



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลกระทบของวัสดุของอิเล็กทรอนิกส์ต่อความเค้นตกค้างและ
ชั้นหลอมสีขาวของเครื่องกีดทางไฟฟ้า

โดย นายอภิวัฒน์ มุฑามาระ และคณะ

มีนาคม 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลกระทบของวัสดุของอิเล็กทรอนิกส์ต่อความเค้นตึงและ
ชั้นหลอมสีขาวของเครื่องกีดขวางไฟฟ้า

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|--------------------------|---|
| 1. นายอภิวัฒน์ มุตาตามระ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 2. นายชาวสวน กาญจน์มัย | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Abstract (บทคัดย่อ)

Project Code : MRG5280074

(รหัสโครงการ)

Project Title : Effect of Electrode Materials to residual stresses and white layer in electrical discharge machining

(ชื่อโครงการ) ผลกระทบของวัสดุของอิเล็กโตรดต่อความเค้นตกค้างและ
ชั้นหลอมสีขาวของเครื่องกัดทางไฟฟ้า

Investigator : . นายอภิวัฒน์ มุตะตามระ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

(ชื่อนักวิจัย)

E-mail Address : mapiwat@engr.tu.ac.th

Project Period : 15 มีนาคม 2552 – 15 มีนาคม 2554 (2ปี)

(ระยะเวลาโครงการ)

บทคัดย่อ

กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machining : EDM) เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถขึ้นรูปวัสดุที่มีความแข็งสูงและรูปร่างซับซ้อนได้ แต่ส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) และทำให้ชิ้นงานมีความเสี่ยงที่จะเกิดรอยแตกร้าวได้สูง งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาผลของวัสดุชิ้นงานและของเหลวตัวกลางต่อความเค้นตกค้างในชั้นหลอมสีขาว (White Layer) และรอยแตกร้าว ซึ่งอิเล็กโตรดที่ใช้เป็นแท่งทองแดง และกราไฟต์ ส่วนวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กหล่อ และเหล็กเพลาชาว (SS400) การทดลอง EDM ทำในของเหลวตัวกลาง 2 ชนิด คือ น้ำบริสุทธิ์และน้ำมันแร่ ภายใต้เงื่อนไขความสัมพันธ์เดียวกัน ผลการทดลองพบว่าการเกิดรอยแตกร้าวในน้ำบริสุทธิ์มีน้อยกว่าในน้ำมันแร่ เนื่องจากคาร์บอนในน้ำมันแร่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชั้นหลอมเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์ไต์ได้อย่างสมบูรณ์ ความเค้นตกค้างของชั้นหลอมสีขาวบนเหล็กหล่อน้อยกว่าความเค้นตกค้างของชั้นหลอมสีขาวบนเหล็กเพลาชาว เพราะกราไฟต์ในเนื้อชิ้นงานที่แพร่สู่ชั้นหลอมมีส่วนในการกระจายความเค้นตกค้าง ชิ้นงานเหล็กหล่อเทาเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กน้อยกว่าเหล็กเพลาชาว เพราะความเค้นตกค้างในชั้นหลอมน้อยกว่าความเค้นตกค้างที่เกิดในชั้นหลอมบนเหล็กเพลาชาว เมื่อใช้อิเล็กโตรดเป็นกราไฟต์ สปาร์คขึ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ คาร์บอนจากอิเล็กโตรดสามารถแพร่สู่ชั้นหลอมฯซึ่งทำให้ความแข็งของชั้นหลอมมีค่าใกล้เคียงกับชั้นหลอมที่เกิดบนเหล็กหล่อซึ่งกราไฟต์ได้แพร่กระจายสู่ชั้นหลอมฯ และจากค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันนี้สามารถสรุปได้ว่าเฟสโครงสร้างเป็นประเภทเดียวกันคือมาร์เทนไซต์ ออสเทนไนต์และเฟอร์ไรท์

คำหลัก : การกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ชั้นหลอมสีขาว ความเค้นตกค้าง รอยแตกร้าว มาร์เทนไซต์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) รวมทั้งศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาวสวน กาญจนมัย ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

นายอภิวัฒน์ มุตะตามระ
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2554

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (คาดว่าจะตีพิมพ์ใน 2555)

Apiwat Muttamara, Chaosuan Kanchanomai, Effect of workpiece materials to surface cracks with EDM in kerosene and de-ionized water , Journal of Materials Processing Technology

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- ใช้ในการเรียนการสอนวิชาการรวมวิธีการผลิต
- ได้องค์ความรู้ของรอยแตกร้าวที่เกิดจากระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

3. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ

Apiwat Muttamara, Chaosuan Kanchanomai, Study of Surface Cracks with EDM in Kerosene and Deionized Water" International Conference on Materials Processing Technology 2010(MAPT2010), P.151-154.

อภิวัฒน์ มุตะตามระ* และ ชีรพจน์ คล้ายแก้ว, “การศึกษาพฤติกรรมการเกิดรอยแตกร้าวบนผิวงานที่เกิดจากการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ด้วยอิเล็กโตรดทองแดง และ กราไฟต์” , การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 (4th TMETC),วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2553, กรีนเนอรี รีสอร์ทเขาใหญ่ จ. นครราชสีมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์	3
2.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine : EDM)	3
2.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกัดอาร์ค	6
2.3 วัสดุชิ้นงาน	8
2.4 ความเค้นตกค้าง (Residual stress)	11
2.5 เทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction ; XRD)	12
2.6 รอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-Cracks)	20
2.7 ชั้นหลอมสีขาวและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจากการ EDM	21
2.8 วรรณกรรมปริทัศน์	22

3. วิธีการวิจัย	24
3.1 แผนงานวิจัย	24
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	25
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	27
4. ผลการทดลองและการอภิปราย	28
4.1 ผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงาน ต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงาน.....	28
4.2 ผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงาน ต่อความหนาผิว	29
4.3 ผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงาน ต่อชั้นหลอมสีขาวและชั้นใต้ ชั้นหลอมสีขาว	30
4.4 ผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงาน ต่อการเกิดรอยแตกร้าว.....	39
4.5 ผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงาน ต่อความเค้นตกค้าง	46
4.6 ผลของความเค้นตกค้าง ต่อการเกิดรอยแตกร้าว.....	46
4.7 ผลของค่าความแข็งของชั้นหลอมสีขาว	48
5. สรุปผลการทดลอง.....	50
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก.....	52
ก คำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง.....	53
ข Manuscript	54

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีได้รับการพัฒนาอย่างไม่มีขีดจำกัด ซึ่งกรรมวิธีการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine : EDM) หรือกระบวนการตัดวัสดุโดยวิธีความร้อน ก็เป็นเทคโนโลยีอย่างหนึ่งในงานอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญมากในการผลิต จึงทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการกัดวัสดุที่มีความแข็งสูง และใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่แปรรูปด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก (จวีวรรณ ลิ้มสุวรรณ;2550, El-Hofy;2005, wiseGEEK;2008) ซึ่งการกัดโลหะด้วยไฟฟ้านี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนได้ เนื่องจากมีการสปาร์คทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการขยายหรือหดตัวของอนุภาควัสดุ จนทำให้อนุภาคของวัสดุทั้งสองที่ถูกแยกออกมา ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส (Ho and Newman;2003, Mukherjee and Ray;2006) แล้วถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยของเหลวตัวกลาง (Dielectric liquid) จนกลายเป็นชั้นของแข็งสีขาวขึ้นมา เรียกว่า “ชั้นหลอมสีขาว (White layer)” ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) และทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความเสี่ยงที่จะเกิดรอยแตกร้าว (Crack) ได้สูง ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งาน หรือประสิทธิภาพในการทำงานต่ำกว่าที่ควรจะเป็น (Lee, Rehbach, et al.;2004, Mamalis, Vosniakos, et al.;1988, Singh, Maheshwari, et al.;2004) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างเกิดความล้มเหลวในทางวิศวกรรม ทำให้เกิดความยุ่งยากต่อกระบวนการผลิตได้

ซึ่งปัญหาความเค้นตกค้าง (Residual stress) ที่เกิดขึ้นนี้ อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับของเหลวตัวกลาง และวัสดุอิเล็กโทรด (Lee, Hsu, et al.;2004, Muttamara and Suatra-kul;2008) รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน และเงื่อนไขหรือค่าตัวแปรในการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งถ้ามีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านนี้อาจจะแก้ปัญหารอยแตกร้าว และอายุการใช้งานของเครื่องมือหรือแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นได้ และจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

ปัญหารอยแตกร้าว (Cracks) ที่เกิดขึ้นนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับของเหลวตัวกลาง และวัสดุอิเล็กโทรด (Lee, Hsu, et al., 2004) รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน และเงื่อนไขหรือค่าตัวแปรในการกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาผลของชนิดวัสดุชิ้นงานและวัสดุอิเล็กโตรด ต่อความเค้นตกค้างในชั้นหลอมสีขาว (White layer) โครงสร้างชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวและเนื้อเหล็กใต้ชั้นหลอมสีขาว และรอยแตกร้าวที่เกิดจากกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาผลของการกำหนดตัวแปรของการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีต่อค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น อันได้แก่ กระแสไฟฟ้า (Discharge current, I_d) และเวลาเปิด (On time, T-on)

ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. อิเล็กโตรดที่ใช้ คือ แท่งทองแดง และแท่งกราไฟต์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร กัดโลหะลึกลงประมาณ 0.2 มิลลิเมตร
2. ชิ้นงานทดลอง ได้แก่ เหล็กหล่อ และเหล็กเพลขาว (JIS SS400)
3. ของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำบริสุทธิ์ (De-ionized Water) และน้ำมันแร่เกรด Shell EDM Fluid 2A
4. ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open-circuit voltage, V_o) ที่ใช้ในการวิจัย คือ 250 โวลต์ และค่าปัจจัยประสิทธิภาพมีค่าเท่า 50 %

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของชนิดวัสดุชิ้นงาน และของเหลวตัวกลาง ต่อความเค้นตกค้างในชั้นหลอมสีขาว (White layer) และชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจากกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า
2. ทราบถึงเงื่อนไขความสัมพันธ์ของตัวแปรของการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ที่มีผลต่อการสร้างชั้นหลอมสีขาว ความเค้นตกค้าง รอยแตกร้าว และโครงสร้างชั้นหลอมสีขาวและชั้นใต้ชั้นหลอม
3. ได้องค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้าง ความเค้นตกค้างในชั้นหลอมสีขาว และการเกิดรอยแตกร้าวขณะใช้งาน เพื่อใช้ในการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพชิ้นงานให้มีความคงทน และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และสามารถเผยแพร่วิชาการและเทคโนโลยีสู่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine : EDM)

เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นเครื่องจักรที่ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 จนได้รับการยอมรับในเรื่องมาตรฐานการผลิต ทำให้เป็นเครื่องจักรที่มีความสำคัญในงานผลิตโลหะขั้นสูง (Non-Traditional manufacturing) และต่อมาได้รับการพัฒนาปรับปรุงด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัย ทำให้กลายเป็นเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพ สามารถทำการผลิตได้รวดเร็วและสะดวกยิ่งขึ้น (Singh, Maheshwari, et al., 2004)



ภาพที่ 2.1

เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า รุ่น FORM-2-LC

จึงเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และมีความแข็งสูงที่ยากต่อการแปรรูป เช่น โลหะที่ผ่านการชุบแข็ง หรือโลหะพิเศษ เป็นต้น รวมไปถึงการผลิตแม่พิมพ์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แม่พิมพ์หล่อโลหะ แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เป็นต้น ที่สำคัญเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้ายังสามารถใช้ขัดผิวชิ้นงานในขั้นสุดท้าย (Surface finish) ได้อีกด้วย (El-Hofy, 2005; Tung, 1998) และยังสามารถใช้

กัดวัสดุเซรามิกที่ไม่นำไฟฟ้าได้ โดยการใช้วัสดุช่วยเหี่ยวน้ำ (Assisting Electrode) ทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานเซรามิกได้ (อภิวัฒน์ มุตตามระ และคณะ, 2549; Yakuzawa, Naotake, et al., 1997)

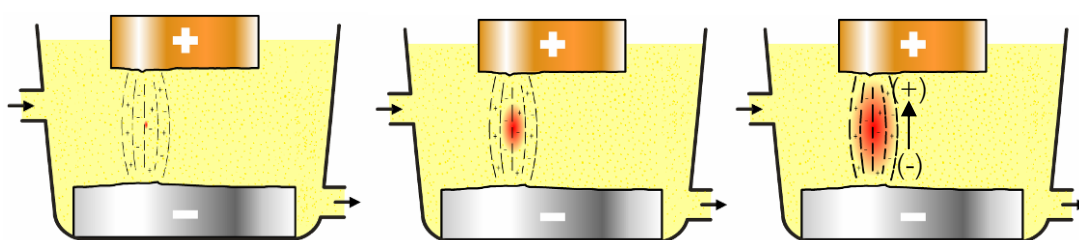
2.1.1 หลักการของการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM)

เป็นกระบวนการแยกอนุภาควัสดุโดยวิธีทางความร้อน (Thermal method) ซึ่งความร้อนที่ได้เกิดจากการสปาร์คทางไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรดโดยที่ไม่สัมผัสกัน ภายใต้ของเหลวตัวกลางที่ไม่นำไฟฟ้า (Dielectric fluid) ส่งผลให้ชิ้นงานและอิเล็กโทรดเกิดการหลอมละลายและถูกกัดเซาะออกไป ซึ่งอนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือ แก๊ส (Ho and Newman, 2003; Mukherjee and Ray, 2006)

2.1.2 กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

1. การสูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric breakdown) เมื่ออิเล็กโทรดเข้าใกล้ชิ้นงานจนถึงระยะหนึ่ง ของเหลวตัวกลางที่ไม่นำไฟฟ้าจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน ทำให้ไอออนประจุลบถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นประจุบวก ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น



