

รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดที่มีต่อ
ขนาด ความหยาบผิว และการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460

A study on effect of wire-EDM machining parameters on dimension,
surface roughness, and metallurgical alteration of K460 tool steel

RCH

TA

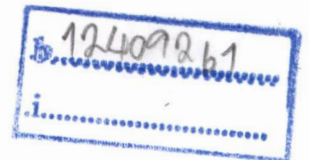
465

ก171ก

พ.1

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 121206
วัน, เดือน, ปี 25 ส.ย. 2555



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดที่มีต่อขนาด ความหยาบผิว และการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460
(ภาษาอังกฤษ) A study on effect of wire-EDM machining parameters on dimension, surface roughness, and metallurgical alteration of K460 tool steel

แหล่งเงิน งบรายได้อุตสาหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 68,400 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

หัวหน้าโครงการ นายกรณชัย กัลยาศิริ

หน่วยงานต้นสังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-329-8339 อีเมล kkkannac@kmitl.ac.th

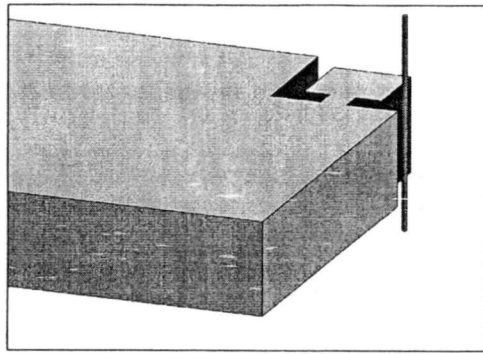
คำสำคัญ (Keywords) Wire-EDM, Dimension, Surface roughness, Metallurgical microstructure, Tool steel

บทคัดย่อ

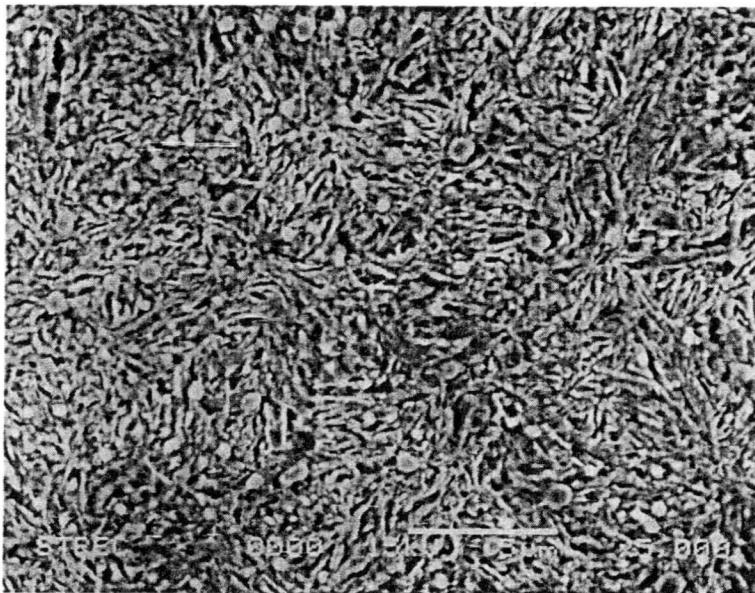
ในกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตจะต้องมีขนาดของเครื่องมือที่แม่นยำ และมีค่าความหยาบผิวของเครื่องมืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตออกมา ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดที่มีต่อขนาด ความหยาบผิว และการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง โดยทำการหาค่าตัวแปรการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดและให้ขนาดใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด ในการศึกษาได้ทำการศึกษาคัดชิ้นงานแบบตัดละเอียดสองครั้ง โดยการตัดครั้งแรกศึกษาเฉพาะระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน และแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค จากการศึกษาพบว่า ค่าของตัวแปรการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดและให้ขนาดของชิ้นงานใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด คือ เวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงานที่ 19 μ s และ แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์คที่ 55 V สำหรับในการตัดละเอียดครั้งที่สองมีตัวแปรการตัดที่ศึกษา คือ ความเร็วในการตัด กระแสที่ใช้ในการตัด และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ค่าของตัวแปรการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดและให้ขนาดของชิ้นงานใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด คือ ความเร็วในการตัดเท่ากับ 5.5 mm/min กระแสที่ใช้ในการตัด เท่ากับ 2.0 A และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานเท่ากับ 771.9 μ m ในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดในโครงการวิจัยนี้พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดนี้

Abstract

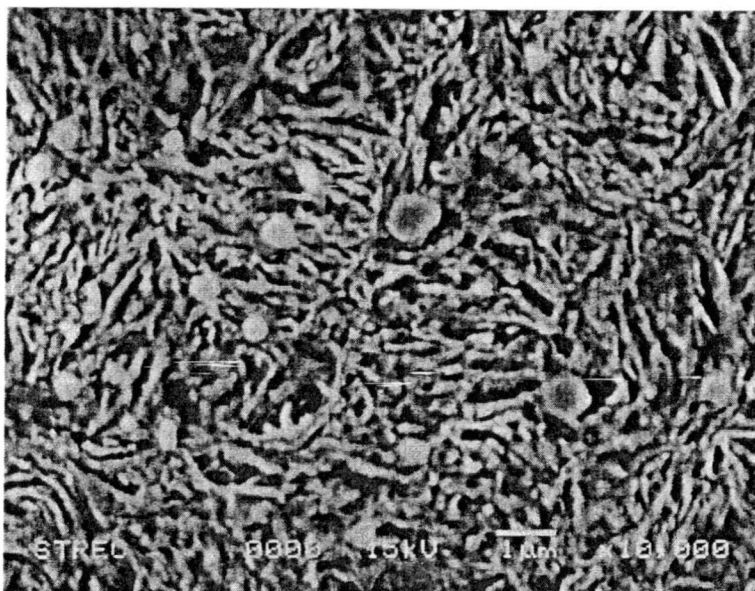
In a high-precision production system, tools and dies used in the manufacturing processes must be fabricated with a high precision on their dimensions and surface roughness. The precision of the tools is an important factor to determine the quality of the produced parts. This research was aimed to investigate on influence of wire-EDM machining parameters on dimension, surface roughness, and metallurgical alteration of K460 tool steel. The investigation technique employed was based on experimental designs. The objective of this study was to select a cutting condition minimizing surface roughness and dimensional error of the workpiece. In this study, two consecutive finishing cuts were performed to obtain optimal cutting conditions for the workpiece. In the first finishing cut, effect of pulse-on time, and discharge voltage on surface roughness, and dimensional error were investigated. Results showed that setting the pulse-on time at 19 μs , and the discharge voltage at 55 V provides the minimum surface roughness and dimensional error of the workpiece. In the second finishing cut, influence of cutting speed, pulse-peak current, and off-set distance were studied. Experimental results revealed that surface roughness and dimensional error of the workpiece was minimized when the cutting speed, pulse-peak current, and off-set distance was set at 5.5 mm/min, 2.0 A., and 771.9 μm , respectively. It was found in this study that there is no metallurgical alteration of the K460 tool steel due to the wire-EDM process.



ลักษณะการตีชิ้นงานทดสอบ



ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	75
บทที่ 4 ผลการทดลอง	88
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	130
บรรณานุกรม	131

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มีการใช้กระบวนการตัดเนื้อวัสดุด้วยวิธีดั้งเดิม (Conventional machining processes) ซึ่งเป็นกระบวนการตัดเนื้อวัสดุที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลายาวนานและเป็นกระบวนการตัดเนื้อวัสดุที่พบเห็นได้โดยทั่วไป แต่ในปัจจุบันได้มีการใช้วัสดุชนิดใหม่ๆ มาใช้ในกระบวนการผลิตมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตและการแปรรูปชิ้นงาน โดยการใช้วัสดุที่มีค่าคุณสมบัติด้านความแข็ง ความเหนียว และความทนทานต่อแรงกระแทกสูง ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่ยากต่อการขึ้นรูปด้วยวิธีดั้งเดิม ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีใหม่ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น (Non-traditional machining processes) เช่น Electrochemical machining processes, Ultrasonic machining processes และ Electric discharge machining processes

กระบวนการตัดชิ้นงานด้วย Wire EDM ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ EDM กระบวนการตัดชิ้นงานด้วยวิธีนี้เป็นกระบวนการตัดชิ้นงานด้วยวิธีใหม่ ที่เป็นกระบวนการตัดด้วยพลังงานความร้อน โดยการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าหรือการสปาร์กที่ออกมาเป็นช่วงๆ ผ่านเส้นลวดไฟฟ้ากับชิ้นงานที่ทำให้อุณหภูมิบนชิ้นงาน ณ จุดใดจุดหนึ่งสูงพอที่จะหลอมละลายชิ้นงาน ซึ่งในกระบวนการตัดด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นในของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric Fluid) ที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน การใช้กระบวนการตัดชิ้นงานด้วยวิธี EDM นี้เป็นที่นิยมมากในภาคอุตสาหกรรมเพราะมีประสิทธิภาพในการตัดชิ้นงานที่มีคุณสมบัติในด้านความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) ความแกร่ง (Toughness) ที่มีค่าสูงๆ และตัดชิ้นงานที่มีรูปแบบซับซ้อนได้ดี

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วย Wire EDM เป็นระบบที่ซับซ้อนมาก เช่น การสปาร์กที่เป็นประกายไฟจะปลดปล่อยพลังงานระดับสูงมากออกมาในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากๆ จึงทำให้เกิดปัญหาในการปรับตั้งค่าตัวแปรการตัด และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการตัดชิ้นงาน ในขณะที่ตัวแปรตอบสนอง เช่น คุณภาพของผิวชิ้นงานที่ต้องการ และขนาดของชิ้นงานเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากในการนำไปผลิตชิ้นงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงๆ และผลิตเป็นจำนวนมากๆ เช่น ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ในการผลิตและประกอบนาฬิกา ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุดในการตัดชิ้นงานด้วย Wire EDM เพื่อให้ได้คุณภาพของผิวหน้าชิ้นงาน (ค่าความละเอียดผิว) ที่เหมาะสม และขนาดของชิ้นงานที่ตัดออกมาตามที่ต้องการกับการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่ ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วน และอุปกรณ์ของเครื่องจักร ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนนาฬิกา เพื่อลดปัญหา

ต่างๆที่เกิดจากการตัดชิ้นงาน เช่น ค่าความละเอียดของผิวหน้าชิ้นงาน ขนาดของชิ้นงานที่ไม่ตรงตามแบบ (Drawing) และ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ซึ่งมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของวัสดุ ชิ้นงานเนื่องจากการใช้ค่าตัวแปรในการตัดที่ไม่เหมาะสม และเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุชนิดใหม่ๆมาใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและหาค่าตัวแปรในการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่น้อยที่สุด ในการตัดชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ที่ผ่านการตัดด้วยเครื่อง Wire EDM

1.2.2 เพื่อศึกษาและหาค่าตัวแปรในการตัดที่ให้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด ในการตัดชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ที่ผ่านการตัดด้วยเครื่อง Wire EDM

1.2.3 เพื่อศึกษาและตรวจสอบ โครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุชิ้นงาน ที่ผ่านการตัดด้วยเครื่อง Wire EDM

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

สืบเนื่องมาจากอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต และประกอบ นาฬิกาจำเป็นต้องใช้ค่าความละเอียดของผิวหน้าชิ้นงาน และขนาดของชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง ถ้าค่าความละเอียดของผิวหน้าชิ้นงาน และขนาดของชิ้นงานไม่ตรงตามที่กำหนดไว้ อาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายขึ้นได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงได้นำทฤษฎีของการออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment) โดยใช้วิธีแบบ Full Factorial Design (3^k) และวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) มาช่วยในการวิเคราะห์และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการตัดชิ้นงาน (Cutting Parameter) ด้วยเครื่อง Wire EDM เพื่อช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นจากการตัดชิ้นงานได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ใช้เครื่องจักรในการทดลอง ผลิตโดย AGIE CHARMILLES รุ่น Agie Cut Progress V2 ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดลองดังนี้

1.4.1.1 การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการตัดชิ้นงานในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 (Trim cut 2) มีค่าตัวแปรที่ใช้ในการตัดดังนี้

1.4.1.1.1 เวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (Ton) อยู่ในช่วง 18, 19 และ 20 μ s

1.4.1.1.2 แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (P) มีค่า 53, 55 และ 57 โวลต์ (V.)

1.4.1.2 การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการตัดชิ้นงานในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 (Trim cut 3) มีค่าตัวแปรที่ใช้ในการตัดดังนี้

1.4.1.2.1 ความเร็วในการตัดชิ้นงานมีค่าอยู่ในช่วง 3.5, 4.5 และ 5.5 mm/min.

1.4.1.2.2 กระแสที่ใช้ในการตัด (IP) มีค่า 1, 2 และ 3 แอมแปร์ (A.)

1.4.1.2.3 ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset value) มีค่า 770, 780 และ 790 μm .

1.4.2 ใช้ลวดในการตัดชิ้นงานเป็นของ Cobra Cut มีส่วนผสมของทองแดง (Cu) และเคลือบด้วยสังกะสี (Zn) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.150 มิลลิเมตร

1.4.3 ใช้วัสดุในการตัดเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 (1.2510) ตัดชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 5x5x20 มิลลิเมตร

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยของ ทวีป จีระประดิษฐ์ ได้ศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็ม โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) และสร้างสมการ โทโกนัล โพลินอร์เมียลของอัตราการตัดเนื้อวัสดุ อัตราการสึกหรอ ความหยาบผิว และโอเวอร์คัต ซึ่งมีตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปรคือ กระแสในการตัด เซอร์โวโวลต์เทจ และช่วงพัลส์ ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าเมื่อมีกระแสเพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อการเพิ่มของอัตราการตัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ โอเวอร์คัต และความหยาบผิวลดลง แต่โอเวอร์คัตเพิ่มขึ้นที่เซอร์โวระดับ 4 จะให้อัตราการตัดเนื้อโลหะและโอเวอร์คัตที่สูง แต่ที่เซอร์โวระดับ 2 และ 4 จะให้อัตราการสึกหรอลดลง แต่ความหยาบของผิวงานเพิ่มขึ้น [1]

ในงานวิจัยของ ประสพ อนุชาติ ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดระหว่างกรณีที่มีช่วงค่าพัลส์คงที่และกรณีที่มีการปรับโดยอัตโนมัติ โดยการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียล (Factorial Design) ซึ่งมีตัวแปรอยู่ 2 ตัวแปร คือ กระแส (Peak Current) และช่วงเวลาหยุดพัลส์ (Off time) จากผลการทดลองสรุปได้ว่ากรณีที่มีการปรับโดยอัตโนมัติจะให้ผลการตัดที่กระทำได้นานขึ้นและอายุการใช้งานของอิเล็กโทรดยาวนานกว่า โดยที่ความเร็วในการตัดจะลดลงประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ ความหยาบของผิวอยู่ในช่วง 18-20 μm และผลการทดลองทั้งหมดได้นำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดซึ่งมีรูปแบบเป็นสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง เพื่อใช้ในการประมาณค่าความเร็วในการตัดและความหยาบของผิวงาน [2]

ในงานวิจัยของ สมจิตร ตากโนนเขวา ได้ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขของการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด โดยการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นพื้นฐานของการวิจัย มีจำนวนตัวแปรอยู่ 4 ตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาดิสชาร์จ ระยะเวลาหยุดดิสชาร์จ แรงดันไฟฟ้าเซอร์โว และ แรงดันไฟฟ้าไร้โหลด ซึ่งมีอิทธิพลต่อการขาดของเส้นลวด อัตราการตัด และความหยาบผิวจาก ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาดิสชาร์จจะอิทธิพลต่อการเพิ่มอัตราการขาดของเส้นลวดอัตราการตัด และความหยาบผิว การเพิ่มระยะเวลาหยุดดิสชาร์จทำให้อัตราการขาดของเส้นลวดอัตราการตัด และความหยาบผิวลดลง แต่ที่เวลาหยุดดิสชาร์จเป็น 3 μs ไม่สามารถแปรรูปได้ ที่แรงดันไฟฟ้าเซอร์โวเป็น 15 V ทำให้อัตราการขาดของเส้นลวดอัตราการตัด และความหยาบผิวสูงสุด ที่แรงดันไฟฟ้าเซอร์โว

โวเป็น 10 V และ 20 V ทำให้อัตราการตัดและความหยาบผิวลดลง การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไร้โหลด จะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มอัตราการขาดของเส้นลวด อัตราการตัด และ ความหยาบของผิวงาน [3]

ในงานวิจัยของ วีระศักดิ์ บุตรเดือน ได้ศึกษาเงื่อนไขของการแปรรูปโลหะด้วยกรรมวิธีอีดี้เอ็ม โดยการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล (Factorial Design) ซึ่งมีตัวแปรอยู่ 3 ตัวแปร คือ เวลาติสซาร์จ กระแสติสซาร์จ และ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานที่มีผลกระทบต่อ ความหยาบผิว อัตราการตัดเนื้อโลหะและ ขนาดของเศษ ผลจากการทดลองของอิเล็กโทรดทรงกระบอกพบว่า เมื่อเวลาติสซาร์จเพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อการเพิ่มค่าความหยาบผิว อัตราการตัดเนื้อโลหะ และ ขนาดของเศษ การเพิ่มขึ้นของกระแสติสซาร์จจะมีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อโลหะและ ขนาดของเศษ การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะมีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อโลหะและขนาดของเศษสูงสุด แต่ความหยาบผิวมีผลกระทบเล็กน้อย สำหรับอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมเมื่อเวลาติสซาร์จเพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อการเพิ่มค่าความหยาบผิว อัตราการตัดเนื้อโลหะ และ ขนาดของเศษ การเพิ่มขึ้นของกระแสติสซาร์จจะมีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อโลหะสูงสุดและขนาดของเศษมีผลกระทบน้อย การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะมีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อโลหะและขนาดของเศษ [4]

ในงานวิจัยของ บุญธรรม ลิ้มปีย์พันธ์ ได้ศึกษาเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแบบอีดี้เอ็ม โดยการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล (Factorial Design) ซึ่งมีตัวแปรอยู่ 3 ตัวแปร คือ ชนิดของโลหะขึ้นรูป มี 3 ชนิด คือ CM50 M202 และ M300 กระแสไฟฟ้า และ วัสดุขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตราการแปรรูปของชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ความหยาบผิว และ โอเวอร์คัต จากผลการทดลองพบว่าระดับของกระแสไฟฟ้าที่สูงจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มอัตราการแปรรูปโลหะอัตราการสึกหรอ ความหยาบผิว และ โอเวอร์คัต วัสดุชนิด M300 จะให้อัตราการแปรรูปที่ดีในขณะที่อิเล็กโทรดทองแดงและทังสเตนจะให้อัตราการสึกหรอ และ ความหยาบผิวที่ต่ำ [5]

ในงานวิจัยของ ณรงค์สร ศรีอบเชย ได้ศึกษาและหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมืออีดี้เอ็ม 53 ด้วยกระบวนการตัดแบบเส้นลวดโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ Response Surface Methodology ที่เป็นการออกแบบส่วนประสมกลางที่หมุนได้ ภายใต้ตัวแปรคือระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน ระยะเวลาในการหยุดสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน ความตึงของเส้นลวด และ ความเร็วของเส้นลวด ผลจากการทดลองพบว่ากรณีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดจะได้ค่าความหยาบผิวเท่ากับ $2.4 \mu\text{m}$ และความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ 1.97 mm/min กรณีค่าความหยาบผิวมากที่สุดจะได้ความหยาบผิวเท่ากับ $3.31 \mu\text{m}$ และความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ 3.45 mm/min ซึ่งผลลัพธ์ของทั้งสองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนในการทำนายน้อยกว่า 5% [6]

