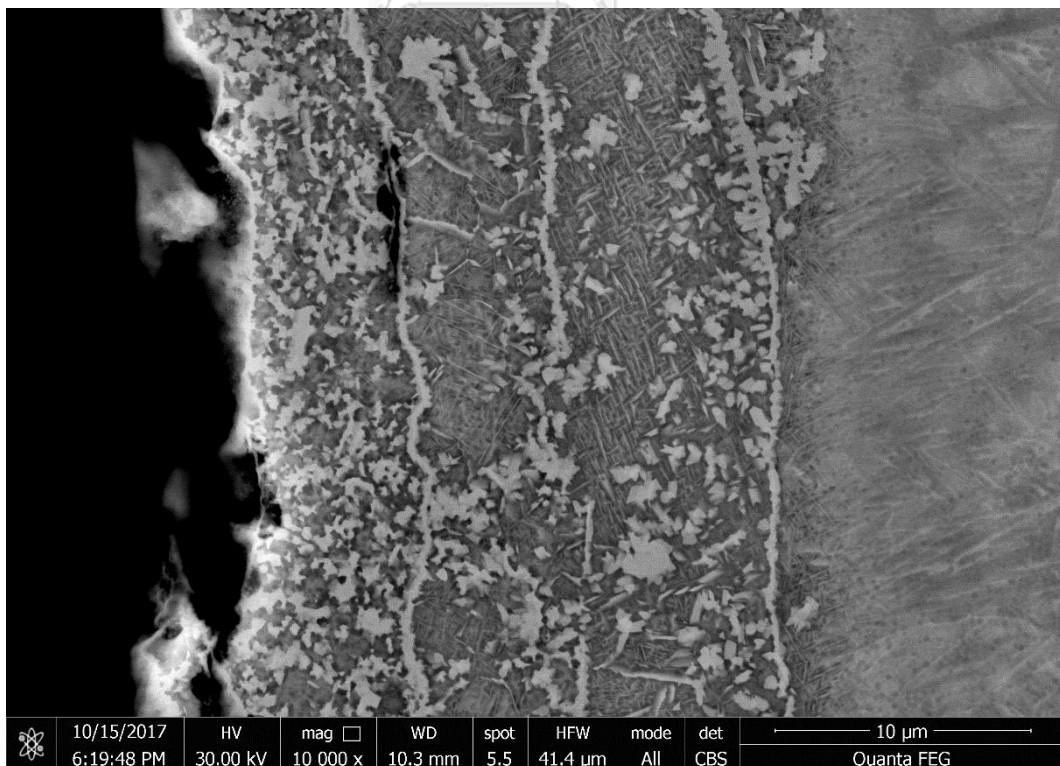
รูปที่ ค-23 เฟสมาร์เทนไซต์บริเวณชั้น RC



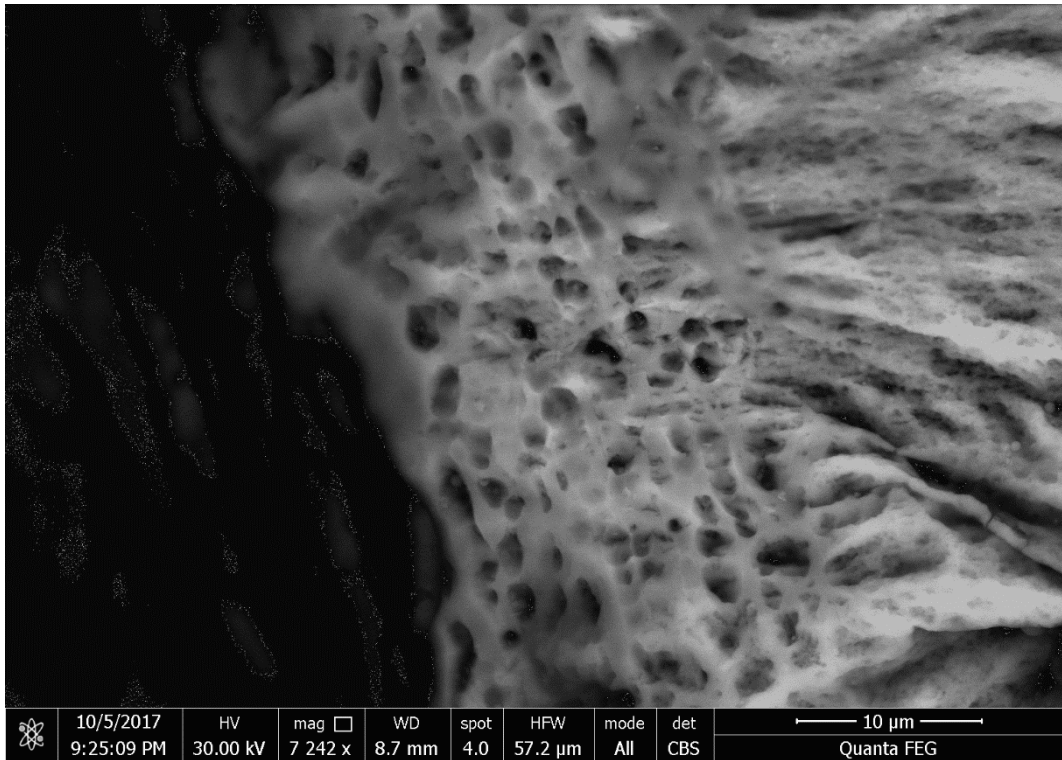
รูปที่ ค-24 เฟสแอลฟา α และบีตา β บริเวณเนื้อพื้นเดิม



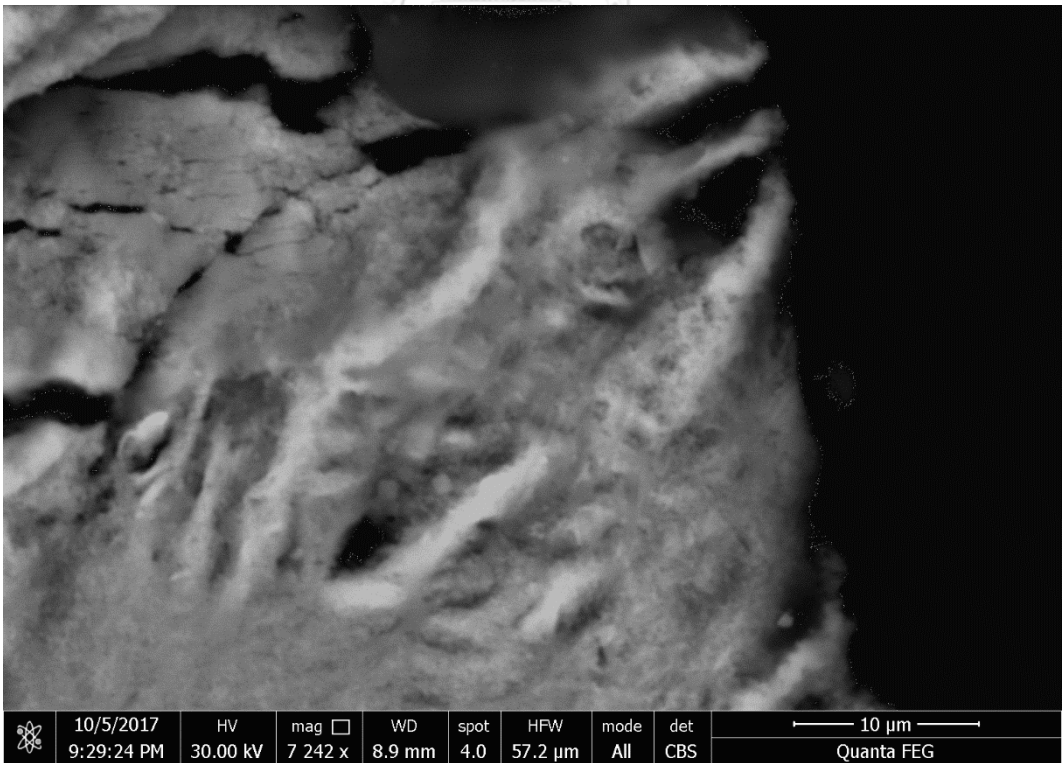
รูปที่ ค-25 เฟสแมรทีนไซต์บริเวณชั้น HAZ



รูปที่ ค-26 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยตัด แสดงชั้น RC และ HAZ

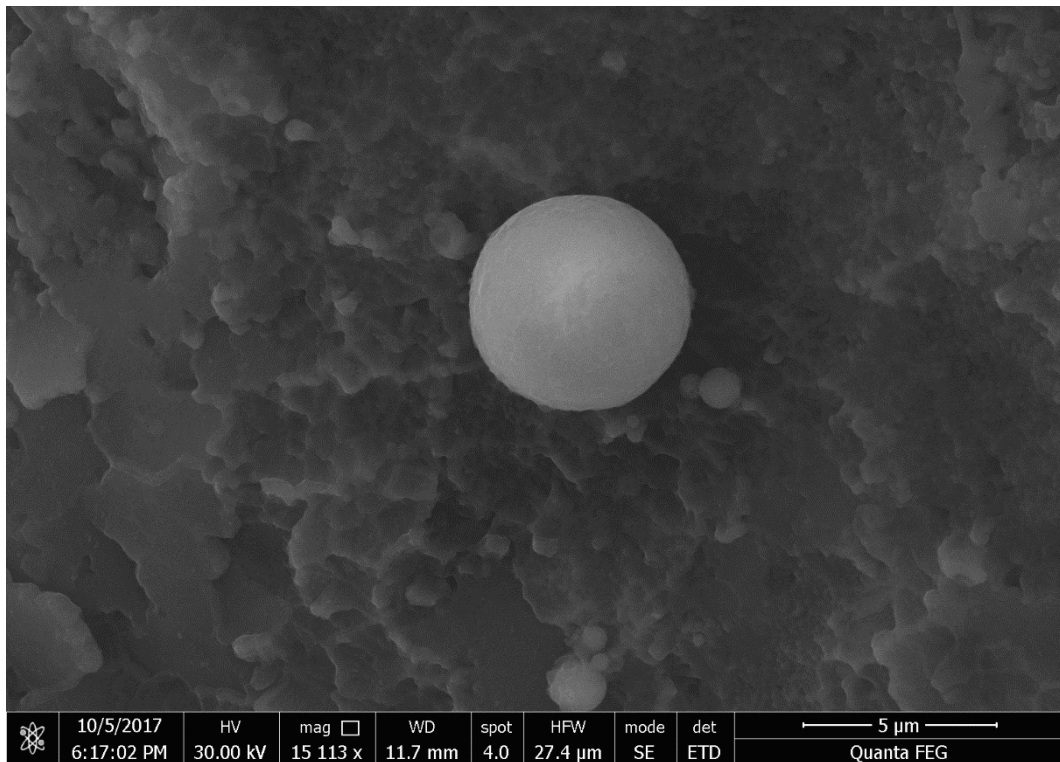


รูปที่ ค-27 ฝักรอยตัด แสดงบริเวณที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

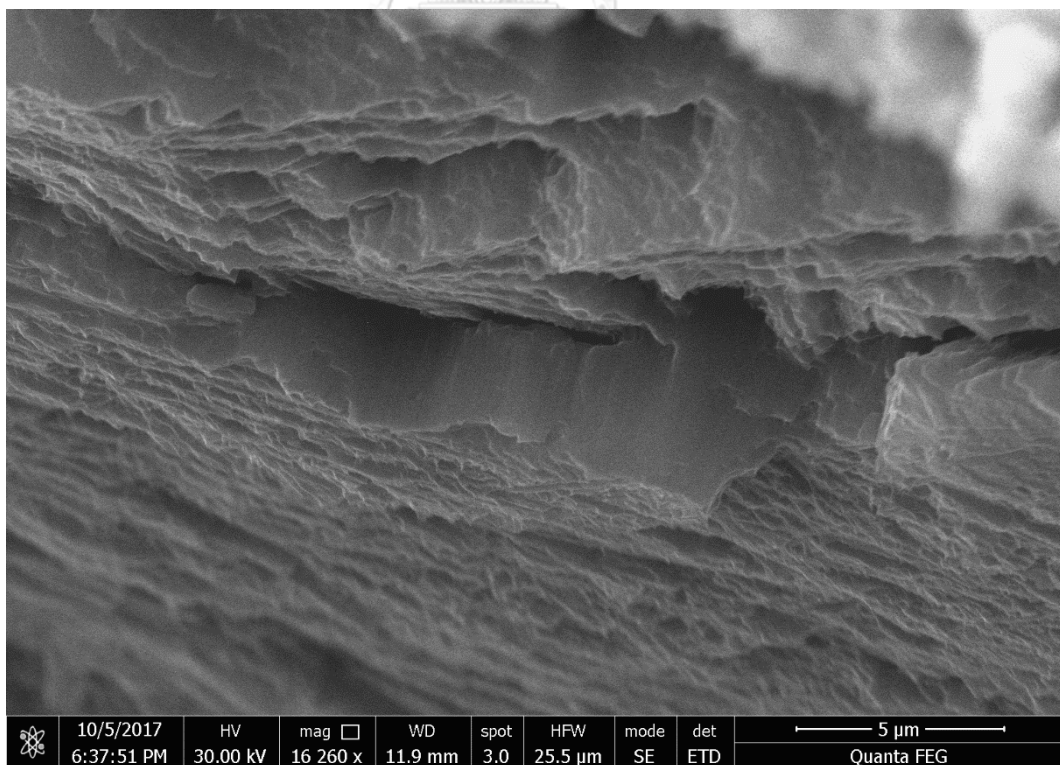


รูปที่ ค-28 ฝักรอยตัด แสดงบริเวณที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

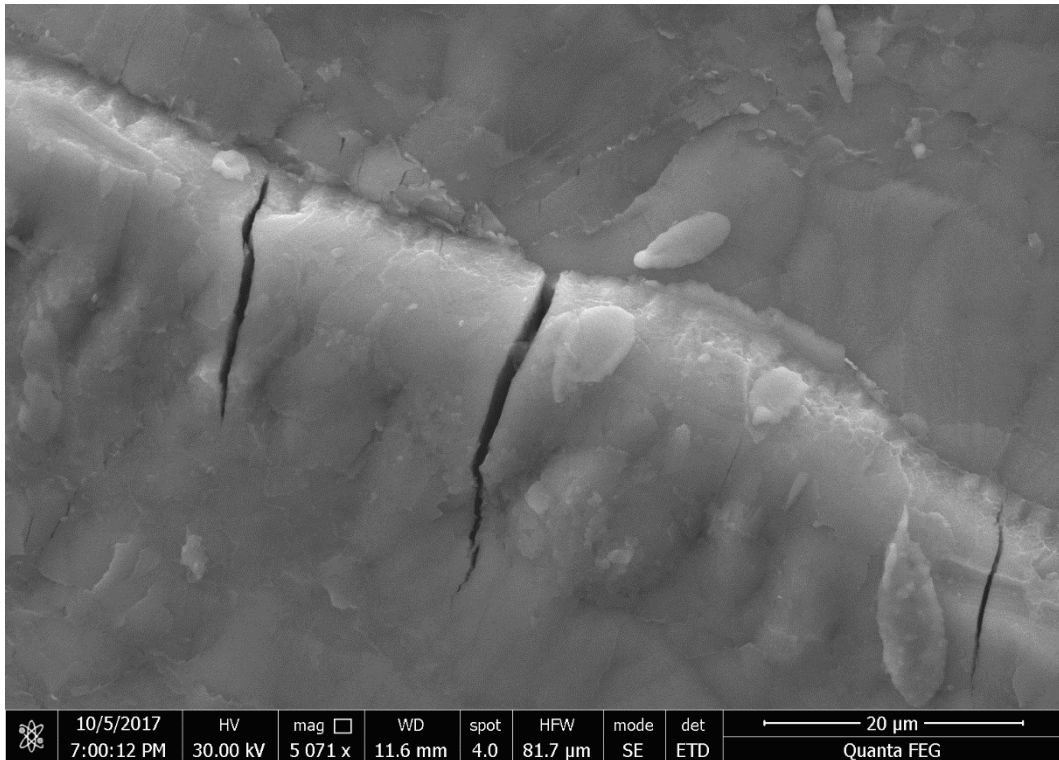
รูป



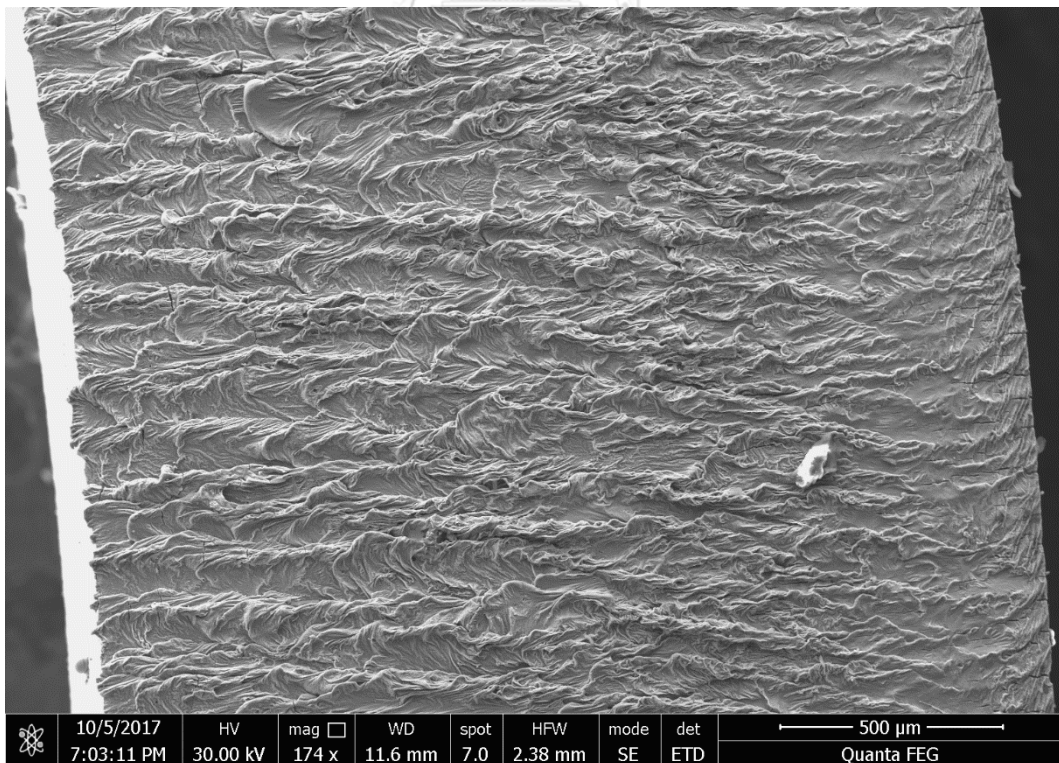
รูปที่ ค-29 หยดน้ำโลหะทรงกลมบริเวณผิวรอยตัด