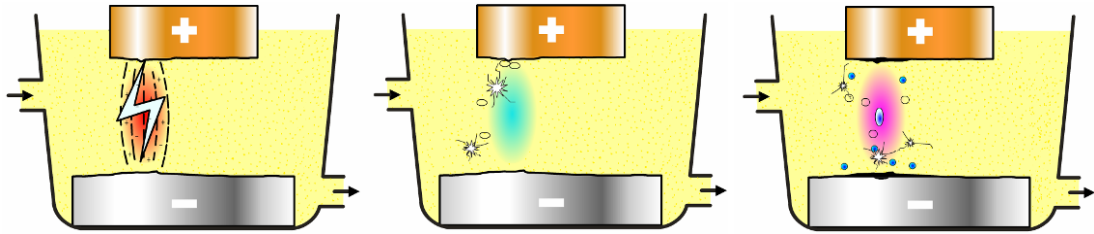
ภาพที่ 2.2

การสูญเสียความเป็นฉนวน

(ที่มา : <http://www.cours.polymtl.ca/mec4530/AnimEng/Chimie.swf>)

2. การสปาร์ค (Spark) หรือการหลอมละลาย เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนของของเหลวตัวกลางแล้ว จะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน จนทำให้เกิดการสปาร์ค ซึ่งจุดที่เกิดการสปาร์คนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 8,000 ถึง 12,000 °C และอาจจะสูง

ได้ถึง 20,000 °C เมื่อค่ากระแสมีความถี่สูงที่ประมาณ 20,000 ถึง 30,000 เฮิร์ตซ์ แล้วกระแสจะถูกตัดลงในทันที

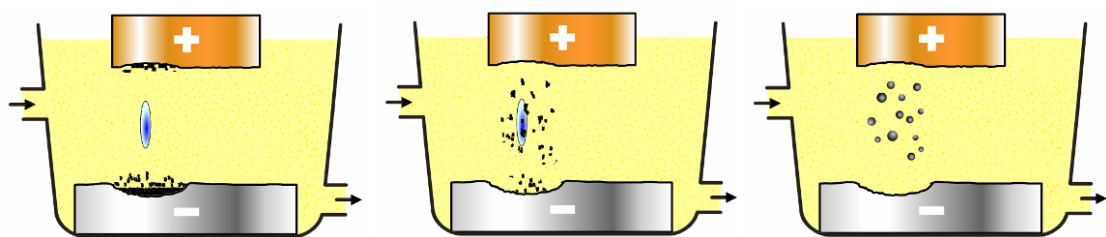


ภาพที่ 2.3

การเกิดการสปาร์คขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน

(ที่มา : <http://www.cours.polymtl.ca/mec4530/AnimEng/Chimie.swf>)

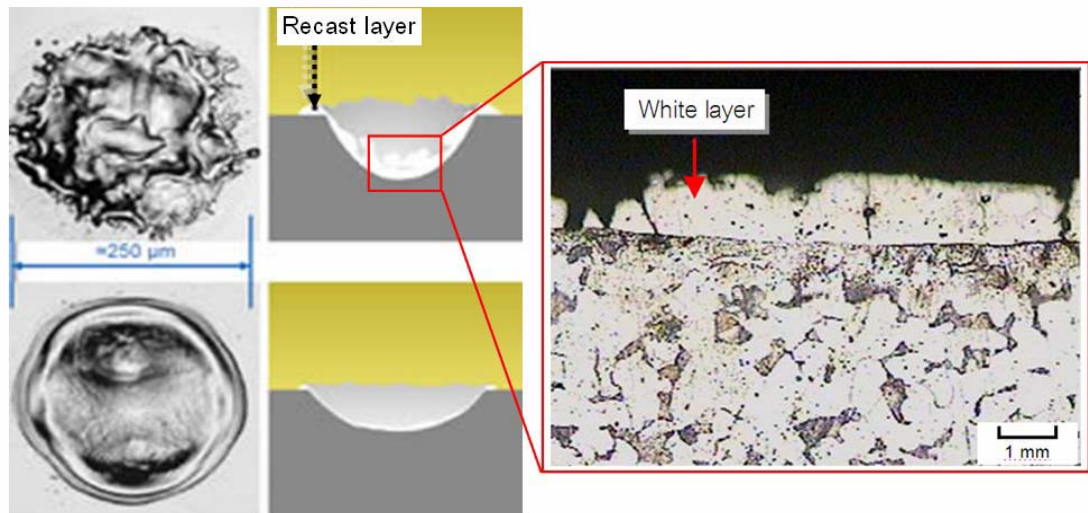
3. การกัดกร่อนของบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานและอิเล็กโทรด (Erosion) เมื่อกระแสถูกตัดลง จะเกิดการกัดกร่อนของผิวชิ้นงานและการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดหลุดออกมา และอุณหภูมิของชิ้นงานและแท่งอิเล็กโทรดจะถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว ด้วยการฉีดของเหลวตัวกลางผ่านเข้าไปยังบริเวณที่เกิดการสปาร์ค เพื่อช่วยในการขจัดเศษเล็ก ๆ และเขม่าที่เกิดจากการสปาร์คให้หลุดออกจากบริเวณพื้นที่การทำงาน



ภาพที่ 2.4

การกัดกร่อนบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานและแท่งอิเล็กโทรด

จากนั้นเศษที่หลุดออกมาจากการสปาร์ค จะเกิดการรวมตัวกันเนื่องจากความร้อนจนกลายเป็นชั้นของแข็งปกคลุมอยู่บนผิวสำเร็จของชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาวเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จึงทำให้ถูกเรียกว่า “ชั้นหลอมสีขาว (White layer)” ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5

ชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจากการกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า

2.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกัดอาร์ค

2.2.1 กระแสไฟฟ้า (Discharge current) และความต่างศักย์วงจรเปิด (Open-circuit voltage)

ความต่างศักย์วงจรเปิด (V_o) ที่ต่างกันระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุและการไหลของกระแสไฟฟ้า (I_p) ในขณะสปาร์คจะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยกระแสไฟฟ้าอาจมีขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ ถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ ทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงมาก โดยอาจสูงถึง $20,000^\circ\text{C}$

2.2.2 เวลาเปิด (On time : T-on) และ เวลาปิด (Off time : T-off)

เวลาเปิด คือ ช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุหรือช่วงเวลาการปล่อยกระแส เมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงานสูงขึ้น จะนำไปสู่การปลดปล่อยพลังงานจนทำให้เกิดการสปาร์คที่ผิวของชิ้นงาน

เวลาปิด คือ ช่วงเวลาที่หยุดการสปาร์คหรือช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสไหลจากอิเล็กโทรดไปที่ชิ้นงาน ทำให้ของเหลวตัวกลางสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนแตกตัวได้

เมื่อค่าของช่วงเวลาการสปาร์คเปลี่ยนไป จะมีผลทำให้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor : τ) เปลี่ยนไปด้วย ตามสมการ (1) ดังนี้

$$\text{ปัจจัยประสิทธิภาพ} = [(\text{เวลาเปิด}) / (\text{เวลาเปิด} + \text{เวลาปิด})] \times 100 \% \quad \dots (1)$$

2.2.3 ของเหลวตัวกลาง (Dielectric fluid)

ในการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) นั้น จำเป็นต้องใช้ของเหลวตัวกลางกั้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ถ้าความต้านทานของของเหลวตัวกลางระหว่างขั้วมีค่าสูง สามารถที่จะทำให้เกิดการสปาร์คด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ รวมทั้งสามารถลดระยะห่างระหว่างขั้วให้แคบลงได้

2.2.3.3 ชนิดของของเหลวตัวกลาง

ของเหลวตัวกลางที่จะใช้กับเครื่อง EDM โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) หรือน้ำบริสุทธิ์ ในสภาวะปกติ น้ำหรือสารละลายน้ำจะมีไอออนผสมอยู่ในปริมาณมาก จึงทำให้มีค่าความต้านทานที่ต่ำ ดังนั้นเวลาที่จะแปรรูปโลหะจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการที่จะทำให้มีค่าความต้านทานสูงขึ้น ด้วยวิธี การต่าง ๆ เช่น วิธีการสับเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เพื่อจับทั้งไอออนบวกและลบออกจากน้ำ

2. สารไฮโดรคาร์บอน ที่นิยมใช้กันมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ น้ำมัน (Oil) น้ำมันก๊าด (Kerosene) น้ำมันจักร (Spindle oil) น้ำมันเครื่องกล (Machine oil) น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) และน้ำมันแร่ (Mineral oil) เป็นต้น

ซึ่งของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ น้ำปราศจากไอออน (De-ionized Water)

2.2.4 วัสดุอิเล็กโทรด (Electrode Material)

การแปรรูปประเภทตัดจะมีเครื่องมือสำหรับตัดขึ้นรูปชิ้นงาน เช่น Cutting tool, End mill เป็นต้น ส่วนการแปรรูปด้วยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ซึ่งเรียกเครื่องมือนี้ว่า “อิเล็กโทรด (Electrode)” ซึ่งอิเล็กโทรดจะมีรูปทรงเหมือนกับชิ้นงานต้นแบบ แต่จะมีรูปทรงตรงกันข้ามกับชิ้นงานที่ถูกแปรรูปด้วยอิเล็กโทรดนั้น ๆ กล่าวคือ ส่วนที่ยื่นออกมาของอิเล็กโทรดจะตรงกับส่วนที่เป็นหลุมลงไปของชิ้นงาน การขึ้นรูปเช่นนี้ถูกเรียกว่า “การขึ้นรูปประเภทถ่ายแบบ”

2.2.4.1 อิเล็กโทรดทองแดง (Copper electrode)

สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ทนทานต่อการสึกกร่อนและทนทานต่อการกัดกร่อน มีความบริสุทธิ์สูงมาก มีลักษณะการจับตัวที่แน่นหนา และมีราคาถูก

อิเล็กโทรดทองแดง มีอัตราการขจัดเนื้องานอยู่ในเกณฑ์ดี และมีอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดสูงกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์

คุณสมบัติทางกายภาพของทองแดง เป็นดังนี้

- จุดหลอมเหลว : 1084 °C
- ความหนาแน่น : 8.94 g/cm³

- สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน : $16.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

2.2.4.2 อิเล็กโตรดกราไฟต์ (Graphite electrode)

สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีแต่น้อยกว่าทองแดง ทนทานต่อการสึกกร่อนและทนทานต่อการกัดกร่อน มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าทองแดง

อิเล็กโตรดกราไฟต์ มีอัตราการขจัดเนื้องานอยู่ในเกณฑ์ดี และมีอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดน้อยกว่าอิเล็กโตรดทองแดง

คุณสมบัติทางกายภาพของกราไฟต์ เป็นดังนี้

- จุดหลอมเหลว : $3,500 ^\circ\text{C}$
- ความหนาแน่น : 2.27 g/cm^3
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน : $7.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

2.3 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece material)

วัสดุที่นำมาแปรรูปด้วยเครื่อง EDM จะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความแข็งของวัสดุไม่เป็นอุปสรรคต่อการแปรรูป เนื่องจากเครื่อง EDM สามารถแปรรูปโลหะพวกเหล็กกล้า (Mild steel), เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) และเหล็กคาร์ไบด์ (Carbide steel) ได้ ซึ่งในการแปรรูปโลหะเหล่านี้ถือเป็นข้อดีของเครื่อง EDM สำหรับวัสดุที่สามารถแปรรูปด้วยเครื่อง EDM ได้ เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ทังสเตน ทองเหลือง โมลิบดีนัม ไททาเนียม แบรเวียม และคาร์ไบด์ เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้เหล็กหล่อเทา และเหล็กเพลาชาวเป็นวัสดุชิ้นงาน โดยมีคุณสมบัติต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย

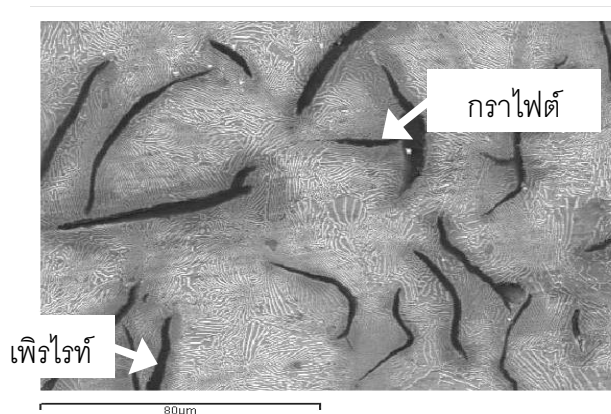
คุณสมบัติ	วัสดุชิ้นงาน	
	เหล็กเพลาชาว	เหล็กหล่อเทา
จุดหลอมเหลว ($^\circ\text{C}$)	1,495	1,260
ความหนาแน่น (g/cm^3)	7.85	7.75
การเหนี่ยวนำความร้อน ($\text{W/(m}^\circ\text{C)}$)	53.661	55
ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (GPa)	400	90

2.2.5.1 ชิ้นงานทดสอบ – เหล็กหล่อเทา

เหล็กหล่อจะเป็นเหล็กที่นิยมใช้งานมากที่สุดในโลหะตระกูลเหล็กทั้งหมด เหล็กหล่อคล้ายกับเหล็กกล้า (Steel) ตรงที่เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่เช่นเดียวกัน เพียงแต่ว่า

ปริมาณคาร์บอนจะมีมากกว่าในเหล็กกล้า คือ ตั้งแต่ 2 - 6.67% คาร์บอน แม้โดยข้อเท็จจริงแล้วโลหะวิทยาว่าด้วยเหล็กหล่อจะสลับซับซ้อนกว่าพวกเหล็กกล้าก็ตาม

เหล็กหล่อเทา เป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมและโครงสร้างใกล้เคียงกับเหล็กดิบ (Pig iron) โดยมีคาร์บอนอยู่ร้อยละ 2.5 - 4 รวมไปถึงธาตุอื่น ๆ เช่น ซิลิกอน ฟอสฟอรัส และแมงกานีส เป็นต้น เหล็กหล่อเทายังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่เหมาะสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมอีกหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูงสามารถกลึงหรือไสได้ง่าย มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและมีความสามารถในการไหล (Fluidity) ดีสามารถหล่อหลอมให้ได้รูปร่างซับซ้อนได้ง่าย มีอัตราการขยายตัวน้อย มีความต้านทานต่อแรงอัดและรับแรงสั่นได้ดี ส่วนลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อเทาจะประกอบไปด้วย เฟอร์ไรต์ และ กราไฟต์ แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของเหล็กหล่อเทา

คุณลักษณะทั่วไป (General Characteristics)