ในงานวิจัยของ Huang และคณะ ได้ศึกษาการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิง

เส้น (Non-linear) ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดแบบละเอียด (Finish-Cutting) ด้วยการใช้การสปาร์คด้วยเส้นลวด (WEDM) ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่จำเป็นกับกรรมวิธีนี้ได้แก่ เวลาหยุดและปล่อยพัลส์, อัตราการป้อน, แรงดันของน้ำที่ใส่เข้าไป, ระยะห่างระหว่างเส้นลวดและพื้นผิวชิ้นงาน และจากการทำงานของเครื่อง ซึ่งพบว่า ตัวแปรที่มีผลกับคุณภาพผิวของชิ้นงานที่สำเร็จที่พิจารณาจากความหยาบและความลึกของพื้นผิวงานในชั้น White layer ได้แก่เวลาที่กระแสปั่นและระยะห่างระหว่างขอบของเส้นลวดและผิวของชิ้นงาน ผลที่ได้จากการวางแผนและเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองนี้คือ พบว่าสามารถทำนายประสิทธิภาพของการทำงานโดยมีความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขของการมีอัตราการตัดสูงสุดทำให้มีความหยาบผิวน้อยลงและใช้เวลาลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับพนักงานที่มีทักษะที่ดีพบว่าวิธีการนี้ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพผิวดีกว่า, ใช้เวลาน้อยกว่า และมีความแม่นยำในระดับที่สามารถยอมรับได้ [7]

ในงานวิจัยของ Liao และคณะได้ศึกษา A neural network เพื่อประเมินความสูงของชิ้นงานและแยกความแตกต่างของสถานะการขึ้นรูปในกระบวนการ WEDM ด้วยวิธีการ (Feed-forward neural network และ back-propagation learning Algorithm) ซึ่งมีตัวแปรในการทดลอง 8 ตัวแปรคือ เวลาเปิด (On-time) เวลาปิด (Off-time) รัศมีของการเปิด (Arc on-time) รัศมีของการปิด (Arc off-time) แรงดันไฟฟ้าเซอร์โว (Servo voltage) อัตราการตัดเกิน (Feed rate over-ride) ความเร็วของเส้นลวด (Wire speed) ความตึงของเส้นลวด (Wire tension) ผลจากการวิจัยสามารถประเมินความสูงของชิ้นงานได้อย่างประสบความสำเร็จโดยมีความแม่นยำที่ 1.6 มิลลิเมตร บนพื้นฐานของความสูงของชิ้นงานที่ประเมินไว้ [8]

ในงานวิจัยของ Gokler ได้ศึกษาการตรวจสอบเชิงทดลองของผลกระทบต่าง ๆ ของตัวแปรการตัดที่มีต่อความหยาบของพื้นผิวในกระบวนการ การทดลองต่าง ๆ ได้มีขึ้นรูปกับวัสดุเหล็กกล้า 1040 ที่มีความหนา 30, 60 และ 80 มิลลิเมตร และวัสดุเหล็กกล้า 2379 และ 2738 ที่มีความหนา 30 และ 60 มิลลิเมตร ผลการทดลองนั้นถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสมมากที่สุดในการได้มาซึ่งค่าความหยาบของพื้นผิวที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาชิ้นนี้สามารถนำมาใช้สำหรับการขึ้นรูปแบบ WEDM ที่มีกลไกการควบคุมแบบเดียวกับ Sodick Mark XI A500 EDW โดยใช้ความหนาของชิ้นงานและประเภทของวัสดุและสามารถเลือกตารางและผังอย่างง่าย ๆ เพื่อค้นหาค่าตัวแปรรวมกันที่เหมาะสมที่สุดคล้อยกับความหยาบของพื้นผิวที่ต้องการได้ [9]

ในงานวิจัยของ Tosun ได้ศึกษาผลของตัวแปรในการตัดที่มีผลต่อการสึกของอิเล็กโทรด (เส้นลวด) ในกระบวนการตัดชิ้นงานแบบ WEDM ได้มีการทำการทดลองภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ อย่างเช่น ระยะเวลาของพัลส์ การเปิดของแรงดันไฟฟ้า ความเร็วของเส้นลวด และความดันของ ๆ เหลวโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Experimental Design Method โดยพิจารณาตัวแปรอยู่ 4 ปัจจัยโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA ในการ

วิเคราะห์ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีต่อ Wire wear ratio (WWR) ซึ่งผลการทดลองที่ได้คือ ระยะเวลาของพัลส์ที่เพิ่มขึ้นและแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่ม WIRE WEAR RATIO (WWR) ในขณะที่ความเร็วของเส้นลวดและความดันของของเหลวลดลง และอัตราส่วนการสึกหรอของเส้นลวด WIRE WEAR RATIO (WWR) ที่สูงมักจะมาพร้อมกับระดับของอัตราการตัดเนื้อวัสดุ MRR ที่สูงและค่าความหยาบผิว R_a ที่สูง [10]

ในงานวิจัยของ Puri ได้ศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปเหล็กแม่พิมพ์ M2 โดยใช้วิธี Design of Experiment บนพื้นฐานของ Taguchi method และ Analysis of variance เพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วตัด ค่าความหยาบผิวไม่เที่ยงตรงของรูปทรงของชิ้นงานอันเนื่องมาจาก Wire lag หลังจากนั้นได้ทำการหาสภาวะของตัวแปรป้อนเข้าที่ทำให้ค่าความเร็วตัด ค่าความหยาบผิวที่มีความไม่เที่ยงตรงของชิ้นงาน อันเนื่องมาจาก Wire lag มีค่าเหมาะสมที่สุดในช่วงของการทดลอง ซึ่งจุดที่เหมาะสมที่หาได้ในการทำนายมีความผิดพลาดของความเร็วตัด 2.15% ค่าความหยาบผิว 2.66% ความไม่เที่ยงตรงของรูปทรงของชิ้นงานอันเนื่องมาจาก Wire lag 1.54% [11]

ในงานวิจัยของ Hascalyk ได้ศึกษาการทดลองกระบวนการตัดชิ้นงานด้วยเส้นลวดกับเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D5 โดยการทดสอบซึ่งใช้การออกแบบการทดลองแบบ factorial experimental design method ซึ่งในระหว่างการทดลองค่าตัวแปรเช่นการเปิดปิดของแรงดันไฟฟ้า ช่วงระยะเวลาของพัลส์ ความเร็วลวด และความดันของของเหลวได้อิเล็กทริกถูกทดสอบว่ามีผลกระทบกับความหยาบผิวและโครงสร้างทางโลหะวิทยาโดยการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนและการตรวจสอบความแข็งแบบจุลภาค จากผลการทดลองพบว่าความรุนแรงของกระบวนการของพลังงานจะมีผลต่อการเปลี่ยนรูปใหม่ของชิ้นงาน ความหยาบผิวและการเกิดรอยร้าวแบบจุลภาค ซึ่งความเร็วของเส้นลวดและความดันของของเหลวได้อิเล็กทริกไม่มีอิทธิพลมากในการเปลี่ยนรูปของชิ้นงาน [12]

ในงานวิจัยของ Tosun และคณะได้ศึกษาในส่วนของความกว้างของรอยตัด (Kerf) และอัตราการตัดเนื้อวัสดุในกระบวนการตัดชิ้นงาน WEDM โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi experimental design method) แบบ Taguchi orthogonal array (L_{18}) ซึ่งมีปัจจัยในการทดลองอยู่ 4 ปัจจัย การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการกำหนดระดับความสำคัญของตัวแปรของการขึ้นรูปที่มีต่อความกว้างของการตัดหรือ Kerf และ อัตราการกำจัดวัสดุ (MRR) ผลจากการวิจัยพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างสูงที่มีต่อทั้ง Kerf และ MRR พบว่าเป็นการเปิดของแรงดันวงจรไฟฟ้า และ ระยะเวลาของพัลส์ (Open circuit voltage and Pulse duration) ในขณะที่ความเร็วของเส้นลวดและความดันของของเหลวเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อยกว่า [13]

ในงานวิจัยของ Spedding ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) แบบ Central Composite Rotatable และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธี Artificial neural network (ANN) ขนาด 4-16-13 แบบ Back propagation neural network นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบความ

แม่นยำในการทำนายค่าความหยาบผิว ค่าความเรียบผิว และความเร็วตัดแล้วทำการตรวจสอบผลการทดลองทั้ง 2 วิธี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าทั้ง 2 วิธีความแม่นยำในการทำนายที่ใกล้เคียงกัน [14]

ในงานวิจัยของ Sarkar และคณะได้ศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวแปรและการปรับค่าให้เหมาะสมมากที่สุดของกระบวนการตัดชิ้นงานแบบเส้นลวดของโลหะผสม Y-titanium aluminide การศึกษานี้ได้มีการสร้างแบบโดยใช้แบบจำลองเพื่อทำนายตัวแปรในการตอบสนองอันได้แก่ความเร็วของการตัด พื้นผิวของชิ้นงานและการเบี่ยงเบนของขนาด โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Taguchi orthogonal array (L18) ซึ่งมีปัจจัยในการทดลองอยู่ 6 ปัจจัย และใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร ซึ่งผลที่ได้ คือ ความหยาบของพื้นผิว และ ความเบี่ยงเบนของขนาดนั้น เป็นอิสระจากเวลาหยุดของพัลส์ ลักษณะนี้เป็นลักษณะที่สำคัญมาก ภายใต้เวลาหยุดของพัลส์ ตามเงื่อนไขการขึ้นรูปที่สำคัญที่แตกต่างกันไปได้ตามความต้องการที่จะทำให้เกิดเสถียรภาพดีขึ้นและมีความแม่นยำมากขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำและพื้นผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ [15]

ในงานวิจัยของ Kuriakose ได้ศึกษาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ Multi-objective ของกระบวนการขึ้นรูปแบบตัดด้วยเส้นลวดโดยใช้อัลกอริทึม Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm โดยใช้ วิธีการออกแบบการทดลอง Factorial design บนพื้นฐานของ Taguchi orthogonal array (L18) จากผลการทดลองพบว่าค่าความหยาบผิว $3.43\mu\text{m}$ และอัตราความเร็วตัด 0.553 mm/min สามารถที่จะเห็นได้ว่าอัตราความเร็วตัด สามารถเพิ่มขึ้นเป็น 1.036 mm/min หรือการเพิ่มขึ้นเป็น 87% ของอัตราความเร็วตัด ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มอัตราการผลิตได้อย่างมาก โดยการลดเวลาของการขึ้นรูปลงได้ [16]

ในงานวิจัยของ Hewidy และคณะได้ศึกษาและการสร้างแบบตัวแปรในการขึ้นรูปของกระบวนการ WEDM ในส่วนของวัสดุ Inconel 601 การทดลองถูกออกแบบโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^k factorial และใช้ Response Surface Methodology (RSM) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร ผลจากการทดลองพบว่าอัตราการตัดเนื้อวัสดุตามเชิงปริมาตรได้มากถึง 8 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที และพื้นผิวของชิ้นงานที่น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร อัตราการตัดเนื้อวัสดุเชิงปริมาตร โดยทั่วไปแล้วจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของค่าของกระแสไฟสูงสุดและความดันของน้ำ อัตราส่วนการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกระแสไฟสูงสุดและ ความหยาบของพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกระแสไฟสูงสุดและลดลงตามค่า Duty factor และความตึงของเส้นลวด พื้นผิวของชิ้นงาน (R_a) ที่ดีที่สุดได้ถึง 0.8 ไมโครเมตร [17]

ในงานวิจัยของ Chiang ได้ศึกษาการปรับกระบวนการ WEDM ให้เหมาะสมมากที่สุดของวัสดุที่มีการเสริมแรงอนุภาค Al_2O_3 ด้วยลักษณะการทำงานแบบหลากหลายโดยใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational analysis) และใช้การออกแบบการทดลองของ Taguchi orthogonal array ซึ่งในการศึกษานี้มี ตัวแปรในการขึ้นรูปอันได้แก่ รัศมีการตัดของชิ้นงาน เวลาของการจ่ายไฟ เวลาที่ไม่มีการจ่ายไฟ รัศมีของเวลาการจ่ายไฟ รัศมีของการหยุด

จ่ายไฟ แรงดันไฟฟ้าเซอร์โว ความเร็วของเส้นลวด การไหลของน้ำ ซึ่งตัวแปรทั้งหมดนี้ได้รับการปรับให้เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาถึงลักษณะการทำงานแบบหลากหลาย อย่างเช่น อัตรากำจัดพื้นผิวและความหยาบของพื้นผิวสูงสุด โดยการศึกษาที่ปัจจัยและตัวแปรเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าช่วยลดเวลาในการผลิตลดในการลองผิดลองถูก และลดต้นทุนในสภาพที่ทำให้คุณภาพเพิ่มสูงขึ้น และลดต้นทุนการผลิตลง [18]

ในงานวิจัยของ Sanchez และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลในการจำกัดความเร็วในการตัดที่มีต่อความแม่นยำของการตัดมุมของกระบวนการ WEDM โดยใช้ชิ้นงานที่มีความหนา 50 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร โดยใช้รัศมีของมุมในการตัด 0.2 มิลลิเมตร และ 0.25 มิลลิเมตร ผลของการศึกษาพบว่า การจำกัดความเร็วของการตัดต่อความแม่นยำของการตัดมุนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อย่างเช่น ความหนาของชิ้นงาน รัศมีของมุม และจำนวนของการตัดในขั้นสุดท้าย และความผิดพลาดจะถูกลดลงอย่างมาก เมื่อมีการเพิ่มจำนวนการตัดในขั้นสุดท้าย [19]

ในงานวิจัยของ Kanlayasiri ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรของกระบวนการ WEDM ในความหยาบผิวของการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Design of experiments แบบ Full Factorial Design (2^k) ซึ่งจะมีการตัวแปรหรือปัจจัยในการทดลองคือ เวลาปล่อยพัลส์ Pulse-on time (ON), เวลาหยุดพัลส์ Pulse-off time (OFF), กระแส Pulse-peak current (IP), และ แรงดึงของเส้นลวด Wire tension (WT) ในแต่ละปัจจัยจะมีการทดลอง 2 ระดับ และใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิว จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวคือ Pulse-on time เวลาปล่อยพัลส์ (ON), และ กระแส Pulse-peak current (IP) หลังจากนั้นได้พัฒนาและสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการของสมการการถดถอย (Multiple Regression Method) เพื่อที่จะคำนวณหาค่าของ เวลาปล่อยพัลส์ และ กระแส ที่จะส่งผลไปยังค่าความหยาบผิว จากผลการทดลองพบว่าไม่มีสมมุติฐานใดที่ถูกละเมิด และ ค่าความหยาบผิวมีการเพิ่มขึ้นถ้าตัวแปรทั้งสองมีการเพิ่มขึ้นคือ เวลาปล่อยพัลส์ และ กระแส และผลจากการสร้างรูปแบบการทำนายค่าความผิดพลาดในส่วนที่ทำการทดลองนี้พบว่า ค่าความผิดพลาดในการทำนายสูงสุดในการทำนายน้อยกว่า 7% และค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการทำนายน้อยกว่า 3% [20]

ในงานวิจัยของ Ramakrishnan ได้ศึกษาการสร้างแบบและการปรับค่าให้เหมาะสมที่สุดของวัสดุ Inconel718 ในกระบวนการขึ้นรูปแบบ CNC WEDM เพื่อเป็นการทำนายและเลือกค่าต่าง ๆ ในการตัดที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ WEDM ในการทำนายลักษณะของผลการทำงานอันได้แก่ อัตราการตัดเนื้อวัสดุและความหยาบของพื้นผิวนั้น รูปแบบของ Artificial neural network (ANN) ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยใช้ Back-propagation algorithms และใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงตัวแปรค่าต่าง ๆ ของทฤษฎี การวิเคราะห์ความแปรปรวนหรือ ANOVA ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดลงไปถึงระดับความสำคัญของค่าของการขึ้นรูป ซึ่งสรุปได้ว่า รูปแบบ

รูปแบบของ Artificial neural network (ANN) ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำนายได้ถึงลักษณะการทำงานของกระบวนการ WEDM ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น [21]

ในงานวิจัยของ Sarkar และคณะ ได้ศึกษาการทำนายสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำมีกระบวนการตัดชิ้นงานด้วยวิธี WEDM โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองหรือ Response Surface Methodology (RSM) แบบ Central Composite Design (CCD) ซึ่งมีตัวแปรในการทดลอง 5 ปัจจัย โดยใช้ Analysis of variance (ANOVA) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรผลจากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าคุณภาพของพื้นผิวลดลงเมื่อความเร็วของการตัดเพิ่มขึ้นและก็จะแตกต่างกันไปตามความหยาบของพื้นผิวที่มีค่า 1.22 ไมโครเมตร และ ความเร็วในการตัด 13.88 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับการทดลองนี้ [22]

ในงานวิจัยของ Bamberg ได้ศึกษาผลของการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดที่ทำจากวัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำ ที่มีการเติมสารเจือปน (p-type) ในกรรมวิธี WEDM โดยใช้เส้นลวดชนิดและขนาดที่ต่าง ๆ กัน จากนั้นจึงตัดชิ้นงานตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ 3D optical profiler และกล้องสแกนจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในการส่องดูความหยาบและความเสียหายของผิวชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างจะถูกกัดกร่อนและวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรมิเตอร์พลังงาน X-ray (EDS) และมีการทดสอบกับเส้นลวดขนาดเล็กเพื่อเพิ่มอัตราการเฉือนและพื้นผิว นอกจากนี้ยังทำการทดสอบขนาดกระแสสูงสุดที่ลวดแต่ละชนิดสามารถรับได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อผิวชิ้นงาน ซึ่งผลจากการทดลองที่ได้พบว่า สามารถใช้ Gallium ในกระบวนการ WEDM ได้โดยไม่ต้องเติมความสามารถในการนำไฟฟ้า (ไม่ต้องทำให้เป็น p-type) โดยอัตราการเฉือนจะขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้า, ปริมาตร รวมถึงชนิดและขนาดของลวด โดยขนาดของกระแสที่เหมาะสมกับลวดแต่ละชนิดจะต่างกันและหากปล่อยเกินกระแสสูงสุดที่ลวดแต่ละชนิดสามารถรับได้จะทำให้โดยที่ผิวชิ้นงานเกิดเป็นลิ้มเล็กๆ ลวดที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดความสูญเสียของรอยตัดน้อยกว่า ในขณะที่ลวดแบบอื่นๆ อาจทำให้เกิดลิ้มเล็กๆ เนื่องจากต้องให้กระแสที่สูงเพื่อต้องการอัตราการตัดที่สูง และการใช้ลวด Germanium แบบไม่ต้องเติมสิ่งเจือปนจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการแบบที่เติม Silicon [23]

ในงานวิจัยของ Haddad ได้ศึกษาการทดสอบ Cylindrical Wire Electrical Discharge Turning (CWEDT) ของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3 โดยประยุกต์ใช้วิธีการการออกแบบการทดลอง (DOE) แบบ $2^3 \times 3^2$ mixed full factorial design ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่นำมาใช้พิจารณา 4 อย่างคือ กำลัง, แรงดันไฟฟ้า, เวลาหยุดพัลส์ และความเร็วในการหมุน เพื่อหาพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ที่เหมาะสมในการศึกษา ความหยาบผิว (Ra), ความกลม และอัตราการเร็วการตัด (MRR) ในกระบวนการ CWEDT ซึ่งใช้วัสดุเป็นเหล็กมาตรฐานอเมริกา AISI ชนิด D3 เนื่องจากนิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบต่างๆ ในลูกสูบ ซึ่งสมการ Regression ที่ได้สามารถใช้ในการคาดการณ์ค่าความหยาบผิว (Ra), ความกลม และอัตราการเร็วการตัด (MRR) ที่เหมาะสมได้ และ