รูปที่ ค-30 รอยแตกบริเวณชั้น RC



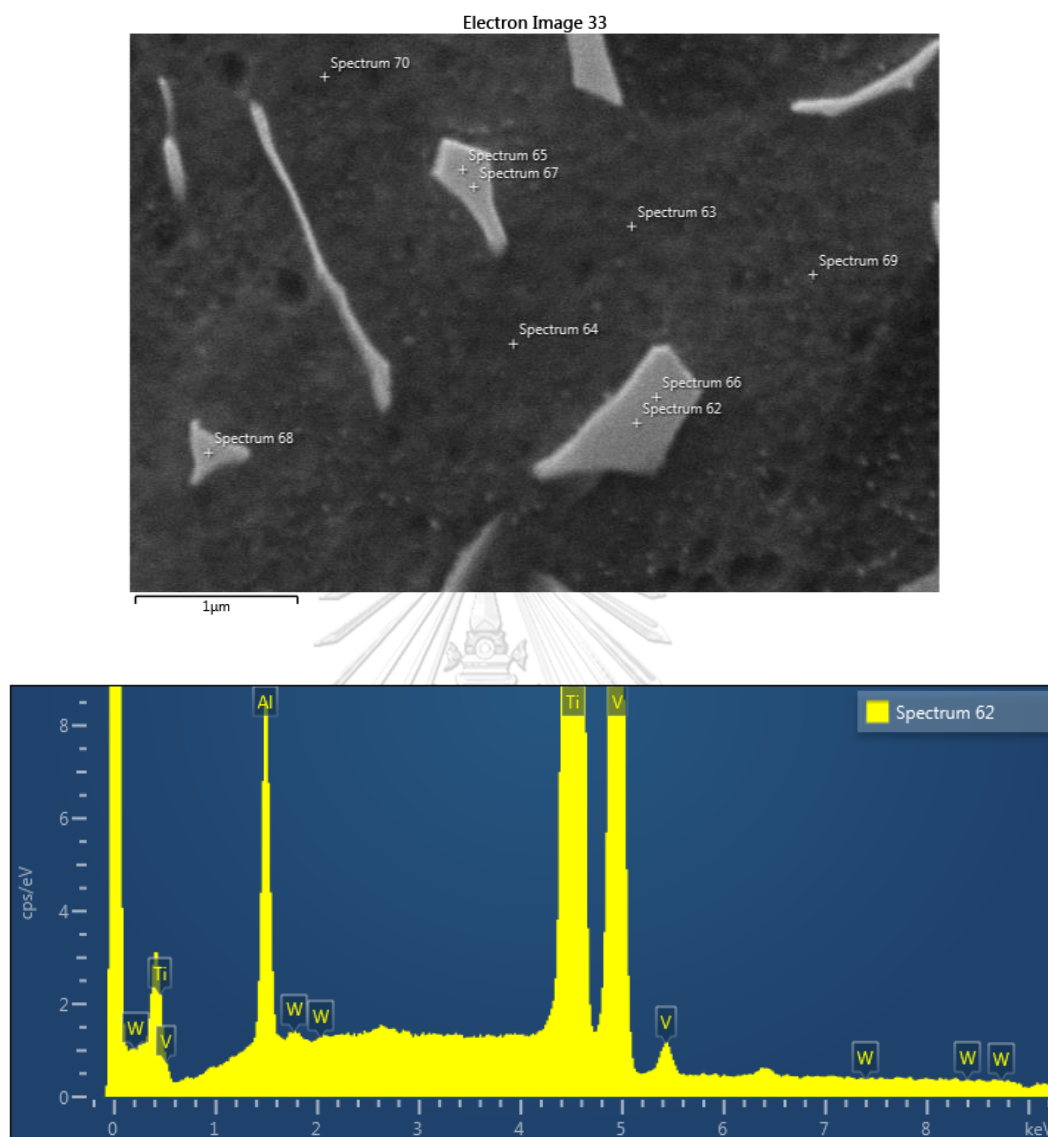
รูปที่ ค-31 รอยแตกที่ผิวบริเวณชั้น RC



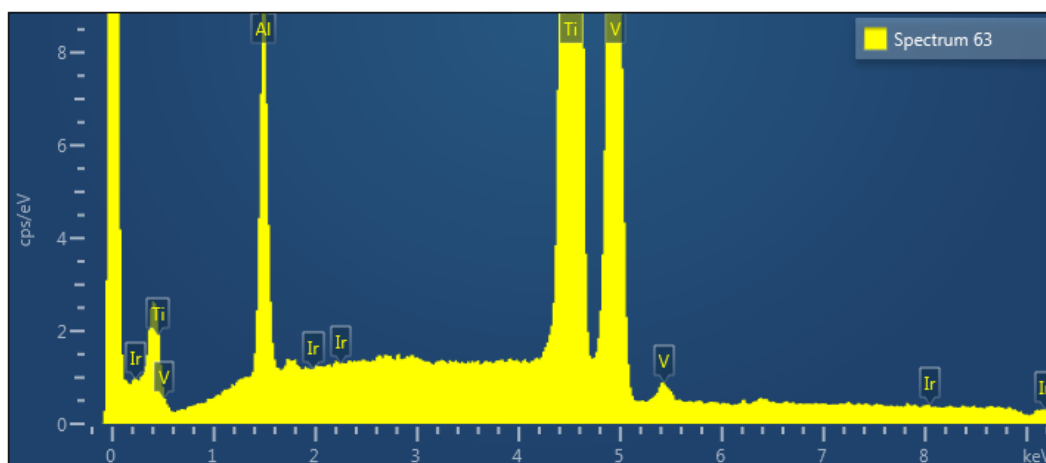
รูปที่ ค-30 ผิวรอยตัด



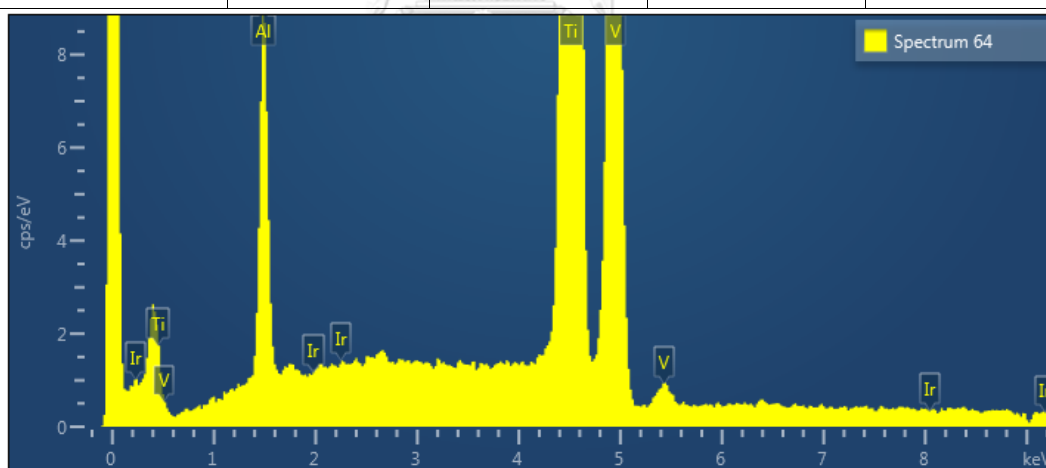
ง-1 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบภายในเฟสแอลฟา α และบีตา β ของ Ti-6Al-4V



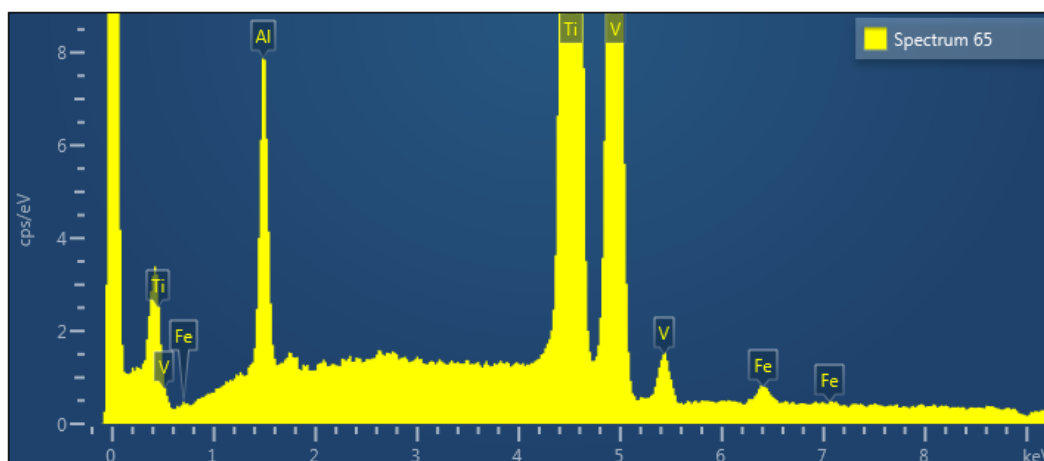
Spectrum 62				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.98	0.07	10.17
Ti	K series	89.12	0.10	85.41
V	K series	4.91	0.08	4.42
W	L series	0.00	0.10	0.00
Total		100.00		100.00



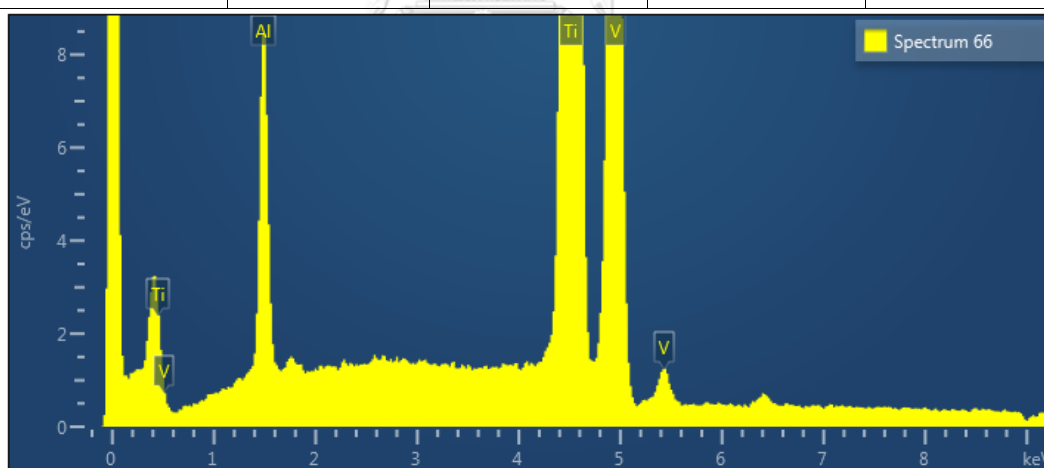
Spectrum 63				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	6.23	0.08	10.62
Ti	K series	89.96	0.15	86.31
V	K series	3.25	0.08	2.93
Ir	L series	0.56	0.12	0.13
Total		100.00		100.00



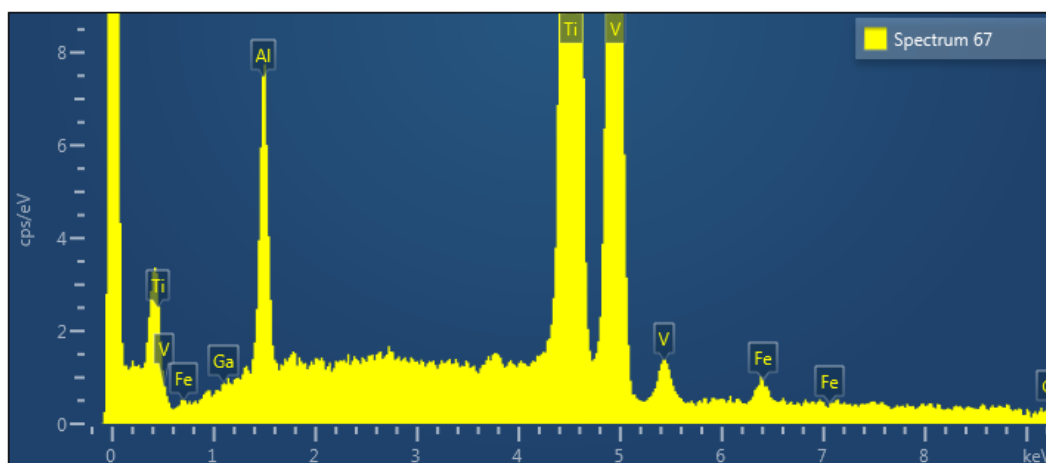
Spectrum 64				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	6.03	0.12	10.29
Ti	K series	89.81	0.24	86.42
V	K series	3.45	0.13	3.12
Ir	L series	0.71	0.19	0.17
Total		100.00		100.00



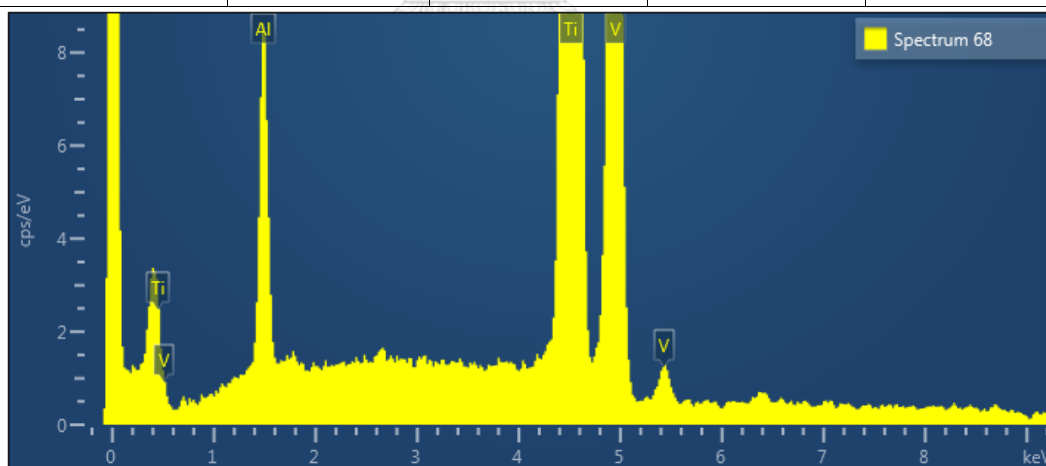
Spectrum 65				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.45	0.10	9.33
Ti	K series	87.00	0.15	83.87
V	K series	7.03	0.11	6.38
Fe	K series	0.52	0.06	0.43
Total		100.00		100.00



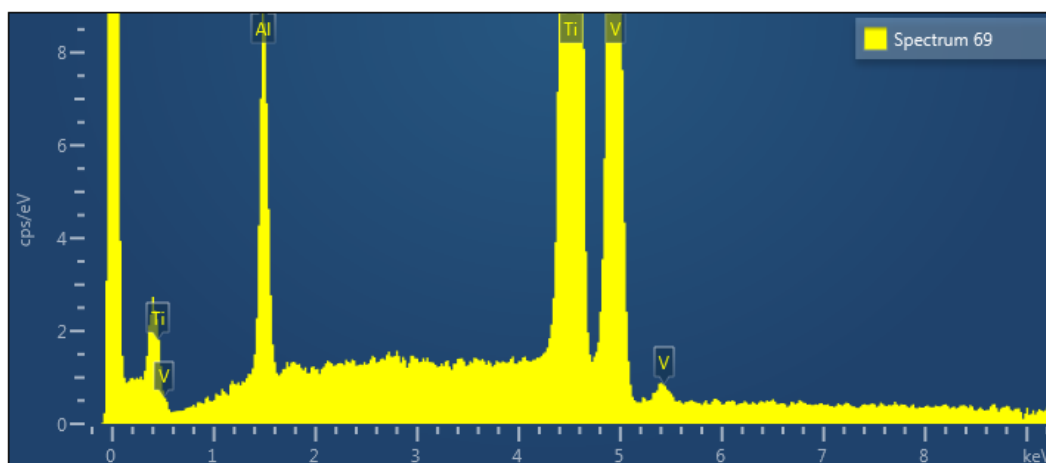
Spectrum 66				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	6.02	0.10	10.24
Ti	K series	88.35	0.14	84.69
V	K series	5.63	0.11	5.07
Total		100.00		100.00



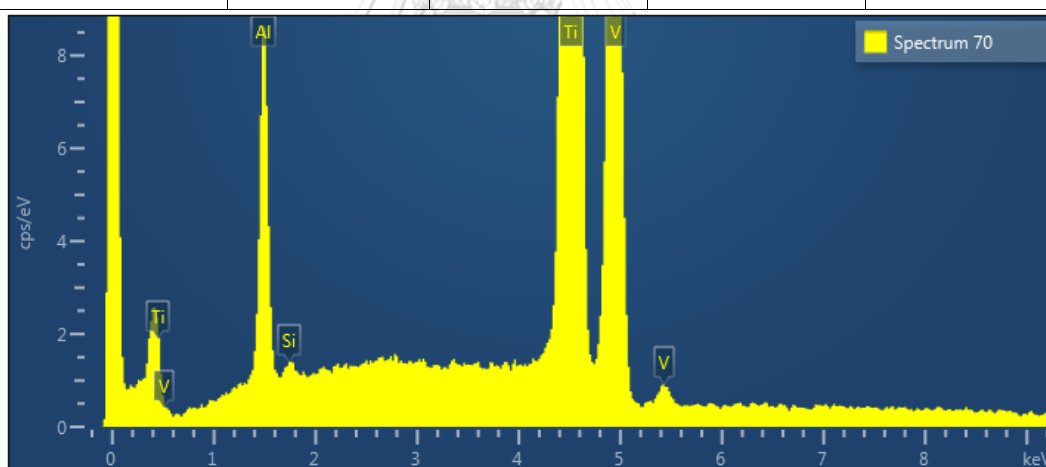
Spectrum 67				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.25	0.18	9.02
Ti	K series	86.66	0.29	83.81
V	K series	6.93	0.20	6.30
Fe	K series	0.66	0.11	0.55
Ga	K series	0.49	0.13	0.33
Total		100.00		100.00



Spectrum 68				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.93	0.16	10.09
Ti	K series	88.46	0.22	84.85
V	K series	5.61	0.16	5.06
Total		100.00		100.00

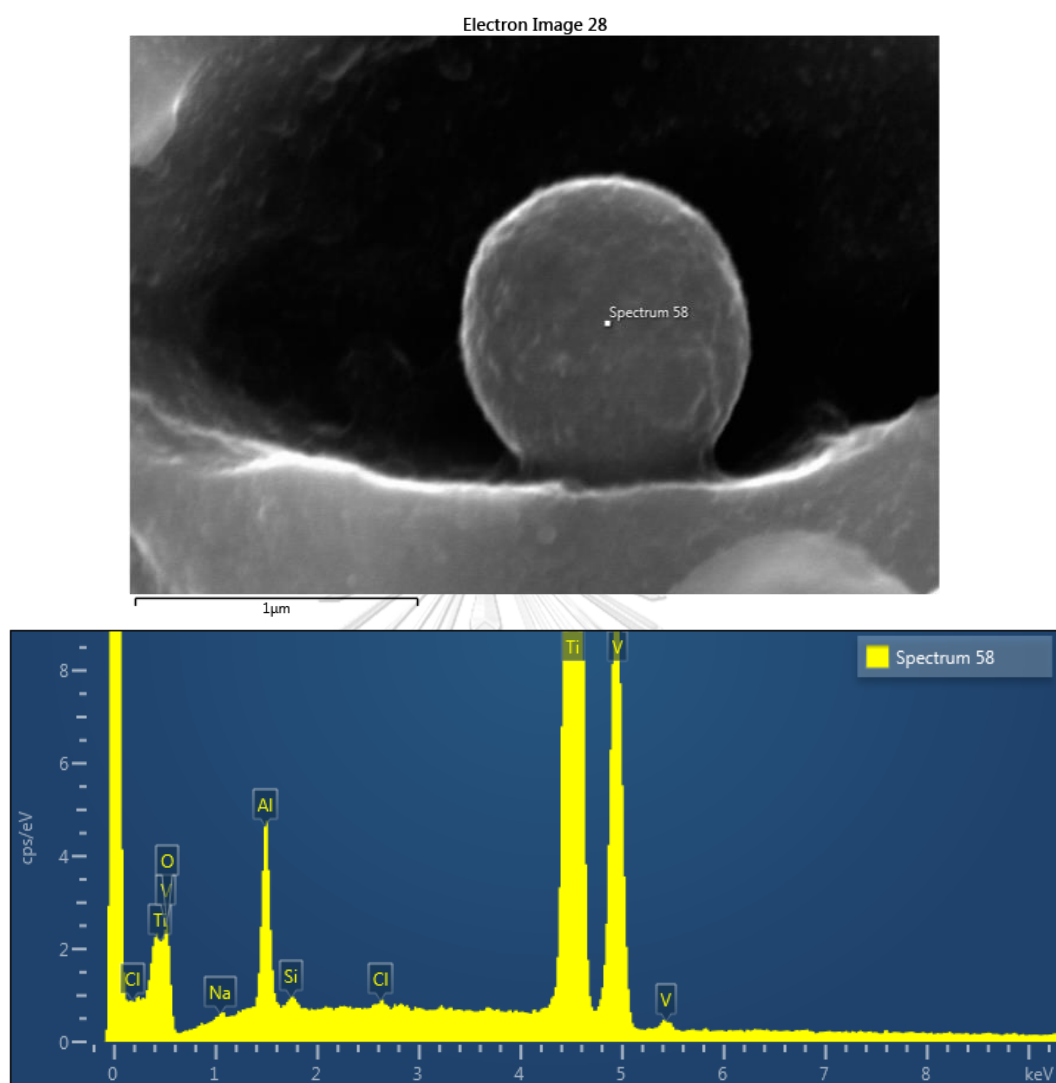


Spectrum 69				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	6.19	0.14	10.51
Ti	K series	90.50	0.19	86.52
V	K series	3.31	0.14	2.98
Total		100.00		100.00



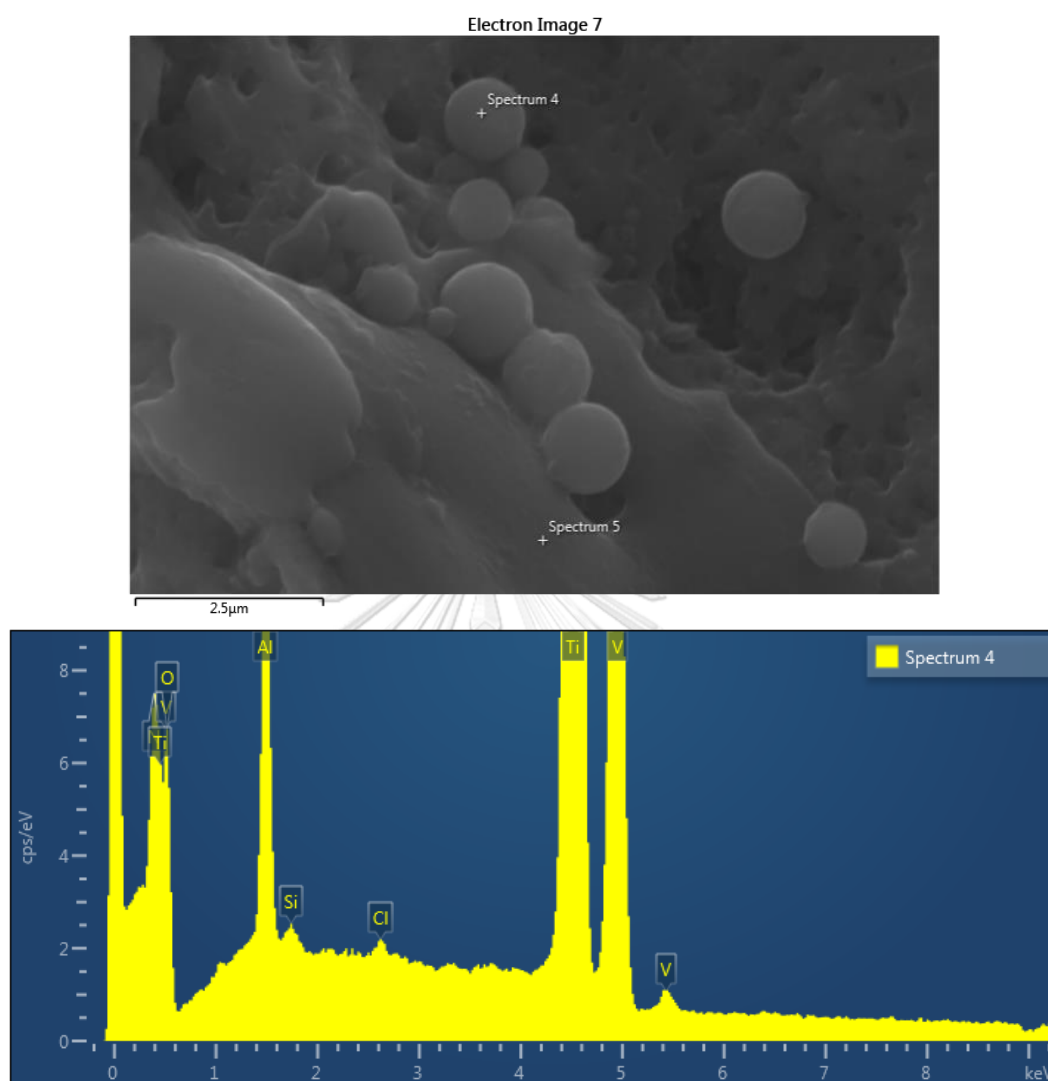
Spectrum 70				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.95	0.13	10.10
Ti	K series	90.42	0.18	86.48
V	K series	3.43	0.13	3.08
Si	K series	0.21	0.06	0.34
Total		100.00		100.00

ง-2 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบบริเวณหยดน้ำโลหะทรงกลมที่พบ