ส่วนผสมทางเคมี (%wt.)	C	Si	Cu	Mn	Cr	Fe
	3.97	1.99	0.20	0.21	0.05	93.44

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

- จุดหลอมเหลว : 1,260 °C
- ความหนาแน่น (Density) : 7.75 g/cm³
- การเหนี่ยวนำความร้อน : 55 W/m°C
- ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น : 90 GPa

2.2.5.2 ชิ้นงานทดสอบ – เหล็กเพลลาขาว (JIS SS400)

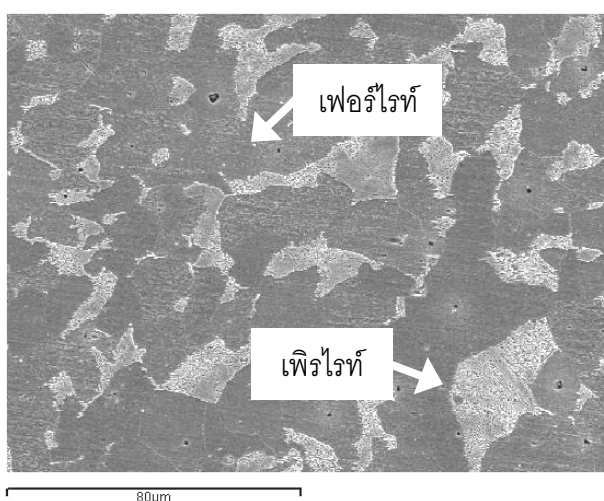
เหล็กเพลลาขาวหรือเหล็กเหนียว ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.2% นอกจากคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย แต่มีผสมอยู่น้อยจนแทบจะไม่มี ความสำคัญ มีคุณสมบัติเหนียวแต่ไม่แข็งแรงมากนัก นำไปอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะบาง ๆ ได้ ง่าย ไม่สามารถนำไปชุบแข็งได้ แต่ถ้าต้องการชุบแข็งต้องใช้วิธีเติมคาร์บอนที่ผิวก่อน เนื่องจากมี คาร์บอนอยู่น้อย เหล็กกล้าชนิดนี้ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป มีคุณสมบัติในการเชื่อมที่ดี สามารถ เชื่อมต่อได้ง่าย ส่วนลักษณะโครงสร้างของเหล็กเพลลาขาวจะประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์ และเพอร์ไลต์เป็น ส่วนใหญ่ แสดงดังภาพที่ 2.2

คุณลักษณะทั่วไป (General Characteristics)

ส่วนผสมทางเคมี (%wt.)	C	Si	Cu	Mn	Cr	Fe
	0.18	0.19	0.01	0.37	0.37	98.82

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

- จุดหลอมเหลว : 1,495 °C
- ความหนาแน่น (Density) : 7.85 g/cm³
- การเหนี่ยวนำความร้อน : 53.661 W/m°C
- ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น : 400 MPa



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของเหล็กเพลลาขาว

2.4 ความเค้นตกค้าง (Residual stress)

ความเค้นตกค้าง คือ ความตึง หรือความกดดันที่ตกค้างอยู่ในวัสดุโดยไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ส่วนใหญ่จะเป็นความเค้นที่เหลืออยู่ระหว่างพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน ซึ่งความเค้นตกค้างเกิดขึ้นจากหลายเหตุผล เช่น จากแรงภายนอก หรือจากการไม่สมดุลของความร้อน เป็นต้น แต่โดยทั่วไปความเค้นตกค้างจะแฝงอยู่ในวัสดุชิ้นงานอยู่แล้ว ไม่ว่าชิ้นงานนั้นจะผ่านหรือไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป เพราะในกระบวนการผลิตสามารถทำให้เกิดความเค้นตกค้างได้เช่นเดียวกัน การที่ความเค้นตกค้างจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นหรือน้อยลง จะขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูปชิ้นงานที่เลือกใช้ ซึ่งการแปรรูปชิ้นงานนั้นมีมากมายหลายวิธี เช่น การเจียร การเจาะ การกลึง และการกัด รวมไปถึงการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) เพราะเป็นกระบวนการแปรรูปที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยตรงต่อพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อเกิดการสปาร์คขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน จะทำให้เกิดการหลอมละลายรวมตัวกันของเศษวัสดุบนพื้นผิวชิ้นงาน เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และถูกทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันด้วยของเหลวตัวกลาง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างบนพื้นผิว (Lee, Rehbach, et al., 2004) โดยความเค้นที่ตกค้างจะเป็นความเค้นแบบตึง ส่งผลทำให้กระบวนการ EDM กลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวและความเค้นตกค้าง (Ekmekçi, Tekkaya, et al., 2002) ส่วนวิธีที่ใช้ในการตรวจวัดค่าความเค้นตกค้างบนพื้นผิว จะไม่สามารถตรวจวัดค่าโดยตรงได้ จึงต้องหาค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีการทางอ้อม โดยอาศัยหลักการ ทฤษฎี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องสำหรับวิธีการที่ใช้ในการหาค่าความเค้นตกค้างมีอยู่หลายวิธี ดังนี้

1. วิธีวิเคราะห์โลหะแบบทำลายชิ้นงานตัวอย่าง ได้แก่ The hole drilling method, The ring core technique, The bending deflection method และ The sectioning method เป็นต้น สำหรับวิธีวิเคราะห์โลหะแบบทำลายชิ้นงานตัวอย่าง เป็นวิธีที่ไม่นิยมนำมาใช้ในการตรวจวัดหาค่าของความเค้นตกค้าง เพราะวิธีเหล่านี้จะต้องมีการทำลายชิ้นงาน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อค่าความเค้นตกค้างจริงได้ ทำให้ค่าที่ได้ อาจไม่ใช่ค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจริง

2. วิธีวิเคราะห์โลหะแบบไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง อันได้แก่

- The X-ray diffraction method เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของวัสดุตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ผลที่ได้จึงสามารถหาค่าประกอบของวัสดุตัวอย่าง ขนาดของผลึก และโครงสร้างผลึก รวมไปถึงความเค้นได้อีกด้วย

- The ultrasonic techniques เป็นเทคนิคที่อาศัยความแปรปรวนจากความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก โดยสามารถแสดงถึงค่าความเค้นที่ตกค้างอยู่ได้

- The magnetic methods เป็นวิธีที่อาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างการทำให้มีสภาพเป็นแม่เหล็ก โดยการเพิ่มสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องมือเฉพาะทาง ซึ่งคุณสมบัติเกี่ยวกับความ

เป็นแม่เหล็ก สามารถศึกษาถึงความแตกต่างของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นได้โดยดูจากการซึมผ่านและเสียงรบกวน

ซึ่งวิธี X-Ray Diffraction เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้ในการตรวจวัดค่าของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นหลอมสีขาวหลังจากการแปรรูปด้วย EDM และเป็นวิธีวิเคราะห์โลหะที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง (Non-destructive method)

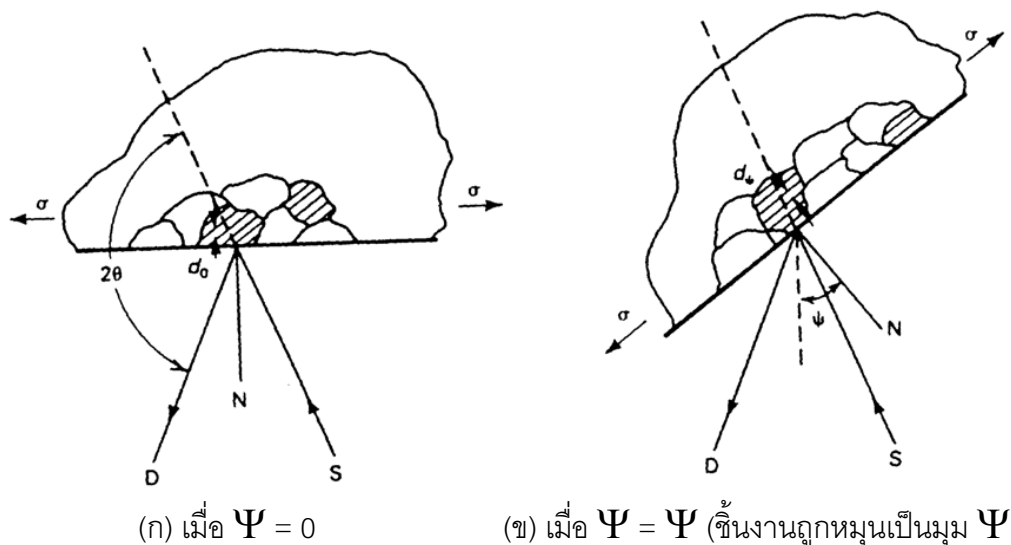
2.5 เทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction ; XRD)

เทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าเทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบบนวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ จากหลักการเบื้องต้นในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L.Bragg ได้นำมาทำการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffractometer) ขึ้นในปี ค.ศ. 1948 และได้รับการพัฒนาจนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน จึงทำให้สามารถวิเคราะห์ประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น จากหลักการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุ ทำให้สามารถบ่งบอกชนิดขององค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ (Elemental analysis) ที่มีอยู่ในวัสดุตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (Crystal structure) ของวัสดุตัวอย่างนั้น ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณคร่าว ๆ ของปริมาณความเป็นผลึก และขนาดของผลึก รวมทั้งสามารถวิเคราะห์หาความเค้นของสารประกอบในวัสดุตัวอย่างได้อีกด้วย (สุกชัย ประเสริฐสกุล, 2548; Heiney, 1996)

2.5.1 หลักการวิเคราะห์หาความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ที่ใช้กันทั่วไปจะใช้ได้อย่างดีกับสมภาวะของ Bragg's Law โดยในการวิเคราะห์สมัยใหม่จะใช้ X-Ray Diffractometer ยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีตัว Detector เป็นตัวรับข้อมูลเพื่อหาค่ามุมเลี้ยวเบนและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา และตัวRecorder จะทำหน้าที่แสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาเทียบกับมุมที่เลี้ยวเบน (2θ) แบบอัตโนมัติ ทำให้สามารถหาความเค้นตกค้างได้ ความจริงการวิเคราะห์หาความเค้นตกค้างของวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน แต่สามารถทำความเข้าใจได้โดยเริ่มจากการ ศึกษาหลักการของการหาความเค้นด้วยเทคนิค X-Ray diffraction ดังภาพที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของลำแสงรังสีเอกซ์ที่มุมองศาการเลี้ยวเบนสูงสุด

(2θ) จากผิวหน้าในตำแหน่งที่แตก ต่างกันของชั้นงาน โดยมีมุม Ψ เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าปกติ กับแนวเส้นตกกระทบและสะท้อน หรือเป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างระนาบการเลี้ยวเบนของแลตทิซปกติกับ ผิวหน้าของชิ้นงาน เมื่อ D เป็นอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์, S คือ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และ N คือ ผิวหน้าปกติ



ภาพที่ 2.14

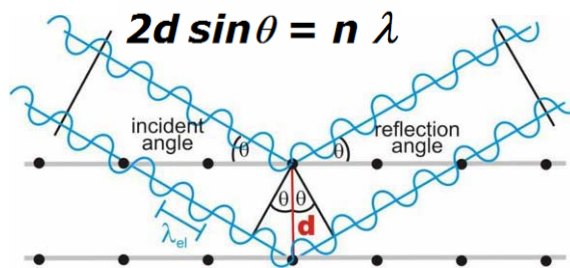
หลักการของการหาความเค้นด้วยเทคนิค X-Ray diffraction (Prevéy, 1986)

การเลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ อธิบายได้ด้วยกฎของแบรกก์ แสดงดังสมการ (3)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots (3)$$

โดยที่ n เป็นลำดับของการสะท้อน, λ เป็นความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์, d เป็น ระยะห่างระหว่างระนาบ และ θ เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลัง พิจารณา ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ ในกฎของแบรกก์ สำหรับรังสีเอกซ์ จะถูกสร้างขึ้นจากโลหะที่อยู่ตรงปลายของท่อยิงรังสีเอกซ์ ส่วนระยะห่างระหว่างระนาบ (d) เมื่อ แปรเปลี่ยนจะมีผลทำให้มีค่าเท่ากันในมุมเลี้ยวเบน (2θ) แม้จะเลื่อนตำแหน่ง

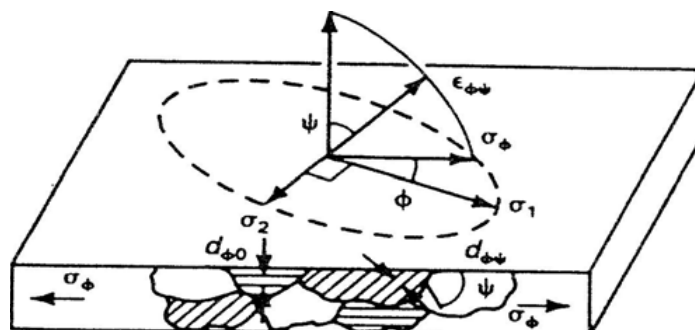
ภาพที่ 2.9 (ก) แสดงชิ้นงานในตำแหน่งที่ $\Psi = 0$ โดยนำเสนอความเค้นแบบดิ่งในชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่า Poisson's ratio ของการหดตัว ทำให้ลดระยะห่างระหว่างระนาบและเพิ่มมุมเลี้ยวเบนขึ้นเล็กน้อย แต่ถ้าชิ้นงานถูกหมุนเป็นมุม Ψ ดังภาพที่ 2.9 (ข) ความเค้นแบบดิ่งในผิวหน้าทำให้เพิ่มระยะห่างระหว่างระนาบและลดค่ามุมเลี้ยวเบนน้อยลง เมื่อเทียบกับสภาวะที่ปราศจากความเค้น เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งมุมของการเลี้ยวเบนสูงสุด สำหรับตำแหน่งที่แตกต่างกันน้อยสุด 2 มุมของชิ้นงาน (Ψ) สามารถคำนวณค่าความเค้นในผิวหน้าของชิ้นงานในแนวของการเลี้ยวเบน



ภาพที่ 2.15

กฎของแบรกก์ (Bragg's Law)

การวิเคราะห์หาความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction จะถูกจำกัดพื้นที่บนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยการกระจายของความเค้นสามารถอธิบายได้ด้วยอันดับของความเค้น σ_1 และ σ_2 ที่ยังคงอยู่ในระนาบของผิวหน้ากับส่วนที่ไม่มีความเค้นโดยสมมติให้ตั้งฉากกับผิวหน้า ($\sigma_3 = 0$) อย่างไรก็ตาม ส่วนประกอบของความเครียดที่ตั้งฉากกับผิวหน้า (ϵ_3) ที่เหลืออยู่ ที่ทำให้ได้ Poisson's ratio ของการหดตัว ที่เป็นสาเหตุของอันดับทั้งสองของความเค้น ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.16