อาจพัฒนาการออกแบบการทดลอง (DOE) นี้โดยการเพิ่มความซับซ้อนของแบบจำลองและใช้ปัจจัยอื่นๆเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการ EDM และ WEDM เพื่อสร้างแบบจำลองที่มีเสถียรภาพต่อไป [24]

ในงานวิจัยของ Mohammadi และคณะได้ใช้การออกแบบการทดลองโดยวิธีทากูจิ (แบบ $L_{18} 2^1 \times 3^7$ orthogonal array) ในการศึกษาการออกแบบแกนหมุนเพื่อให้มีความแม่นยำ, ยึดหยุ่น และ ทนต่อการสึกกร่อน โดยพิจารณาผลของ กำลังงาน, เวลาหยุดพัลส์, แรงดันไฟฟ้า, เซอร์โว, ความเร็วเส้นลวด, ความตึงเส้นลวด และความเร็วในการหมุน ที่มีต่ออัตราการตัด (MRR) โดยมีเป้าหมายคือ ผล, ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์และค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆที่กล่าวมา ที่มีผลต่อ MRR ซึ่งสามารถดูได้จากสมการ Regression และ S/N ratio ที่ได้ ซึ่งพบว่า กำลังงาน, แรงดันไฟฟ้า และเซอร์โว มีผลมากที่สุด ความเร็วในการหมุนและความตึงเส้นลวดมีผลน้อย ส่วนความเร็วเส้นลวด และเวลาหยุดพัลส์ไม่มีผลต่อ MRRในงานวิจัยนี้ [25]

ในงานวิจัยของ Portillo และคณะได้ศึกษาวิธีการใช้เครือข่าย Artificial neural network (ANN) ที่เกิดขึ้นซ้ำในการติดตามตรวจสอบพฤติกรรมที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพลงในความหนาของชิ้นงานต่าง ๆ ของกระบวนการ WEDM เพื่อใช้ในการตรวจสอบล่วงหน้าถึงการเสียของเครื่องมือตัดหรือเส้นเส้นลวดซึ่งเป็นการลดลงของประสิทธิภาพของกระบวนการและความแม่นยำที่ต้องการ วิธีการที่นำเสนอนี้ได้กำหนดปริมาณโดยผ่านสัดส่วนการพิสูจน์ และสัดส่วนการทดสอบ สัดส่วนทั้งสองนี้คำนวณไว้สำหรับเครือข่าย Parallel Elman network โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัดส่วนการพิสูจน์นั้นมีตั้งแต่ 85 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนการทดสอบมีตั้งแต่ 75 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้ระบบการควบคุมนี้หมายถึงว่า กรณีการขาดของเส้นลวดสามารถที่จะลดลงได้ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ ในความหนาของชิ้นงานต่าง ๆ ที่ใช้โดยทั่วไป [26]

ในงานวิจัยของ Poros ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปแบบ WEDM ของวัสดุที่ขึ้นรูปยากโดยการพัฒนาแบบของ Employing dimensional analysis และ Semi-empirical model ผลของการศึกษาพบว่าค่าความเหนียวนำความร้อนที่สูงขึ้นและกำลังของความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ขึ้นรูปนั้นก่อให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพของกระบวนการ WEDM และประสิทธิภาพของการตัดก็จะลดลงสำหรับวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า [27]

ในงานวิจัยของ Marafona ได้ศึกษาอิทธิพลความแข็งของชิ้นงานในประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการ EDM ที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อวัสดุและความหยาบของผิวชิ้นงาน โดยใช้วิธีการของ Taguchi methodology ในการศึกษาอิทธิพล และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ Linear regression model เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Various inputs and a Single output จากผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการตัดเนื้อวัสดุจะขึ้นอยู่กับความแข็งของชิ้นงานและการทำนายค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 1.06% และยังคงแสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับความแข็งของชิ้นงานและตัวแปรป้อนเข้าอื่นๆ และรูปแบบการทำนายค่าความหยาบผิวของชิ้นงานกับค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 0.4% [28]

ในงานวิจัยของ Saha ได้ศึกษากระบวนการสปาร์คด้วยไฟฟ้าแบบแห้งโดยให้ฉนวนเหลว แทนที่ด้วยสื่อก๊าซ วิเคราะห์ค่าตัวแปรในกระบวนการนี้ทำได้ด้วยการใช้ท่อขั้วไฟฟ้าทองแดง และแผ่นเหล็กอ่อน การทดลองทำขึ้นด้วยการใช้อากาศเป็นสื่อกลางเพื่อศึกษาผลกระทบของ ช่องว่างแรงดันไฟฟ้า การปล่อยกระแส จังหวะเวลา อัตราส่วน แรงดันอากาศ และความเร็วของ แรงหมุน โดยแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง ได้รับการพัฒนาด้วยการออกแบบการทดลองด้วยที่มีพื้นฐานมาจาก Central Composite Design ของการทดลอง และ Response Surface Analysis และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย (Analysis of variance) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าลักษณะการ ไหลของอากาศใน Inter-electrode ส่งผลต่อ MRR และ R_a การคงอยู่ของจำนวนช่องให้อากาศ ผ่านดีที่สุดในอุปกรณ์ที่ทำให้ได้ MRR สูงที่สุด และ R_a ต่ำที่สุดและจากการออกแบบชุดทดลอง บน CCD พบว่า การปล่อยกระแสไฟฟ้า, Duty factor, แรงดันอากาศ และความเร็วของแกนหมุน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ MRR และ TWR และจะเพิ่มขึ้นหากปัจจัยเหล่านี้ ในค่าเฉลี่ย มีการเพิ่มขึ้นและ จากการทดลอง CCD พบว่า นอกจากความต่างของแรงดันไฟฟ้าแล้ว ตัวแปร อื่นๆ (การปล่อยกระแสไฟ, Pulse-on time, Duty factor, แรงดันอากาศ และความเร็วแกนหมุน) มี ผลสำคัญต่อค่าความหยาบผิว R_a โดยค่า R_a ลดลงด้วยการลดลงของค่ากระแสไฟฟ้า และ Duty factor รวมทั้งค่า R_a ยังลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันอากาศ และความเร็วแกนหมุน [29]

ในงานวิจัยของ Wang และคณะได้ศึกษาและใช้การออกแบบการทดลองโดยวิธีทากูชิ แบบ L_{18} และ L_9 orthogonal array เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการตกแต่งชั้นผิวใหม่โดยใช้วัสดุ Ni-based super alloys หลังจากกระบวนการ EDM โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นแรก ทำ EDM ด้วยพลังงานขนาดใหญ่ซึ่งจะใช้ Taguchi L_{18} analytical method สำหรับ recast layer ที่ หนานี้ ขั้นที่สองจะทำการตกแต่งส่วนที่เกิด recast แล้วใช้ Taguchi L_9 analytical method ในการ วิเคราะห์คุณภาพ แล้วทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของ Ni-based superalloys เป็นขั้นตอน สุดท้าย ผลจากการทดลองดังกล่าวพบว่าไฟฟ้าบวกจะให้ชั้น recast ที่หนากว่าการใช้ไฟลบ และ การลบชั้น recast ด้วยกรด Phosphoric และกรด Hydrochloric ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมจะมี อัตราการลบชั้น recast ที่เพิ่มขึ้นสำหรับวัสดุ Inconel 718 alloy และจากการใช้ การวิเคราะห์ EPMA พบว่าการใช้กรด Phosphoric และกรด Hydrochloric พิสูจน์ว่าสามารถลดคาร์บอนลง อย่างรวดเร็วในกระบวนการกัดกร่อน ซึ่งเมื่อทำการทดสอบ Micro-hardness พบว่ากรดทั้งสองจะมี ผลต่อวัสดุในชั้น recast เท่านั้น โดยที่ชั้นวัสดุพื้นฐานจะไม่ได้รับความเสียหายเลย ซึ่งการ ออกแบบการทดลองแบบ Taguchi นั้นจะช่วยให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพการ ทำงานที่ดี [30]

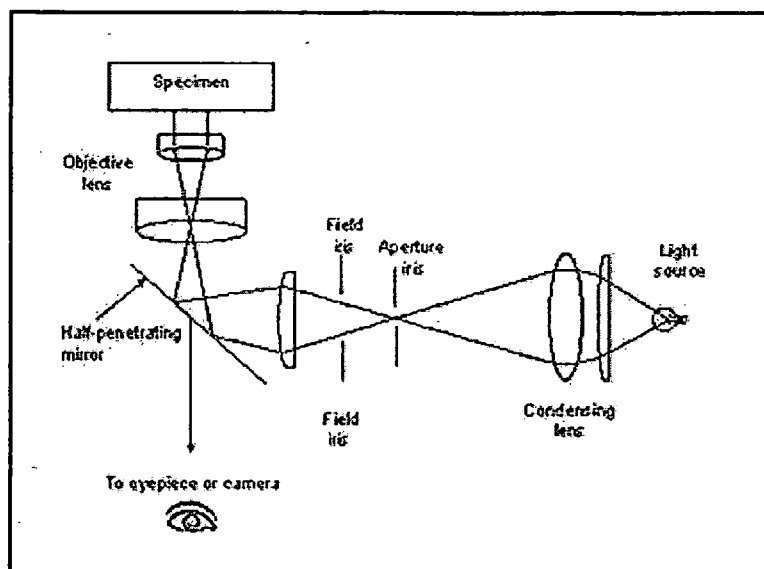
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

สำหรับโครงสร้างบางอย่างมีขนาดใหญ่ในระดับมหภาค (Macroscopic) จึงสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่วัสดุจำนวนมากมีขนาดเกรนในระดับจุลภาค คือ มีขนาดระดับไมโครเมตรหรือเรียกอีกอย่างว่า ระดับไมครอน ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การศึกษารายละเอียดของวัสดุเหล่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุรวมทั้งองค์ประกอบและตำหนิที่มีผลต่อวัสดุเพื่อให้เข้าใจถึงความเกี่ยวข้องระหว่างโครงสร้าง และคุณสมบัติทำให้สามารถทำนายสมบัติของวัสดุได้จากโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตามก่อนการตรวจสอบในระดับจุลภาคต้องมีการเตรียมพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญและต้องทำอย่างระมัดระวังมากในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยการขัดกระดาษทรายและผงขัดที่มีขนาดเล็กมาก หลังจากนั้นกัดผิว (Etching) ด้วยสารเคมีที่เหมาะสมจึงจะสามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้

2.2.1.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

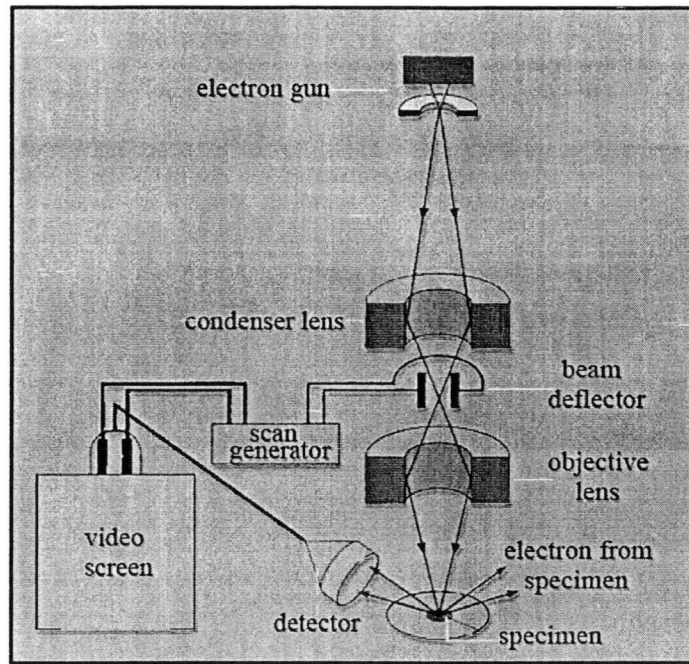
กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้น โดยการสะท้อนแสง สำหรับวัสดุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และพอลิเมอร์บางชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนเรียบให้สะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากกัดด้วยสารเคมีและนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงจะมองเห็น โครงสร้างจุลภาคที่เป็นเช่นนี้เพราะเกรนมีทิศทางที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนออกจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันหลังผ่านการกัดผิว โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนจะขึ้นอยู่กับ การสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังการกัดผิวที่ขอบเกรนเกิดร่องขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรนโดยร่องขนาดเล็กนี้สามารถมองเห็นได้เนื่องจากการสะท้อนแสงที่แตกต่างจากบริเวณพื้นเกรน



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แสง

2.2.1.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

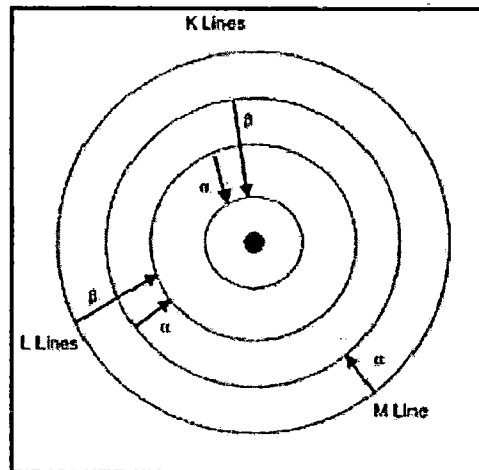
กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ซึ่งยิงลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบน เป้าซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง จะรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic signals) ซึ่ง ปล่อยออกมา โดยชิ้นงานที่ใช้ทำเป็นเป้าไม่จำเป็นต้องผ่านการขัดผิว แต่จะต้องสามารถนำไฟฟ้า ได้ ถ้าวัสดุไม่นำไฟฟ้าจะต้องเคลือบผิวด้วย โลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทองคำ หรือ คาร์บอน รูปที่ 2.2 แสดงรายละเอียดและหลักการทำงาน โดยปืนอิเล็กตรอนจะผลิตลำอิเล็กตรอน (Electron beam) และควบคุมให้พุ่งมาตกกระทบบจุดเล็กๆ บนเป้าตัวอย่าง โดย Scanning coils จะ ปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างลำอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็กๆ (Low-angle back-scattered electrons) จะทำอันตรกิริยากับส่วนที่นูนของพื้นผิว และทำให้เกิด อิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่สอง (Secondary back-scattered electrons) เพื่อสร้างสัญญาณของ อิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดภาพสามารถขยายได้ถึง 500,000 เท่า



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

2.2.1.3 การวิเคราะห์ Energy dispersive X-ray

การวิเคราะห์ EDX ใน SEM เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยใช้หลักการยิงรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ไปยังเป้าหมายตัวอย่างและวัดระดับการกระจายของพลังงาน (Energy dispersive) ที่สะท้อนออกมาในรูปร่างรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) จะทำให้ทราบว่าตัวอย่างมีธาตุอะไรอยู่บ้างในปริมาณเท่าไรซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งบรรยากาศปรกติ สุญญากาศ และก๊าซฮีเลียม เพื่อความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งาน สำหรับรังสีเอ็กซ์คือ โฟตอน (Photon) ที่มีพลังงานมากกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) แต่น้อยกว่ารังสีแกมมา (Gamma rays) รังสีเอ็กซ์มีพลังงานต่ำสุดที่ประมาณ 10 eV และสูงสุดประมาณ 100 keV ซึ่งการมีอยู่ของอิเล็กตรอนในอะตอมในสภาวะการยึดเหนี่ยว โดยแบบจำลองอะตอมของบอร์และจากกลศาสตร์ควอนตัมมีสมมติฐานว่า อิเล็กตรอนมีวงโคจรและตำแหน่งที่แน่นอนอยู่รอบนิวเคลียส จากหลักการควอนตัมพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าเฉพาะคือ อิเล็กตรอนสามารถมีพลังงานในบางค่าเท่านั้นและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนแปลงไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่ประกอบด้วยระดับชั้นพลังงานย่อย (Sub shell) โดยเลขควอนตัมจะบ่งบอกระดับชั้นพลังงานหลัก (Shell) ถูกแสดงด้วยเลขควอนตัมหลัก (Principal quantum number) n เป็นเลขจำนวนเต็มเริ่มจากหนึ่งหรือบางครั้งแสดงด้วยอักษร K, L, M แทนเลข 1, 2 และ 3 ตามลำดับแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองอะตอมของบอร์

แบบจำลองอะตอมของบอร์จะเกิดรังสีเอ็กซ์ปล่อยออกมาโดยอะตอมหลังเกิดไอออน เมื่อปล่อยรังสีเอ็กซ์จากแหล่งพลังงานมากระทบเป้าตัวอย่างและจะเกิดการดูดซับรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างที่ถูกกำหนดโดยปริมาณของสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Absorption coefficient) (cm^2/g) จะแสดงโดย μ/ρ ซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's law)

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho} \rho x\right)} \quad (2.1)$$

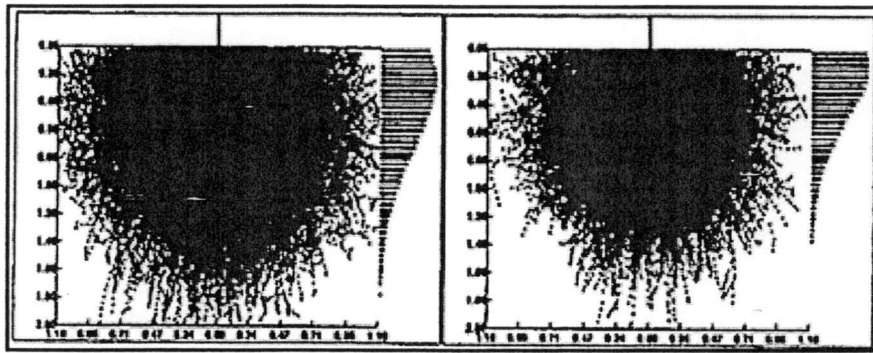
เมื่อ I คือ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่มากกระทบตัวอย่าง I_0 คือ ความเข้มเริ่มต้นของรังสีเอ็กซ์ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง และ x คือ ความหนาของวัสดุที่รังสีเอ็กซ์ผ่าน โดยปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับจะเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีเอ็กซ์ และคุณลักษณะเฉพาะทางเคมีของวัสดุ สำหรับอัตราการสูญเสียพลังงานของลำแสง (Beam) กับความลึกจะแสดงโดยสมการของ Bethe's

$$\frac{dE}{dx} = -7.85 \left(\frac{Z \rho}{AE_m} \right) \ln \left(\frac{1.66E}{J} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ E คือ พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน Z คือ จำนวนอะตอมเฉลี่ย A คือ น้ำหนักของอะตอม และ J คือ จำนวนไอออนเฉลี่ยของธาตุในตัวอย่าง

สำหรับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งเป็นจุดที่ลำอิเล็กตรอนมาตกกระทบไปถึงการตรวจจับและรวบรวมจากสเปกตรัม (Spectrums) สำหรับจำนวนอะตอมที่มีความแตกต่างกัน ตัวอย่างการวิเคราะห์โลหะผสม Ni-Al โดย Ni Ka line