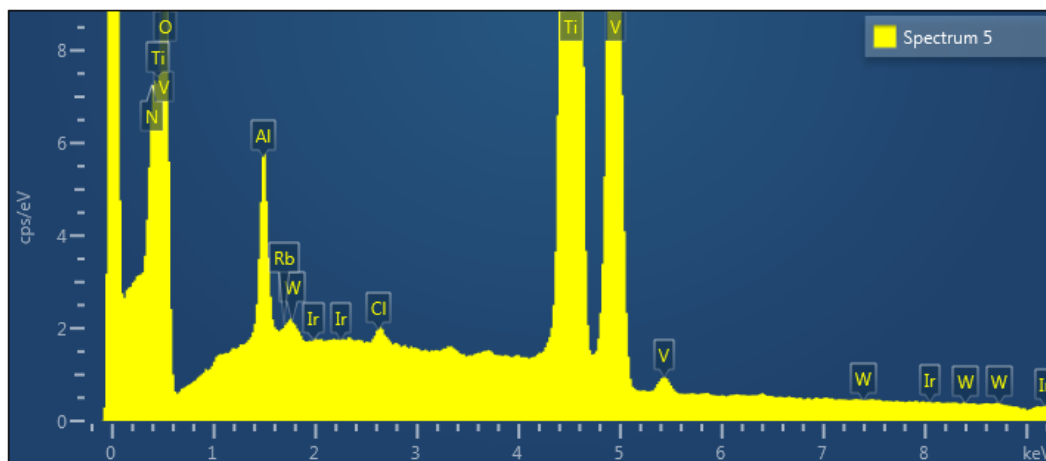


Spectrum 58				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	4.43	0.12	4.88
Ti	K series	64.03	1.06	39.71
V	K series	2.10	0.10	1.23
O	K series	28.75	1.17	53.38
Si	K series	0.21	0.05	0.22
Na	K series	0.38	0.12	0.50
Cl	K series	0.10	0.03	0.09
Total		100.00		100.00

ง-3 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบบริเวณหยดน้ำโลหะทรงกลมที่พบ

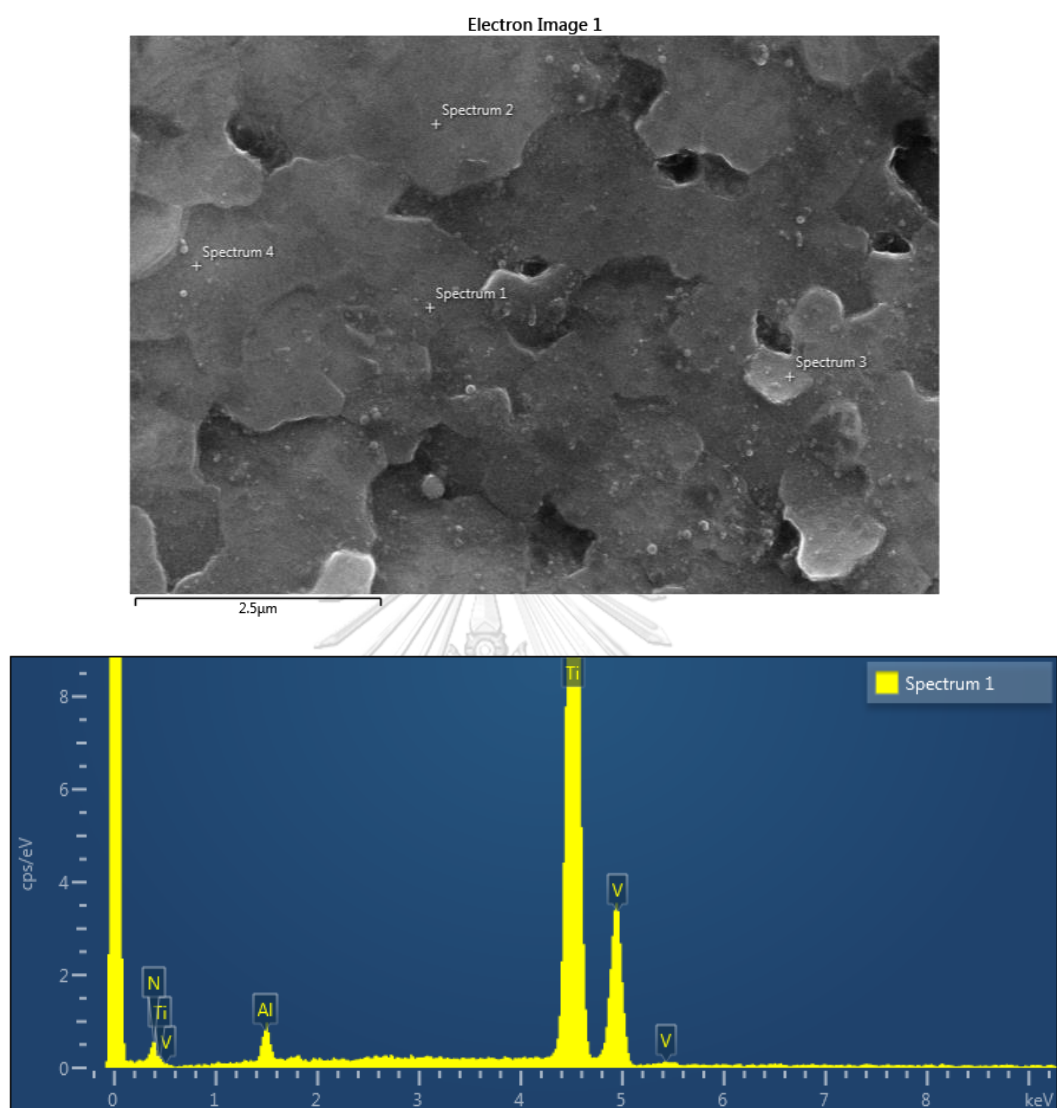


Spectrum 4				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
O	K series	34.34	1.08	59.79
Al	K series	4.50	0.09	4.65
Ti	K series	58.92	0.97	34.26
V	K series	2.01	0.06	1.10
Si	K series	0.13	0.03	0.13
Cl	K series	0.09	0.02	0.07
N	K series	0.00	0.76	0.00
Total		100.00		100.00

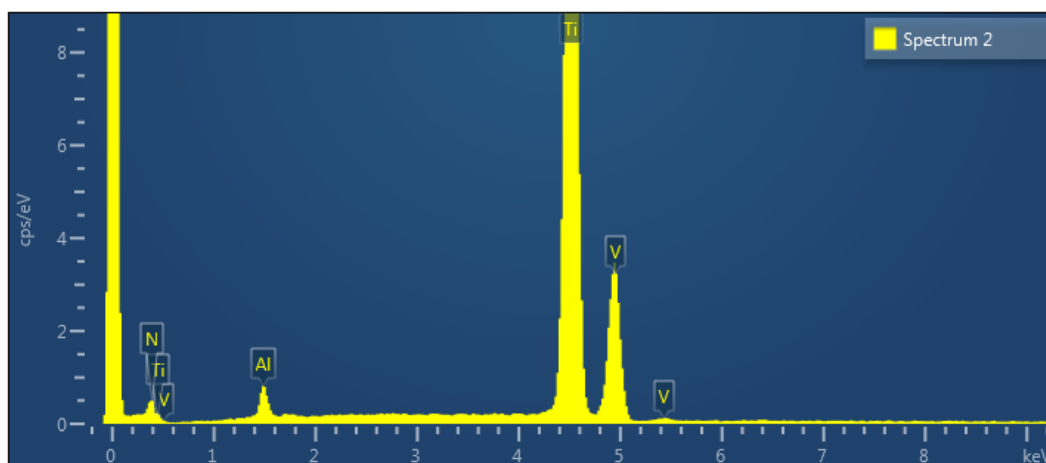


Spectrum 5				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
O	K series	48.42	0.42	73.37
Al	K series	1.62	0.03	1.46
Ti	K series	48.17	0.40	24.38
V	K series	1.48	0.03	0.71
Cl	K series	0.08	0.01	0.05
W	L series	0.02	0.03	0.00
Rb	K series	0.00	0.05	0.00
Ir	L series	0.19	0.04	0.02
N	K series	0.00	0.37	0.00
Total		100.00		100.00

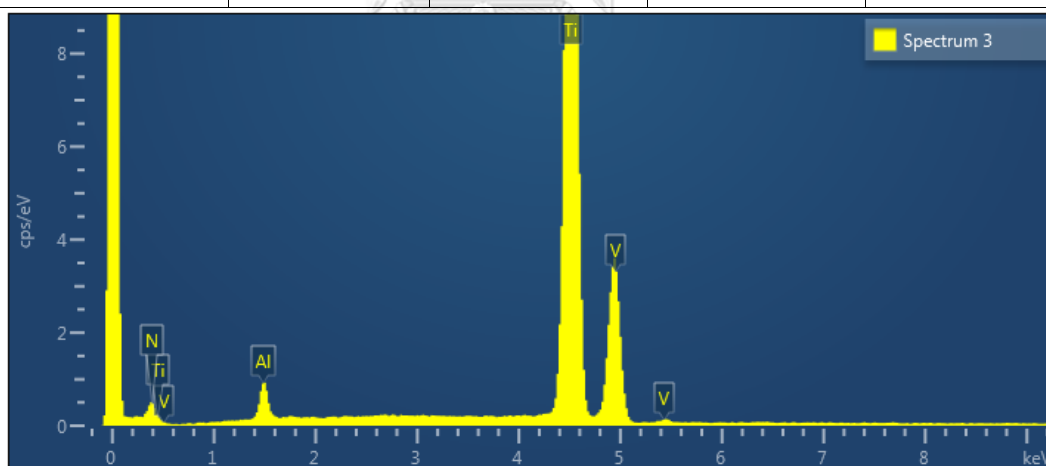
ง-4 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบบริเวณที่ทดสอบยิงเลเซอร์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Ti	K series	85.96	1.45	71.36
V	K series	3.12	0.33	2.43
N	K series	7.41	1.50	21.02
Al	K series	3.52	0.28	5.18
Total		100.00		100.00

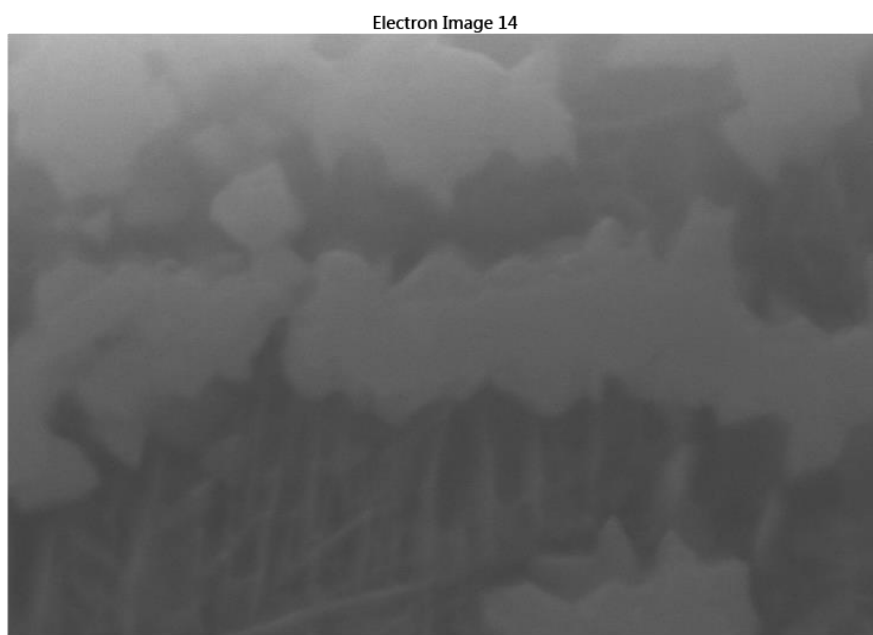


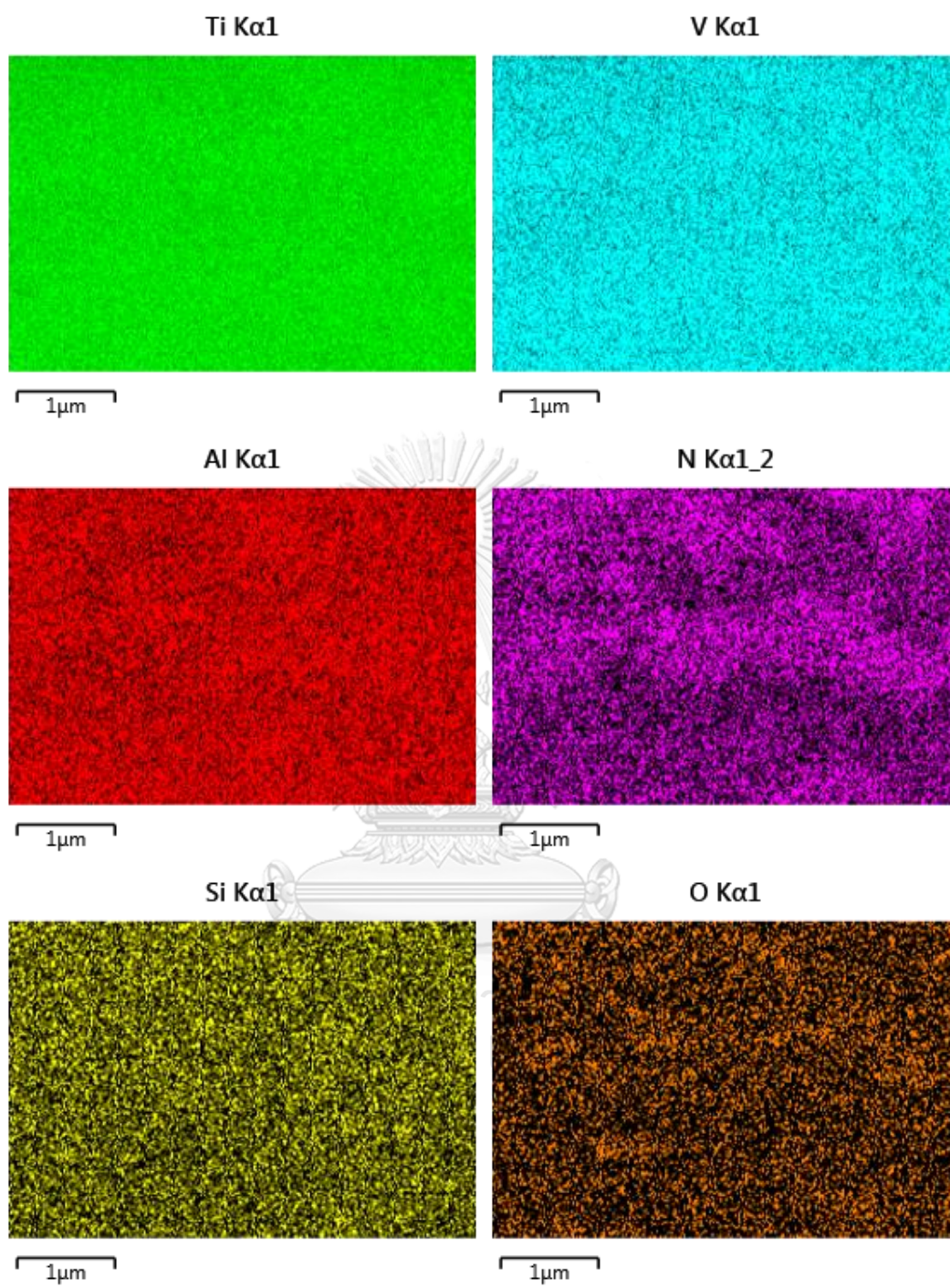
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	3.22	0.14	4.94
Ti	K series	88.24	0.78	76.36
V	K series	3.06	0.17	2.49
N	K series	5.48	0.80	16.21
Total		100.00		100.00



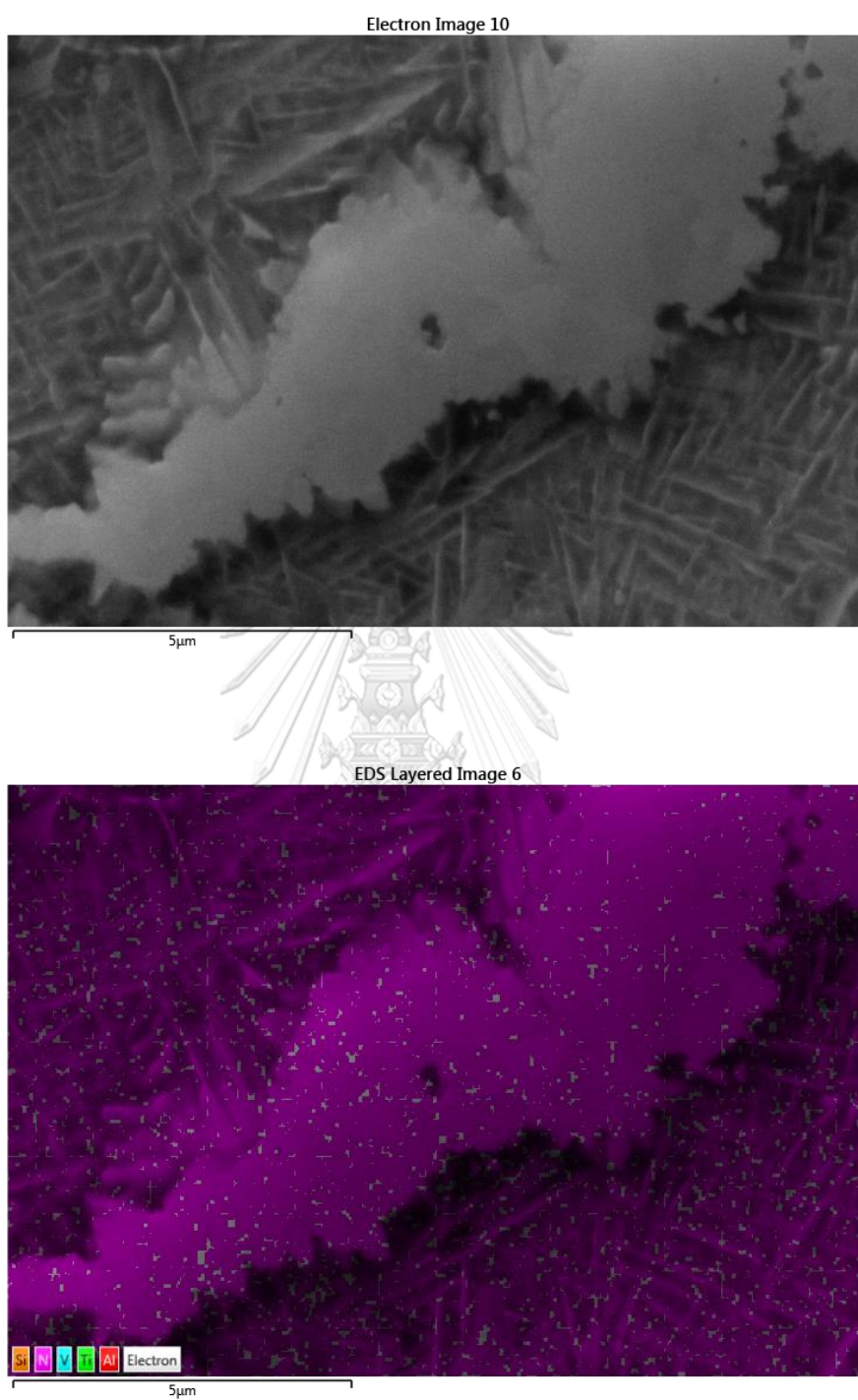
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	3.68	0.13	5.63
Ti	K series	87.31	0.69	75.19
V	K series	3.45	0.16	2.80
N	K series	5.56	0.72	16.38
Total		100.00		100.00

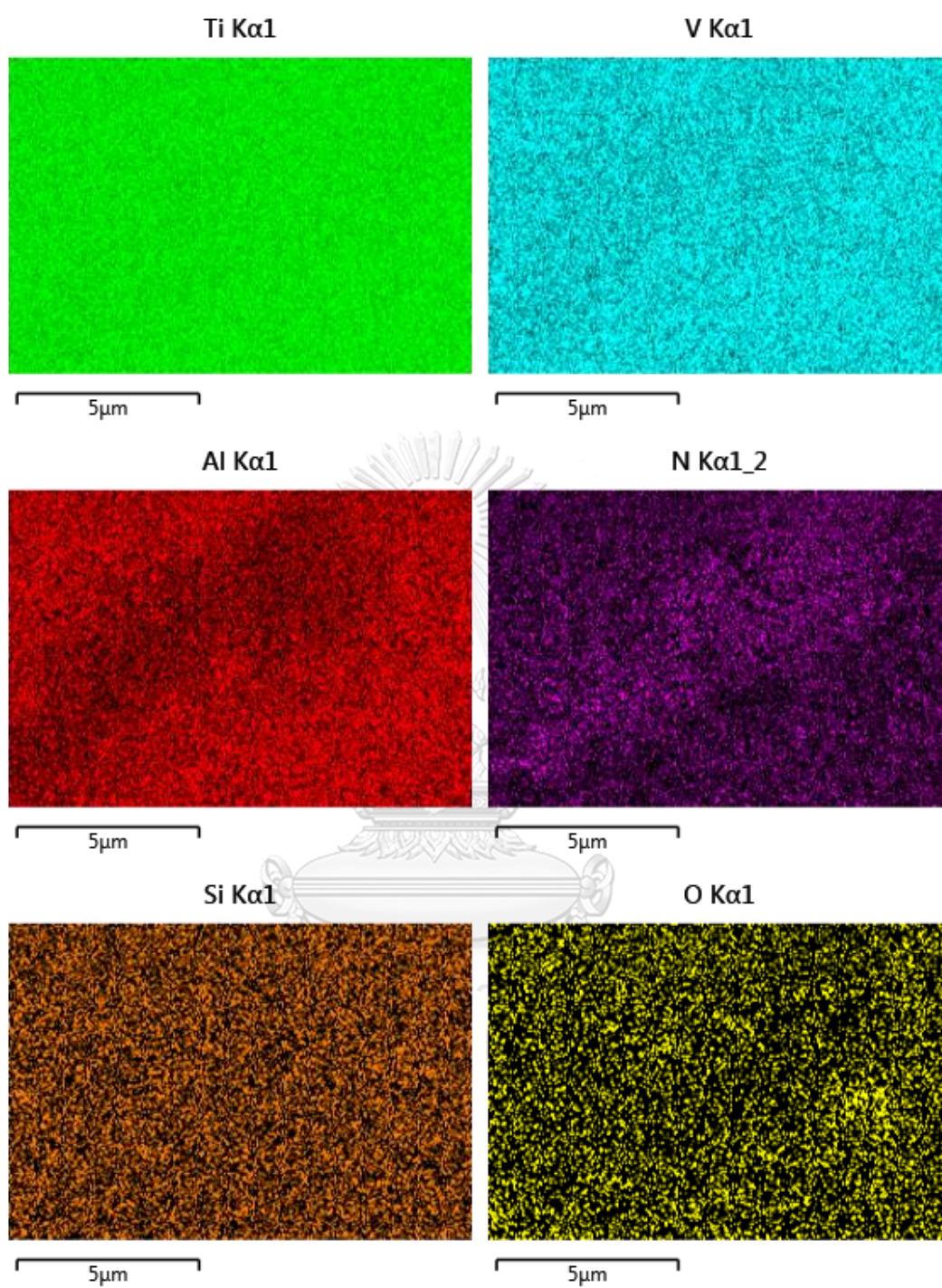
ง-5 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณเฟสที่มีไนโตรเจนสูง