ระนาบของแบบจำลองความเค้นแบบยืด (Prevéy, 1986)

ความเครียด ($\epsilon_{\phi\psi}$) ในทิศทางที่กำหนดโดยมุม ϕ และมุม ψ คือ

$$\epsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2) \right] - \left[\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad \dots (4)$$

เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น, ν เป็น Poisson's ratio และ α_1 กับ α_2 เป็นมุมโคไซน์ของเวกเตอร์ความเครียด

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \cos\phi \sin\psi \\ \alpha_2 &= \sin\phi \sin\psi \end{aligned} \quad \dots (5)$$

แทนค่า α_1 กับ α_2 ในสมการที่ (4) ได้เป็น

$$\epsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi \right] - \left[\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad \dots (6)$$

ถ้ามุม ψ เท่ากับ 90 องศา ทำให้เวกเตอร์ความเครียดที่ตั้งอยู่ในระนาบของผิวหน้า และส่วนประกอบของความเค้นผิวหน้า (σ_ϕ) ได้ดังสมการที่ (7)

$$\sigma_\phi = (\sigma_1 \cos^2 \phi) + (\sigma_2 \sin^2 \phi) \quad \dots (7)$$

จากนั้นแทนค่า σ_ϕ ในสมการที่ (6) จะได้

$$\epsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E} \sigma_\phi \sin^2 \psi \right] - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right) (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad \dots (8)$$

สมการที่ (8) แสดงความเค้นผิวหน้า (σ_ϕ) ในมุม ψ และความเครียด (ϵ) ที่มุม ϕ และ ψ ซึ่งเป็นความเค้นที่สำคัญที่สุดในผิวหน้า

ถ้า $d_{\phi\psi}$ เป็นระยะห่างระหว่างระนาบแลตทิซโดยถูกวัดที่มุม ϕ และ ψ ความเครียดสามารถแสดงให้เข้าใจง่ายได้ด้วยเทอมของการเปลี่ยนแปลงสมการเส้นตรงของผลึกแลตทิซ ดังสมการที่ (9)

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad \dots (9)$$

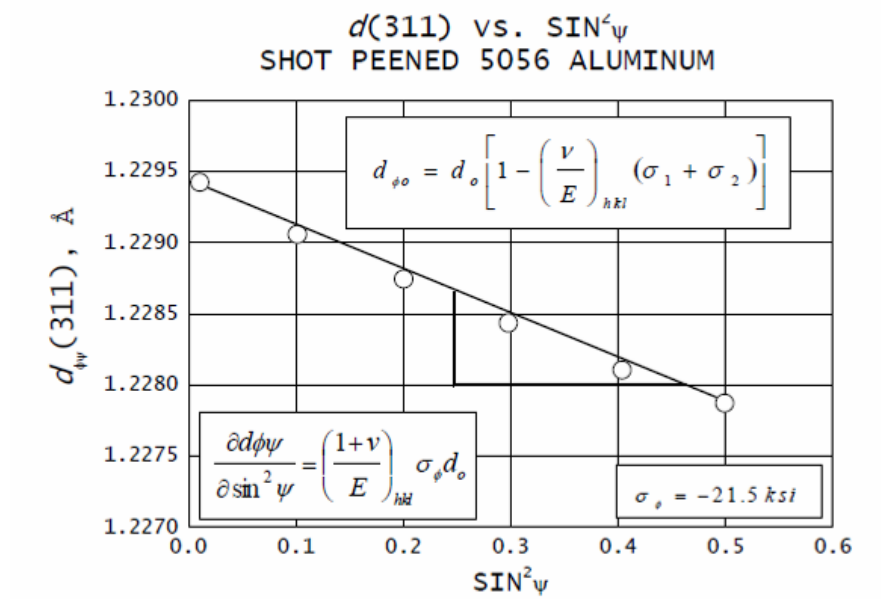
เมื่อ d_0 เป็นระยะห่างระหว่างระนาบที่ปราศจากความเค้น และแทนค่าในสมการที่ (8) ได้เป็น

$$\frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} \sin^2 \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \right] \quad \dots (10)$$

หรือ

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \sin^2 \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} d_0 (\sigma_1 + \sigma_2) + d_0 \right] \right] \quad \dots (11)$$

สมการที่ (11) อธิบายถึงที่มาของความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบกับความเค้นในผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่ระยะห่างระหว่างระนาบ ($d_{\phi\psi}$) เป็นฟังก์ชันเส้นตรงของ $\sin^2 \Psi$ ดังภาพที่ 2.12 ที่แสดงถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{311}) ต่อมุม Ψ ในช่วง 0 ถึง 45 องศา สำหรับการ Shot Peen อะลูมิเนียม 5056-O ซึ่งมีความเค้นที่ผิวหน้า -148 เมกกะปาสคาล (-21.5 ksi) โดยเส้นตรงที่ได้มาจากวิธีการ least squares regression



ภาพที่ 2.17

ค่า d_{311} กับ $\sin^2 \Psi$ สำหรับการ Shot Peen อะลูมิเนียม 5056-O (Prevéy, 1986)

เมื่อ $\sin^2 \Psi$ มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ได้

$$d_{\phi 0} = d_0 - \left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} d_0 (\sigma_1 + \sigma_2) = d_0 \left[1 - \left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad \dots (12)$$

และสามารถคำนวณหา Slope ของสมการเส้นตรงได้ด้วยสมการ (13)

$$\frac{\partial d_{\phi \Psi}}{\partial \sin^2 \Psi} = \left(\frac{1 + \nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \quad \dots (13)$$

ปรับปรุงได้เป็นสมการหาความเค้น (σ_{ϕ}) :

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_0} \left(\frac{\partial d_{\phi \Psi}}{\partial \sin^2 \Psi} \right) \quad \dots (14)$$

เมื่อ σ_{ϕ} คือ ความเค้นผิวหน้า

E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

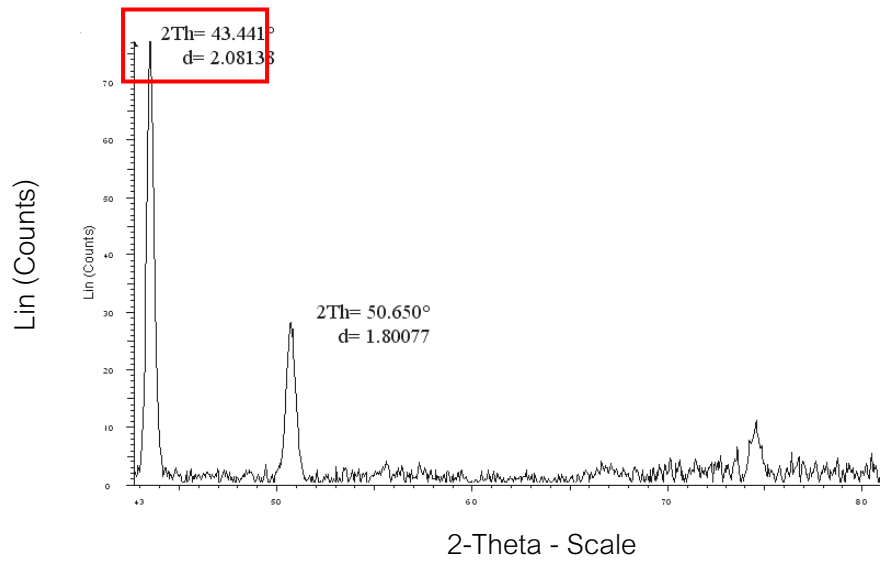
ν คือ Poisson's ratio

d_0 คือ ระยะห่างระหว่างระนาบที่ปราศจากความเค้น

$d_{\phi\psi}$ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบแลตทิซโดยถูกวัดที่มุม ϕ และ ψ

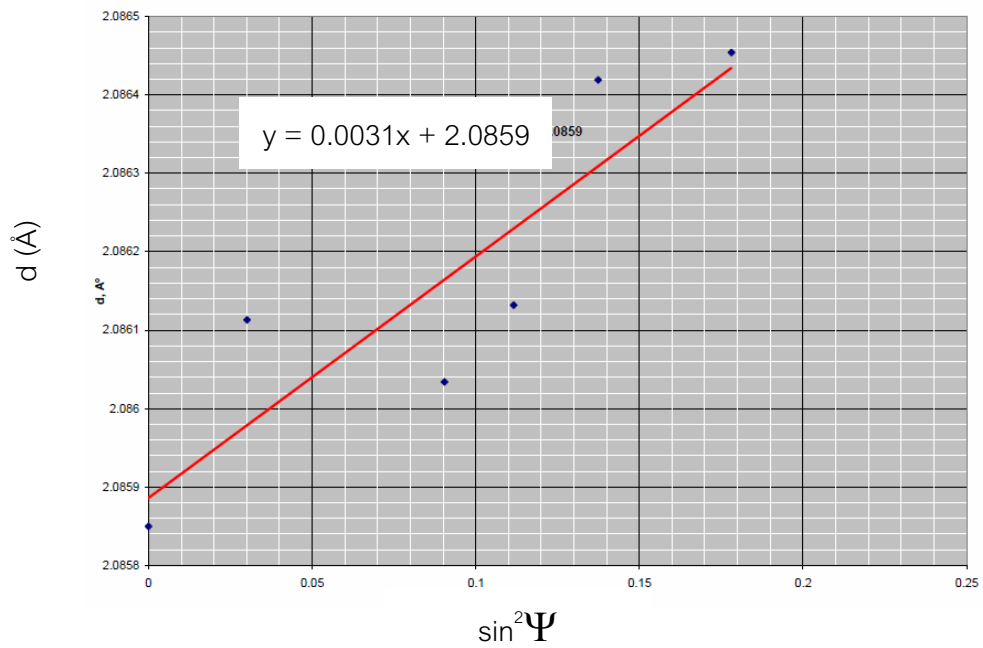
2.5.2 การคำนวณหาความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction

การวิเคราะห์หาความเค้นตกค้าง จะต้องอาศัยข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชิ้นงานเป็นหลัก เพื่อใช้ในการกำหนดแนวทางและเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาความเค้นตกค้างในวัสดุชิ้นงาน ได้แก่ Young's modulus (E) Poisson's ratio (ν) และมุม Ψ เป็นต้น สำหรับชิ้นงานที่จะใช้ในการวิเคราะห์ต้องมีผิวหน้าเป็นระนาบหรือเรียบ และจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 3.5 เซนติเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้เครื่อง XRD ได้รับความเสียหายจากการชนกับชิ้นงาน การทดสอบจะดำเนินการไปตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ รังสีเอกซ์จะถูกยิงจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไปยังชิ้นงานตรวจสอบ โดยยิงลึกลงไปจากผิวหน้าพอประมาณ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดด้วย Detector และข้อมูลที่ได้อาจจะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นของรังสีเอกซ์ หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเค้นที่มุมต่าง ๆ จะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า "Diffractogram" แสดงดังภาพที่ 2.13 ซึ่งประกอบด้วยพีคต่าง ๆ โดยแต่ละพีคจะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ของสมการของ Bragg จะสามารถหาความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (d) ในแต่ละมุม Ψ ได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเส้นตรงระหว่างค่า d และ $\sin^2\Psi$ ดังภาพที่ 2.14 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแบบแผนพฤติกรรมของค่า diffraction spacing (d) และ $\sin^2\Psi$ ที่ได้จากการใช้สมการ (8) จากนั้นจึงสามารถคำนวณหาความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นได้ด้วยการใช้สมการ (12) ซึ่งหน่วยของความเค้นที่ได้จะเป็นเมกะปาสคาล (MPa) (Anderoglu, 2004) โดยสามารถศึกษาวิธีการคำนวณอย่างละเอียดได้ในภาคผนวก จ ซึ่งเป็นตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค XRD



ภาพที่ 2.18

ความหนาแน่นของรังสีเอกซ์ในแต่ละมุม Ψ (Anderoglu, 2004)



ภาพที่ 2.19

กราฟเส้นตรงระหว่างค่า diffraction spacing และ $\sin^2 \Psi$ (Anderoglu, 2004)

2.6 รอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-cracks)

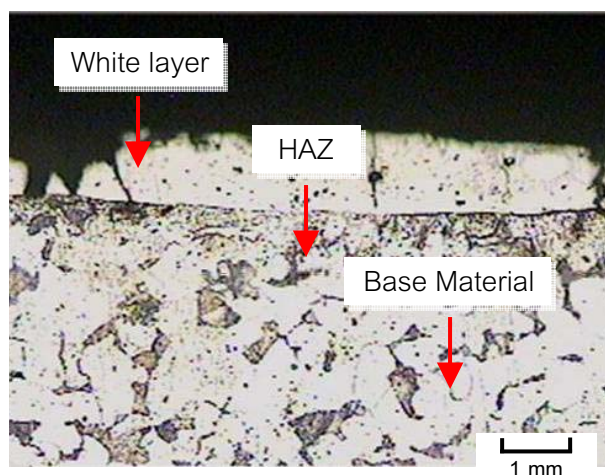
อิทธิพลจากการที่ได้รับความร้อนและความเย็นอย่างรวดเร็วจากกระบวนการ EDM ทำให้เกิดเป็นชั้นหลอมสีขาวปกคลุมบนผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งชั้นหลอมสีขาวจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างจากชิ้นงาน และช่วยทำให้ผิวหน้ามีความแข็งแรง ทนทานต่อการกัดกร่อนและสึกกร่อน แต่อาจจะทำให้เกิดช่องว่าง รอยแตกร้าวขนาดเล็ก หรือมีความเค้นเพิ่มขึ้นในผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งรอยแตกร้าวเป็นผลกระทบที่เกิดจากการ EDM ที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากรอยแตกร้าวเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพลดลง