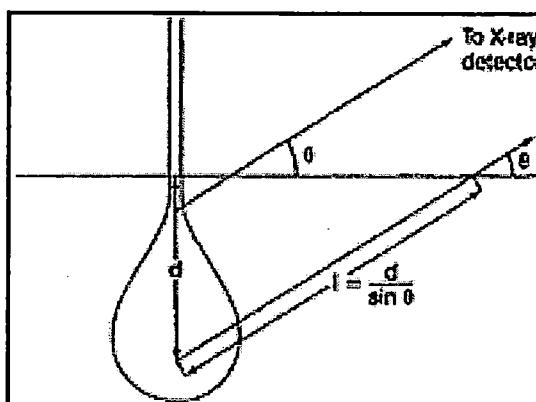
พลังงานจะอยู่ที่ประมาณ 7.48 keV และ L line ประมาณที่ 0.85 keV ถึงแม้ว่า Al K line มีพลังงานประมาณ 1.49 keV การเลือกพลังงานอิเล็กตรอนสำหรับการวิเคราะห์ที่มีความเข้มข้นประมาณ 20 keV เมื่อลำอิเล็กตรอนแทรกซึมไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นรังสีเอ็กซ์ของ Ni K แต่สำหรับการกระตุ้น Al K หรือรังสีเอ็กซ์ของ Ni L ขณะที่การกระจายของอิเล็กตรอนผ่านตัวอย่างและพลังงานถูกลดลง กระบวนการรังสีเอ็กซ์ของ Ni K จะลดลงกับความลึก อย่างไรก็ตามกระบวนการรังสีเอ็กซ์ของ Al K และ Ni L เพิ่มขึ้นเพราะพลังงานลำแสงเข้าใกล้พลังงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการของรังสีเอ็กซ์นั้นๆ ในที่สุดกระบวนการรังสีเอ็กซ์ของ Ni K จะสิ้นสุดทันทีที่พลังงานของลำแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 8 keV แต่กระบวนการรังสีเอ็กซ์ของ Al K และ Ni L จะยังคงเพิ่มขึ้นสำหรับบางส่วนของที่ลึกมาก กระบวนการจะยังคงมีรังสีเอ็กซ์ที่สูงสุดของกระบวนการและค่อนข้างจะลดลงอย่างรวดเร็วถึงศูนย์ รูปที่ 2.4 แสดงรายละเอียดของกระบวนการจากการจำลอง



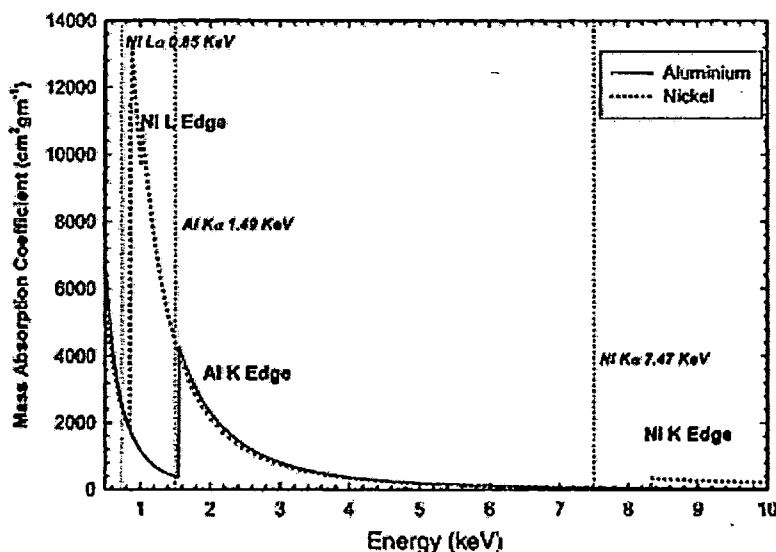
รูปที่ 2.4 แบบจำลองรังสีเอ็กซ์ของระดับพลังงานหลัก K ของ AL (ซ้าย) และ Ni (ขวา) ของ NiAl จากการทำให้ SEM ที่ 20 kV

สำหรับตัวอย่างถ้าความต่างศักย์ลำแสงเป็น 10 keV รังสีเอ็กซ์ของ Ni K เกิดขึ้นเล็กน้อย และกระบวนการของ Al K และรังสีเอ็กซ์ของ Ni L จะน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความลึก เพราะพลังงานสูงอิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานช้ามากกว่าพลังงานต่ำ เช่น ช่วงของ 10 keV อิเล็กตรอนที่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของช่วง 20 keV ในการอธิบายนี้จึงมีการยอมรับถึงการเสียพลังงานอย่างรวดเร็วของลำอิเล็กตรอน (เป็นที่ยอมรับถึงสมการ Bethe สำหรับตัวอย่าง) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าสมการของ Bethe's อาจจะทำนายพลังงานของอิเล็กตรอนอย่างแม่นยำ บางครั้งก็ไม่สามารถประมาณพลังงานที่กระจายของอิเล็กตรอนที่ผ่านเข้าไปสัมพันธ์กับระยะห่างที่กว้าง โดยปราศจากการสูญเสียพลังงานและความจริงอื่นๆ ที่อยู่อย่างกระจัดกระจายกลับไปสู่พื้นผิวการเพิ่มไปสู่ความเข้มข้นของอิเล็กตรอน แต่การเพิ่มขึ้นของพลังงานที่กระจายของอิเล็กตรอนบางส่วนของอิเล็กตรอนสามารถกระตุ้นรังสีเอ็กซ์ของ Ni K ในการตรวจจับรังสีเอ็กซ์เพื่อเกิดเป็นสเปกตรัม ดังรูปที่ 2.5 แสดงการดูดซับรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างและรูปที่ 2.6 แสดงสัมประสิทธิ์การ

ดูดซับสำหรับ Ni และ Al ขณะเป็นฟังก์ชันของพลังงานของรังสีเอ็กซ์บนช่วงเส้นตรงกับพลังงานของ Ni K, Al และ Al line ที่แสดงรายละเอียดตัวแปรจากสมการของ Heinrich's สำหรับการสะท้อนกลับของ NiAl เป็นสาเหตุให้การตรวจจ็บริ่งสีเอ็กซ์ทำมุม 40 องศา กับระนาบพิจารณาผลขณะรังสีเอ็กซ์ของ Al k_{α} เกิดที่ 1 μm ได้พื้นผิวและเริ่มเคลื่อนที่ไปสู่การตรวจจ็บริ่งสีเอ็กซ์เมื่อเปลี่ยนไปเป็น 1.6 μm



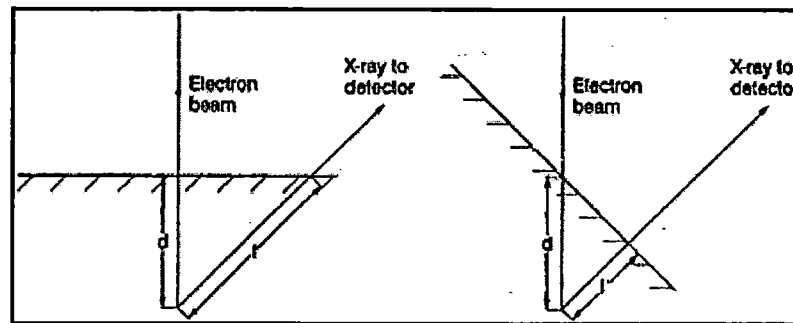
รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งปฏิกิริยาที่แตกต่างของการเกิดรังสีเอ็กซ์



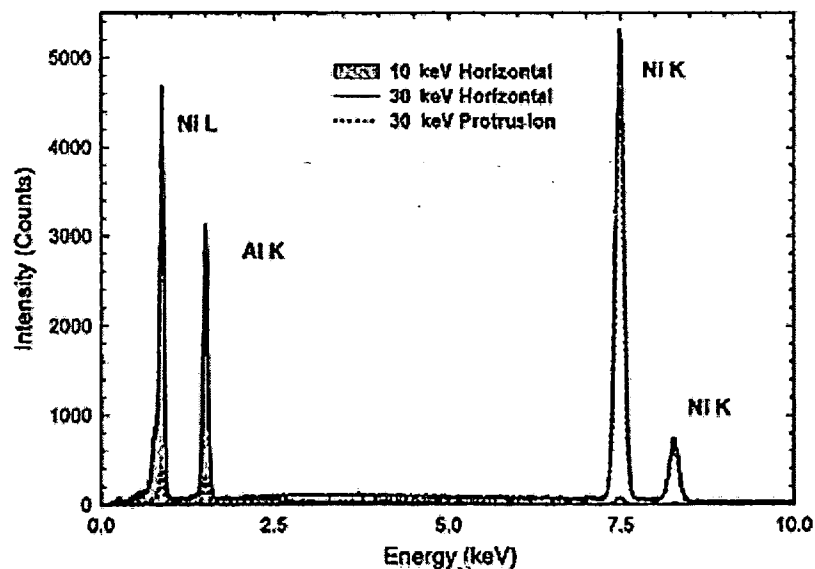
รูปที่ 2.6 ปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีเอ็กซ์ของ Ni และ Al ขณะเป็นฟังก์ชันของพลังงานรังสีเอ็กซ์

ปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับโดยตัวแปรจากสมการของ Heinrich's สามารถคำนวณรังสีเอ็กซ์ได้ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ของการมาถึงที่พื้นผิว ดังนั้นที่เกดขึ้นจากการตรวจจ็บริ่งสีเอ็กซ์แตกต่างกันกับรังสีเอ็กซ์ของ Ni K α ที่เกิดขึ้นที่ความลึกเท่ากันมีความน่าจะเป็นของการตรวจจ็บริ่งสีเอ็กซ์ 94 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับรังสีเอ็กซ์ของ Ni L ที่ 0.85 keV ที่ความลึกเท่ากันมีความน่าจะเป็นของการ

ตรวจจับ 17 เปอร์เซ็นต์ สำหรับบางจุดมีผลกระทบต่อการศึกษาสำหรับพื้นผิวตัวอย่างที่มีลักษณะเอียงเพราะระยะความยาวของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นอยู่กับความเอียงของพื้นผิวแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 สำหรับรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างผลกระทบที่รุนแรงของตัว Ni-49.3 at.% Al จากรูปได้รับสเปกตรัมที่พลังงาน beam 30 keV จากพื้นผิวที่มีลักษณะราบเรียบกับการได้รับสเปกตรัมจากส่วนที่ยื่นออกมาจากพื้นผิว



รูปที่ 2.7 ลักษณะพื้นผิวที่มีผลต่อระยะรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.8 ผลของการวิเคราะห์ EDX ใน SEM

และส่วนที่เป็นพื้นราบที่ 10 keV สิ่งสำคัญของการไม่สะท้อนกลับของรังสีเอ็กซ์ในอะตอมของวัสดุ คือ การเกิดช่องว่างในโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดรังสีเอ็กซ์จากอะตอมซึ่งต้องการช่วงเวลา โดยความเข้มข้นของบางเส้นในสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์สามารถปรับให้ชัดเจนได้ โดยทั่วไปผลฟลูออเรสเซนซ์จะมีความเข้มข้นลดลงจากความแตกต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอ็กซ์และพลังงานการเกิดไอออน (Ionization energy) ของช่องว่างก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์และความชัดเจนจะขึ้นอยู่กับผลกระทบของความเข้มข้นรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ ลักษณะของ

รังสีเอ็กซ์ที่เคลื่อนไปสู่การตรวจจับสามารถก่อเกิดเป็นฟลูออเรสเซนซ์ในช่วงเวลานั้น และรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยออกมาจะถูกตรวจจับและนำไปวิเคราะห์ผลจากการสะท้อนกลับจากตัวอย่าง

จากตัวอย่างแสดงให้เห็นรังสีเอ็กซ์ของ Ni K ในปริมาณมากนั้นจะเป็นทิศทางเคลื่อนที่สู่พื้นผิวตัวอย่างที่สะท้อนกลับ อย่างไรก็ตามรังสีเอ็กซ์ของ Ni K ที่ผ่านไปสู่ตัวอย่างก่อให้เกิดไอออนของ Al L หรือ Ni L และบางครั้งรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้น โดยบังเอิญ (ผลที่ตามมาของรังสีเอ็กซ์ของ Ni K เป็นระยะห่างในตัวอย่างที่กว้าง) เพราะฉะนั้นมีผลทำให้ Ni L หรือ Al สูงในกรณีของรังสีเอ็กซ์ของ Al ถึงแม้ว่ามีความแตกต่าง จึงเป็นการดูดซับ โดยเปรียบเทียบความเข้มข้น โดย Ni และมีในระยะที่สั้นเนื่องจากเปรียบเทียบกับความลึกที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์มีทุกทิศทางและมีทั่วทั้งตัวอย่างทำให้เกิดรังสีนำไปสู่การอธิบายในกระบวนการสเปกตรัม

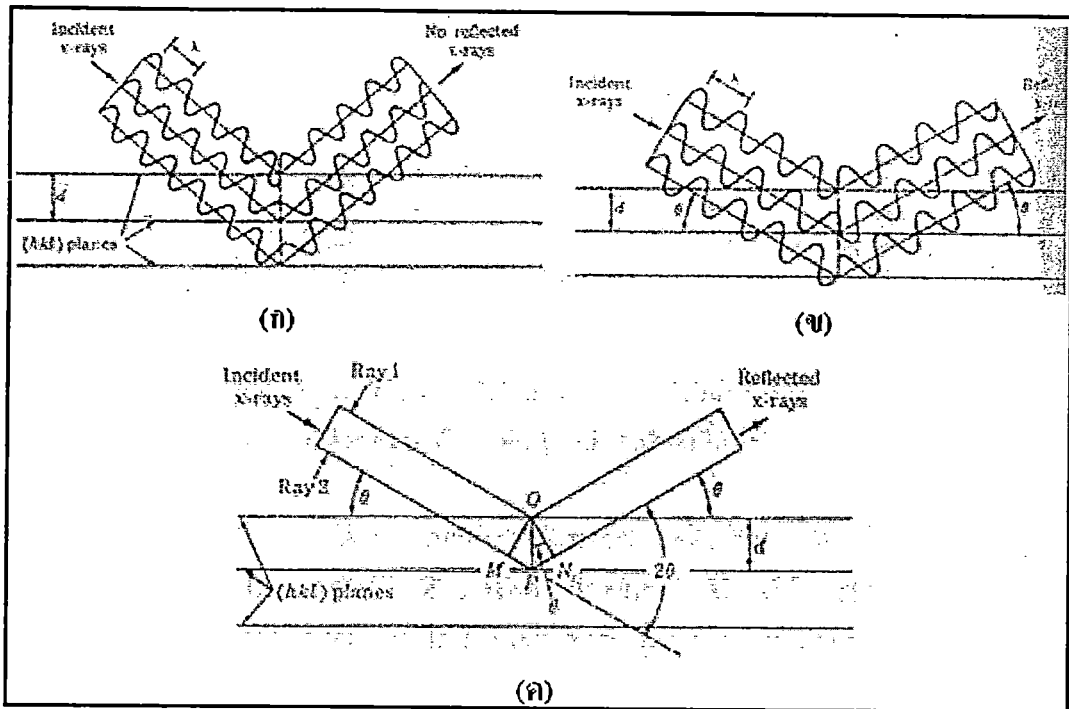
2.2.1.4 การวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกโดยทั่วไปใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับระยะห่างระหว่างระนาบแลตทิซของผลึก เนื่องจากความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์บางช่วงเท่ากับระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกของแข็ง เมื่อรังสีเอ็กซ์กระทบผลึกของแข็งจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยมีรูปแบบทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องกับการเลี้ยวเบนหรือการเสริมเนื่องจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ดังนี้ พิจารณาลำคลื่นที่มีความถี่เดียว (Single wave length) ของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบผลึกดังรูปที่ 2.9 ในระนาบของผลึกของอะตอมที่เป็นแกนกลางของการกระเจิง (Scattering) แทนด้วยระนาบของผลึกซึ่งทำหน้าที่เหมือนกระจกเงาที่สะท้อนลำคลื่นที่ตกกระทบ โดยเส้นในแนวระดับแทนชุดของระนาบผลึกที่ขนานกันมีดัชนีมิลเลอร์ (hkl) เมื่อลำคลื่นความถี่เดียวกันของรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น λ ตกกระทบระนาบที่มุมซึ่งลำคลื่นสะท้อนไม่อยู่ในเฟสเดียวกันจะไม่มีลำคลื่นเสริมเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) และจะเกิดการสอดแทรกแบบทำลาย ถ้าการสะท้อนของรูปคลื่นที่สะท้อนออกจากระนาบอยู่ในเฟสเดียวกันจะมีการเสริมกัน หรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) เมื่อพิจารณารังสีเอ็กซ์ตกกระทบดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) สำหรับรังสีที่มีเฟสตรงกัน ระยะทางการเคลื่อนที่ของรังสี 2 ส่วน MP + PN จะต้องเป็นเลขจำนวนเต็มหน่วยของความยาวคลื่น λ ดังนี้

$$n\lambda = MP + PN \quad (2.3)$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ และเรียกลำดับของการเลี้ยวเบน (Order of diffraction) เนื่องจากทั้ง MP และ PN เท่ากับ $d_{hkl} \sin \theta$ เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกที่มีดัชนี (hkl) ดังนั้นสภาพที่เกิดขึ้นจากการสอดแทรกแบบเสริมสร้างจะเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law)

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \tag{2.4}$$

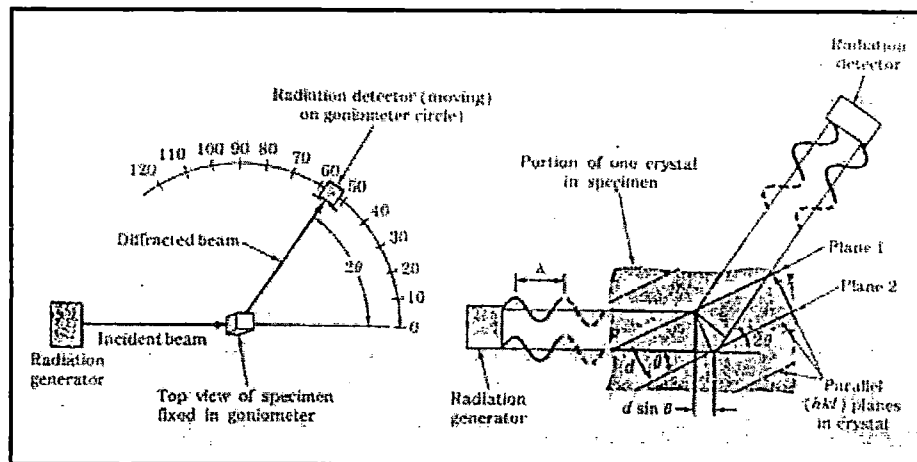


รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบผลึก (hkl) (ก) ไม่มีลำคลื่นเลี้ยวเบนปรากฏที่มุมตกกระทบที่กำหนด (ข) ที่มุมของแบรกก์ θ รังสีสะท้อนมีเฟสตรงกันและมีการเสริมซึ่งกันและกัน (ค) มีลักษณะคล้ายกับรูป (ข) แต่ไม่แสดงรูปคลื่น

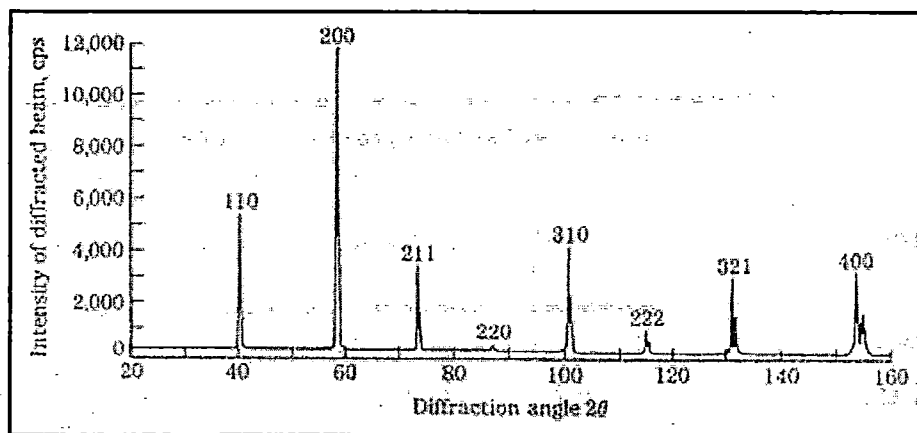
จากสมการของแบรกก์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของตำแหน่งลำคลื่นที่เลี้ยวเบนเสริมกันในรูปความยาวคลื่น λ ของรังสีที่เปล่งออกมาและช่องว่างระหว่างระนาบ d_{hkl} ของระนาบของผลึก โดยทั่วไปจะใช้การเลี้ยวเบนลำดับที่ 1 ($n = 1$) กฎของแบรกก์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \tag{2.5}$$