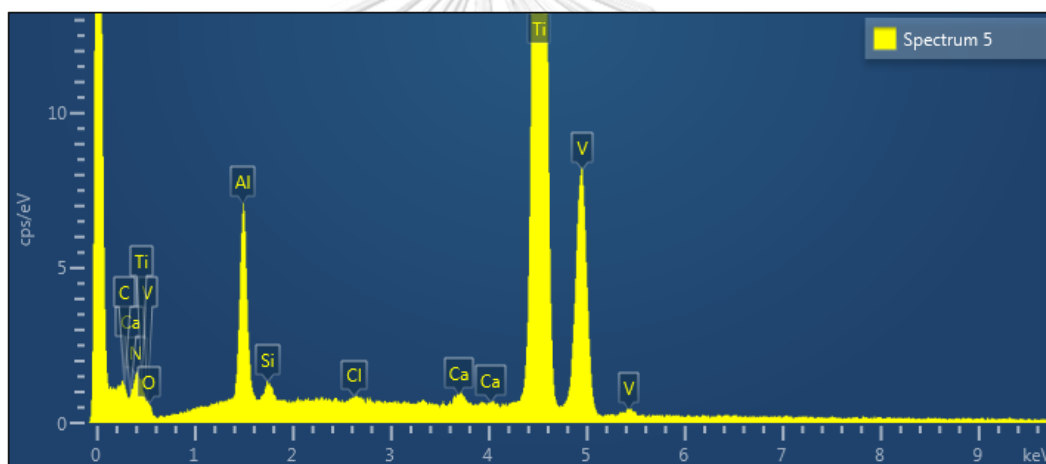
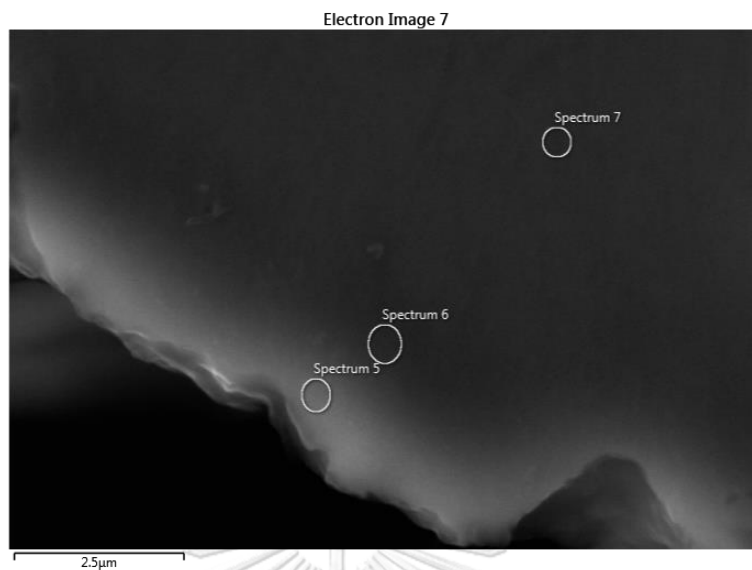


ง-6 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณเฟสที่มีไนโตรเจนสูง

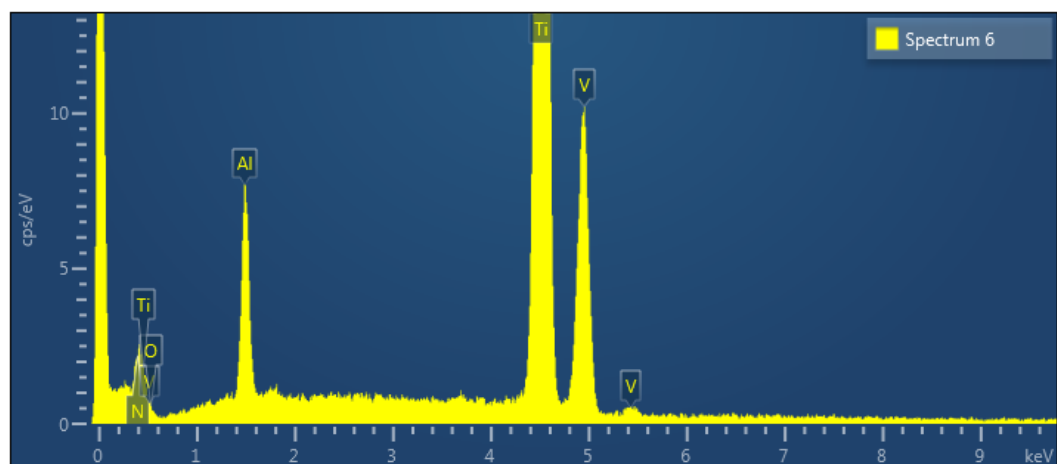




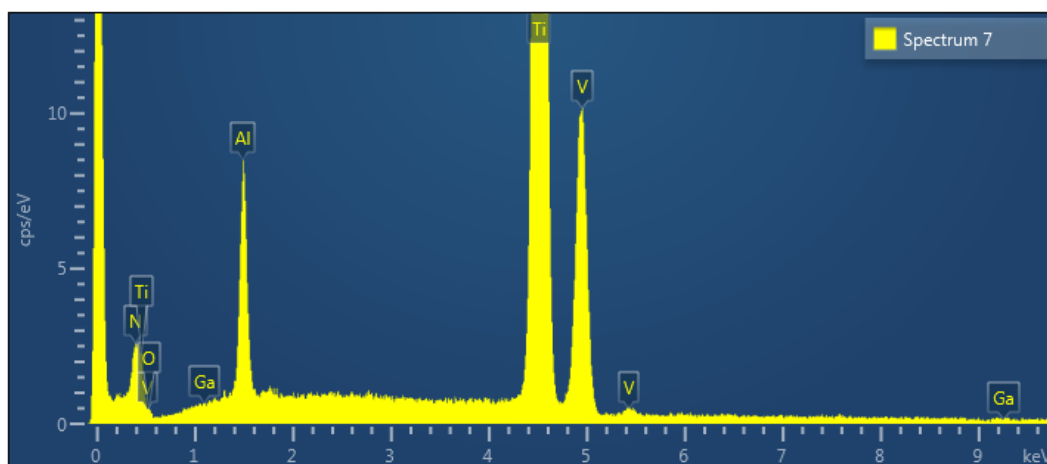
ง-7 ผลการวิเคราะห์การธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



Spectrum 5				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.60	0.11	8.23
Ti	K series	82.71	1.14	68.52
V	K series	3.62	0.15	2.82
Si	K series	0.47	0.05	0.66
Ca	K series	0.39	0.04	0.38
O	K series	5.08	1.21	12.59
N	K series	0.00	0.60	0.00
C	K series	2.01	0.46	6.65
Cl	K series	0.12	0.04	0.14
Total		100.00		100.00

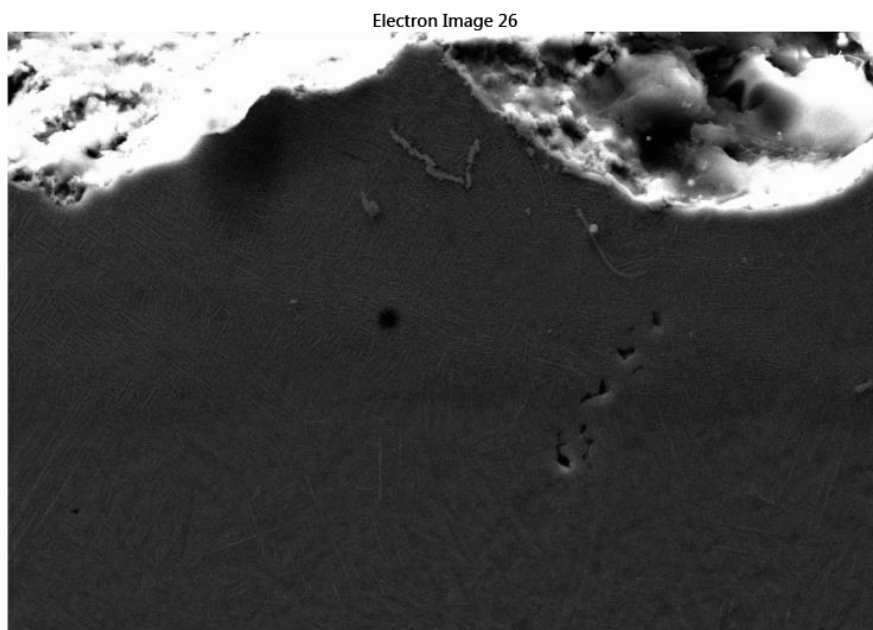


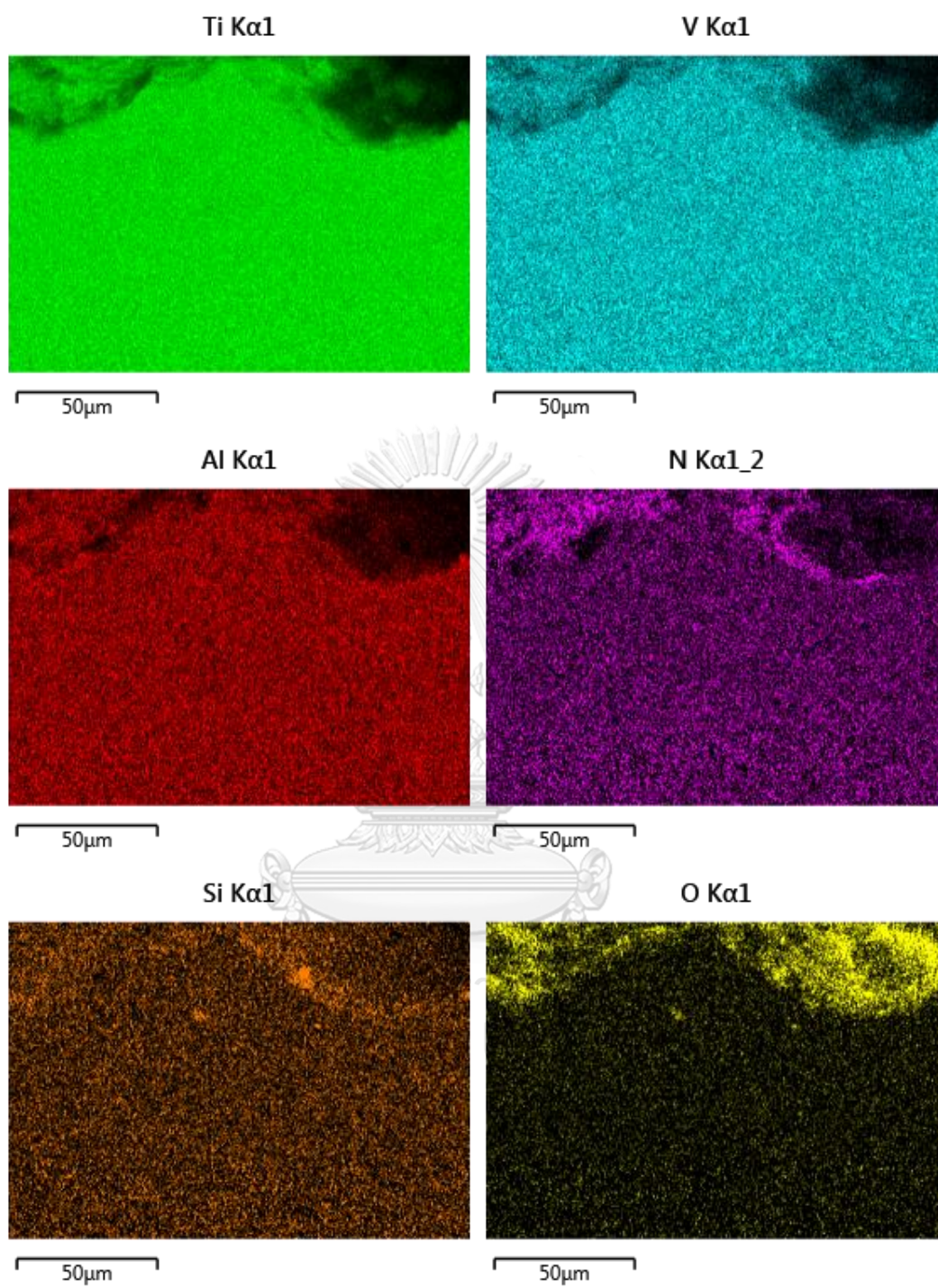
Spectrum 6				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.35	0.16	8.39
Ti	K series	86.46	1.66	76.42
V	K series	3.58	0.23	2.98
O	K series	4.62	1.82	12.21
N	K series	0.00	0.81	0.00
Total		100.00		100.00



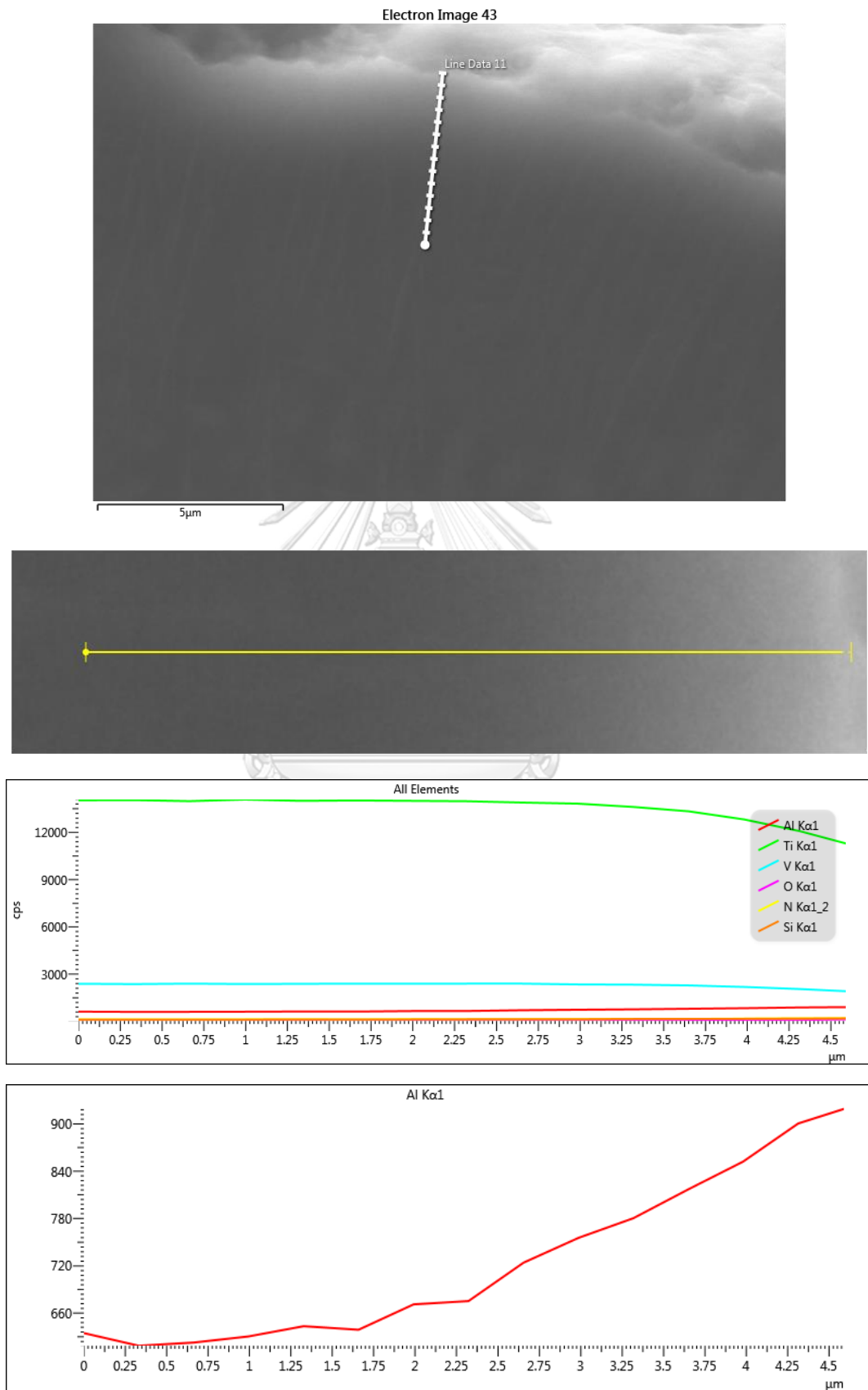
Spectrum 7				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.68	0.14	9.31
Ti	K series	87.68	1.43	80.94
V	K series	3.85	0.20	3.34
N	K series	0.00	0.71	0.00
O	K series	2.18	1.56	6.02
Ga	K series	0.61	0.20	0.38
Total		100.00		100.00

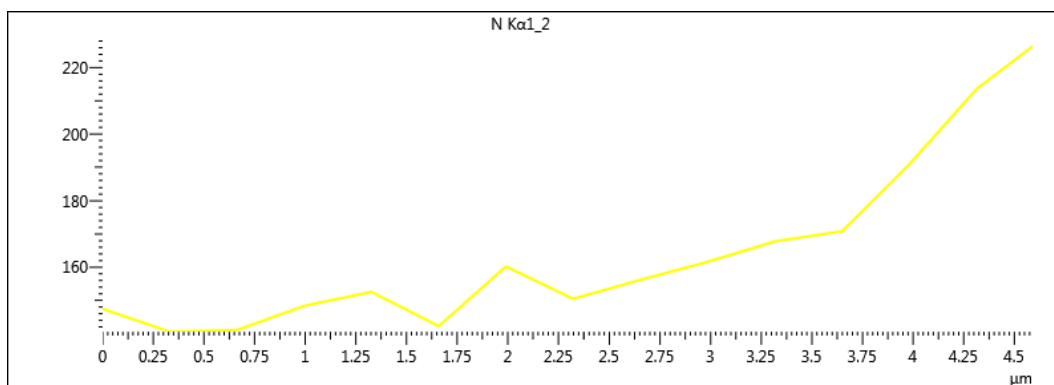
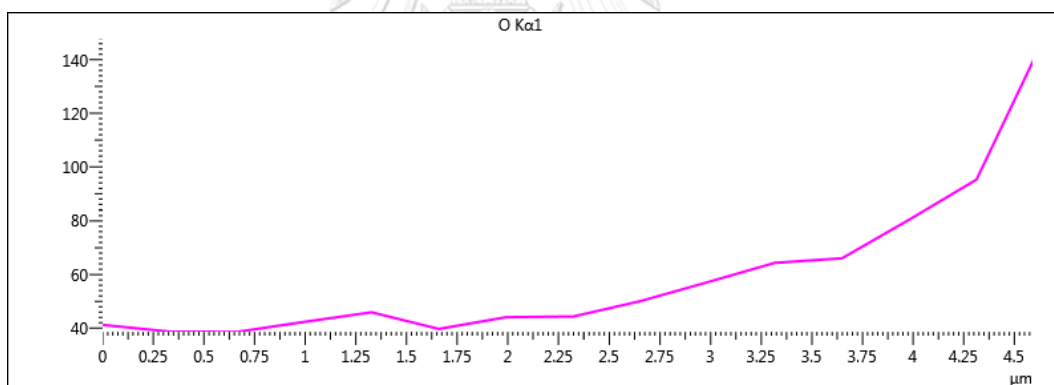
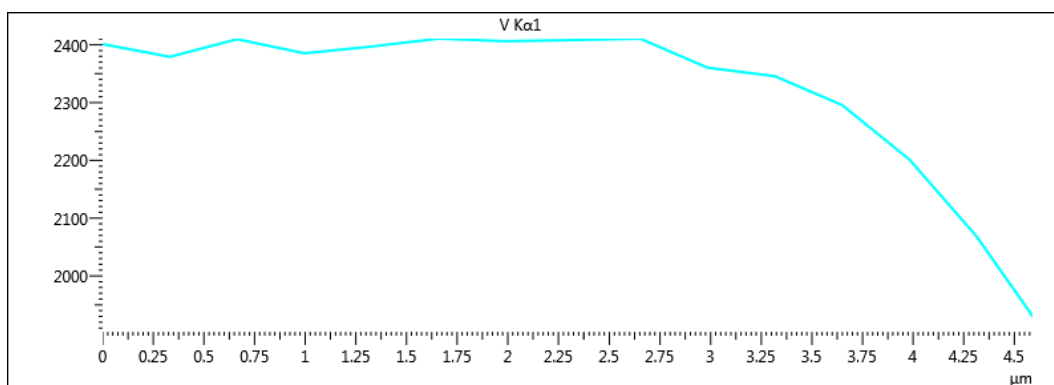
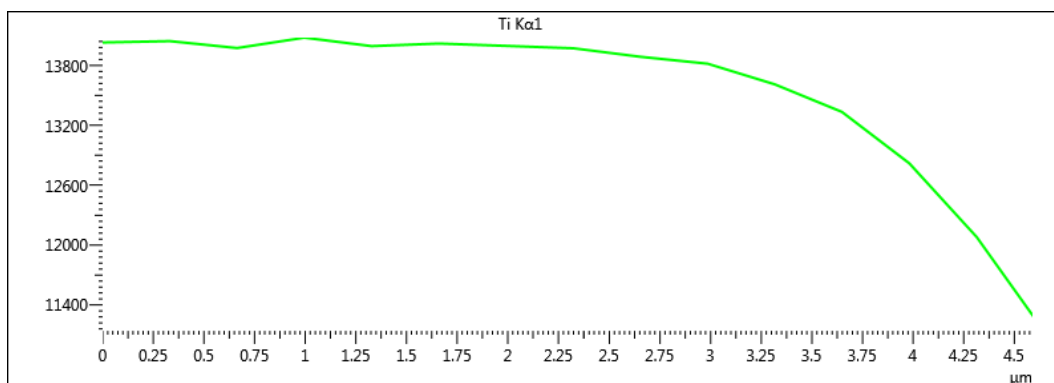
ง-8 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