การเกิดรอยแตกร้าวสามารถอธิบายได้ด้วยความเค้นที่เกิดจากความร้อน (Thermal stress) และความเค้นแบบดึง (Tensile stress) ภายในชิ้นงาน ซึ่งความเค้นที่เกิดจากความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กโตรดปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการสปาร์คกับชิ้นงาน ส่วนความเค้นแบบดึงจะเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของแต่ละชิ้นงานที่สามารถจะทนได้ เมื่อ EDM ทำให้เกิดการหลอมละลายรวมตัวกันระหว่างอนุภาคที่หลุดออกกับชิ้นงาน แล้วถูกทำให้เย็นตัวกลายเป็นชั้นหลอมสีขาว ทำให้เกิดเป็นความเค้นสะสมในชั้นหลอมสีขาว ซึ่งความเค้นสะสมเกิดจากความเค้นที่เกิดจากความร้อนที่ได้รับจากการ EDM รวมกับความเค้นที่เหลือค้างอยู่ในชิ้นงาน เมื่อความเค้นสะสมมีค่ามากเกินไปเกินกว่าความเค้นดึงที่จะสามารถทนได้ จนเกิดเป็นรอยแตกร้าวขึ้น (บุญธรรม ลิ้มปิยพันธ์, 2544; พีรวิชญ์ พิมพ์สวัสดิ์ และวีระพงศ์ ต้นหัน, 2544; วีระศักดิ์ บุตรเถื่อน, 2545) ดังภาพที่ 2.15 แสดงถึงรอยแตกร้าวที่เกิดจากการกัดเหล็กเพลลาขาวในน้ำมันแร่ โดยใช้อิเล็กโตรดทองแดง ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์ เวลาเปิด 300 ไมโครวินาที ซึ่งรอยแตกร้าวนี้มีขนาดเล็กมากไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องมองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope : SEM) เท่านั้น หน่วยที่ใช้วัดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เรียกว่า ความหนาแน่นของรอยแตกร้าว (O'Brien, Taylor, et al., 2003) ซึ่งหน่วยการวัดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. จำนวนของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (Numerical crack density, Cr.Dn) โดยแสดงหน่วยเป็นจำนวนรอยแตกร้าวต่อตารางมิลลิเมตร
2. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (Surface crack density, Cr.S.Dn) โดยจะแสดงหน่วยเป็นไมโครเมตรต่อตารางมิลลิเมตร ($\mu\text{m}/\text{mm}^2$)
3. ความยาวเฉลี่ยของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Mean crack Length, Cr.Le) ซึ่งหมายถึงความยาวของรอยแตกร้าวขนาดเล็กเฉลี่ย ในพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด โดยจะแสดงหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)

2.7 ชั้นหลอมสีขาว (White layer) และชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจากการ EDM

ชั้นของแข็งที่เกิดจากการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส แล้วเกิดการหลอมละลายรวมตัวกันระหว่างอนุภาคของวัสดุทั้งสอง จากนั้นจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยของเหลวตัวกลาง (Dielectric liquid) จนกลายเป็นชั้นของแข็งปกคลุมอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะเนื้อเป็นสีขาวเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ทำให้ถูกเรียกว่า “ชั้นหลอมสีขาว (White layer)” (Ekmekci;2007, Tung;1998) โดยส่วนใหญ่การเกิดของชั้นหลอมสีขาว จะขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลวตัวกลาง และวัสดุชิ้นงานเป็นหลัก (Ramasawmy, Blunt and Rajurkar;2005) เนื่องจากชั้นหลอมสีขาวเป็นชั้นโลหะที่ประกอบขึ้นจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์เป็นหลัก และออสเทนไนท์ แล้วถูกละลายจนกลายเป็นคาร์ไบด์ (Bormann;1991) ทำให้ในชั้นหลอมสีขาวนี้เต็มไปด้วยคาร์บอนเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะนำไปสู่คุณสมบัติความแข็งมากของชั้นโลหะใหม่นี้ (Bormann;1991, Mamalis, Vosniakos, et al.;1988, Mamalis, Vosniakos, et al.;1987) รวมไปถึงตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการ EDM ปัจจัยเหล่านี้เป็นผลทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) จากการ EDM ซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบได้ดังนี้ คือ บริเวณชั้นหลอมสีขาว (White layer) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการ EDM (Heat affect zone, HAZ) และวัสดุพื้นฐานที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการ EDM (Base materials) (Kruth, Stevens, et al.;1995) ดังภาพที่ 2.25 ที่แสดงลักษณะชั้นหลอมสีขาวและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวของเหล็กเพลลาขาว เมื่อ EDM ในน้ำมันแร่



ภาพที่ 2.25 ลักษณะชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจากการกัดเหล็กเพลลาขาวในน้ำมันแร่

2.8 วรรณกรรมปริทรรศน์

คุณภาพของผิวงาน EDM สามารถพิจารณาได้จากความหยาบของผิว ชั้นหลอมสีขาว การเกิดรอยแตกร้าว การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบนผิวหน้าและใต้ผิวหน้า ความแข็ง และความเค้นตกค้าง งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นเพียงเพื่อให้ได้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด และมีอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดต่ำสุด โดยขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ปัจจัยในการ EDM อย่างเหมาะสม (Hasçalik and Çaydaş, 2007) ปัจจัยที่มีส่วนสำคัญต่อคุณภาพของผิวสำเร็จ เช่น กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด เวลาปิด ขั้วอิเล็กโทรด วัสดุชิ้นงาน และอิเล็กโทรด ของเหลวตัวกลาง รวมถึงลักษณะของการสปาร์ค (Normal Short and Concentration) แม้กระทั่งขนาดของอิเล็กโทรด (Lee, Hsu, et al., 2004) ผลกระทบที่ตามมาคือ อาจทำให้ชิ้นงานเกิดความล้า หรือมีความทนทานต่อการกัดกร่อน และความต้านทานต่อการสึกหรอ (Huang, Hsu and Yao, 2004) มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาการกัดวัสดุชิ้นงานหลายชนิดด้วยไฟฟ้า โดย Lee และ Tai (Lee and Tai, 2003) ได้เสนอว่าวัสดุชิ้นงานที่มีค่าการเหนี่ยวนำความร้อนสูง จะช่วยลดความหนาแน่นของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้ และทำให้ชั้นหลอมสีขาวมีความหนาน้อย โดยเปรียบเทียบระหว่างวัสดุชิ้นงาน D2 และ H13 (Ghanem, Braham, et al., 2003) ส่วนความแข็งและองค์ประกอบของวัสดุชิ้นงานจะมีผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวเช่นกัน นั่นคือ รอยแตกร้าวจะมีโอกาสเกิดขึ้นสูง เมื่อชั้นหลอมสีขาวมีความแข็งสูง (Rebelo, 1998; Mamalis, 1988) และสามารถอธิบายได้ด้วยโครงสร้างของชั้นหลอมสีขาวและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาว (Lim, Lee, et al., 1991) สำหรับของเหลวตัวกลางมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของของเหลวตัวกลางต่อการ EDM โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำกับน้ำมัน ซึ่งการสปาร์คในน้ำจะทำให้ได้อัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่า แต่ให้อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมัน (Jeswani and Basu, 1979) ส่วนชั้นหลอมสีขาวจะมีชั้นคาร์บอนเพิ่มขึ้น จนมีโครงสร้างเป็นเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) เมื่อ EDM ในน้ำมัน ส่วนน้ำจะทำให้เกิดชั้นที่ปราศจากคาร์บอน และมีโครงสร้างเป็นเดนดริตริก (Kruth, Stevens, et al., 1995) มีผลทำให้ผิวหน้าแข็งขึ้นและทนทานต่อการกัดกร่อน (Bai and Koo, 2006) สำหรับชิ้นงานไททาเนียมจะพบชั้นหลอมสีขาวประกอบด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เมื่อใช้น้ำมันก๊าด แต่น้ำจะทำให้เกิดชั้นไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) แพร่กระจายบนผิวหน้าชิ้นงาน (Leão and Pashby, 2004) สำหรับการเกิดรอยแตกร้าว เมื่อ EDM ในน้ำจะมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมัน (Kruth, 1995; Ekmekci, 2005) ซึ่งรอยแตกร้าวสามารถเกิดได้ทั้งระหว่างกระบวนการและหลังจากกระบวนการ เนื่องจากมีความเค้นตกค้างเกินจากที่ผิววัสดุจะสามารถทนได้ (Lee, Hsu, et al., 2004) Kruth และ Bleys (Kruth and Bleys, 2000) ได้ศึกษาพบว่าค่าความเค้นตกค้างจะมีผลไปถึงผิวใต้ชั้นหลอมสีขาวด้วย จากการศึกษาของ Ghanem และคณะ (Ghanem, Braham, et al., 2003) พบว่า โครงสร้างมาร์เทนไซต์ของชั้นหลอมสีขาวจะมีผลต่อความแข็ง และความเค้นที่ตกค้างจะเป็นแบบดิ่ง ลักษณะโครงสร้างจะเปลี่ยนไป

เนื่องจากปัจจัยตัวแปรของการ EDM ด้วย (Ekmekci, Elkoca, et al., 2005) เวลาเปิดจะเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรอยแตกร้าวและความเค้นตกค้างมากที่สุด (Lin, 1998) เมื่อใช้เวลาเปิดน้อย ๆ สามารถทำให้ลดความเค้นและการเกิดรอยแตกร้าวบนผิวชิ้นงานได้ (Lee, Rehbach, et al., 2004; Lee, Hsu, et al., 2004; Lee and Tai, 2003) ส่วนกระแสไฟฟ้า Gripenberg (Gripenberg, Siiriäinen, et al., 2008) ได้ศึกษาผลกระทบของการ EDM ต่อความเค้นตกค้างบนพื้นผิว พบว่า ความแรงของพลังงานที่ใช้การแปรรูปด้วย EDM มีอิทธิพลต่อความเค้นตกค้างในลักษณะแปรผันตาม แต่สำหรับของเหลวตัวกลางและวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด จากการศึกษานี้ของ Bülent (Ekmekçi, Tekkaya, et al., 2002) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยทั้งสองต่อโครงสร้างชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจาก EDM โดยใช้อิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน 2 ชนิด (ทองแดง และกราฟไฟต์) และของเหลวตัวกลางต่างชนิดกัน (น้ำมันก๊าด และน้ำปราศจากไอออน) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่า ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าของเหลวตัวกลางและวัสดุอิเล็กโทรดมีผลกระทบต่อการเกิดความเค้นตกค้างในชั้นหลอมสีขาว เนื่องจากความเค้นตกค้างที่กระจายตัวอยู่บนผิวงาน EDM ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์ต่อกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ส่วนใหญ่เป็นการทดลองการกัดอาร์คขึ้นงานเหล็กหล่อเทาและเหล็กเพลลาขาวด้วยไฟฟ้า โดยใช้กราฟไฟต์และทองแดงเป็นวัสดุอิเล็กโตรด และมีของเหลวตัวกลางเป็นน้ำปราวจากไอออนและน้ำมัน ค่าตัวแปรที่ใช้ในการกัดอาร์ค กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.1 เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาเปิด ต่อความเค้นตกค้างและรอยแตกร้าวในชิ้นหลอมสีขาว โดยใช้กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง 4 ถึง 25 แอมแปร์ เนื่องจากเป็นช่วงที่กระแสไฟฟ้ามีผลทำให้การเกิดรอยแตกร้าวมีแนวโน้มลดลง (Lee and Tai, 2003; Hasçalık and Çaydaş, 2007; Lee, Hsu, et al., 2004) ส่วนเวลาเปิดและเวลาปิดที่ใช้ คือ 9 และ 300 ไมโครวินาที โดยที่ปัจจัยประสิทธิภาพจะมีค่าเท่ากับ 0.5 สำหรับเวลาเปิดที่น้อยกว่า 12 ไมโครวินาที จะช่วยลดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้ แต่ถ้ามีค่าสูงกว่าจะทำให้รอยแตกร้าวมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น (Lee, Hsu, et al., 2004) และความต่างศักย์วงจรเปิดใช้ที่ 250 โวลต์ จึงทำให้พลังงานในการ EDM มีค่าสูง จนส่งผลทำให้การสปาร์คระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเกิดขึ้นได้ดี และสมบูรณ์กว่าเมื่อเทียบกับความต่างศักย์วงจรเปิดต่ำ ๆ (Kao and Shih, 2006)

ตารางที่ 3.1

เงื่อนไขที่ใช้ในการกัดอาร์คขึ้นงานด้วยไฟฟ้า (EDM)

เงื่อนไขการกัดขึ้นงานด้วยไฟฟ้า	
ขั้วอิเล็กโตรด	ขั้วประจุลบ (-)
ความต่างศักย์วงจรเปิด (V)	250
กระแสไฟฟ้า (A)	4, 12, 25
เวลาเปิด (μ s)	9, 300
ปัจจัยประสิทธิภาพ (%)	50

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุชิ้นงาน

วัสดุที่ชิ้นงานใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เหล็กหล่อเทา และเหล็กเพลลาขาว เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดจะมีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของคาร์บอน (%wt) ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2

ส่วนประกอบทางเคมี (%wt.) ของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย

ชิ้นงาน ทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (%wt.)					
	C	Si	Cu	Mn	Cr	Fe
เหล็กเพลลาขาว	0.18	0.19	0.01	0.37	0.37	98.82
เหล็กหล่อเทา	3.97	1.99	0.20	0.21	0.05	93.44

3.2.2 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องจักรของบริษัทชาร์มิลล์เทคโนโลยี จำกัด (Charmilles Technologies.,Ltd) รุ่น FORM 2-LC แสดงดังภาพที่ 3.1 ซึ่งสามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1.5 ถึง 75 แอมแปร์, ปรับค่าความต่างศักย์วงจรเปิดได้ 90 และ 250 โวลต์ และปรับค่าเวลาเปิด และเวลาปิด ได้ตั้งแต่ 2 ถึง 1600 ไมโครวินาที



ภาพที่ 3.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า รุ่น FORM 2-LC

3.2.3 วัสดุอิเล็กโตรด

วัสดุอิเล็กโตรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ทองแดงและกราไฟต์ เนื่องจากเป็นอิเล็กโตรดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม และเพื่อต้องการศึกษาถึงผลปริมาณคาร์บอนที่ต่างกันของอิเล็กโตรดทั้งสองที่มีผลต่อการเกิดรอยแตกร้าว

ตารางที่ 3.3 สมบัติทางกายภาพของอิเล็กโตรดทองแดง และกราไฟต์

	Thermal conductivity (W/m-K)	melting point (°C)	electrical conductivity (Ω -m) ⁻¹
ทองแดง	398	1,084	6.0×10^7
กราไฟต์	95	3,500	3×10^4