การวิเคราะห์ผลึกโดยใช้รังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีซึ่งมีที่รับการแผ่รังสีเพื่อหาค่ามุมและความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนของลำคลื่น เครื่องบันทึกจะพล็อตค่าความเข้มข้นของการเลี้ยวเบน ในขณะที่ตัวรับรังสีเคลื่อนที่ไปบนเครื่องวัดมุมของผลึกซึ่งมีลักษณะเป็นรูปวงกลมแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 พร้อมๆ กันในช่วงของค่ามุม 2θ รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนของลำคลื่นกับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ที่บันทึกโดยเครื่องบันทึกการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สำหรับตัวอย่างเป็นวัสดุทดลองที่เป็นโลหะผงบริสุทธิ์ โดยวิธีนี้มุมของการเลี้ยวเบนของลำคลื่นและความเข้มข้นสามารถบันทึกในช่วงเวลาหนึ่ง



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงรายละเอียดของเครื่องวัดการเลี้ยวเบน



รูปที่ 2.11 การเลี้ยวเบนสำหรับตัวอย่างที่เป็นโลหะทั้งสะเตน

จากตัวอย่างในช่วงมุมการเลี้ยวเบน 2θ จากการทดลองการเลี้ยวเบนของระนาบ $\{hkl\}$ มีหลายค่า และมีความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนของลำคลื่นที่แตกต่างกันในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 20 ถึง 160° สำหรับทั้งสะเตนมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC การเลี้ยวเบนจึงเกิดขึ้นได้เฉพาะระนาบซึ่งมีดัชนีมิลเลอร์ $(h + k + l)$ รวมกันทั้งหมดมีค่าเป็นเลขคู่ แต่ในกรณีโครงสร้างผลึกแบบ FCC เลี้ยวเบนเกิดขึ้นได้กับระนาบซึ่งมีดัชนีมิลเลอร์รวมกันแล้วเป็นทั้งเลขคู่และเลขคี่ [31]

2.3 หลักการ Electrical Discharge Machining

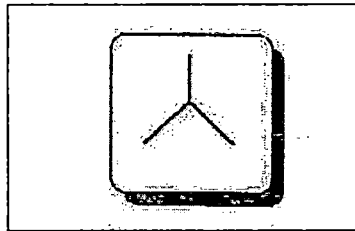
2.3.1 การกำหนดแกนพิกัดมาตรฐาน (Normal Coordinate System)

การติดตั้งชิ้นงานตามระบบแกนพิกัดตั้งฉากมือขวา (Right-Hand Rectangular Coordinate System) โดยขนานกับการเคลื่อนที่เส้นตาราง (ซ้าย-ขวา, หน้า-หลัง, ขึ้น-ลง) ของเครื่องมือกัดดูได้จากรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13 ทิศทางบวกของแกน Z

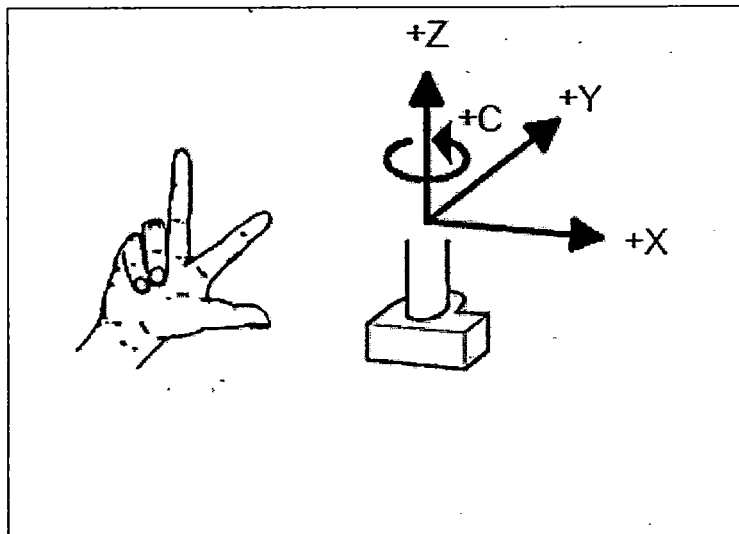
ชิ้นงานอยู่ในแกนหมุนให้ถือการมองเครื่องมือตัดจากแกนหลักเป็นทิศทาง (+) ดูได้จากรูปที่ 2.14 เครื่องมือตัดอยู่ในแกนหมุนให้ถือการมองชิ้นงานจากแกนหลักเป็นทิศทางบวก (+) ดูได้จากรูปที่ 2.15 แกนหมุนและแกนเสริม

แกนหมุนเป็นแกนที่หมุนและขนานกับแกนพิกัด ให้ถือทิศทางของการหมุนของเกลียวมือขวาเป็นทิศทางบวก (+)

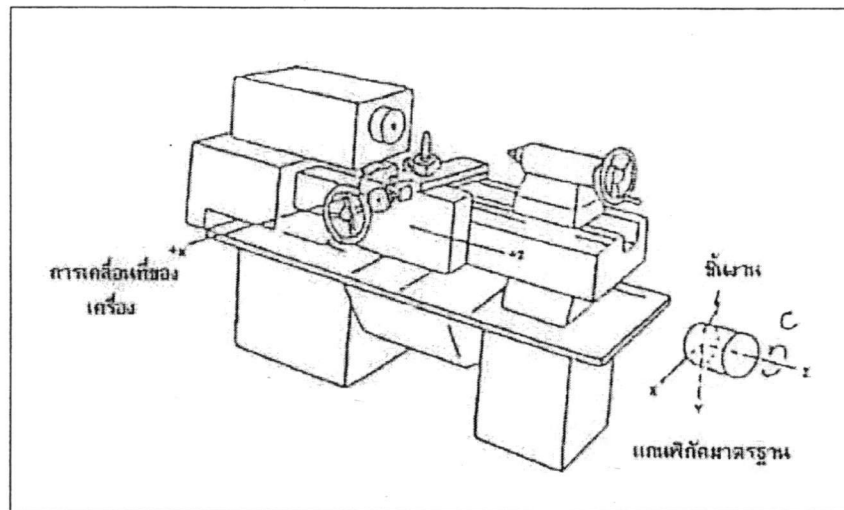
แกนเสริมเป็นแกนที่ช่วยในการเคลื่อนที่อื่น ๆ นอกเหนือจากแกนพิกัดและแกนหมุน



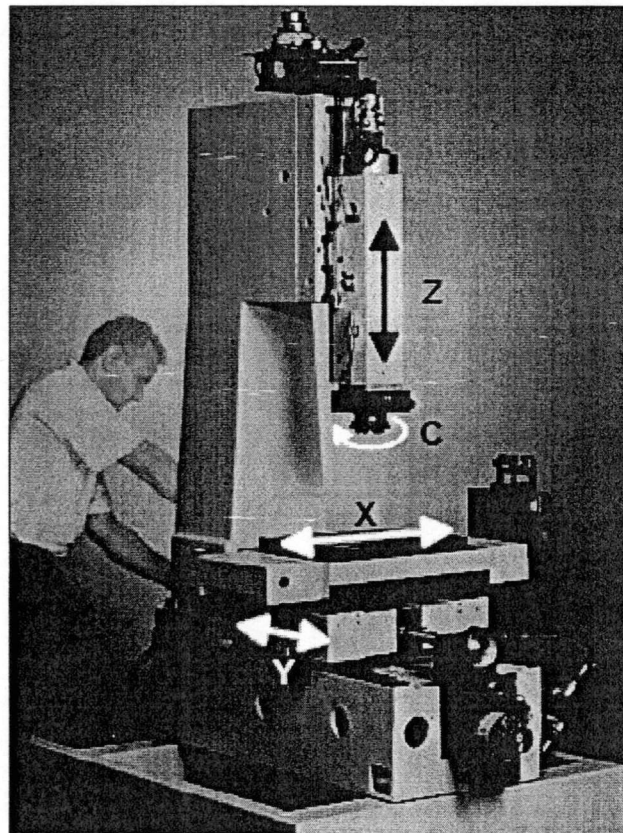
รูปที่ 2.12 ระบบพิกัดตั้งฉาก



รูปที่ 2.13 ระบบพิกัดตั้งฉากมือขวา



รูปที่ 2.14 แกนพิกัดของเครื่องกลึง



รูปที่ 2.15 แกนพิกัดของเครื่องกัด

Wire Cut EDM จะใช้ระบบการควบคุมเชิงตัวเลข โดยคอมพิวเตอร์ระดับต่ำสุด ซึ่งจะต้องโปรแกรมคุมทั้งสองแกน คือ แกน X และแกน Y โดยในแนวรวมทางซ้ายไปขวา เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานในอยู่ด้านหน้าของแกน Y จะกำหนดการเคลื่อนที่ ในแนวราบจากด้านหน้าไป

ด้านหลังแกน Z จะเป็นระยะทางเคลื่อนที่ในแนวตั้งซึ่งสามารถปรับระยะหัวตัดที่ล้อมเส้นลวดให้สูงขึ้นหรือต่ำลง

2.4 ชนิดของเครื่อง EDM

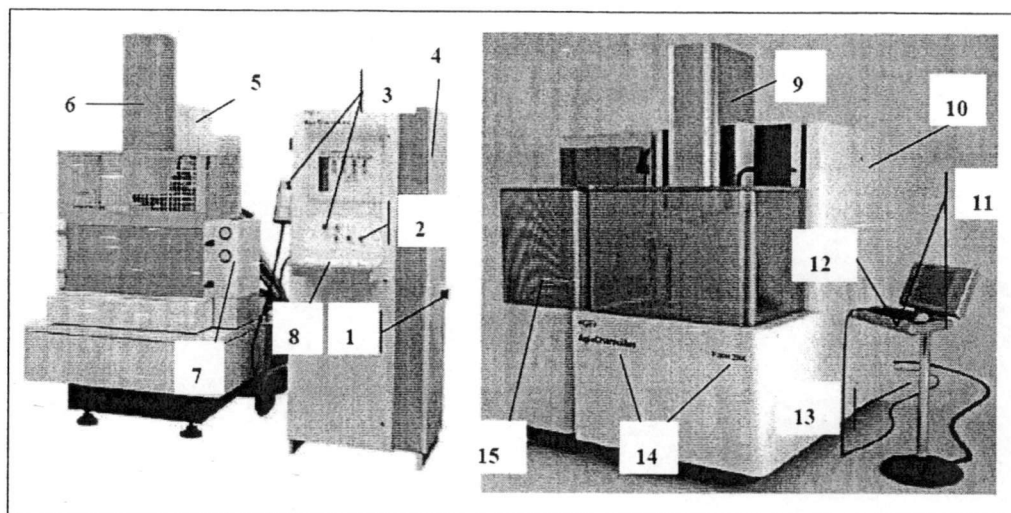
เครื่อง EDM สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เครื่อง EDM และ เครื่อง Wire Cut EDM แต่ทั้งสองประเภทมีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกัน คือ การจัดวางขั้วไฟฟ้า และ ชิ้นงานในสารละลายและให้แรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างขั้ว เพื่อให้เกิดการสปาร์คขึ้น โดยมีจังหวะเกิดและหยุดสปาร์คสลับกันไป

2.4.1 ลักษณะจำเพาะของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM ประเภทนี้เป็นเครื่องที่ใช้ในงานขึ้นรูป ประเภท Die sinking จากรูปที่ 2.16 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. สวิตช์เปิดปิดเพาเวอร์ขับปลาย
2. สวิตช์ควบคุมการทำงานของเครื่อง
3. สวิตช์ฉุกเฉิน
4. เพาเวอร์ขับปลายระบบซีเอ็นซี
5. ชุดเสาของเครื่อง (Column)
6. ส่วนของแกน Z ของเครื่องจักร (Z Axis)
7. ชุดควบคุมการเปิดปิดของสารละลาย
8. ชุดคีย์บอร์ดควบคุมการทำงานของเครื่อง
9. ส่วนของแกน Z ของเครื่องจักร (Z Axis)
10. เพาเวอร์ขับปลายระบบซีเอ็นซี
11. หน้าจอแสดงผลควบคุมการทำงานของเครื่อง
12. ชุดคีย์บอร์ดและสวิตช์ควบคุมการทำงานของเครื่อง
13. ชุดสายรีโมทควบคุมการทำงานของเครื่อง
14. บริษัทผู้ผลิตและรุ่นของเครื่องจักร
15. แผงกันพื้นที่การทำงานของเครื่อง

โดยขั้วไฟฟ้าที่ใช้กันเป็นหลักการจะเป็นขั้วไฟฟ้าที่ลักษณะเป็นแม่แบบ วิธีขึ้นรูปเช่นนี้รูปทรงของรูปที่ถูกขึ้นรูปแบบขึ้นงานจะมีลักษณะพลิกกลับตรงข้ามกับรูปทรงของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.16 เครื่อง EDM

ตัวอย่างการขึ้นรูปที่ใช้กันมากคือ การขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์สำหรับงานพลาสติก นอกจากนี้แล้ว ถ้าติดตั้งแกนควบคุมการหมุนที่แกนหลัก (แกนตั้ง) ก็ทำให้สามารถใช้งานแบ่งมุมหรืองานการขึ้นรูปประเภทตัดเกลียวโดยการควบคุม 2 แกน ในเวลาเดียวกันได้ นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันต่าง ๆ ของระบบ CNC ให้ทำงานอย่างเต็มความสามารถในการขึ้นรูปตามเส้นขอบโดยการควบคุมแกน X-Y-Z พร้อมกันนั้นทำให้สามารถที่จะขึ้นรูปที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ด้วย

2.4.1.2 โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM มีโครงสร้างประกอบที่คล้ายกับ Mill Machine มากคือ บนฐานที่เรียกว่า Bed จะมีองค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แท่น (Table) และเสาตั้ง (Column) ประกอบติดอยู่ เสาตั้งนี้จะทำหน้าที่ประกอบส่วนบน (Head) ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าประกอบติดตั้งอยู่ ถ้าฐานดังกล่าวนี้ไม่มั่นคงแน่นอนหาเพียงพอ ส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านี้อาจจะขาดความละเอียดไปด้วย ถ้า Head ไม่มั่นคงพอเครื่องก็ไม่สามารถทำงานที่ต้องการความละเอียดสูงได้

ส่วนที่เป็นส่วนประกอบการเคลื่อนที่ การที่จะทำการขึ้นรูปงานที่มีรูปทรง 3 มิติ ได้นั้นอย่างน้อยก็จำเป็นที่จะต้องมีส่วนประกอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 มิติ สำหรับเครื่อง EDM นั้นโดยทั่วไปแผ่นซึ่งเคลื่อนที่บนผิวระนาบ X-Y และมี Head เคลื่อนที่บนเสาตั้งในแนวแกน Z ซึ่งตั้งฉากกับผิวระนาบ X-Y

วิธีการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนมีหลายอย่าง แต่ในปัจจุบันจะควบคุมด้วยอุปกรณ์ระบบ CNC ดังนั้นส่วนมากจึงใช้แรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ไฟฟ้า อนึ่งสมรรถนะขององค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งรวมถึงตัวนำ (Guide) ด้วยนั้นจะเป็นปัจจัยในการกำหนดระดับความละเอียดของเครื่องจักร

ถูกขึ้นรูปสำหรับบรรจุสารละลาย ลักษณะจำเพาะอย่างหนึ่งของเครื่อง EDM คือ ใช้สารละลาย (การขึ้นรูปในของเหลว) ที่จะให้ระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าความต้านทานของฉนวนสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มที่เก็บสารละลายนี้ไว้ ถึงขั้นรูปดังกล่าวนี้จะมีส่วนที่ทำหน้าที่ ปรับระดับผิว ของสารละลาย เพื่อที่จะปรับตั้งระดับความสูงของชิ้นงาน

ถึงส่งถ่ายสารละลาย เป็นถึงสำรองเพื่อคอยส่งจ่ายสารละลายไปยังถึงขั้นรูปประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ปั๊มส่งจ่าย พิวเตอร์ สำหรับกรองเศษผงโลหะ ในกรณีที่จำเป็นอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบบหล่อเย็นสารละลาย เพื่อป้องกันมิให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงมากจนเกินไป บางเครื่องอาจจะมีอุปกรณ์เพิ่มเติมเช่น ATC (อุปกรณ์ระบบเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ) อุปกรณ์แกน C เครื่องมือช่วยเหลือการติดตั้งขั้วไฟฟ้า

2.4.2 ลักษณะจำเพาะของเครื่อง Wire Cut EDM

เป็นเครื่อง EDM ชนิดหนึ่งที่ใช้เส้นลวดขนาดเล็กเป็นขั้วไฟฟ้าและมีระบบ CNC สำหรับควบคุมตัวชิ้นงานให้เคลื่อนที่ ในลักษณะเช่นเดียวกับการวาดรูป เพื่อตัดเอาส่วนที่เป็นรูปออกไป เครื่องนี้ประยุกต์มาจากเครื่อง EDM ประเภท Die sinking การวาดรูปที่แกน X-Y เคลื่อนที่ในเวลาเดียวกันทั้ง 2 แกน จึงต้องการอุปกรณ์ระบบ CNC ไว้สำหรับการควบคุม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าถ้าไม่มีการพัฒนาอุปกรณ์ระบบ CNC ขึ้นมาเครื่อง Wire Cut EDM ก็ไม่สามารถกำเนิดขึ้นมาได้

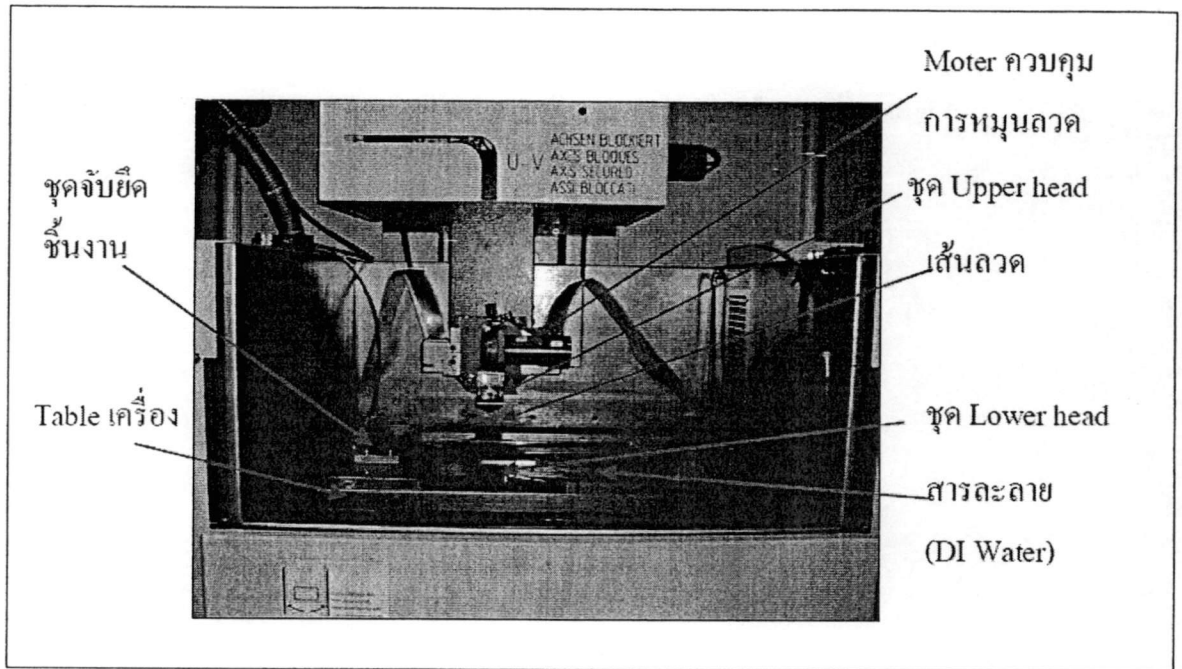
เครื่อง Wire Cut EDM ดังรูปที่ 2.17 ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การขึ้นรูปพื้นเพื่องนอกจากนี้แล้ว การใช้อุปกรณ์ระบบ CNC ควบคุมการเรียงของลวดก็สามารถใช้ในงานขึ้นรูปประเภทเอียง (Taper) หรืองานขึ้นรูปที่มีรูปทรงบนล่างต่างกันได้อีกด้วย ดังรูปที่ 2.18