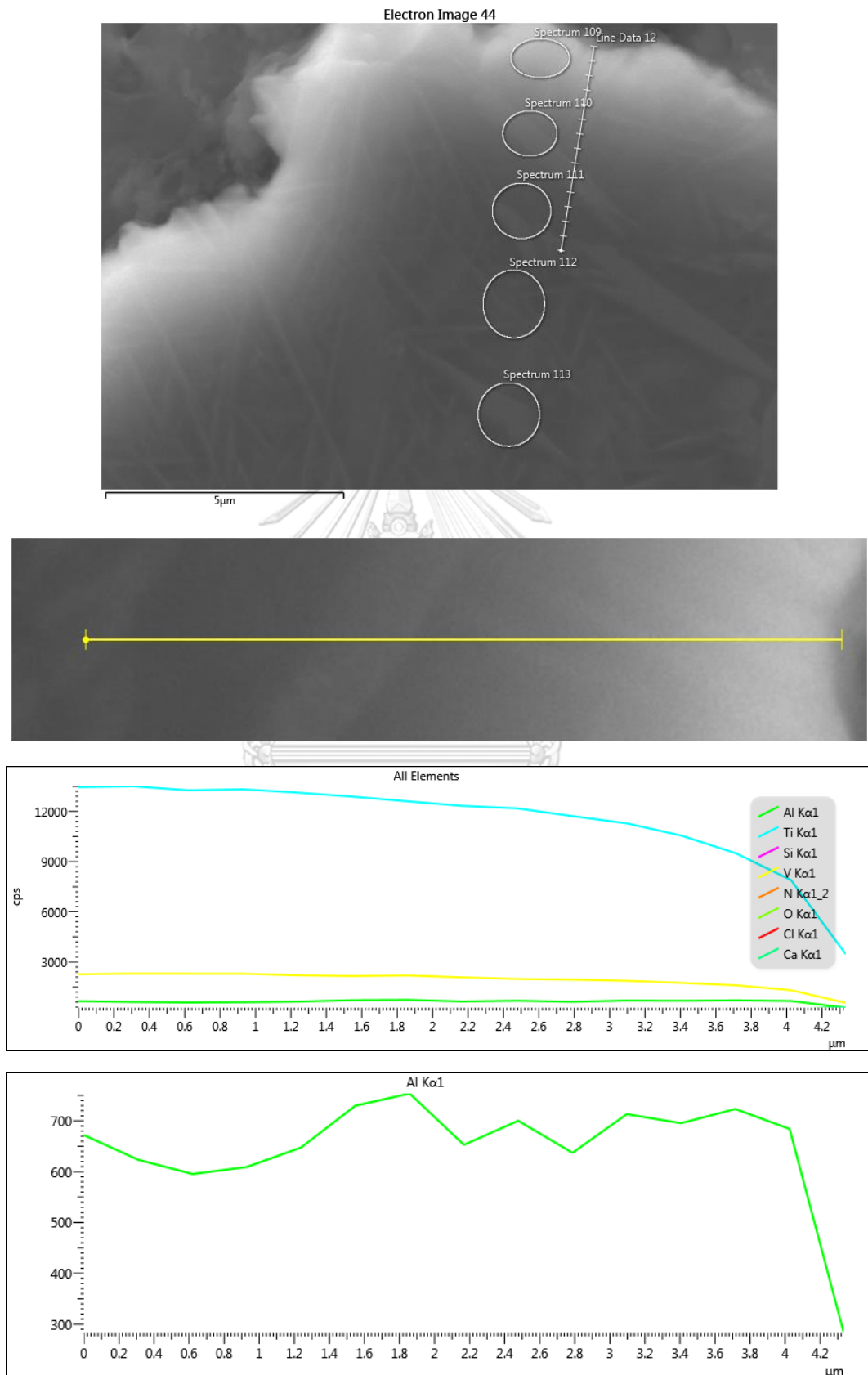


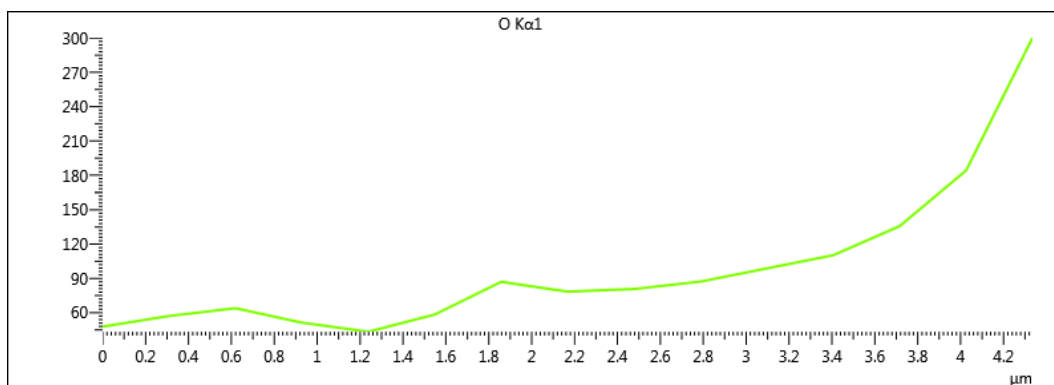
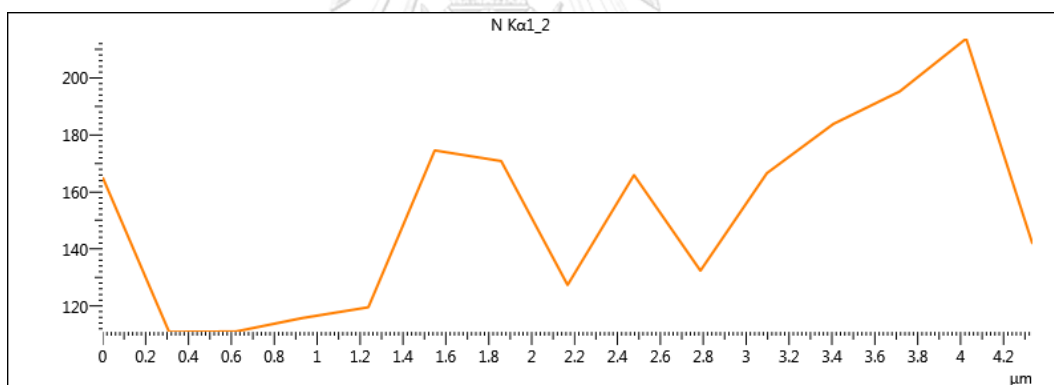
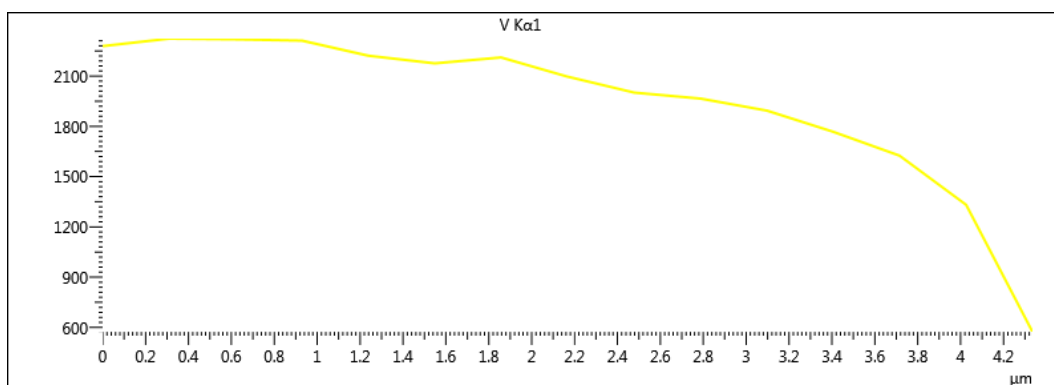
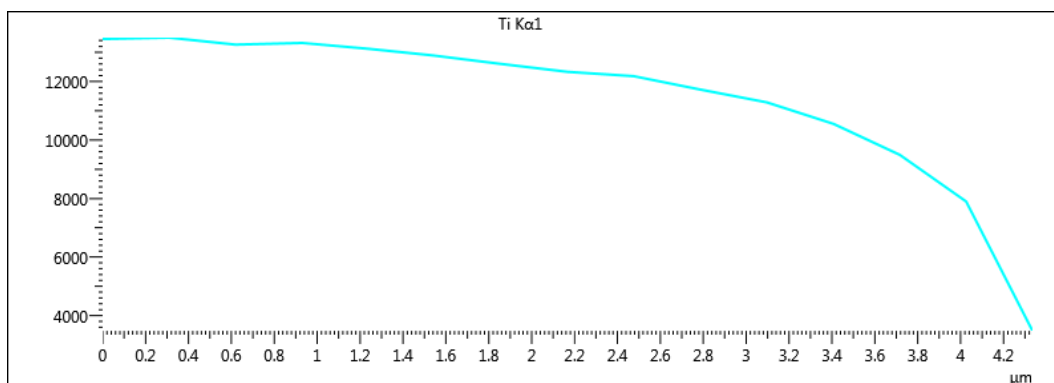
ง-9 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



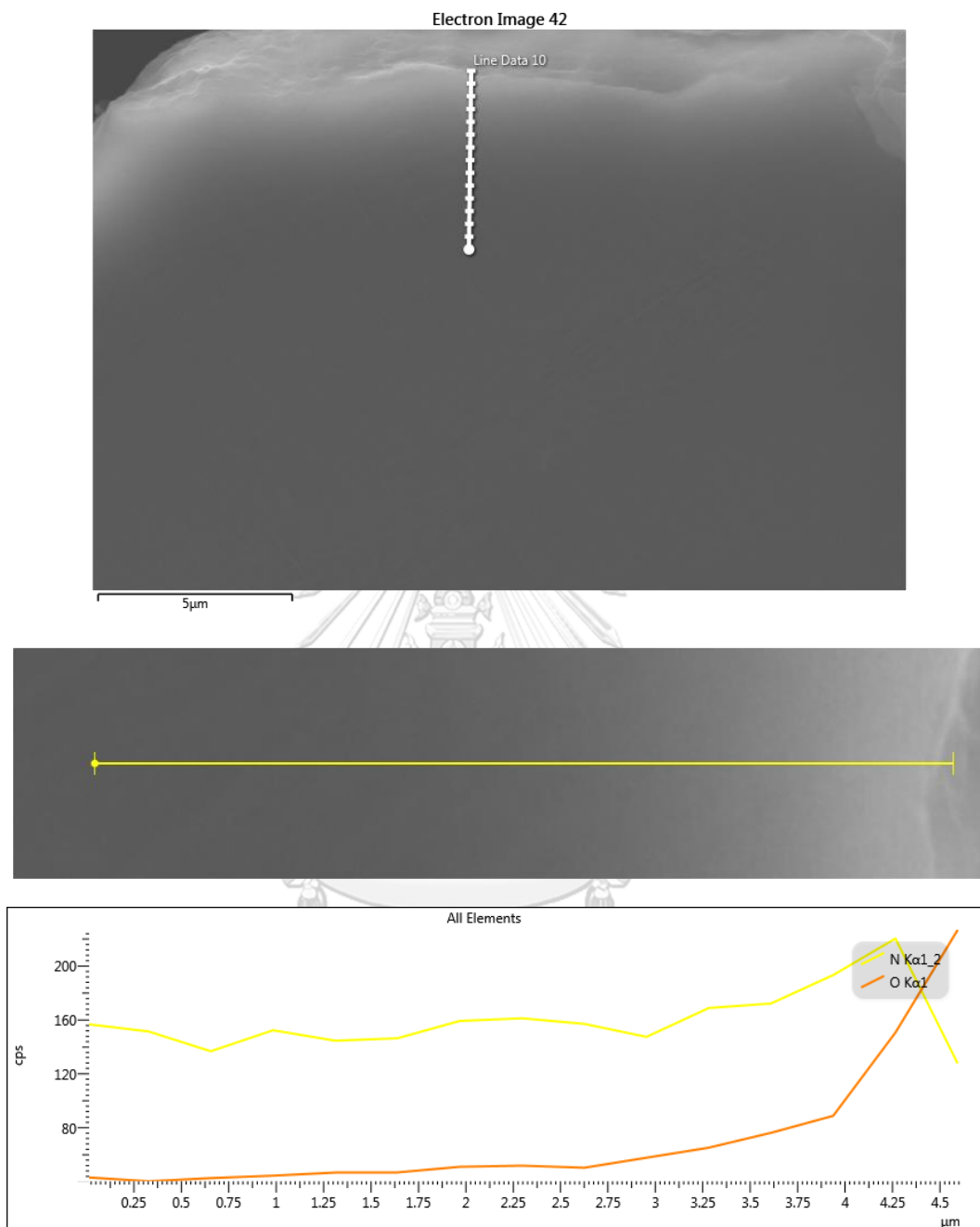


ง-10 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด

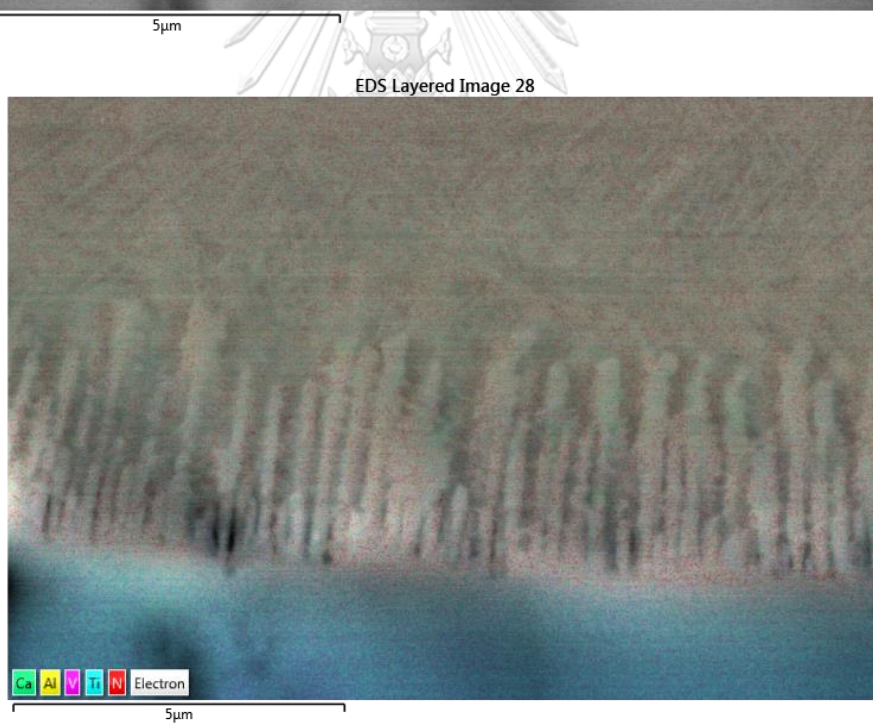
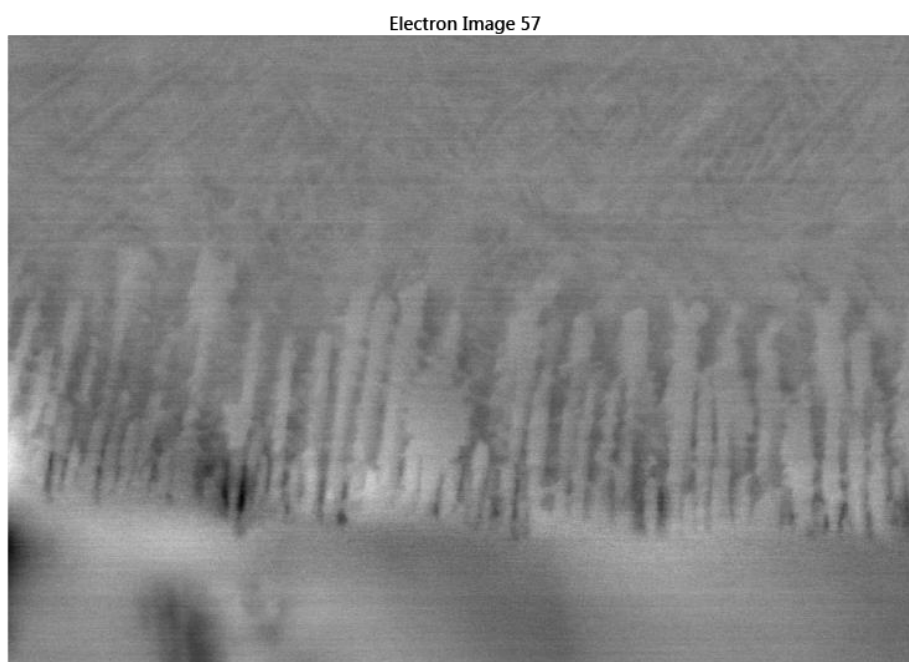