3.2.4 วัสดุอิเล็กโตรดของเหลวตัวกลาง

ของเหลวตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ น้ำบริสุทธิ์ (De-ionized Water) และน้ำมันแร่ของ บริษัท เซลล์แห่งประเทศไทย จำกัด เกรด Shell EDM Fluid 2A ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.3 เพื่อศึกษาผลของของเหลวตัวกลาง ที่มีต่อชั้นหลอมสีขาวและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 3.3

คุณสมบัติของของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการวิจัย

คุณสมบัติ	ของเหลวตัวกลาง	
	น้ำบริสุทธิ์	น้ำมันแร่
สูตรทางเคมี	H ₂ O	CH ₄
ความหนืด ที่ 40°C (cSt)	0.6531	2.5
ความหนาแน่น ที่ 15°C (gm/cc)	0.995	0.789
การเหนี่ยวนำความร้อน (W/m°C)	0.58	0.04

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ทำการทดลองตามเงื่อนไขที่ใช้ในการกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้าในของเหลวตัวกลาง 2 ชนิด คือ น้ำบริสุทธิ์และน้ำมันแร่เกรด EDM Fluid 2A โดยกัดชิ้นงานลึก 0.2 มิลลิเมตร ใช้กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์

เวลาเปิด 300 ไมโครวินาที เวลาปิด 300 ไมโครวินาที และความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการอบคลายความเค้นกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้น

3.3.2 พิจารณาปริมาณความเค้นตกค้างในชั้นหลอมสีขาว กับความสัมพันธ์ของการเกิดรอยแตกร้าว โครงสร้างของชั้นหลอมสีขาว และปริมาณคาร์บอนที่แพร่กระจายในชั้นหลอมสีขาว โดยทดลองจาก

1. ของเหลวตัวกลางน้ำมันแร่เปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กหล่อ
2. ของเหลวตัวกลางน้ำบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กหล่อ
3. ของเหลวตัวกลางน้ำมันแร่เปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กเพลาชาว
4. ของเหลวตัวกลางน้ำบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กเพลาชาว

3.3.3 จากผลสรุปในขั้นตอนที่ 5 พิจารณาข้อได้เปรียบเมื่อใช้ของเหลวตัวกลางเป็นน้ำบริสุทธิ์ และวัสดุชิ้นงานที่เป็นเหล็กเพลาชาว (คาดว่าจะเกิดความเค้นตกค้างและรอยแตกร้าวน้อย) เปรียบเทียบกับของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงานโดยทั่วไป โดยพิจารณาจาก

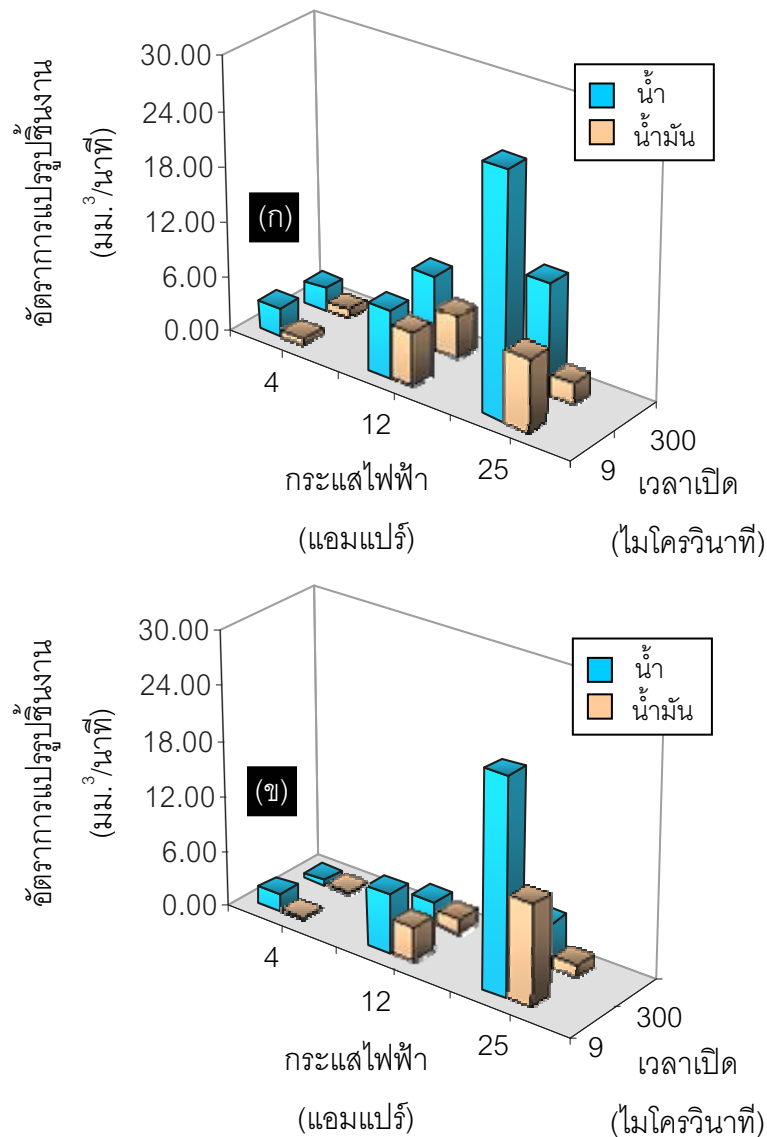
1. อัตราการแปรรูปชิ้นงาน (MRR)
2. ความหยาบผิว (Surface roughness)
3. ความเค้นตกค้าง (Residual stress)
4. รอยแตกร้าวในชั้นหลอมสีขาว (Cracks)
5. ลักษณะของโครงสร้างภายในและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาว (White layer)

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการอภิปราย

4.1 การศึกษาถึงผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงาน ต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงาน

การทดลองได้ทำในน้ำบริสุทธิ์และน้ำมันแร่ เพื่อศึกษาผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงาน ที่มีต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงาน จากภาพที่ 4.4 (ก) แสดงให้เห็นถึงอัตราการแปรรูปชิ้นงานของการกัดชิ้นงานเหล็กหล่อภายใต้เงื่อนไขควบคุมการ EDM ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 4, 12 และ 25 แอมแปร์ และเวลาเปิด 9 กับ 300 ไมโครวินาที โดยใช้ของเหลวตัวกลางน้ำบริสุทธิ์และน้ำมันแร่ พบว่า เมื่อกำหนดให้เวลาเปิดคงที่ น้ำบริสุทธิ์จะเป็นของเหลวตัวกลางที่ทำให้ได้อัตราการแปรรูปชิ้นงานที่สูงกว่าน้ำมันแร่ และเมื่อพิจารณาในกรณีที่ใช้ของเหลวตัวกลางชนิดเดียวกัน เวลาเปิดที่มีค่าน้อยและกระแสไฟฟ้าสูง จะทำให้อัตราการแปรรูปชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนภาพที่ 4.4 (ข) แสดงให้เห็นถึงอัตราการแปรรูปชิ้นงานของเหล็กเพลาชาว ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเช่นเดียวกับเหล็กหล่อ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้น้ำบริสุทธิ์ทำการกัดชิ้นงานได้เร็วกว่าน้ำมันแร่ เพราะน้ำบริสุทธิ์มีค่าการเหนี่ยวนำความร้อนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ (Chow, Yang, et al.;2008) เนื่องจากเมื่อเกิดการ EDM ระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรดจะทำให้เกิดความร้อนที่สูงมาก เมื่อของเหลวตัวกลางมีค่าการเหนี่ยวนำความร้อนสูง ทำให้สามารถกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดี อุณหภูมิจึงมีค่าลดลง การหลอมละลายรวมตัวกันจนกลายเป็นชั้นหลอมสีขาวนั้นเกิดขึ้นได้ช้าลง ซึ่งมีผลทำให้สามารถกัดงานได้เร็วขึ้นหรือมีอัตราการแปรรูปชิ้นงานสูงนั่นเอง ส่วนเหล็กหล่อจะมีอัตราการแปรรูปชิ้นงานมากกว่าเหล็กเพลาชาว เหตุผลเนื่องจากเหล็กหล่อเป็นวัสดุที่มีค่าการเหนี่ยวนำความร้อนที่สูงกว่าเหล็กเพลาชาว (Lee and Tai;2003, Lim, Lee, et al.;1991) แต่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กเพลาชาว (Leão and Pashby;2004) จึงทำให้แรงที่เกิดจากการสปาร์คมีความเสถียรสูง ซึ่งมีผลทำให้อัตราการแปรรูปชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.4 อัตราการแปรรูปขึ้นงานของขึ้นงาน (ก) เหล็กหล่อ และ (ข) เหล็กเพลลาขาว

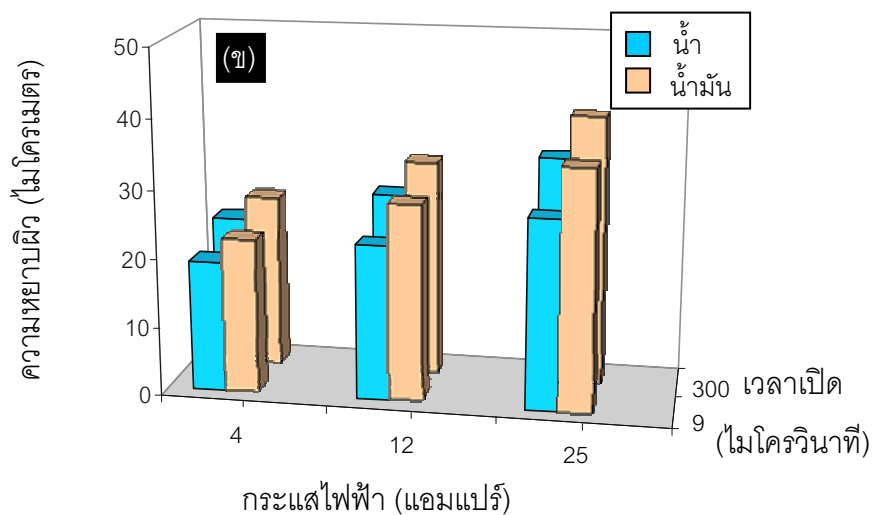
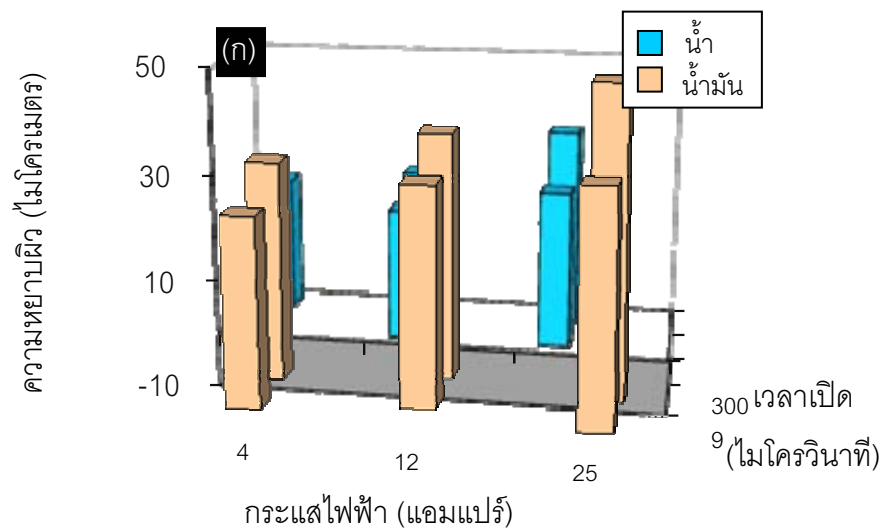
4.2 การศึกษาถึงผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุขึ้นงาน ต่อความหยาบผิวเฉลี่ย

ภาพที่ 4.5 (ก) และ 4.5 (ข) แสดงถึงค่าความหยาบผิวของขึ้นงานเหล็กหล่อและเหล็กเพลลาขาวหลังการกัดด้วยไฟฟ้าในน้ำบริสุทธิ์และน้ำมันแร่ ภายใต้เงื่อนไขควบคุมการ EDM ที่กำหนดไว้ข้างต้น พบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าและเวลาเปิด ทำให้ความหยาบผิวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในด้านของเหลวตัวกลาง น้ำบริสุทธิ์ช่วยลดความหยาบผิวที่เกิดขึ้นได้ (Leão and

Pashby;2004) แต่มีค่าลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ แต่สำหรับวัสดุชิ้นงาน ความหนาผิวมีค่าลดลงเมื่อใช้วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กเพลาชาว เนื่องจากน้ำมันบริสุทธิ์เป็นของเหลวตัวกลางที่มีค่าการเหนียวนำความร้อนสูง และเหล็กเพลาชาวมีจุดหลอมเหลวที่สูง แต่มีค่าการเหนียวนำความร้อนต่ำ เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจากการสปาร์คระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงาน น้ำมันบริสุทธิ์จะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นถูกถ่ายเทจนส่งผลทำให้อุณหภูมิมีค่าลดลง การหลอมละลายรวมตัวกันระหว่างชิ้นงานกับอนุภาคที่เกิดจากการสปาร์ค จนกลายเป็นชั้นหลอมสีขาวปกคลุมผิวหน้าชิ้นงานนั้นจึงเกิดขึ้นได้ยาก ซึ่งผิวที่ได้จะมีลักษณะที่เต็มไปด้วยแอ่ง หลุม รอยแยก เม็ดเล็กๆ และรอยแตกร้าว จึงเป็นสาเหตุของการเกิดความหนาผิวบนชิ้นงาน ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความหนาผิวของผิว นั้นคือ กระแสไฟฟ้า และเวลาเปิด (Dijck and Dutre;1974, Lee and Tai;2003) เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าและเวลาเปิด จะทำให้มีความหนาผิวสูงในลักษณะแปรผันตาม เนื่องจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีความหนาแน่นที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการหลอมละลายได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกันกับเวลาเปิดเมื่อมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังผิวหน้าของชิ้นงานและทำให้เกิดการหลอมละลายได้ดี (Hasçalik and Çaydaş;2007) ดังนั้น น้ำมันบริสุทธิ์และเหล็กเพลาชาวมีผลทำให้ความหนาผิวที่ได้มีค่าลดลง