ตัวเส้นลวดของ เครื่อง Wire Cut EDM จะมีการสึกหรอ อันเนื่องมาจากการสปาร์ค ดังนั้นลวดที่ใช้ไปครั้งหนึ่งแล้วจะถูกทิ้งไปเลย

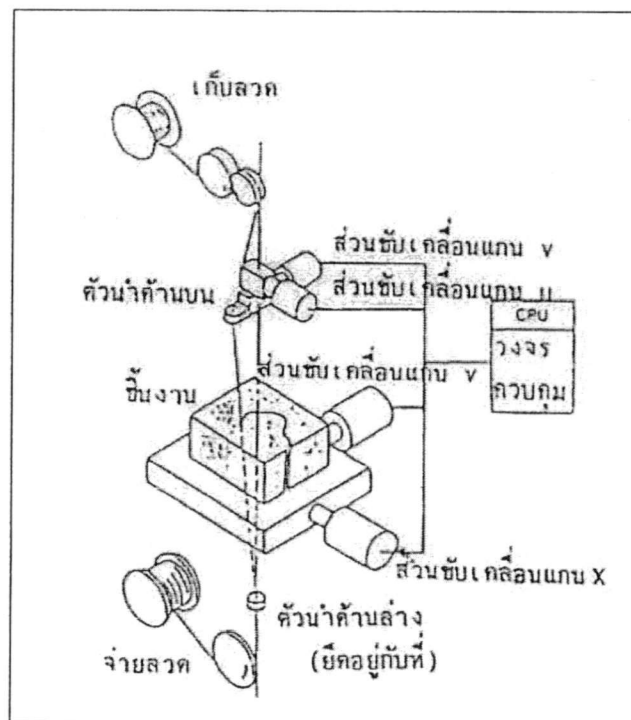
โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง Wire Cut EDM นั้นเกือบจะเหมือนกันกับเครื่อง EDM ประเภท Die sinking แต่เนื่องจากใช้ลวดเป็นขั้วไฟฟ้าจึงต้องมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมประกอบติดอยู่ที่เสาด้วย

ส่วนป้อนลวด	ทำหน้าที่ส่งป้อนลวดออกมาและควบคุมแรงดึงของเส้นลวด
ส่วนที่ม้วนเก็บลวด	ทำหน้าที่ม้วนเก็บรวบรวมลวดที่ใช้งานแล้ว และควบคุมความเร็วของเส้นลวด
ส่วนที่เป็นตัวนำลวด	ทำหน้าที่ประกอกรักษาเส้นลวดเป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับพักการสปาร์คการไหลของสารละลาย
Taper Cut Unit	อุปกรณ์เสริมสำหรับการขึ้นรูปประเภทชิ้นงานเอียง (Taper)

AWT (Automatic Wire Threader) อุปกรณ์การต่อลวดแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.17 เครื่อง Wire Cut EDM



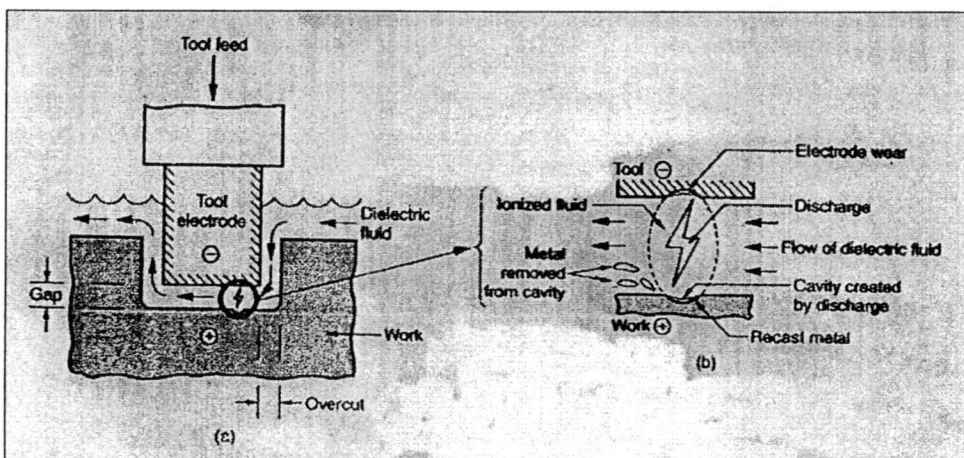
รูปที่ 2.18 หลักการตัดชิ้นงานรูปแบบ Taper

2.5 กระบวนการตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า (Electric discharge processes)

กระบวนการตัดด้วยพลังงานความร้อนในกลุ่มนี้จะใช้การปลดปล่อยประจุไฟฟ้าหรือการสปาร์กที่จะทำให้อุณหภูมิบนชิ้นงาน ณ จุดใดจุดหนึ่งสูงพอที่จะหลอมละลายชิ้นงานหรือแม้กระทั่งทำให้กลายเป็นไอ กระบวนการการตัดที่สำคัญในกลุ่มนี้ คือ การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า และการตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด ซึ่งกระบวนการทั้งสองกระบวนการนี้ใช้ได้กับชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้เท่านั้น

2.5.1 การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า (Electric discharge machining: EDM)

EDM ตัดเนื้อโลหะได้โดยการปล่อยประจุไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ อย่างต่อเนื่องไปยังชิ้นงานเพื่อทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นบางจุดบนชิ้นงาน อุณหภูมินี้สูงพอที่จะหลอมละลายเนื้อโลหะหรือแม้กระทั่งทำให้ระเหยกกลายเป็นไอ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ EDM บริเวณผิวของชิ้นงานที่โค่นตัดจะมีความเสียหายเกิดขึ้นทั้งในทางกายภาพและทางโลหะวิทยา EDM ใช้ตัดได้เฉพาะชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้เท่านั้น ลักษณะของ EDM แสดงในรูปที่ 2.19 (a) รูปร่างของชิ้นงานที่ได้จะเป็นรูปร่างที่ตรงกันข้ามกับรูปร่างของอิเล็กโทรดที่ใช้ในระหว่างการตัด การสปาร์กที่เกิดขึ้นจะเกิดในลักษณะเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่องตามการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงที่เป็นแหล่งกำเนิดของพลังงาน การสปาร์กเกิดขึ้นข้ามช่องระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ซึ่งระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะมีของเหลวไดอิเล็กทริก เป็นตัวกลางในการนำกระแสไฟฟ้าโดยของเหลวไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนสภาพเป็นไอออน ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานในระหว่างที่มีการสปาร์กเกิดขึ้น การสปาร์กจะเกิดขึ้นตรงบริเวณที่อิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานอยู่ใกล้กันมากที่สุดชิ้นส่วนที่ถูกตัดจะถูกพาออกไปโดยการไหลของของเหลวไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.19 การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า

รูปที่ 2.19 (b) แสดงการสปาร์คที่เกิดขึ้นในกระบวนการ EDM การสปาร์คจะเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่ชิ้นงานและอิเล็กโทรดอยู่ใกล้กันมากที่สุด ของเหลวไดอิเล็กทริกเกิดการแตกตัวเป็นไอออน แล้วเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านของเหลวไดอิเล็กทริก บริเวณที่เกิดการสปาร์คจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงพอที่จะทำให้เกิดการหลอมละลายหรือกระทั่งกลายเป็นไอ ซึ่งของเหลวไดอิเล็กทริกก็จะพัดพาเอาวัสดุที่หลอมละลายออกไปจากบริเวณดังกล่าว ถึงแม้ว่าการสปาร์คจะเกิดขึ้นครอบคลุมบริเวณเล็ก ๆ แต่จะเกิดขึ้นในความถี่สูงหลายร้อยหรือหลายพันครั้งต่อวินาที ซึ่งก็จะทำให้เกิดการหลุดออกของเนื้อวัสดุในปริมาณที่มากขึ้นได้

โดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์การสปาร์คเป็นชื่อเรียกโดยรวมของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อใส่แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้าประเภทของแข็ง ของเหลว หรือ แก๊ส กั้นกลางอยู่จนทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน และเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นอย่างรุนแรง ดังนั้นปรากฏการณ์เหล่านี้จึงหมายถึง การฝืนบังคับให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติแล้วไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการฝืนบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ไหลขึ้นมาอย่างกะทันหัน ปรากฏการณ์นี้เปรียบเทียบกับปรากฏการณ์การสปาร์คที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ คือ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการสปาร์ค ซึ่งลำดับของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีดังนี้

1. สภาพที่กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล (Dark current)

การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุด ๆ หนึ่งของเหลวไดอิเล็กทริกจะเริ่มแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าเล็กน้อย และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดึงดูดจากฝั่งขั้วลบไปสู่ฝั่งขั้วบวก ซึ่งในระยะนี้จะเริ่มมีการไหลของกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กมาก

2. การสปาร์คแบบโคโรนา (Corona discharge)

การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric breakdown) ของของเหลวไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นสภาพการสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพเป็นอย่างมาก

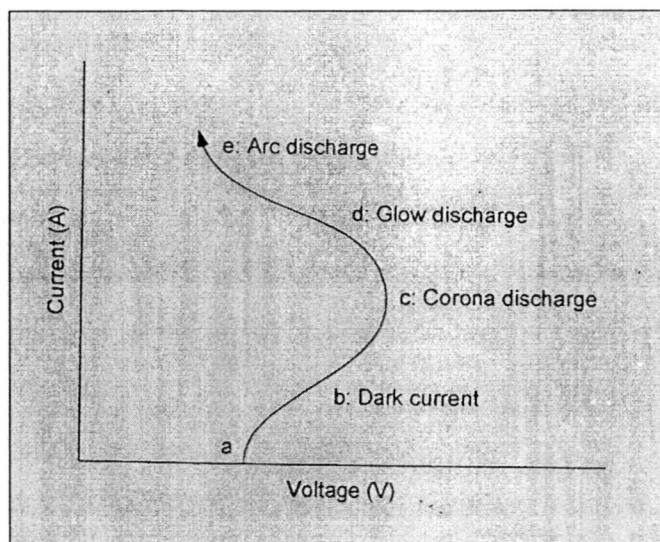
3. การสปาร์คแบบโกลว์ (Glow discharge)

การที่บริเวณส่วนที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้นมีอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย เป็นสภาพการสปาร์คที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

4. การสปาร์คแบบอาร์ค (Arc discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์คแบบโกลว์ได้มีขนาดถึงกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้วการสปาร์คจะเข้าสู่สภาพขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นการสปาร์คแบบอาร์ค สภาพการสปาร์คแบบนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ เป็นสภาพ

ที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมพลังงานก่อนที่จะเข้าสู่สภาพการสปาร์คแบบอาร์กนี้



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าในการสปาร์ค

การสปาร์คที่เกิดขึ้นเป็นประกายไฟในกระบวนการ EDM มีปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสปาร์คเกิดขึ้นทุกขั้นตอนตามที่ได้กล่าวมา ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหลจนถึงสภาพของการสปาร์คแบบอาร์กภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก ๆ โดยปกติการสปาร์คที่เป็นประกายไฟจะมีช่วงระยะเวลาที่สั้นมากดังนั้นการสปาร์คที่เป็นประกายไฟจะปลดปล่อยพลังงานระดับสูงมากออกมาในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก ๆ

ในการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM นั้นจะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องเหมือนกับกรณีการเชื่อมอาร์ก แต่ใช้วิธีการเปิด-ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรงวิธีการขึ้นรูปประเภทนี้อาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้นมาก ในการใช้งานจริงจะใช้ระบบ NC ควบคุมให้เกิดการสปาร์คหลายแสนครั้งใน 1 วินาที และสภาพของพัลส์ในแต่ละครั้งของการสปาร์คจะเป็นดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ไล่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการไล่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 30-280 V) ระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด โดยปกติในการขึ้นรูปนั้นจะใช้ของเหลวไดอิเล็กทริกรักษาความต้านทานไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรดหรือความเป็นฉนวนให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้สามารถลดระยะห่าง

2. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อย่นระยะระหว่างขั้วให้เข้าใกล้เรื่อยๆ จนถึงระยะหนึ่ง สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

3. สปาร์กหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสีย ความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบ จะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือ การสปาร์กนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์กนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ขนาดตั้งแต่ 0.1 A จนถึงหลายร้อย A จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์กมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก (3000°C ขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์กก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไปและเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

4. เย็นตัว

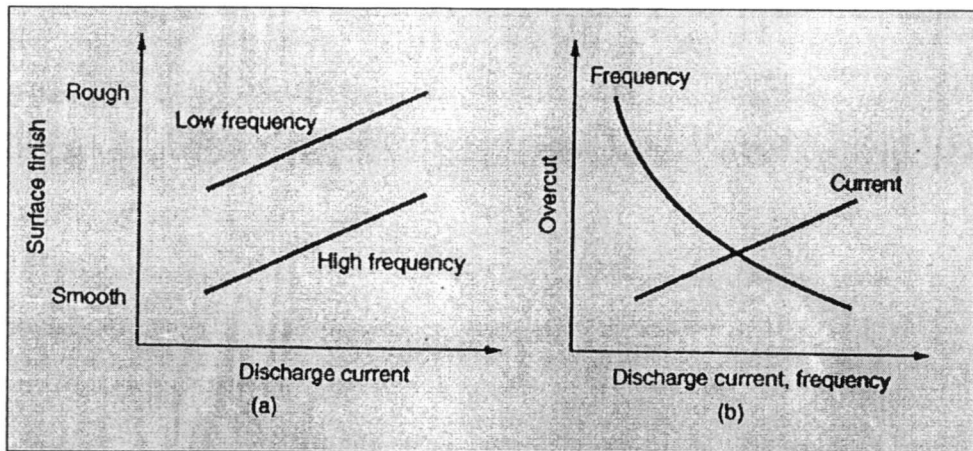
ความดันที่เกิดขึ้นระหว่างการสปาร์ก จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานจะระบายความร้อนไปสู่ของเหลวไดอิเล็กทริกรอบข้างและเย็นตัวอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็ก ๆ

5. กลับสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์ก หนึ่งครั้งแล้วจบลงแล้วจะรอจนกว่า สารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนั้นจะช่วยป้องกันการเกิดสปาร์กแบบผิดปกติ เช่น สปาร์กซ้ำ ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์กเช่นเดิมอีก

การสปาร์กซ้ำ คือ การสปาร์กที่เกิดขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของระบบ NC ในกรณีที่ สภาวะแวดล้อมของการสปาร์กเลวลง อาจเกิดการสปาร์กขึ้นได้โดยไม่สัมพันธ์กับช่วงจังหวะของพัลส์ของการสปาร์ก ซึ่งถูกส่งมาจากวงจรการสปาร์ก เนื่องจากว่า การสปาร์กประเภทนี้เป็นปรากฏการณ์นอกเหนือการควบคุม จนไม่อาจถือได้ว่าเป็นสภาพการสปาร์กที่เหมาะสมได้

ในกระบวนการ EDM มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวคือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมา (Discharge current) และความถี่ในการสปาร์ก (Discharge frequency) ถ้าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งสองตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตัวแปรทั้งสองตัวนี้ยังมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (a) ผิวชิ้นงานที่ได้จะเรียบที่สุดเมื่อตัดด้วยค่ากระแสไฟฟ้าต่ำๆ และมีความถี่ของการสปาร์กสูงๆ ในรูปที่ 2.21 (b) แสดงลักษณะที่สำคัญในการตัดชิ้นงานอีกอย่างหนึ่ง คือ ระยะเวลาตัดเกิน (Overcut) หรือ ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงานที่ได้กับผิวด้านข้างของอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 2.19(a) โดยทั่วไปแล้วการตัดที่ดีจะให้ระยะเวลาตัดเกินที่ต่ำ ในกระบวนการ EDM การเกิดระยะเวลาตัดเกินจะเกิดการสปาร์กระหว่างผิวด้านข้างของอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน จากรูปที่ 2.21(b) จะเห็นได้ว่าระยะเวลาตัดเกินจะขึ้นอยู่กับทั้งขนาดกระแสไฟฟ้าและความถี่ของการสปาร์กระยะเวลาตัดเกินจะมีค่ามากขึ้นเมื่อตัดด้วยค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น และระยะเวลาตัดเกินจะมีค่าน้อยลงเมื่อตัดด้วยความถี่ของการสปาร์กมากขึ้น



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาและความถี่ในการสปาร์กกับ ความหยาบผิวและระยะตัดเกิน

ในระหว่างการตัดด้วยกระบวนการ EDM นอกจากจะมีการหลุดออกไปของเนื้อชิ้นงานแล้ว ส่วนของอิเล็กโทรดก็จะมีการหลอมละลายเนื่องจากความร้อนและหลุดออกไปเช่นกัน โดยปกติการสึกหรอของอิเล็กโทรดในกระบวนการ EDM จะวัดเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเนื้อชิ้นงานที่หลุดออกไปเทียบกับปริมาตรของเนื้ออิเล็กโทรดที่สูญเสียไปในการตัดดังกล่าว อัตราส่วนของการสึกหรอนี้พบว่ายู่ระหว่าง 1:1 ถึง 100:1 ขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานและอิเล็กโทรด วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดในกระบวนการ EDM มีหลายชนิด เช่น แกรไฟต์ ทองแดง ทองเหลือง ทองแดงผสมสังกะสี เงินผสมสังกะสี และวัสดุอื่น ๆ อีกหลายชนิด การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรจ่ายพลังงาน (Power supply circuit) ของเครื่อง EDM ชนิดของวัสดุชิ้นงาน และลักษณะของการตัดว่าเป็นการตัดหยาบ หรือการตัดละเอียด อิเล็กโทรดที่ทำจากแกรไฟต์เป็นที่นิยมในการใช้งานหลายอย่างด้วยกัน เนื่องจากแกรไฟต์จะไม่เกิดการหลอมละลาย แต่จะเกิดการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิสูงมาก ลักษณะของหลุมที่เกิดขึ้นบนผิวของแกรไฟต์เนื่องจากการสปาร์กจะมีขนาดเล็กกว่าหลุมที่เกิดบนผิวของอิเล็กโทรดชนิดอื่น ๆ และการสึกหรอของแกรไฟต์จะต่ำกว่าอิเล็กโทรดชนิดอื่นเช่นกัน