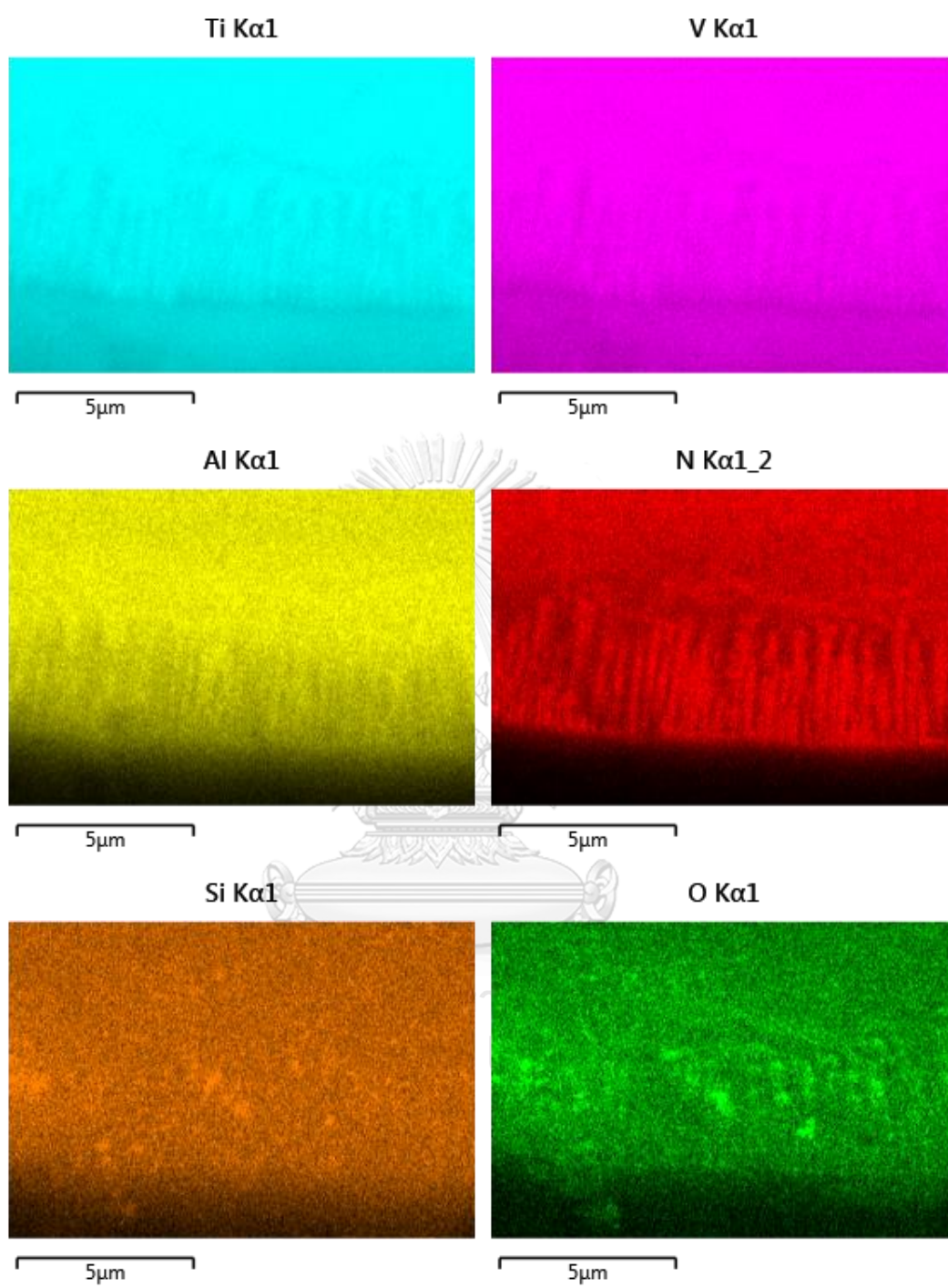


ง-11 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด

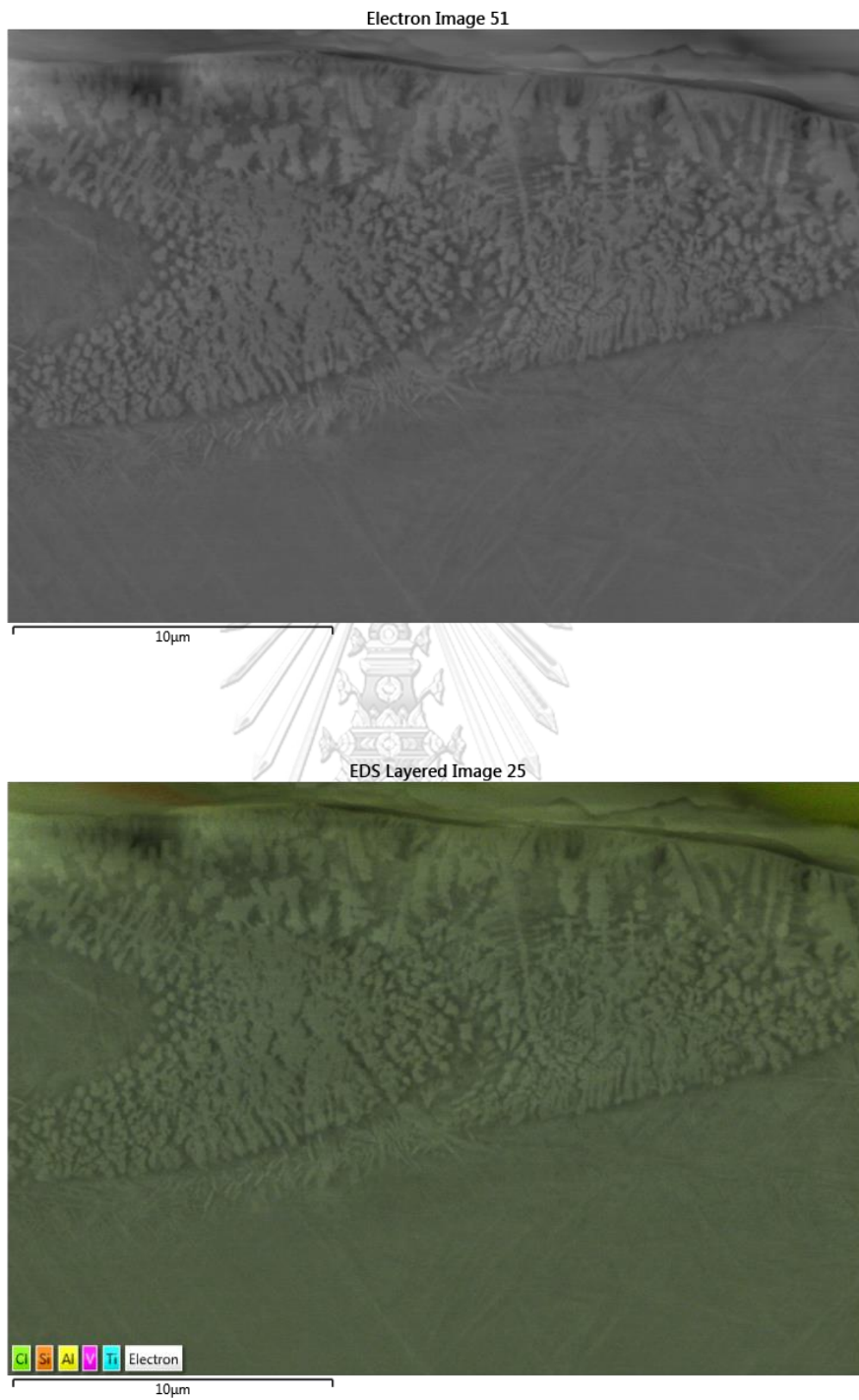


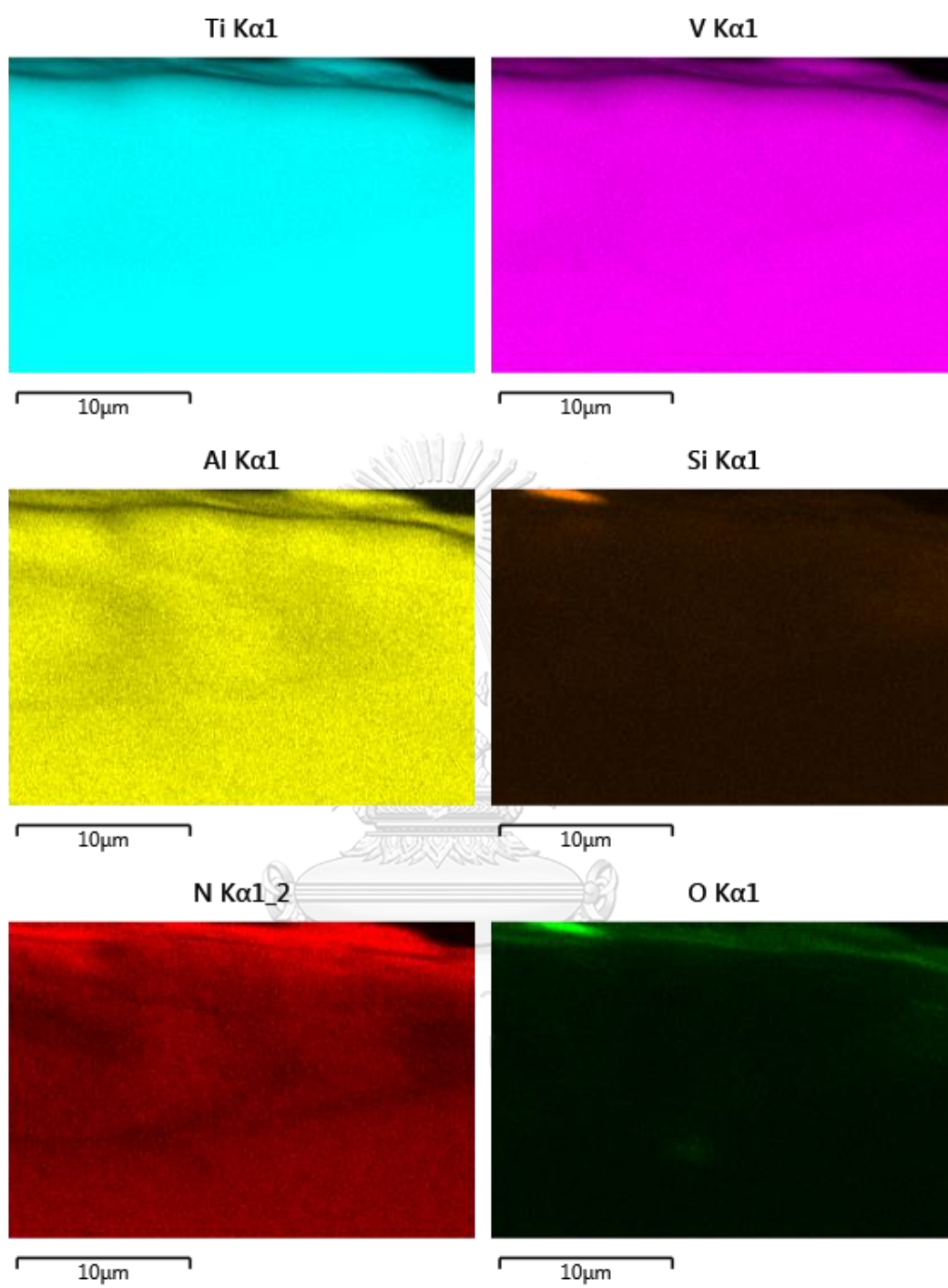
ง-12 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



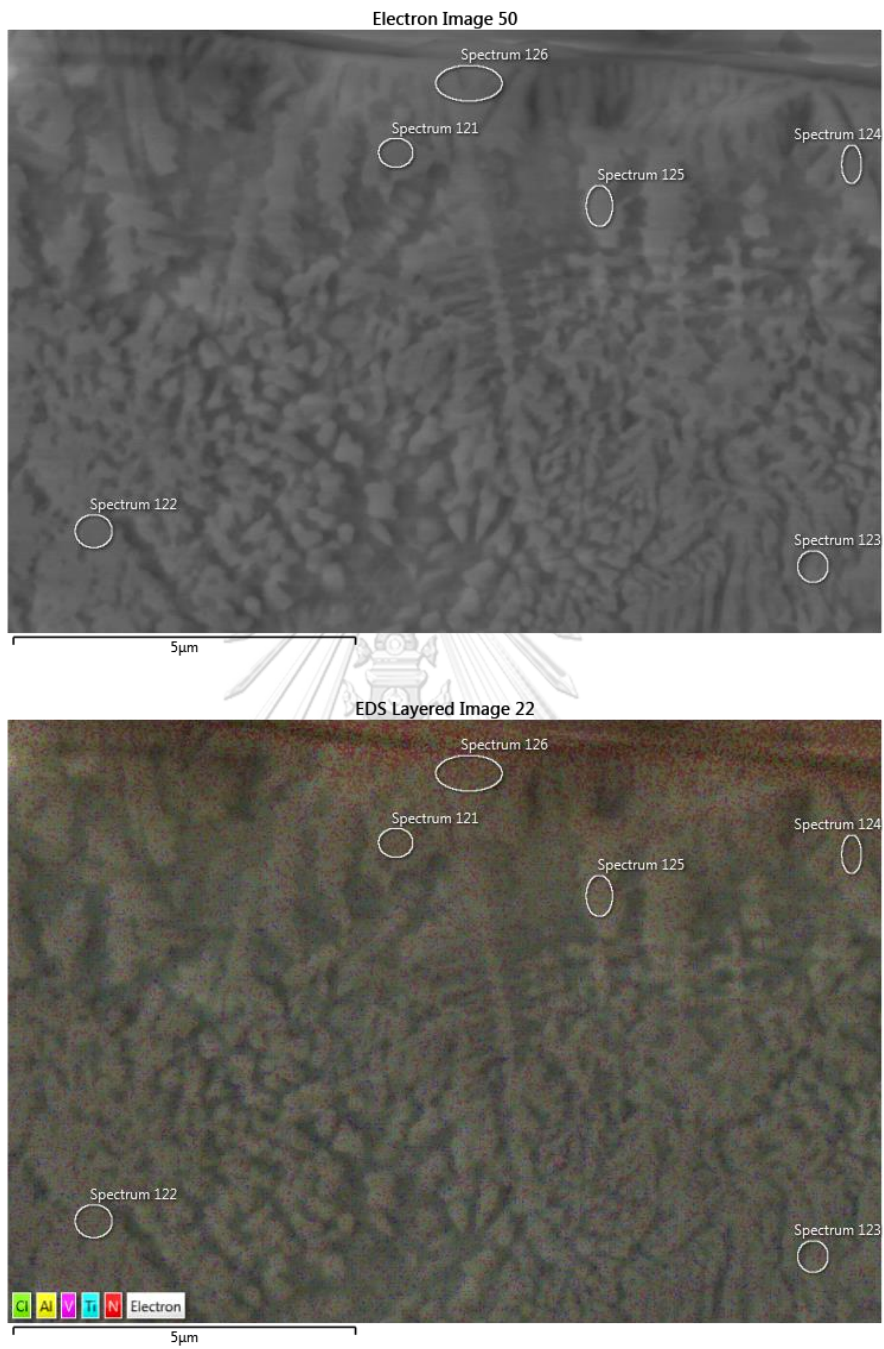


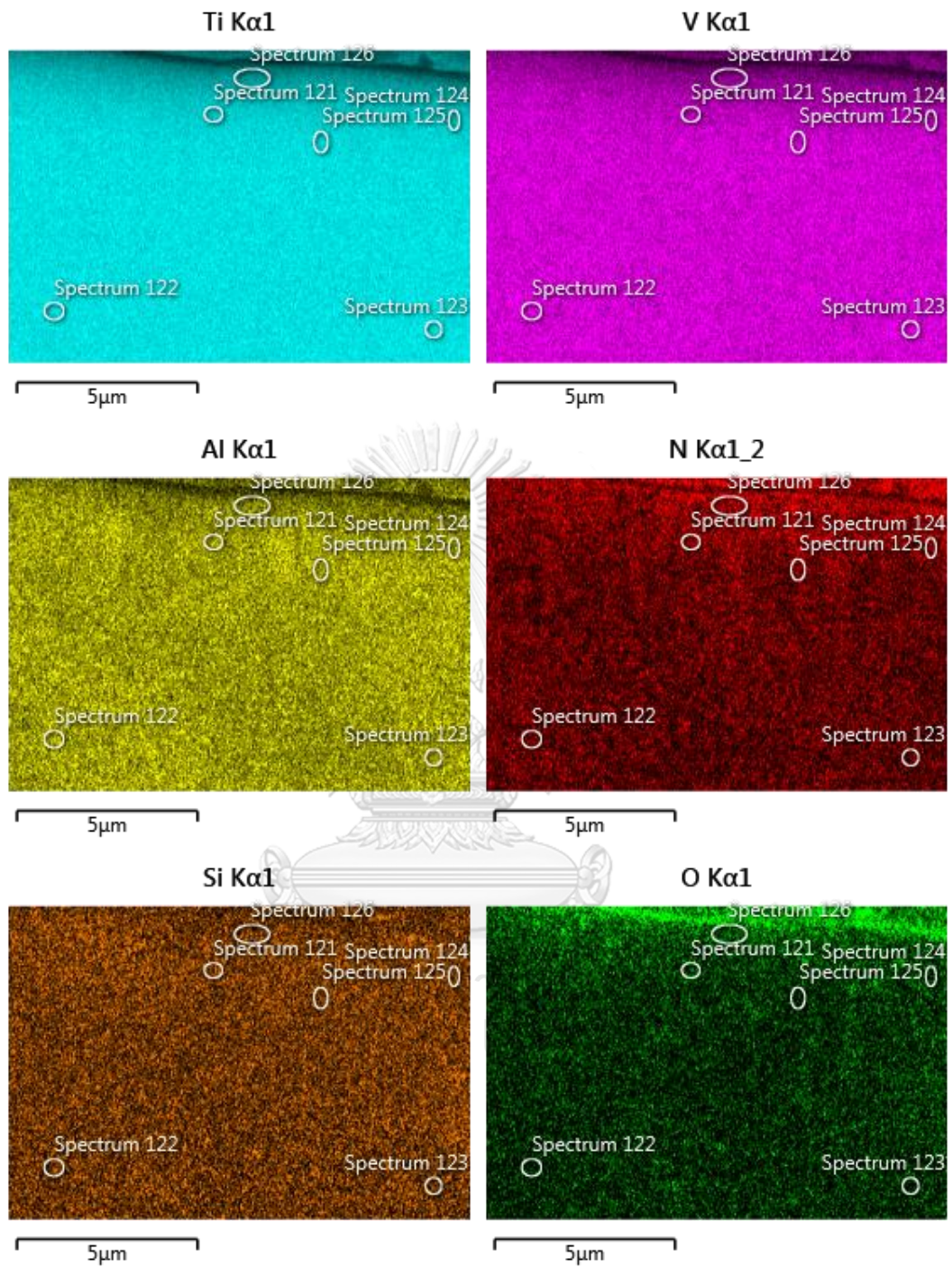
ง-13 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



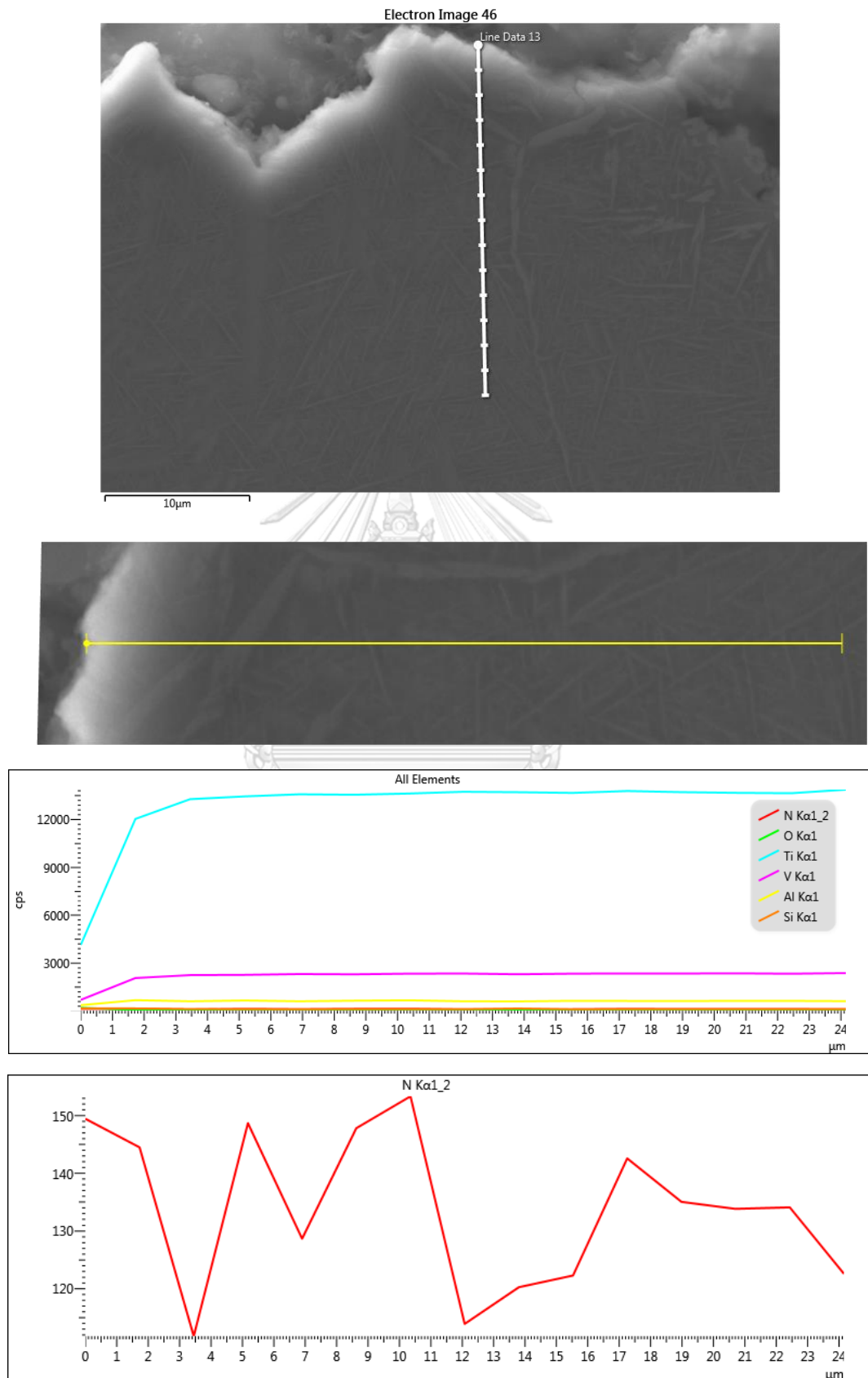


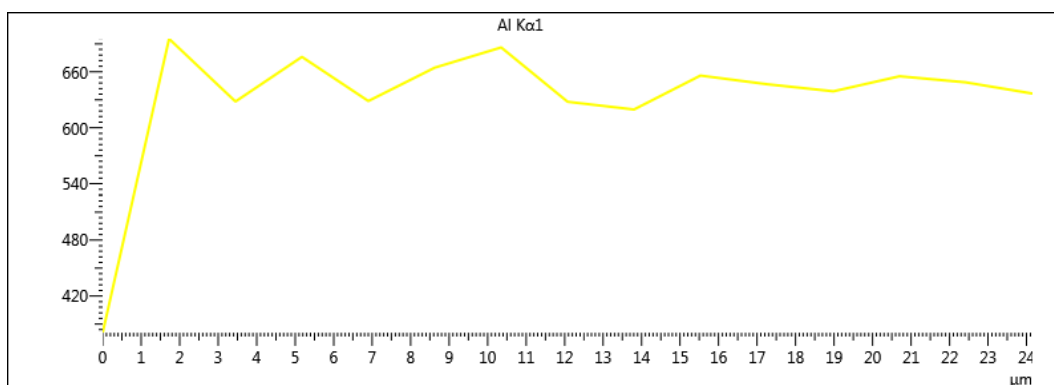
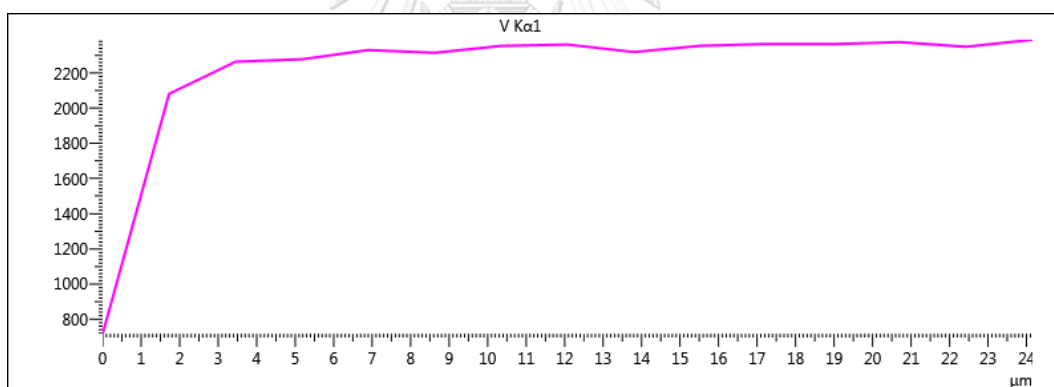
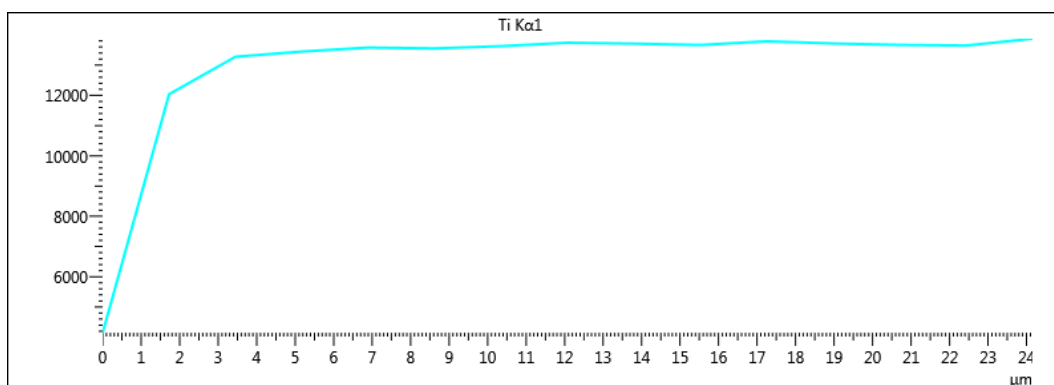
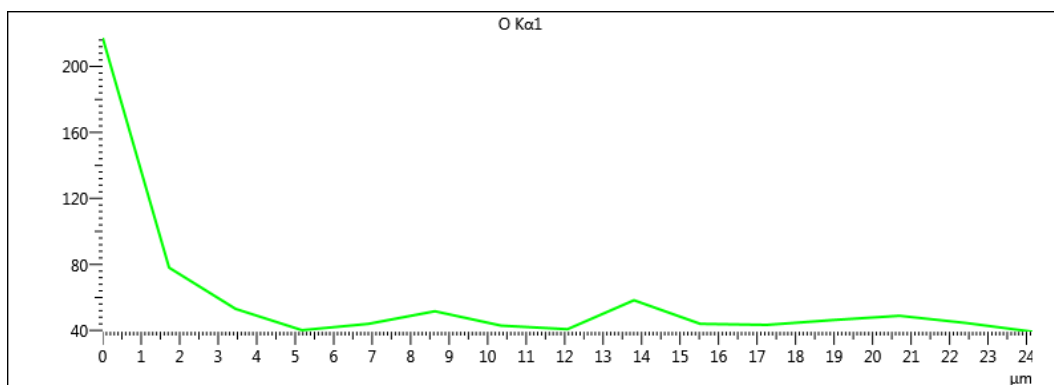
ง-14 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