4.3 การศึกษาถึงผลของของเหลวตัวกลางและวัสดุชิ้นงาน ต่อชั้นหลอมสีขาวและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาว

เมื่อกัดสปาร์คชิ้นงานด้วยไฟฟ้า จะทำให้เกิดการหลอมละลายรวมตัวกันระหว่างอนุภาคที่ถูกแยกออกมาจากอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน จากนั้นจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยของเหลวตัวกลางจนกลายเป็นชั้นของแข็งปกคลุมอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะเนื้อเป็นสีขาวเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ทำให้ถูกเรียกว่า “ชั้นหลอมสีขาว (White layer)” (Ekmekci;2007, Tung;1998) และอิทธิพลจากการ EDM ยังส่งผลกระทบไปยังชั้นที่อยู่ใต้ชั้นหลอมสีขาว ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในด้านคุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะโครงสร้าง ชั้นที่อยู่ใต้ชั้นหลอมสีขาวจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการ EDM (Heat affect zone, HAZ) และส่วนที่เป็นวัสดุพื้นฐานที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการ EDM (Base materials)



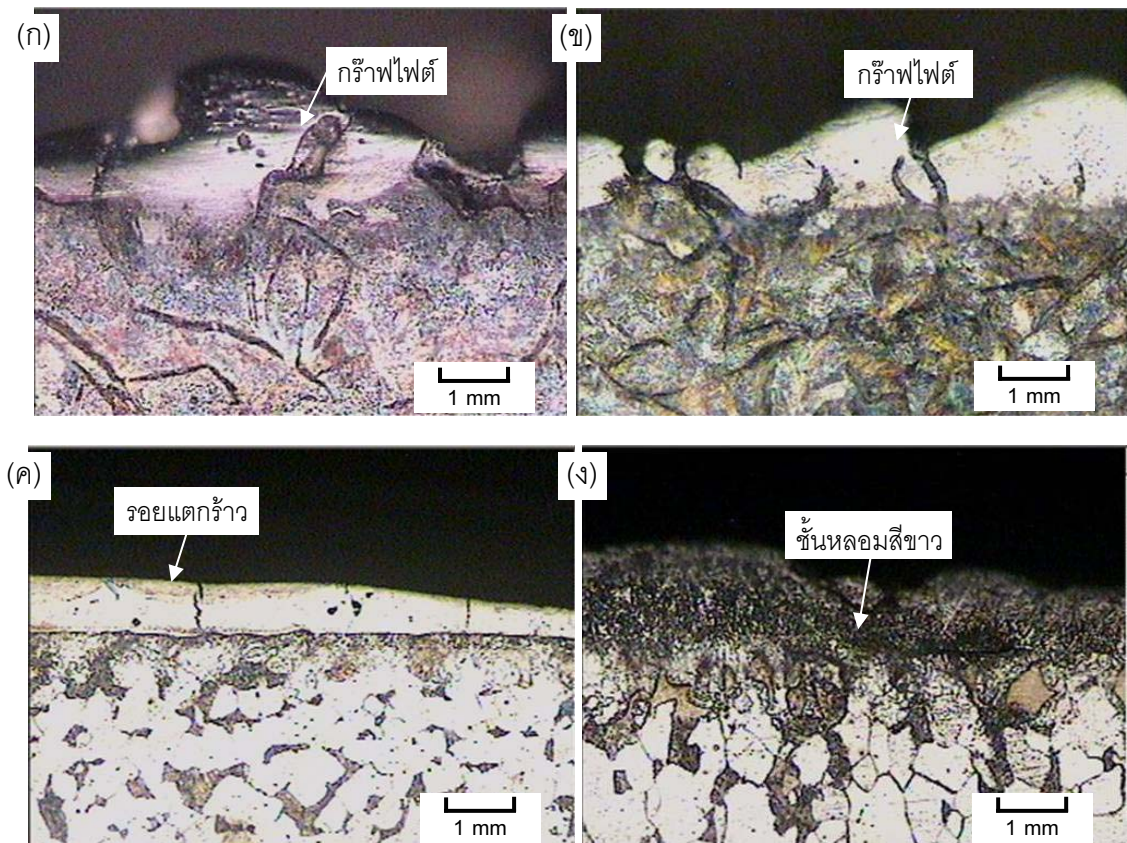
ภาพที่ 4.5

ความยับยั้งเชื้อของ (ก) เหล็กหล่อ และ (ข) เหล็กเพลชาว

การศึกษาลักษณะโครงสร้างมหัพภาค

ภาพที่ 4.6 แสดงรูปถ่ายพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กหล่อและเหล็กเพลชาวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ซึ่งชิ้นงานเหล่านี้ผ่านการกัดด้วยไฟฟ้าในของเหลวตัวกลาง 2 ชนิด คือ น้ำบริสุทธิ์ และน้ำมันแร่ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์ เวลาเปิด 300 ไมโครวินาที เวลาปิด 300 ไมโครวินาที และความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ เพื่อศึกษาวิเคราะห์ถึงลักษณะโดยทั่วไปของ

โครงสร้างภายในและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาว พบว่า เมื่อ EDM เหล็กหล่อในน้ำมันแร่ จะทำให้เกิดชั้นหลอมปกคลุมที่ผิวหน้า ซึ่งชั้นหลอมมีลักษณะของสีเป็นสีขาวขุ่น และมีกราฟไฟต์แทรกตัวอยู่ในชั้นหลอมสีขาว ต่างกับน้ำมันที่ทำให้ชั้นหลอมมีลักษณะของสีคล้ายกับสีของเนื้อเหล็กหล่อ คือ สีคล้ำมันวาว และพบเส้นกราฟไฟต์ ส่วนชั้นที่อยู่ใต้ชั้นหลอมสีขาวไม่ว่าจะในน้ำมันแร่หรือน้ำมันบริสุทธิ์ จะมีลักษณะสีที่เข้มกว่าเนื้อวัสดุชิ้นงาน แสดงดังภาพที่ 4.6 (ก) และ (ข) ส่วนเหล็กเพลลาขาว เมื่อ EDM ในน้ำมันบริสุทธิ์ ทำให้ชั้นหลอมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะของสีเป็นสีดำไหม้ แต่ในน้ำมันแร่กลับทำให้ชั้นหลอมมีลักษณะเป็นสีขาวและพบรอยแตกร้าว ซึ่งรอยแตกร้าวเกิดขึ้นเพียงแค่นชั้นหลอมสีขาวเท่านั้น โดยไม่ได้ลงมาสู่เนื้อชิ้นงานเลย ชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวมีลักษณะสีเช่นเดียวกันกับเหล็กหล่อที่มีสีที่เข้มกว่า ดังภาพที่ 4.6 (ค) และ (ง)

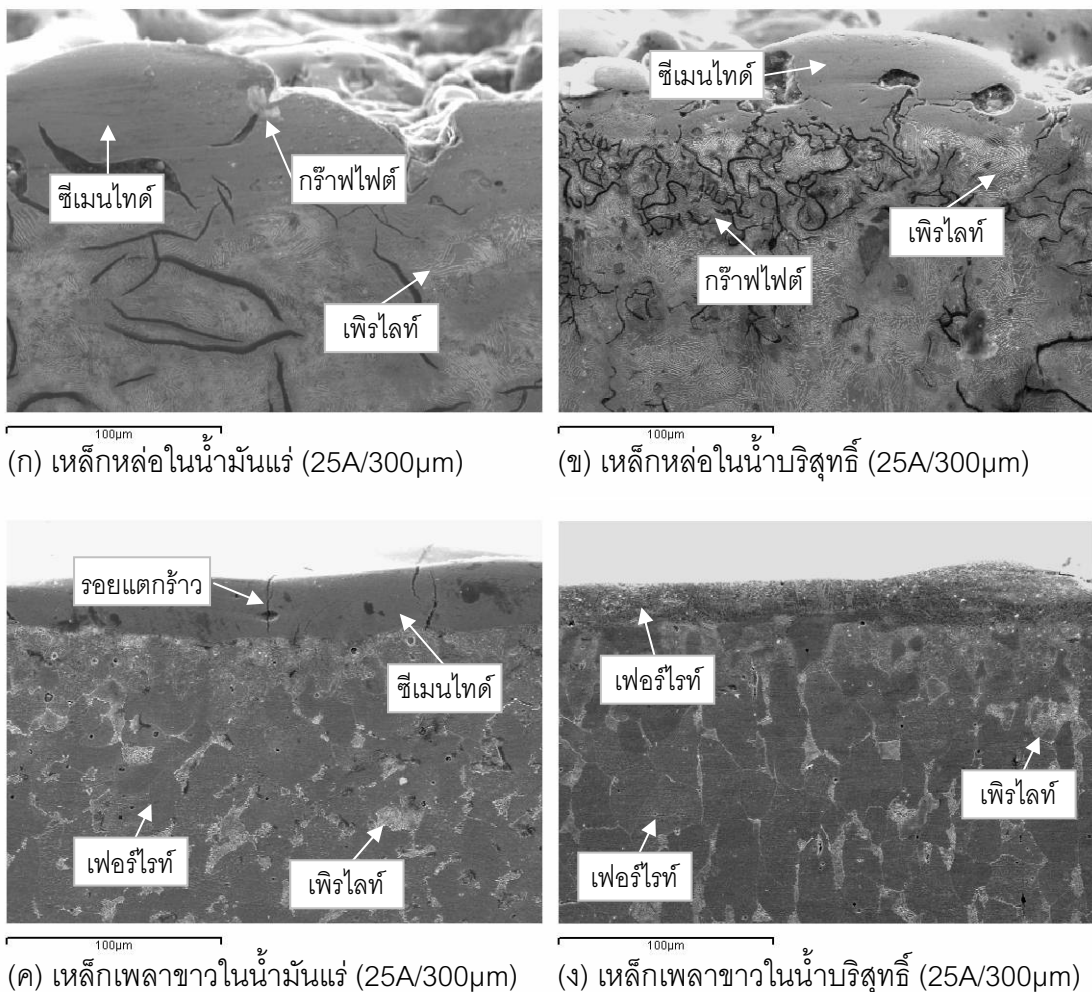


ภาพที่ 4.6

ลักษณะชั้นหลอมสีขาว (White layer) ของ (ก) เหล็กหล่อในน้ำมันแร่, (ข) เหล็กหล่อในน้ำมันบริสุทธิ์, (ค) เหล็กเพลลาขาวในน้ำมันแร่ และ (ง) เหล็กเพลลาขาวในน้ำมันบริสุทธิ์ (25A/300 μ m)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค

เนื่องจากรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ในภาพที่ 4.6 นั้นไม่สามารถเห็นโครงสร้างจุลภาคได้อย่างชัดเจน ดังนั้น เพื่อการศึกษานิวทยาของโครงสร้างภายในและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาว ด้วยรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลที่ได้ก็คือ เมื่อกัดเหล็กหล่อด้วยไฟฟ้าในน้ำมันแร่จะทำให้เกิดชั้นหลอมสีขาวปกคลุมบนผิวหน้า ซึ่งโครงสร้างของชั้นหลอมสีขาวจะเป็นซีเมนต์ไทด์ (คาร์ไบด์) (Kruth, Stevens, et al.;1995) ส่วนชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวจะมีโครงสร้างเป็นเฟอไรต์และกร๊าไฟไฟต์ ดังภาพที่ 4.7 (ก)



ภาพที่ 4.7

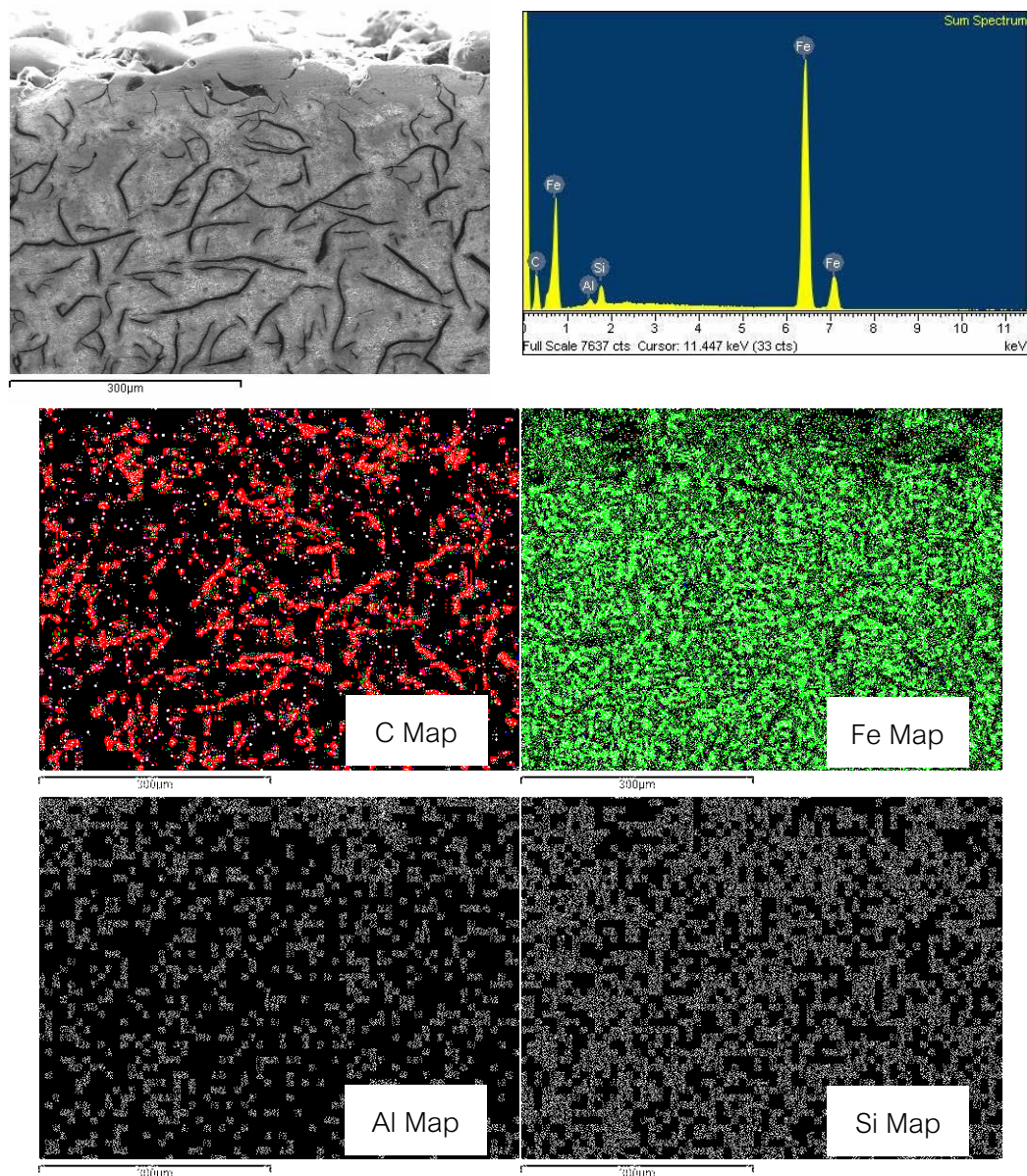
รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงโครงสร้างของพื้นที่ภาคตัดขวาง