ในการตัดด้วย EDM นั้นความแข็งของชิ้นงานไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญแต่จุดหลอมเหลวจะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการกำหนดอัตราการตัดเนื้อวัสดุด้วย EDM สำหรับอัตราการตัดเนื้อวัสดุด้วย EDM สามารถที่จะประมาณค่าได้จากสมการ

$$MRR = \frac{KI}{T_{wm}^{1.23}} \quad (2.5)$$

เมื่อ MRR คือ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน K คือ ค่าคงที่ I คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าและ T_{wm} คือ จุดหลอมเหลวของวัสดุชิ้นงาน ($^{\circ}C$) สำหรับอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode were rate) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$EWR = \frac{KI}{T_{em}^{2.38}} \quad (2.6)$$

เมื่อ EWR คือ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด K คือ ค่าคงที่ I คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าและ T_{em} คือ จุดหลอมเหลวของวัสดุอิเล็กโทรด ($^{\circ}C$) สำหรับความหยาบของผิวชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$R_a = \frac{K}{I^a t^b} \quad (2.7)$$

เมื่อ R_a คือ ความหยาบผิวเฉลี่ย (Average roughness), a,b และ K คือ ค่าคงที่ I คือขนาดของกระแสไฟฟ้า และ t คือ ช่วงเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Pulse duration)

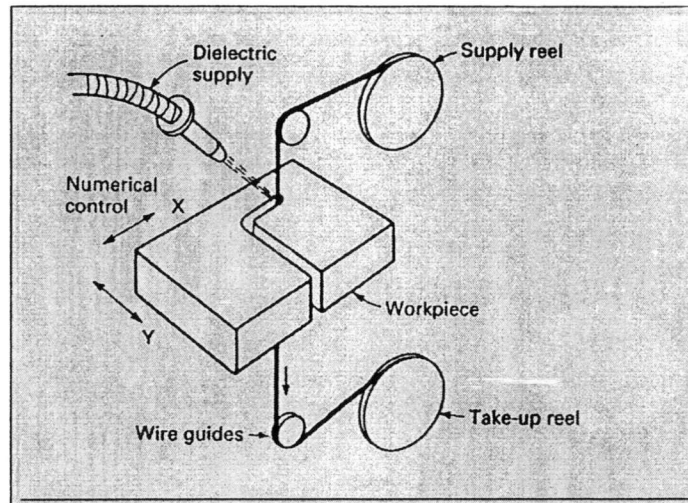
ของเหลวไดอิเล็กทริกที่ใช้ใน EDM จะทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ยกเว้นเมื่อเกิดสภาพของไอออนขึ้นระหว่างที่มีการสปาร์กเกิดขึ้นของเหลวไดอิเล็กทริกสามารถทำมาจากวัสดุหลายชนิด เช่น น้ำกำจัดไอออน น้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำมันก๊าด หรือน้ำกลั่น นอกจากนี้ของเหลวไดอิเล็กทริกยังทำหน้าที่พัดพาเอาเศษวัสดุออกไปจากบริเวณที่มีการสปาร์กเกิดขึ้นและช่วยพาความร้อนออกจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด

โดยส่วนใหญ่กระบวนการ EDM มีการใช้งานในกระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ สำหรับกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น สำหรับการฉีดพลาสติก การอัดรีดขึ้นรูป การดึงขึ้นรูป การตีขึ้นรูป และการปั๊มขึ้นรูป นอกจากนี้ก็อาจจะใช้ผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยตรง ในกระบวนการ EDM อาจจะมีคำว่า ดายซิงค์กิง (Die sinking) ซึ่งหมายถึง การสร้างช่องว่าง (Mold cavity) ในแม่พิมพ์ โดยเครื่อง EDM ที่ใช้งานในลักษณะนี้ เรียกว่า แรมอิตีเอ็ม โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ต้องขึ้นรูปด้วย EDM จะเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปได้ยากหรือเป็นไปไม่ได้ที่จะขึ้นรูปด้วยวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้อาจพบว่า EDM ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานที่บอบบางไม่สามารถทนต่อแรงกระทำของการตัดหรือขึ้นรูปด้วยวิธีดั้งเดิมได้ และ EDM ยังสามารถใช้เจาะรูที่ทำมุมเอียงกับผิวชิ้นงานได้ซึ่งรูลักษณะนี้จะไม่สามารถเจาะได้ด้วยวิธีธรรมดา

2.5.2 การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Electric discharge wire cutting)

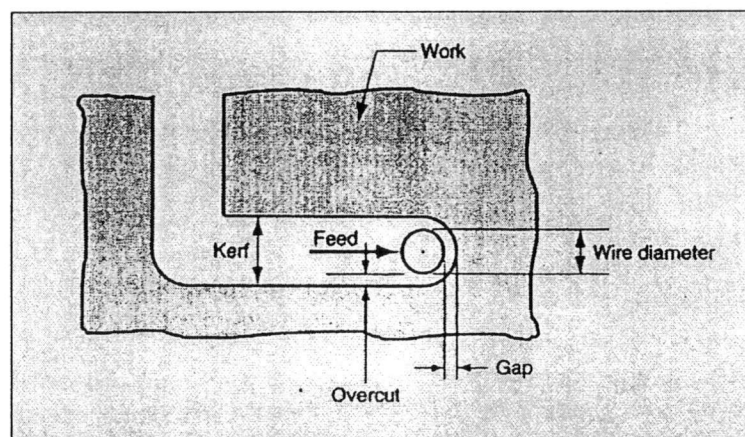
โดยทั่วไปจะเรียกกระบวนการนี้ว่า ไวร์อิตีเอ็ม (Wire EDM: WEDM) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ EDM ในกระบวนการนี้จะใช้ลวดเส้นเล็ก ๆ เป็นอิเล็กโทรดในการตัดชิ้นงาน รูปที่ 2.22 แสดงถึงลักษณะการตัดชิ้นงานด้วย WEDM ชิ้นงานจะเลื่อนเข้าหาลวดที่กำลังเคลื่อนที่

ไปเรื่อยๆ เพื่อให้การตัดชิ้นงานเกิดขึ้นกับอิเล็กโทรดใหม่ตลอดเวลาและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดคงที่เพื่อให้ได้ความกว้างของรอยตัดคงที่ สำหรับการเลื่อนของชิ้นงานเข้าหาอิเล็กโทรดให้เป็นรูปร่างต่างๆ นั้น จะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การตัดด้วย WEDM จะเกิดขึ้นในของเหลวไดอิเล็กทริกเช่นเดียวกับกรณีของ EDM



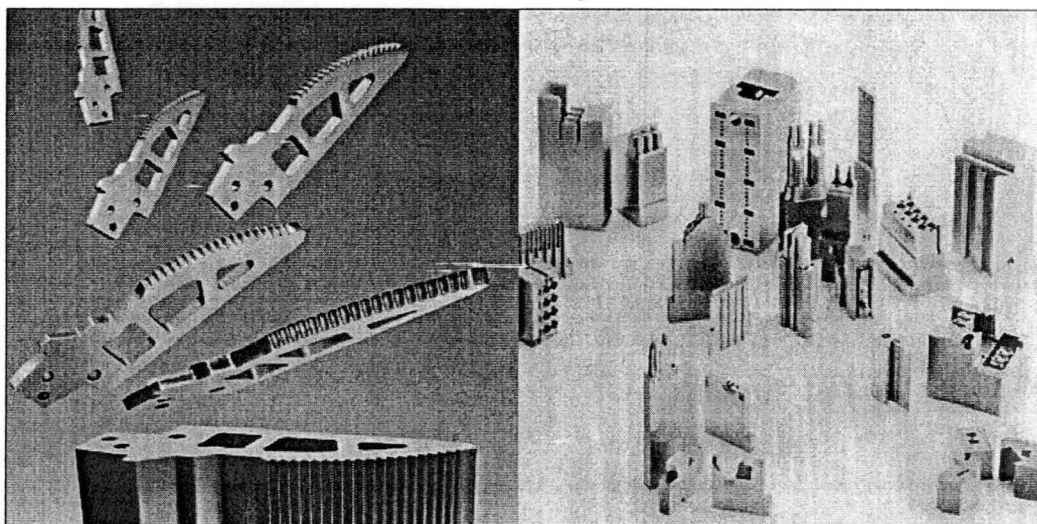
รูปที่ 2.22 การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด

ลวดที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดมีหลายขนาดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 ถึง 0.30 mm ขึ้นอยู่กับความกว้างของรอยตัดที่ต้องการ วัสดุที่ใช้ทำลวด ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง ทังสเตน และ โมลิบดีนัม ส่วนของเหลวไดอิเล็กทริกนั้น สามารถทำมาจาก น้ำกำจัดไอออน หรือน้ำมัน และเช่นเดียวกับกรณีของ EDM ในการตัดด้วย WEDM ก็จะมีระยะตัดเกินขึ้นได้เช่นกันทำให้รอยตัดที่ได้มีความกว้างมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดดังแสดงในรูปที่ 2.23 ระยะตัดเกินที่เกิดขึ้นในกระบวนการ WEDM จะมีค่าประมาณ 0.020-0.050 mm.



รูปที่ 2.23 ระยะตัดเกินที่เกิดขึ้นในกระบวนการ WEDM

เนื่องจากความกว้างของรอยตัดที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมากดังนั้นการตัดด้วย WEDM จึงอาจนำไปใช้ตัดชุดพunchและคay (Punch and die) 1 ชุด ได้จากการตัดเพียงครั้งเดียว โดยที่ชิ้นส่วนหนึ่งที่ถูกตัดออกมาจะกลายเป็นpunch และอีกชิ้นส่วนที่เหลือจะกลายเป็นคay การตัดด้วย WEDM ไม่มีแรงกระทำกับชิ้นงานดังนั้นสามารถใช้ตัดชิ้นงานบางๆ ได้ นอกจากนี้ชิ้นงานโลหะต่างๆ ที่มีรูปร่างซับซ้อนก็มักจะตัดด้วย WEDM เช่นกัน รูปที่ 2.24 แสดงชิ้นงานโลหะที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ผ่านการตัดด้วย WEDM



รูปที่ 2.24 ชิ้นงานโลหะที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ผ่านการตัดด้วย WEDM [32-35]

2.6 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

2.6.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

สมมติว่าเรามีระดับซึ่งแตกต่างกันของสองปัจจัยที่เราต้องการเปรียบเทียบ และคำตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นกลุ่มตัวแปรสุ่ม ข้อมูลควรมีลักษณะที่เหมือนกัน ในตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าต่างที่แสดงในตาราง เช่น y_{ij} หมายถึงค่าสังเกตที่ j ภายใต้ระดับที่ i หรือโดยทั่วไปจะมีค่าสังเกต n ภายใต้ระดับ i เราสามารถที่จะอธิบายค่าสังเกตต่างๆนี้ด้วยแบบจำลองเชิงเส้น คือ

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.8)$$

โดยที่ y_{ij} เป็นค่าสังเกตที่ ij ซึ่ง i มีค่า 1 ถึง a , j มีค่า 1 ถึง n และ μ คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกว่า “มัชฌิมรวม (Overall Mean)” τ_i คือค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่ i หรือผลกระทบจากระดับที่ i และ ε คือองค์ประกอบความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random

Error) จุดประสงค์ของเราก็เพื่อทำการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของระดับต่างๆ และทำการประมาณค่าของมัน สำหรับการทดสอบสมมติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองถูกสมมติให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ และเป็นอิสระต่อกัน ด้วยมีขมึนรวม เท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2 ซึ่งสมมติให้มีค่าคงตัวตลอดทุกระดับของปัจจัย

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลสำหรับการทดลองแบบปัจจัยเดียว

Treatment (Level)	Observations				Totals	Averages
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}	$y_{1.}$	\bar{y}_1
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}	$y_{2.}$	\bar{y}_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a	y_{a1}	y_{a2}	...	y_{an}	$y_{a.}$	\bar{y}_a
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

แบบจำลองนี้เรียกว่า “การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Analysis of Variance)” เพราะมีเพียงปัจจัยเดียวที่นำมาพิจารณา ยิ่งกว่านั้นลำดับในการทดลองจะต้องเป็นแบบสุ่มเพื่อให้สิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลองในต่างๆ (เรียกว่า “หน่วยการทดลอง (Experiment Units)”) จะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการออกแบบการทดลองที่เรียกว่า “การออกแบบการทดลองแบบสุ่ม (Completely Randomized Design)”

แบบจำลองทางสถิติในสมการ 4.1 อธิบายความแตกต่างของ 2 สถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของระดับ อันดับแรกคือ ระดับ a ระดับสามารถถูกกำหนดขึ้นโดยผู้ทดลอง ในที่นี้เราต้องการที่จะทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับมีขมึนของระดับ และบทสรุปที่เกิดขึ้นจะนำไปประยุกต์ได้กับระดับของปัจจัยที่เราพิจารณาเท่านั้น ข้อสรุปที่ได้ไม่สามารถไปใช้ได้กับระดับอื่นที่มีค่าใกล้เคียงที่เราไม่ได้พิจารณาหรือทำการทดลองได้ นอกจากนั้น เรายังอาจต้องการที่จะประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง (μ, τ, σ^2) ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model)” ในทางกลับกันถ้าระดับ a ถูกสุ่มเลือกจากประชากรขนาดใหญ่ของระดับต่างๆที่เป็นไปได้ ในกรณีนี้เราสามารถที่จะขยายผลสรุป (ซึ่งขึ้นกับระดับตัวอย่างที่ใช้) ของเราไปยังทุกระดับของประชากร ถึงแม้เราอาจจะไม่ได้ทำการพิจารณาระดับนั้นๆ อย่างชัดเจนก็ตาม ในการวิเคราะห์ในที่นี้ τ , คือตัวแปรสุ่ม และความรู้เกี่ยวกับตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่งจะไม่มีประโยชน์แต่อย่างไร เราทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรผันของ τ , และพยายามที่จะประมาณค่าแปรผันนี้ ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effect Model)”

2.6.1.1 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีรายงานผลการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดยสามารถบอกได้ว่า $H_0 = \mu_1 = \mu_2$ ถูกปฏิเสธที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คำกล่าวสรุปมักจะไม่ใช่เพียงพอ เพราะไม่ได้บอกให้ผู้ตัดสินใจรู้ว่าค่าทดสอบทางสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่ที่ใดบนพื้นผิววิกฤต ยิ่งกว่านั้น การหาผลลัพธ์โดยวิธีนี้อาจจะไม่เป็นที่พึงพอใจ เนื่องจากผู้ทำการทดลองบางคนอาจไม่ต้องการใช้ระดับความเสี่ยงที่ $\alpha = 0.05$ วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากดังกล่าว P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติ เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้นอกจากนี้เรายังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้

ปกติแล้วเราจะนิยมที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 จะถูกปฏิเสธดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้วผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณมือนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

การคำนวณหา P-Value ที่แม่นยำไม่ใช่สิ่งที่ทำได้ง่ายนักแต่โปรแกรมทางสถิติใหม่ๆก็จะมีค่านี้แสดงไว้หรือแม้แต่ในเครื่องคำนวณแบบที่สามารถพกพาได้

2.6.1.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ตอนนี้เราจะค้นหาว่า การทดสอบสมมติฐานอย่างเป็นทางการในกรณีที่ไม่มีความแตกต่างในมัธยิม ($H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$ หรือ $H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$) จะทำได้อย่างไร เนื่องจากเราต้องสมมติให้ ϵ_{ij} มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน มีมัธยิม = 0 และค่าความแปรปรวน = σ^2 ค่าสังเกต = Y_{ij} มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระ มีมัธยิม = $\mu + \tau_i$ และความแปรปรวน σ^2 ดังนั้น SS_T คือ ผลรวมของกำลังสองของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นเราสามารถแสดงได้ว่า SS_T / σ^2 จะมีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี $N-1$ ระดับขั้นความเสรียิ่งกว่านั้นเราสามารถแสดงได้ว่า SS_E / σ^2 มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี $N-a$ ระดับขั้นความเสรีและ $SS_{Treatment}$ มีการกระจายแบบ Chi-Square ที่มี $a-1$ ระดับขั้นความเสรี ถ้าสมมติฐานหลัก $H_0 : \tau_i = 0$ เป็นจริง อย่างไรก็ตาม ค่าผลรวมของกำลังสองทั้ง 3 ไม่ได้เป็นอิสระต่อกัน เพราะ SS_E และ $SS_{Treatment}$ รวมกันเป็น SS_T ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้มีประโยชน์ในการสร้างความเป็นอิสระให้แก่ SS_E และ $SS_{Treatment}$

ทฤษฎีของ Cochran

ให้ Z_i เป็น NID (0,1) สำหรับ $i = 1, 2, \dots, v$ และ

$$\sum_{i=1}^v Z_i^2 = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_s \quad (2.9)$$

ซึ่ง $s \leq v$, และ Q_i มี v_i ระดับขั้นความเสรี ($i = 1, 2, \dots, s$) ดังนั้น Q_1, Q_2, \dots, Q_s เป็นการแจกแจง Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่า v_1, v_2, \dots, v_s ระดับขั้นความเสรีตามลำดับ ก็ต่อเมื่อ

$$v = v_1 + v_2 + \dots + v_s \quad (2.10)$$

เพราะระดับขั้นความเสรีของ $SS_{Treatment}$ และ SS_E รวมกันเท่ากับ $N-1$ ซึ่งเป็นระดับขั้นความเสรีรวมทั้งหมด ทฤษฎีของ Cochran บอกเป็นนัยว่า $SS_{Treatment} / \sigma^2$ และ SS_E / σ^2 เป็นตัวแปรอิสระที่มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น ถ้าหากสมมติฐานหลักคือ ไม่มีความแตกต่างของมัธยิมของระดับเป็นจริง ดังนั้นอัตราส่วน

$$F_0 = \frac{SS_{Treatments} / (a - 1)}{SS_E / (N - a)} = \frac{MS_{Treatments}}{MS_E} \quad (2.11)$$

จะมีการแจกแจงแบบ F ด้วยระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $a - 1$ และ $N-a$ สมการ 3-7 คือ สถิติทดสอบสำหรับสมมติฐานที่ว่าไม่มีความแตกต่างของมัธยิมของระดับ

จากค่าคาดหวังกำลังสองเฉลี่ยเราพบว่า โดยทั่วไป MS_E จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 ภายใต้สมมติฐานหลัก $MS_{Treatment}$ จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าสมมติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหวังของ $MS_{Treatment}$ จะมากกว่า σ^2 ดังนั้นภายใต้สมมติฐานรอง ค่าคาดหวังของตัวตั้งของสถิติทดสอบ (สมการ 3-7) จะมากกว่าค่าคาดหวังของตัวหาร และเราจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่าของสถิติทดสอบมีค่ามาก หรือค่าดังกล่าวตกอยู่ในบริเวณวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่ด้านขวาของค่าวิกฤต ดังนั้นเราจะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่า มีความแตกต่างระหว่างมัธยิมของระดับถ้า

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (2.12)$$

ซึ่ง F_0 คำนวณได้จากสมการ 3-7 หรือ โดยการใช้ P-Value ในการตัดสินใจก็ได้

สูตรสำหรับคำนวณผลรวมของกำลังสองสามารถหาได้จากการเขียนและลดรูปของ $MS_{Treatment}$ และ SS_T จะได้ว่า

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2.13)$$

$$SS_{Treatment} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2.14)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองสามารถหาค่าได้จากการลบ กล่าวคือ

$$SS_E = SS_T - SS_{Treatment} \quad (2.15)$$

ขั้นตอนการทดสอบได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 3-1 ซึ่งเรียก “ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance Table)”