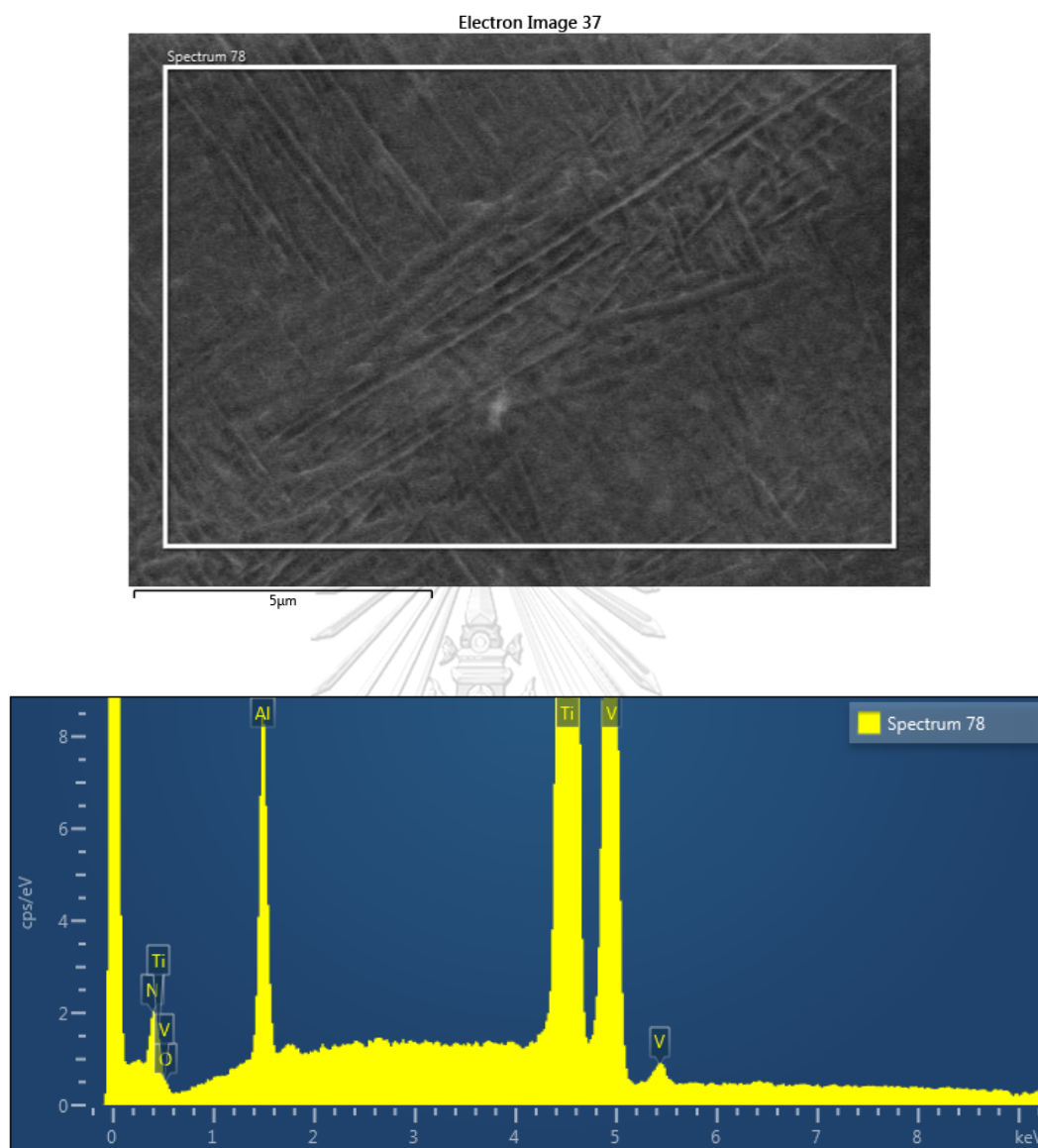


ง-15 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



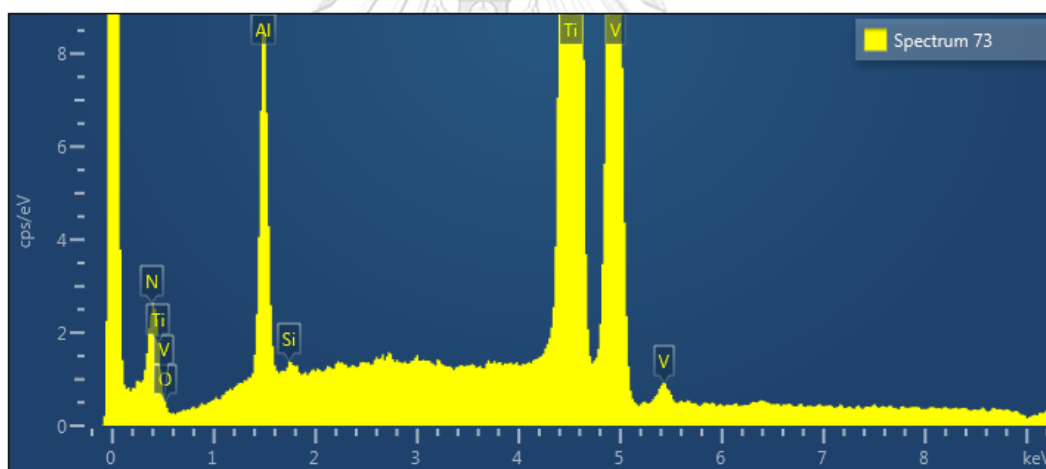
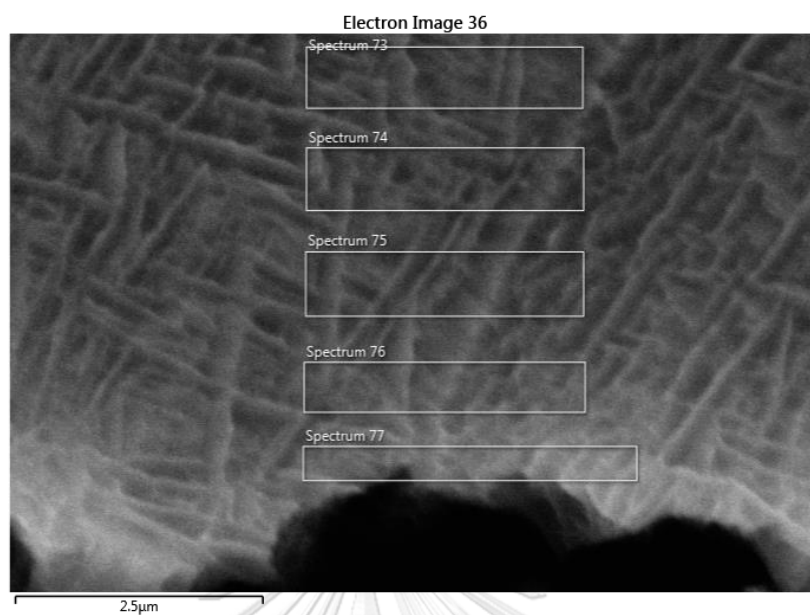


ง-16 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด

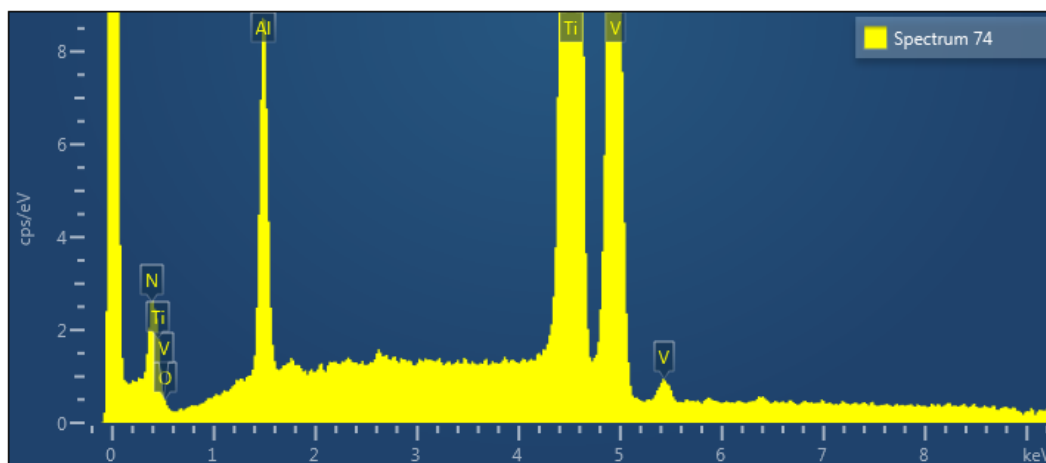


Spectrum 78				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.78	0.12	9.41
Ti	K series	88.28	1.42	80.92
V	K series	3.52	0.10	3.04
O	K series	2.42	1.57	6.64
N	K series	0.00	0.65	0.00
Total		100.00		100.00

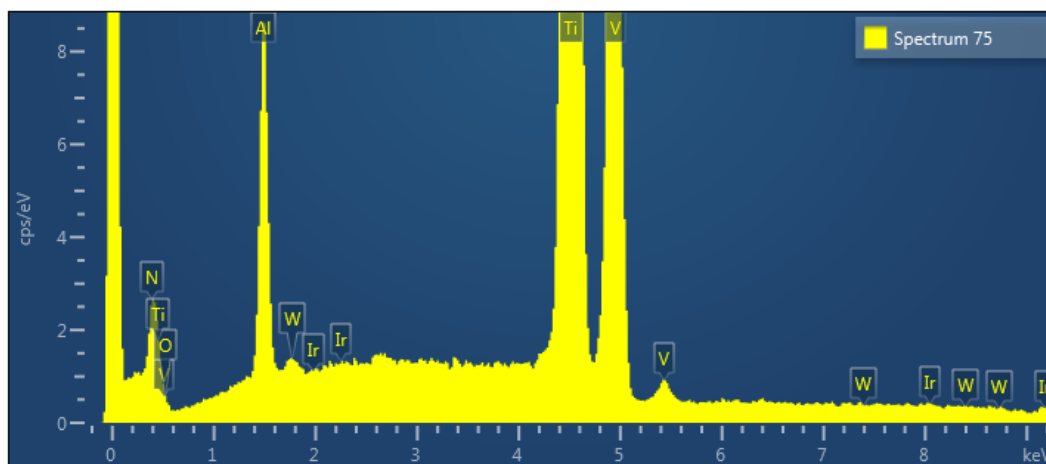
ง-17 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



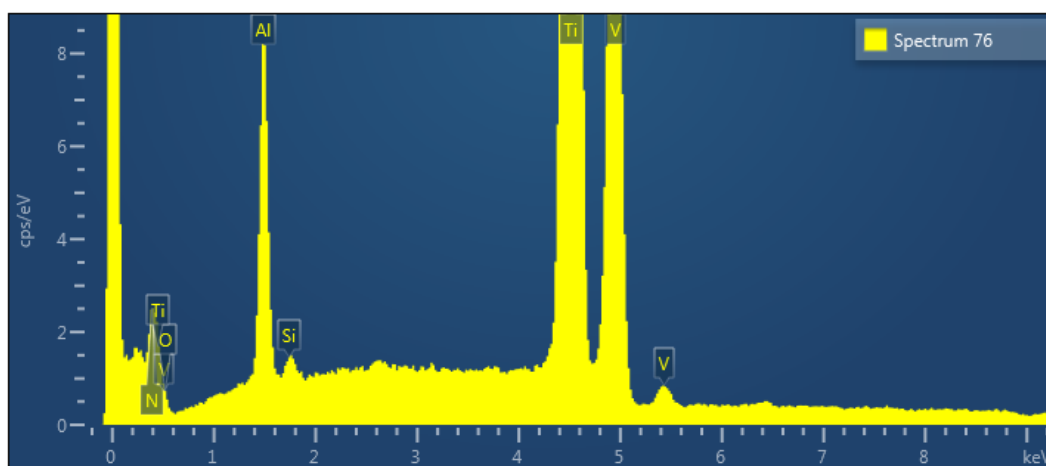
Spectrum 73				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.97	0.10	10.13
Ti	K series	90.26	0.14	86.37
V	K series	3.64	0.10	3.27
Si	K series	0.14	0.05	0.23
O	K series	0.00	2.06	0.00
N	K series	0.00	0.86	0.00
Total		100.00		100.00



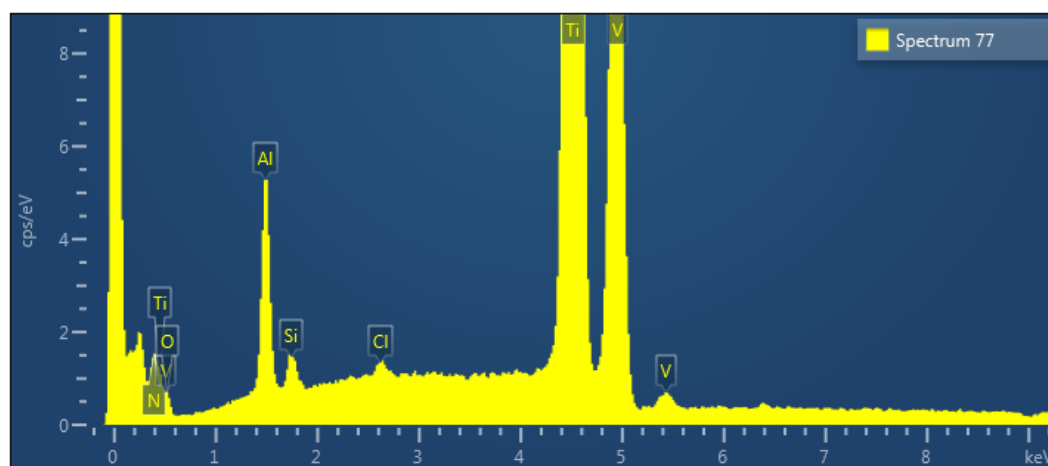
Spectrum 74				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	6.16	0.13	10.39
Ti	K series	89.93	0.90	85.51
V	K series	3.66	0.12	3.27
N	K series	0.25	0.99	0.83
O	K series	0.00	2.35	0.00
Total		100.00		100.00



Spectrum 75				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.99	0.17	9.83
Ti	K series	87.81	1.94	81.19
V	K series	3.49	0.13	3.04
O	K series	2.09	2.15	5.80
N	K series	0.00	0.94	0.00
W	L series	0.12	0.15	0.03
Ir	L series	0.50	0.16	0.12
Total		100.00		100.00

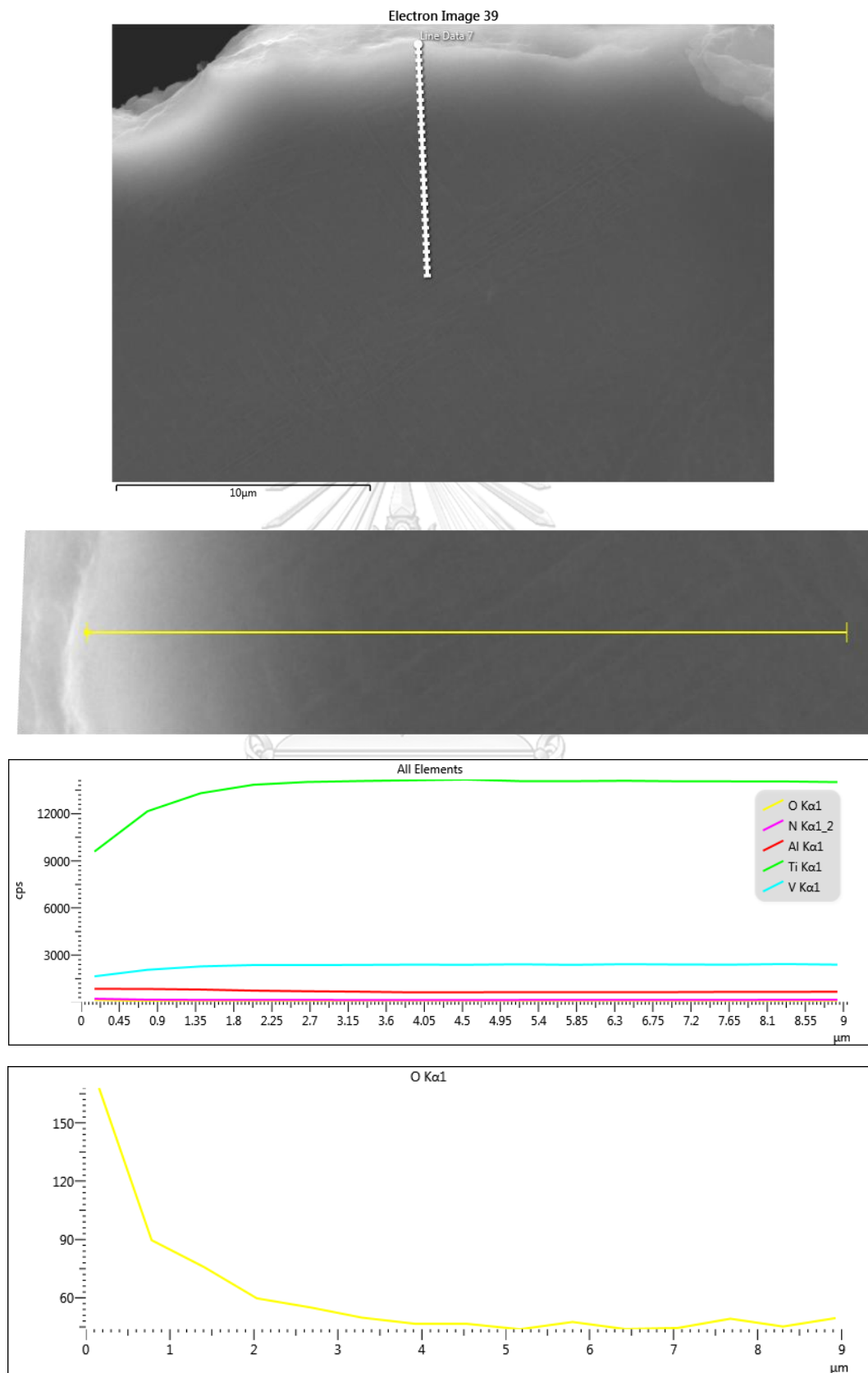


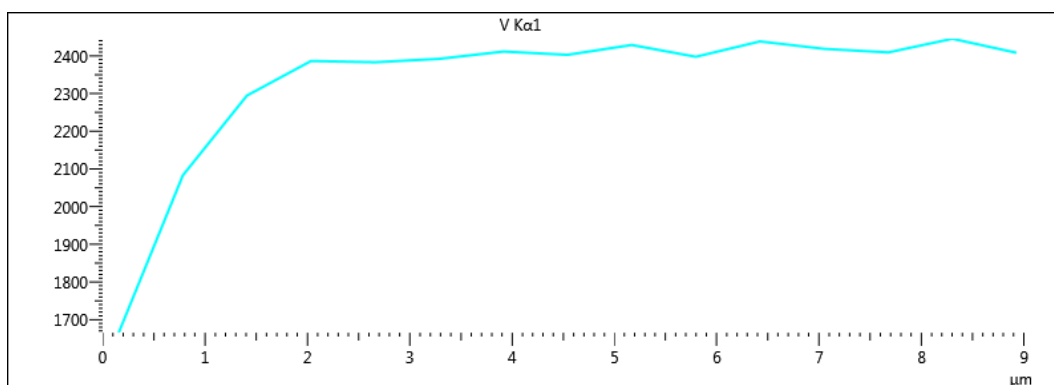
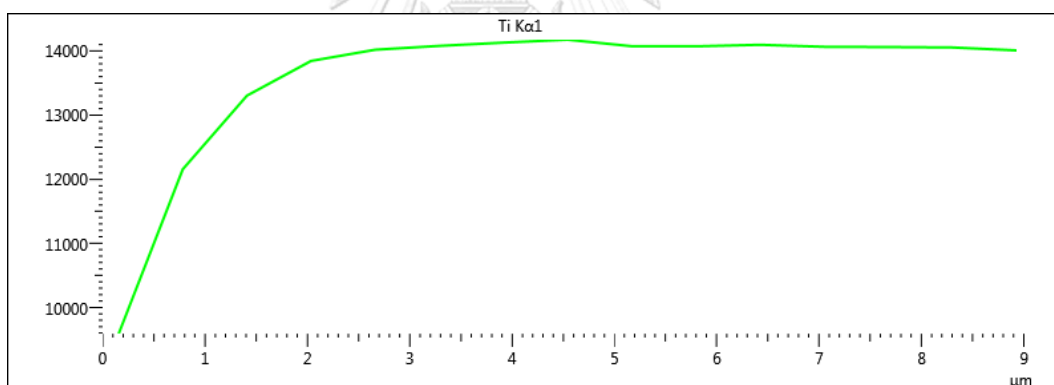
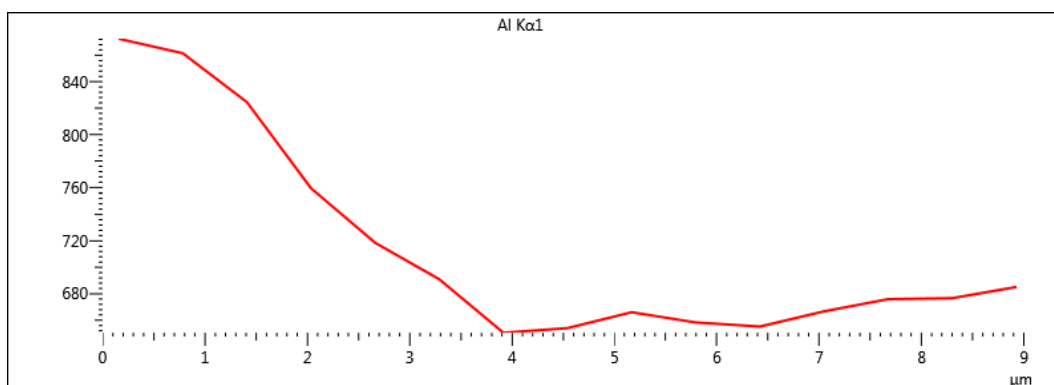
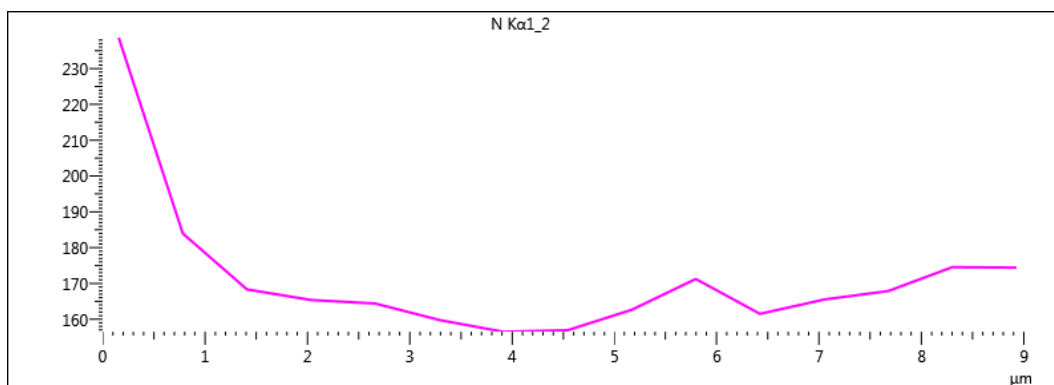
Spectrum 76				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	5.95	0.16	9.38
Ti	K series	86.17	1.89	76.46
V	K series	3.53	0.13	2.95
O	K series	4.05	2.10	10.77
N	K series	0.00	0.93	0.00
Si	K series	0.30	0.05	0.45
Total		100.00		100.00