พบว่ากร๊าไฟไฟต์เป็นจำนวนมากในบริเวณ HAZ ซึ่งเป็นกร๊าไฟไฟต์ที่แพร่กระจายขึ้นมาจากเนื้อวัสดุชิ้นงานพื้นฐาน และเฟอไรต์ แสดงดังภาพที่ 4.7 (ข) ส่วนภาพที่ 4.7 (ค) และ (ง) แสดงถึงลักษณะของ

โครงสร้างชั้นหลอมสีขาวของเหล็กเพลลาขาว เมื่อ EDM ในน้ำมันแร่และน้ำบริสุทธิ์ พบว่า ในน้ำมันแร่ ชั้นหลอมสีขาวจะมีลักษณะของสีเป็นสีมืดและมีรอยแตกร้าว โดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นไม่ลึกลงมาสู่เนื้อชิ้นงานเลย ชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจากน้ำบริสุทธิ์จะมีลักษณะโครงสร้างและสีคล้ายกับวัสดุพื้นฐาน นั่นคือ เฟอร์ไรต์ ออสเทนไนต์ และ เพิร์ไลต์ (Kruth, Stevens, et al.;1995) แต่เมื่อพิจารณาถึงความหนาของชั้นหลอมสีขาว พบว่า เมื่อ EDM ในน้ำมันแร่จะมีผลทำให้ชั้นหลอมสีขาวมีความหนามากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากน้ำมันมีค่าการเหนียวนำความร้อนน้อยกว่าน้ำบริสุทธิ์ เมื่อได้รับความร้อนสูงที่เกิดจากการ EDM ทำให้เกิดหลุมหลอมบนผิวหน้าชิ้นงาน และเกิดการแตกของพันธะโมเลกุลในองค์ประกอบของของเหลวตัวกลาง เป็นเหตุให้เกิดการแพร่กระจายของคาร์บอนในวัสดุชิ้นงาน และกลายเป็นชั้นหลอมสีขาวที่มีองค์ประกอบเต็มไปด้วยคาร์บอน มีผลทำให้ความแข็งของชั้นหลอมสีขาวมีค่าเพิ่มขึ้น (Rama-sawmy, Blunt and Rajurkar;2005) และยังทำให้ผิวหน้ามีความหยาบสูงอีกด้วย

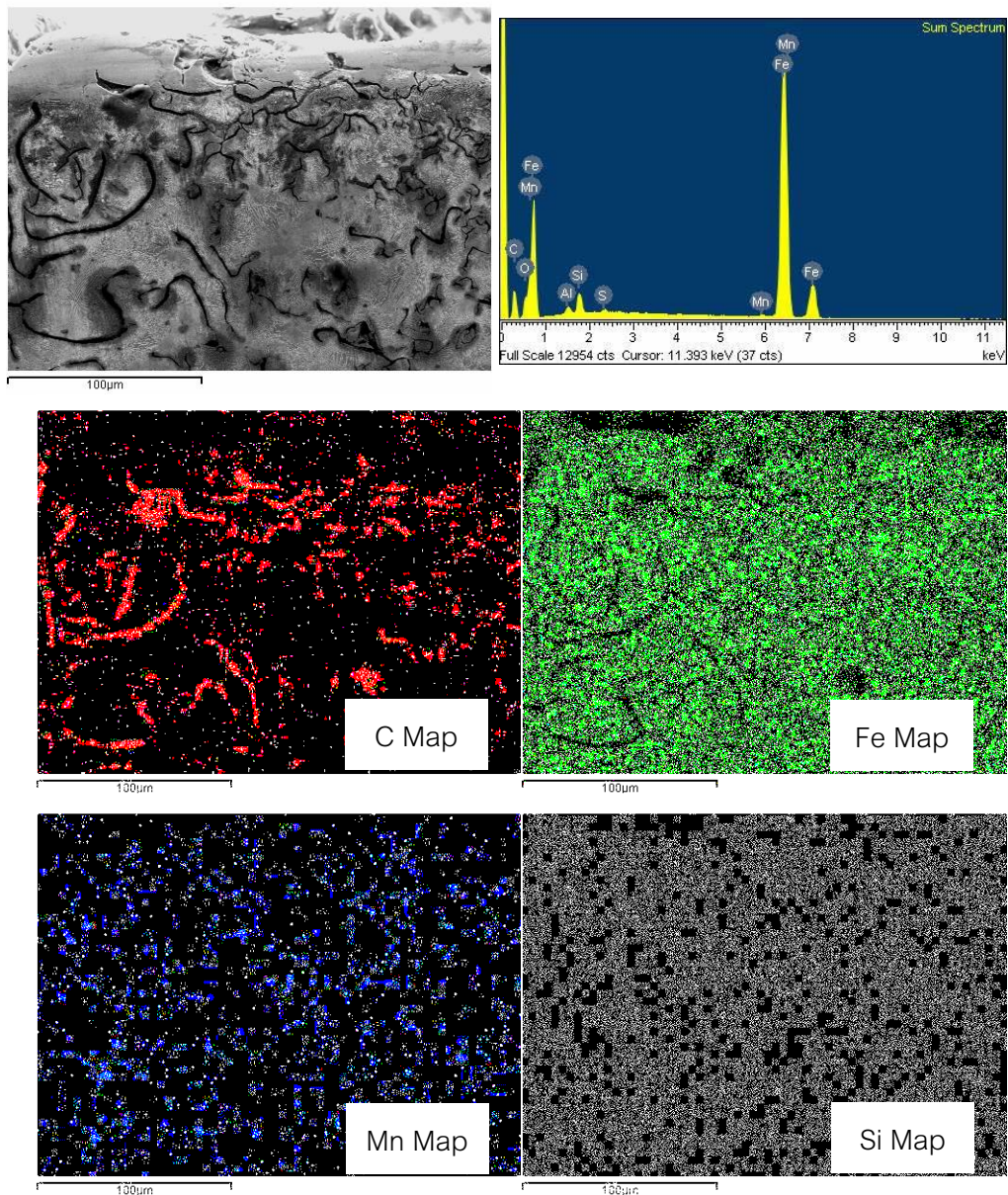
การตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวขององค์ประกอบทางเคมีด้วยการใช้เทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของการวิเคราะห์โครงสร้างภายในชั้นหลอมสีขาว และชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวที่ได้จากรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ภาพที่ 4.8 ถึงภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวขององค์ประกอบทางเคมีภายในและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาว ที่เกิดจากการกัดเหล็กหล่อและเหล็กเพลลาขาวในของเหลวตัวกลางต่างชนิดระหว่างน้ำบริสุทธิ์กับน้ำมันแร่ด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS) พบว่า เมื่อกัดเหล็กหล่อด้วยไฟฟ้าในน้ำมันแร่ โดยองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถตรวจพบจากการเอกซเรย์ (X-Ray) ซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) เหล็ก (Fe) อะลูมิเนียม (Al) และซิลิคอน (Si) ดังภาพที่ 4.8 สังเกตได้ว่า ภายในชั้นหลอมสีขาวจะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนและเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ส่วนซิลิคอนและอะลูมิเนียมมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งธาตุคาร์บอนที่กระจายตัวอยู่ในชั้นหลอมสีขาวนั้น มีปริมาณมากกว่าในน้ำบริสุทธิ์ (Kruth, Stevens, et al.;1995) โดยส่วนใหญ่จะมาจากเหล็กหล่อที่เป็นวัสดุพื้นฐานเป็นหลัก แล้วรวมตัวกับธาตุคาร์บอนที่ได้จากน้ำมันแร่ จึงทำให้โครงสร้างหลักของชั้นหลอมสีขาวจึงเป็นคาร์ไบด์ ส่วนเหล็กหล่อที่ EDM ในน้ำบริสุทธิ์ องค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจพบประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และซิลิคอน (Si) แสดงดังภาพที่ 4.9 ซึ่งพบว่าบริเวณภายในชั้นหลอมสีขาวมีความหนาแน่นของธาตุหลักในปริมาณที่สูงมาก รวมทั้งซิลิคอน และแมงกานีส แต่มีคาร์บอนในปริมาณที่ต่ำ จึงทำให้ชั้นหลอมสีขาวมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเฟอร์ไรต์

ส่วนเหล็กเพลลาขาว เมื่อ EDM ในน้ำมันแร่ องค์ประกอบทางเคมีที่สามารถตรวจพบจากการเอกซเรย์ ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน (C) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และทองแดง (Cu) ดังภาพที่ 4.10 สังเกตได้ว่า ภายในชั้นหลอมสีขาวจะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนและเหล็กเป็น –



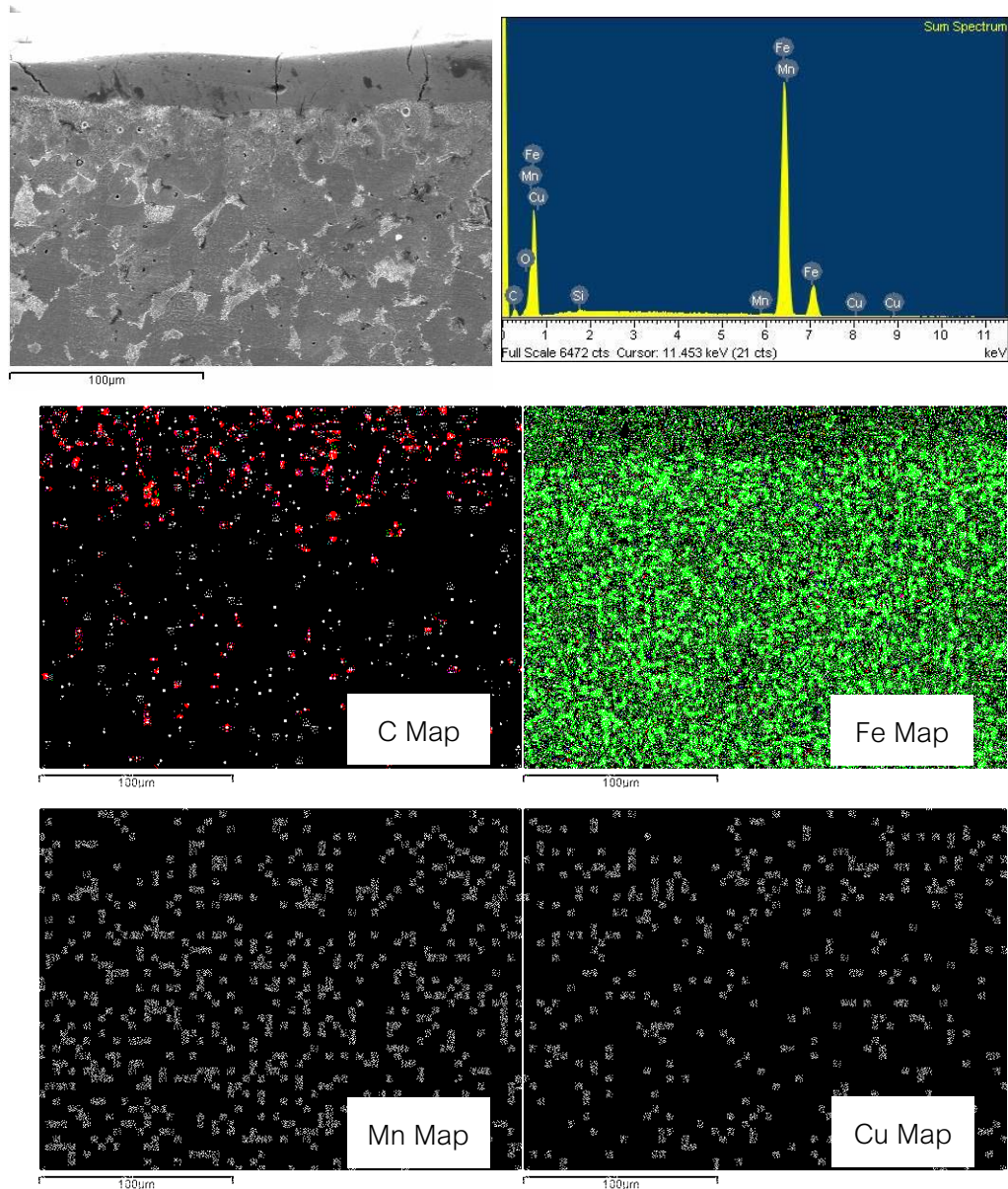
ภาพที่ 4.8

ลักษณะการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน เหล็ก อลูมิเนียม และซิลิคอน ด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS)
บนพื้นที่ภาคตัดขวางชั้นหุ้มสีขาวของเหล็กหล่อในน้ำมันแร่
เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์ เวลาเปิด 300 ไมโครวินาที เวลาปิด 300 ไมโครวินาที
และความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์
(X-Ray Maps และ X-Ray Spectrum)



ภาพที่ 4.9

ลักษณะการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน เหล็ก แมงกานีส และซิลิคอน ด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS)
บนพื้นที่ภาคตัดขวางชั้นหุ้มสีขาวของเหล็กหล่อในน้ำบริสุทธิ์
เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์ เวลาเปิด 300 ไมโครวินาที เวลาปิด 300 ไมโครวินาที
และความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์
(X-Ray Maps และ X-Ray Spectrum)



ภาพที่ 4.10

ลักษณะการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน เหล็ก แมงกานีส และทองแดง ด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS)
บนพื้นที่ภาคตัดขวางชั้นหุ้มเคลือบผิวของเหล็กเพลลาขาวในน้ำมันแร่
เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์ เวลาเปิด 300 ไมโครวินาที เวลาปิด 300 ไมโครวินาที
และความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์
(X-Ray Maps และ X-Ray Spectrum)