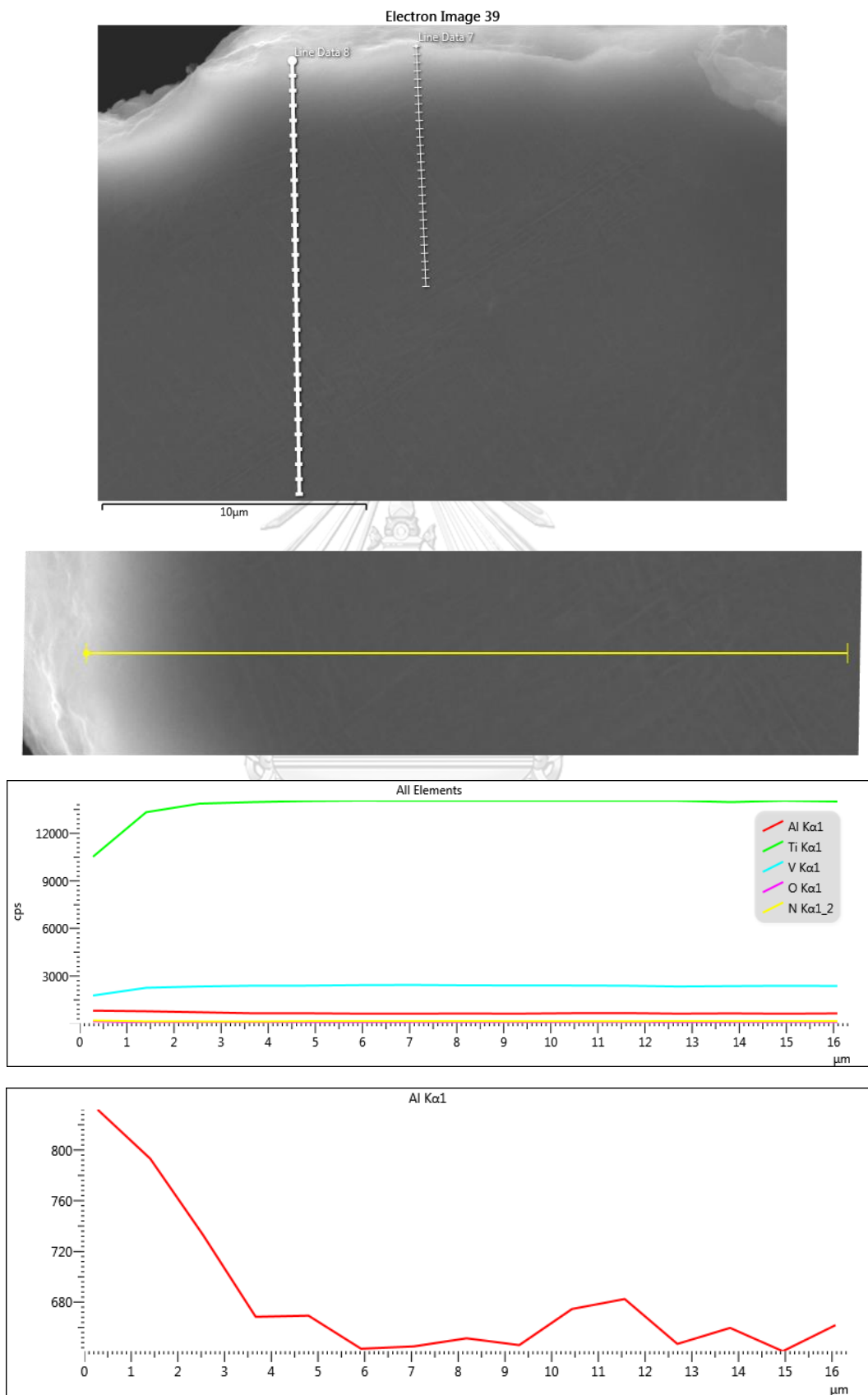
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	3.98	0.11	5.92
Ti	K series	83.92	1.55	70.23
V	K series	3.34	0.11	2.63
O	K series	8.13	1.70	20.37
Si	K series	0.49	0.04	0.70
N	K series	0.00	0.73	0.00
Cl	K series	0.14	0.03	0.16
Total		100.00		100.00

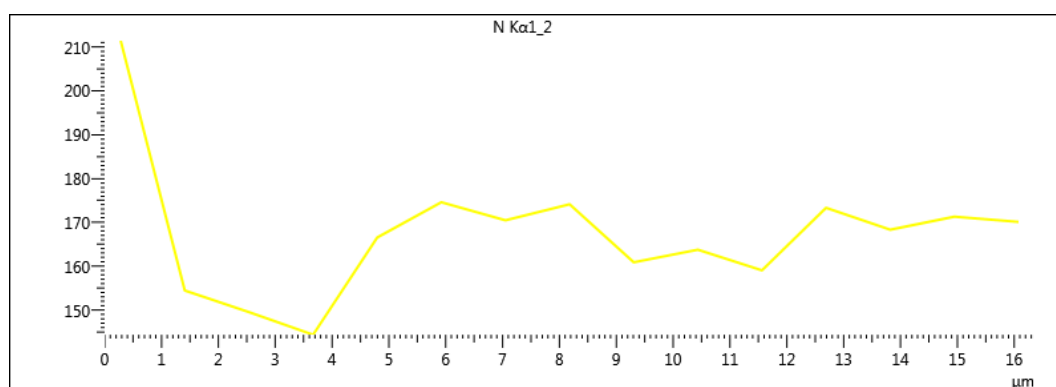
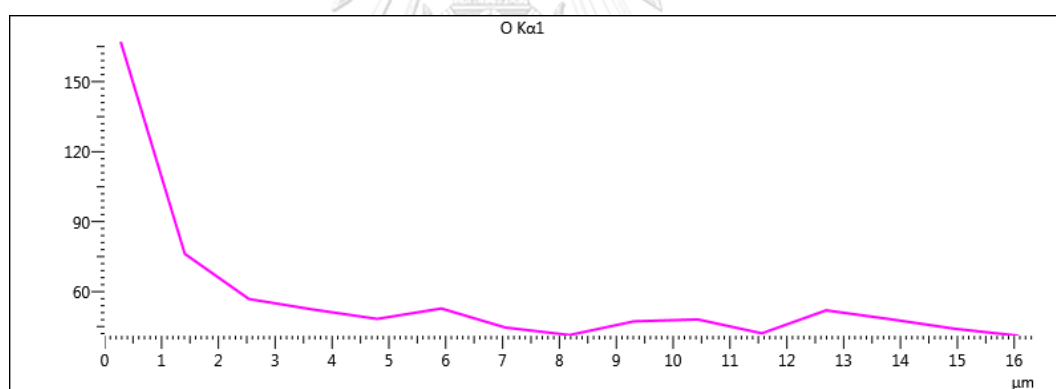
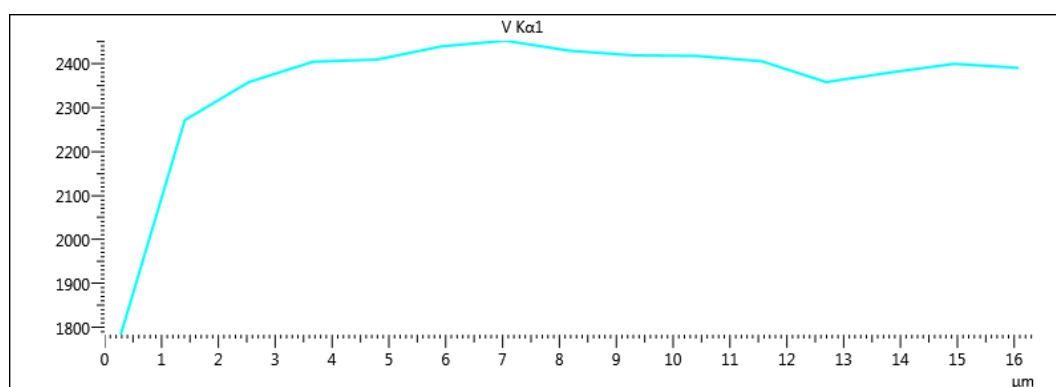
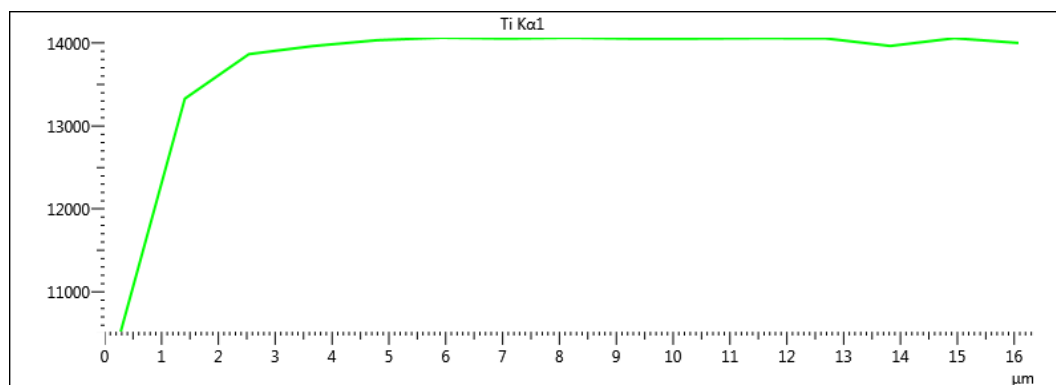
ง-18 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



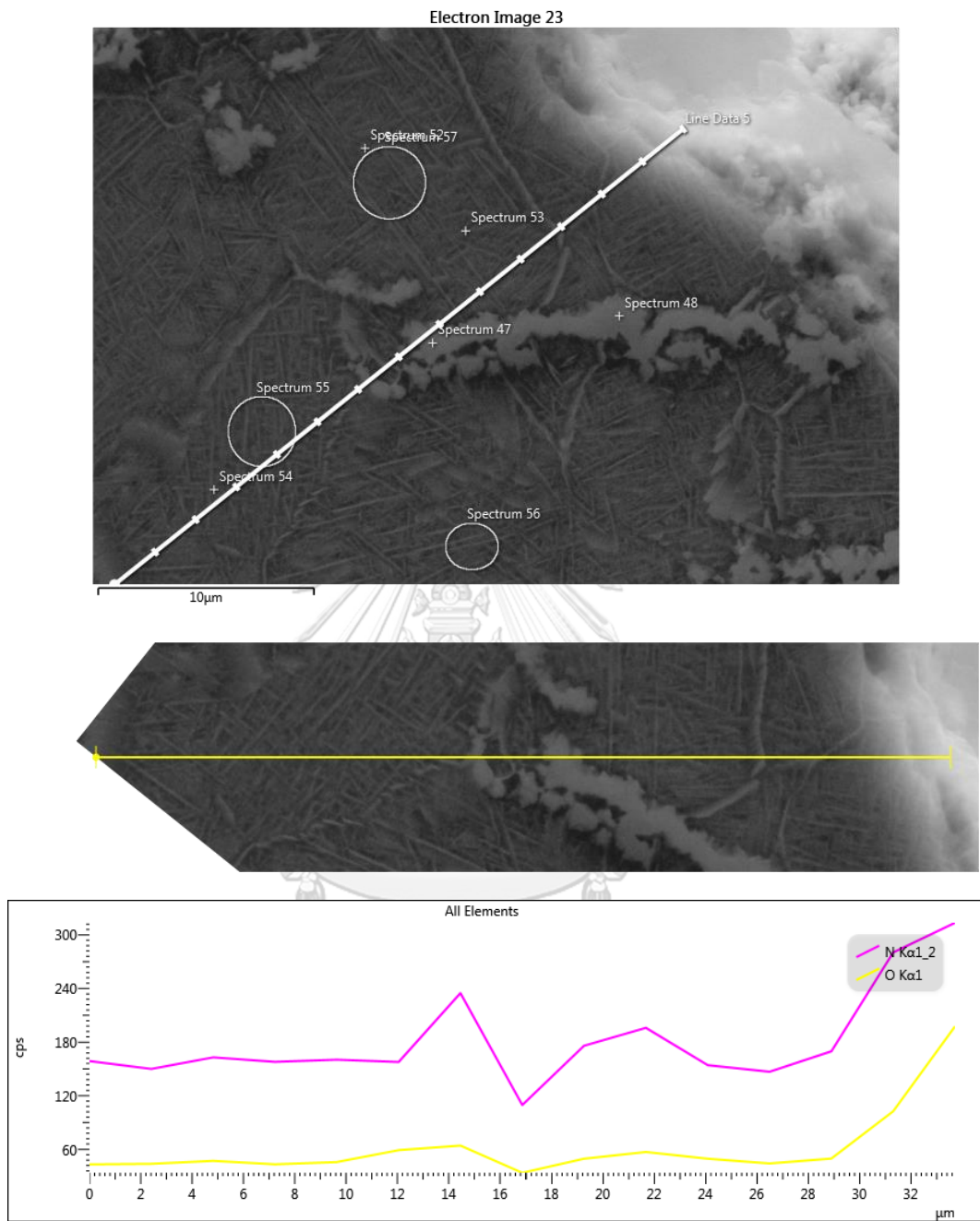


ง-19 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด

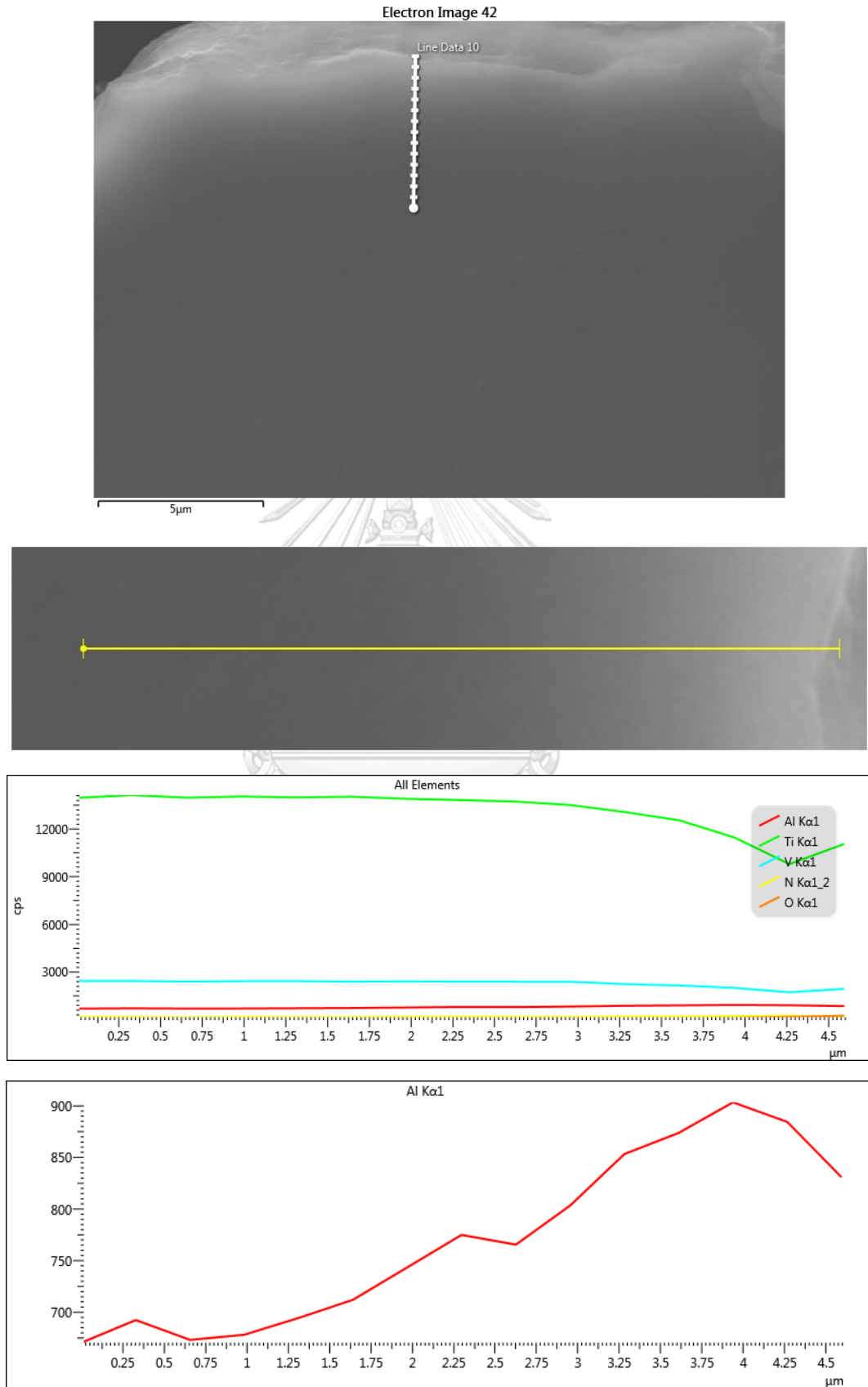


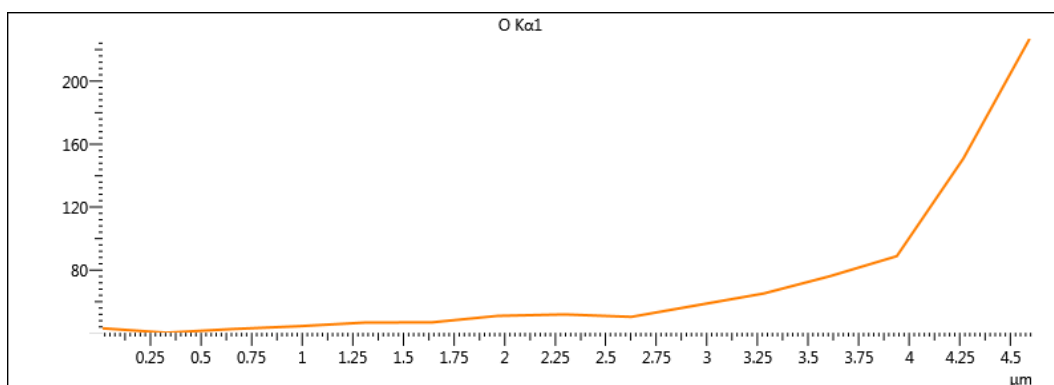
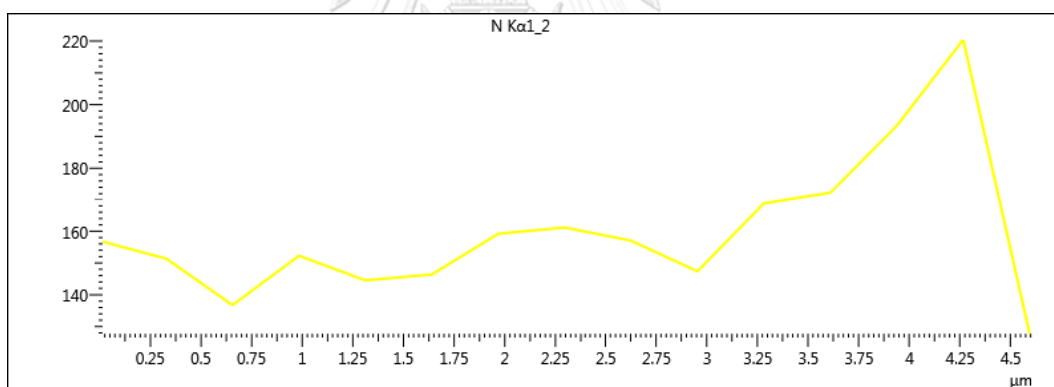
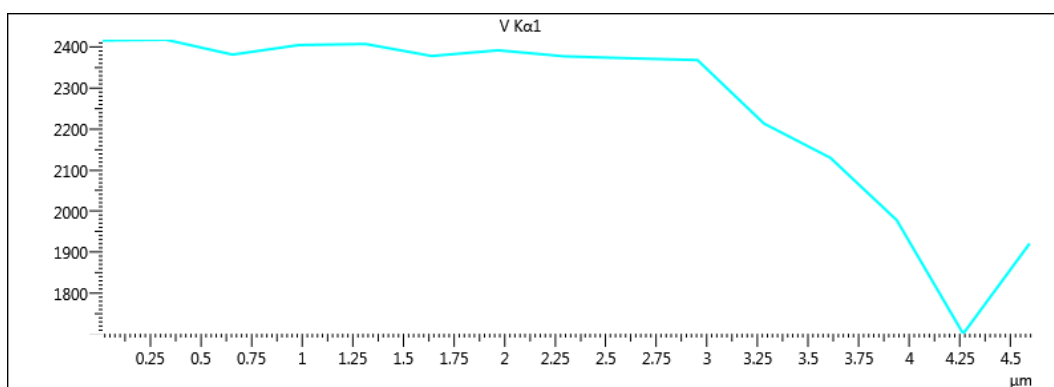
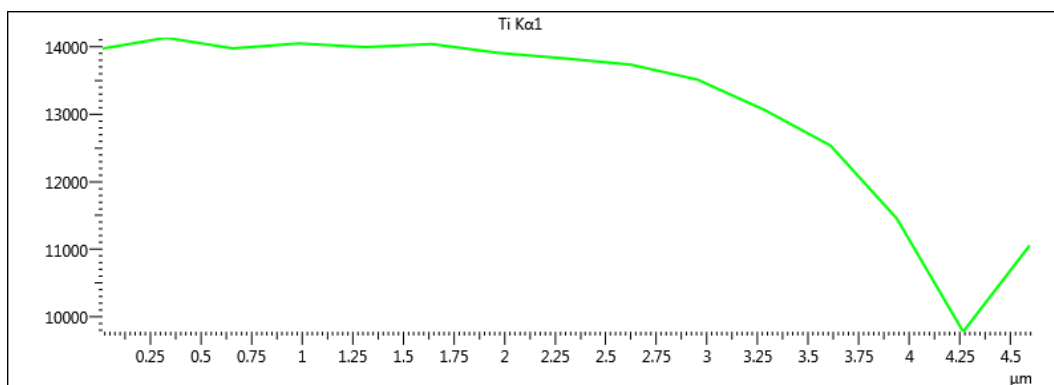


ง-20 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด



ง-21 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบบริเวณผิวรอยตัด





ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวาริท โปษยานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรของนางสุพรรณ โปษยานนท์ และนายพิมาย โปษยานนท์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2556