ตารางที่ 2.2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of freedom	Mean Square	F_0
Between treatment	$SS_{Treatment}$	$a - 1$	$MS_{Treatment}$	$F_0 = \frac{MS_{Treatments}}{MS_E}$
Error (within treatment)	SS_E	$N - a$	MS_E	
Total	SS_T	$N - 1$		

การตรวจสอบส่วนตกค้างควรทำทุกครั้งในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าหากแบบจำลองถูกต้อง ส่วนตกค้างจะต้องไม่มีรูปแบบ โดยการศึกษาก่อนตกค้าง เราจะพบความไม่พอเพียงของสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองได้หลายรูปแบบ ในตอนต่อไปเราจะแสดงถึงการวินิจฉัยแบบง่าย ๆ ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์แบบกราฟิกของส่วนตกค้าง และการจัดการกับสิ่งผิดปกติอีกหลายอย่าง

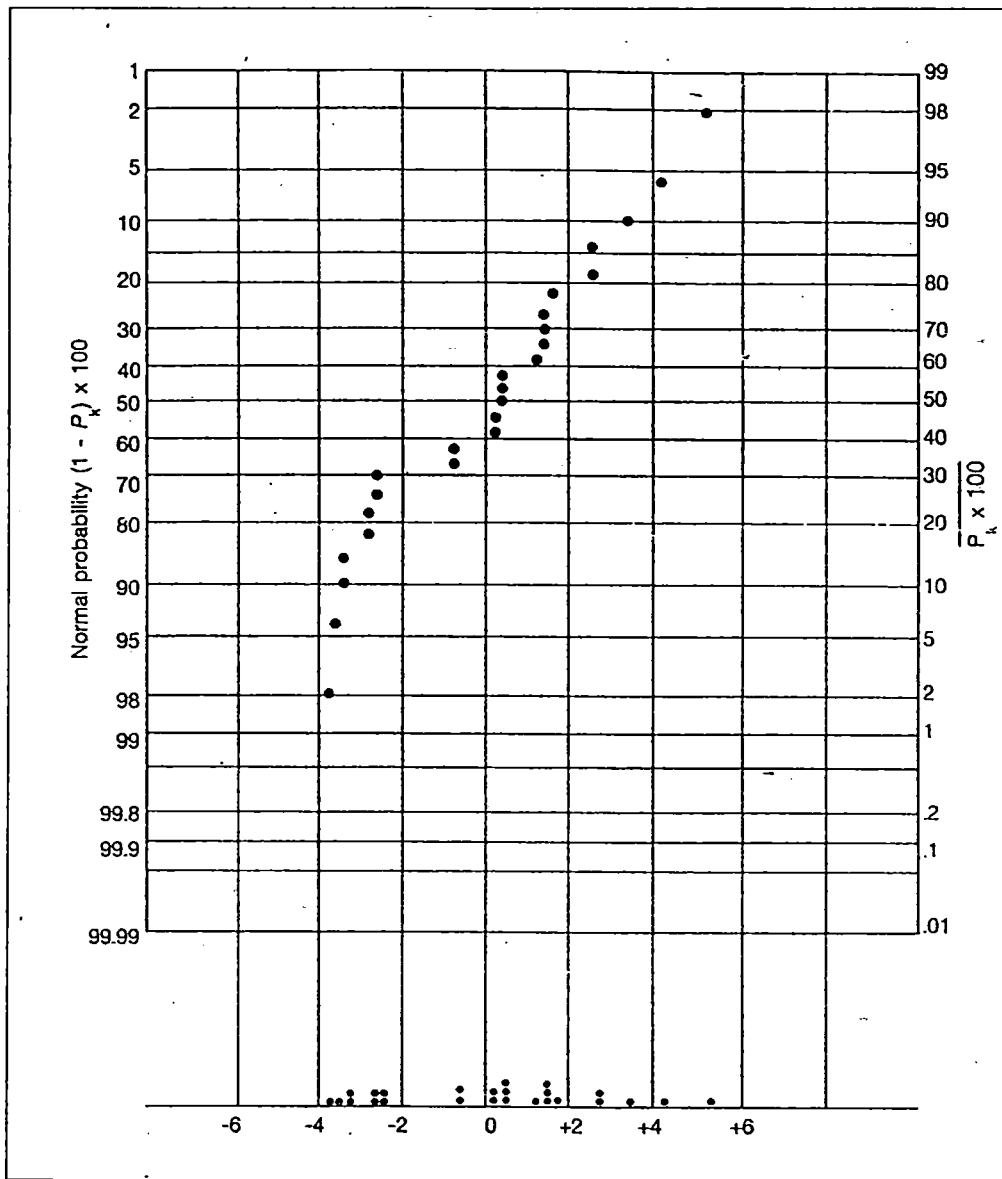
2.6.1.3 สมมติฐานของความเป็นปกติ

การตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นปกติสามารถทำได้โดยการพล็อตฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง ถ้าหากสมมติฐานที่ว่า ความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบ $NID(0, \sigma^2)$

เป็นจริงแล้ว รูปแบบของส่วนตกค้างที่พล็อตออกมาควรจะมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างที่ได้จากการแจกแจงแบบปกติซึ่งจะมีมัธยิมเท่ากับ 0 แต่ในกรณีที่มิติตัวอย่างน้อย พบว่ามักเกิดการแกว่งของข้อมูลขึ้นบ่อยครั้ง ดังนั้นการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติในระดับปานกลางไม่ได้หมายถึงการฝ่าฝืนสิ่งที่กล่าวอยู่ในสมมติฐานอย่างรุนแรงแต่ในกรณีที่มีการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติอย่างมาก จะมีผลกระทบอย่างรุนแรงและต้องมีการวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง คือ การสร้าง Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ขั้นตอนการพล็อตดังกล่าวนี้มีประโยชน์อย่างมาก และทำได้ง่ายตรงไปตรงมา ถ้าหากการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นแบบปกติรูปที่พล็อตขึ้นมาจะเป็นเส้นตรง เราควรมุ่งเน้นการมองเส้นตรงนี้ไปที่มัธยิมของรูปมากกว่าค่าที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด

รูปที่ 2.25 แสดงถึง Normal Probability Plot ระหว่างส่วนตกค้างกับ $P_k \times 100$ บนแกนตั้งขวามือ สังเกตด้านล่างของรูปจะมีแผนภาพแบบจุดของค่าส่วนตกค้างแสดงอยู่ จากการพิจารณาแผนภาพนี้พบว่า การแจกแจงของความผิดพลาดอาจจะมีการบิดเบี้ยวเล็กน้อย โดยทางด้านขวาจะยาวกว่าด้านซ้าย แนวโน้มของ Normal Probability Plot จะงอลงเล็กน้อยที่ทางด้านซ้ายของการแจกแจงซึ่งหมายความว่า การแจกแจงของความผิดพลาดจะเบาบางกว่าที่ควรจะเป็นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการแจกแจงแบบปกติ นั่นหมายความว่า ค่าส่วนตกค้างที่มีค่าเป็นลบไม่ได้มีขนาดใหญ่เหมือนที่คาดเอาไว้ อย่างไรก็ตาม รูปที่ถูกพล็อตขึ้นมาไม่ได้แสดงความไม่เป็นปกติแต่อย่างใด



รูปที่ 2.25 Normal Probability Plot และแผนภาพแบบจุดของส่วนตักข้าง

โดยทั่วไปการเบี่ยงเบนปานกลางจากความเป็นปกติจะมีผลน้อยมากสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบผลกระทบคงที่ การกระจายของความผิดพลาดที่มีทางหนึ่งที่หนากว่าหรือบางกว่าปกติจะมีความสำคัญมากกว่าการบิดเบี้ยวของรูปร่าง เพราะว่าการทดสอบ F จะได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เรากล่าวได้ว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะมีความทนทานต่อการเบี่ยงเบนในสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติ การเบี่ยงเบนจากความเป็นปกติมักจะก่อให้เกิดระดับนัยสำคัญที่แท้จริงและทำให้กำลังของการทดสอบ (Power of Test) แตกต่าง (ลดลง) เพียงเล็กน้อยจากค่าที่คิดไว้สำหรับแบบจำลองแบบผลกระทบสุ่ม (Random Effect Model) จะได้รับผลกระทบรุนแรงกว่าในกรณีที่เกิดความไม่เป็นปกติขึ้นในแบบจำลอง โดยเฉพาะระดับความเชื่อมั่นที่แท้จริงบนการประมาณช่วงของส่วนประกอบของความแปรปรวนอาจจะแตกต่างอย่างมากจากค่าที่คิดเอาไว้

สิ่งที่ผิดปกติที่เห็นบ่อยบน Normal Probability Plot คือ ส่วนตกค้างบางค่ามีค่ามากกว่าตัวอื่นๆ มาก หรือเรียกว่า “Outlier” การที่มี Outlier เพียง 1 ค่า หรือมากกว่าจะทำให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนบิดเบือนไป ดังนั้นถ้าหากมี Outlier ที่สำคัญปรากฏขึ้น เราควรจะมีการตรวจสอบอย่างระมัดระวังบ่อยครั้งการเกิด Outlier มาจากความผิดพลาดจากการคำนวณ หรือการเข้ารหัสให้แก่ข้อมูล หรือ ความผิดพลาดจากการคัดลอกข้อมูล ถ้าสิ่งเหล่านี้ไม่ใช่สาเหตุ เราควรจะตรวจสอบดูสถานะแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง แต่ถ้าหาก Outlier เป็นค่าแตกต่างในทิศทางที่ดี ดังนั้น Outlier อาจจะเป็นตัวที่ให้ข้อมูลที่มีความสำคัญกว่าข้อมูลตัวอื่นๆ เราจึงไม่ควรที่จะมองข้ามหรือละเลยค่า Outlier เหล่านี้โดยไม่มีเหตุผลทางสถิติที่เพียงพอ อย่างน้อยที่สุดเราอาจจะจบการทดลองด้วยการวิเคราะห์ 2 ลักษณะ คือ ทำโดยรวมเอา Outlier เข้าไปด้วย และทำโดยไม่รวม Outlier

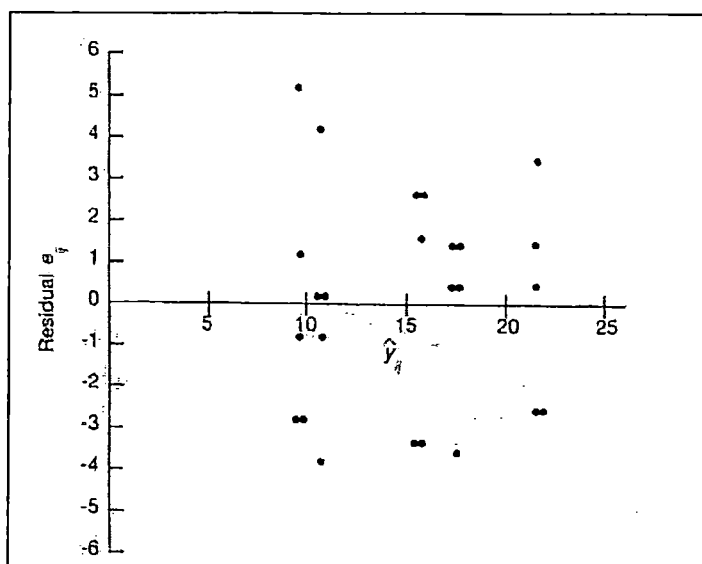
มีหลายวิธีการที่เป็นทางการในการตรวจหา Outlier ในการตรวจหา Outlier อย่างง่ายอาจทำได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้างที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐาน

$$d_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{MS_E}} \quad (2.16)$$

ถ้าหากค่าความผิดพลาด e_{ij} เป็น $N(0, \sigma^2)$ ดังนั้น ส่วนตกค้างที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐานควรประมาณได้เป็นการกระจายแบบปกติ มีมัธยฐานเป็นศูนย์และมีความแปรปรวน 1 หน่วย ดังนั้น ประมาณ 68% ของส่วนตกค้างที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐานควรจะตกอยู่ในช่วง ± 1 ประมาณ 95% ควรตกในช่วง ± 2 และประมาณ 99% ควรตกในช่วง ± 3 ค่าส่วนตกค้างที่มากกว่า 3 หรือ 4 ของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถือเป็น Outlier ที่น่าจะถูกนำมาพิจารณา

2.6.1.4 การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

ถ้าหากแบบจำลองถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ควรจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด รวมถึงค่าของผลตอบที่ถูกทำนาย (Predicted Response) อีกด้วยการตรวจสอบอย่างง่าย คือ การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) \hat{y}_{ij} (สำหรับแบบจำลองทิศทางเดียวจะมี $\hat{y}_{ij} = \bar{y}_i$ หรือค่าเฉลี่ยของระดับที่ i กราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ไม่ควรจะมีรูปร่างเฉพาะแต่อย่างใด รูปที่ 2.26 เป็นการพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตของข้อ จากรูปพบว่าไม่มีโครงสร้างที่ผิดสังเกตปรากฏให้เห็น



รูปที่ 2.26 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิต

สิ่งผิดปกติซึ่งแสดงให้เห็นในกราฟ คือ ความแปรปรวนที่ไม่คงตัว บางครั้งความแปรปรวนของค่าสังเกตเพิ่มในขณะที่จำนวนของการสังเกตเพิ่มขึ้น กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นถ้าหากความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวนที่อยู่เบื้องหลังในการทดลองมีขนาดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่คงที่เป็นจำนวนเท่าของขนาดของค่าสังเกต(ซึ่งเหตุการณ์เกิดขึ้นบ่อยๆ ในกรณีของเครื่องมือวัด กล่าวคือค่าความผิดพลาดจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการอ่านสเกล) ถ้าเป็นเช่นนี้จริงค่าของส่วนตกค้างจะมากขึ้นเมื่อ y_j เพิ่มขึ้น และกราฟของส่วนตกค้างกับ \hat{y}_j จะมีรูปร่างเหมือนกรวยปลายเปิด ความแปรปรวนที่ไม่คงตัวจะเกิดในกรณีที่ข้อมูลนั้น ไม่มีการแจกแจงแบบปกติและบิดเบี้ยวด้วย เพราะว่าการแจกแจงที่บิดเบี้ยวจะทำให้ความแปรปรวนมีแนวโน้มที่จะเป็นฟังก์ชันของมัชฌิม

ถ้าหากสมมติฐานของความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของความแปรปรวนไม่ถูกต้อง ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบคงที่แบบได้คู่ การทดสอบ F จะถูกกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการออกแบบที่ไม่ได้คู่ หรือกรณีที่ความแปรปรวนค่าหนึ่งมากกว่าค่าอื่นมากๆ ปัญหานี้จะมีความรุนแรงขึ้น ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม ความไม่เท่ากันของความแปรปรวนของความผิดพลาดจะมีผลกระทบต่อส่วนประกอบของความแปรปรวนอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบที่ได้คู่ก็ตาม

วิธีการจัดการเกี่ยวกับความแปรปรวนไม่คงตัวเมื่อเกิดขึ้นกับกรณีข้างบนคือ การประยุกต์ใช้ “การแปลงความแปรปรวนให้คงที่ (Variance Stabilizing Transformation)” และจากนั้นก็ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนกับข้อมูลที่มีการแปลงเรียบร้อยแล้ว โดยวิธีการนี้ควรสังเกตว่า ข้อสรุปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้ได้กับประชากรที่ถูกแปลงแล้วเท่านั้น

งานวิจัยจำนวนมากกำลังดำเนินอยู่เพื่อศึกษาถึงการเลือกการแปลงที่เหมาะสม ถ้าหากผู้ทดลองทราบถึงการแจกแจงทางทฤษฎีของค่าสังเกต เขาควรจะใช้ข้อมูลนี้ในการทำการเลือกการแปลงที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าสังเกตเป็นไปตามการแจกแจงแบบปัวส์ซอง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโดยใช้รากที่สองโดย $y_{ij}^* = \sqrt{y_{ij}}$ หรือ $y_{ij}^* = \sqrt{(1 + y_{ij})}$ ควรจะถูกนำมาใช้ แต่ถ้าข้อมูลมีการแจกแจงแบบ Log-Normal ดังนั้นการแปลงแบบลอการิทึม โดย $y_{ij}^* = \log y_{ij}$ จะเป็นการแปลงที่เหมาะสมในกรณีของการแปลงข้อมูลแบบไบโนเมียลซึ่งจะแสดงในรูปเศษส่วน การแปลงแบบ Arcsin โดย $y_{ij}^* = \arcsin \sqrt{y_{ij}}$ จะเป็นการแปลงที่ดี แต่เมื่อไม่มีการแปลงที่เด่นชัดที่จะนำมาใช้ ผู้ทดลองควรพิจารณาการแปลงซึ่งทำให้ความแปรปรวนมีค่าเท่ากัน โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าเฉลี่ย ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ให้เลือกการแปลงที่ทำให้ค่าอันตรกิริยาค่ากำลังสองเฉลี่ย (Interaction Mean Square) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้การทดลองสามารถแปลความหมายได้ง่าย

2.6.2 การออกแบบการทดลองสำหรับพิดพื้นผิวผลตอบ

การพิดและวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะทำได้ง่ายขึ้น ถ้าเราเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ในส่วนนี้ จะขออธิบายเกี่ยวกับแนวทางในการเลือกการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับพิดพื้นผิวผลตอบเมื่อจะเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบ ลักษณะของการออกแบบที่ต้องการบางประการที่ควรพิจารณา คือ

1. ทำให้เกิดการแจกแจงหรือการกระจายที่เหมาะสมของจุดของข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในความสนใจ
2. ทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และ Lack of Fit ได้
3. ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นได้ในบล็อกร
4. ทำให้การออกแบบที่มีอันดับสูงขึ้นไปสามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ
5. ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด
6. ไม่ต้องรันการทดลองเป็นจำนวนมาก
7. ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแบบอิสระ
8. คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย

ลักษณะสมบัติที่ต้องการเหล่านี้ในบางครั้งอาจจะขัดแย้งกันได้ ดังนั้น จะต้องมีการไตร่ตรองอย่างดีก่อนที่จะเลือกการออกแบบที่จะนำมาใช้งาน

2.6.2.1 การออกแบบสำหรับพิดแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง

สมมติว่าเราต้องการพิดแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (First-Order Model) ที่มี k ตัวแปร

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.17)$$

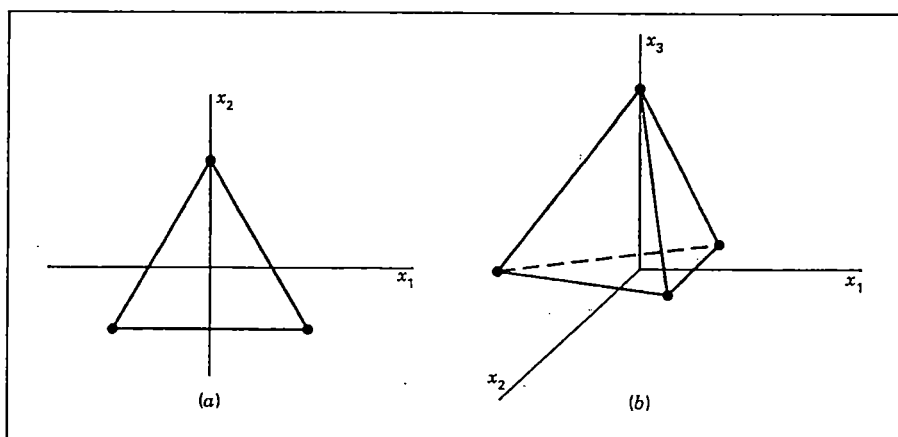
ซึ่งเป็นประเภทของการออกแบบพิเศษชนิดหนึ่งที่จะทำให้ความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์ของการถดถอย $\{\hat{\beta}_j\}$ มีค่าต่ำที่สุด และเรียกว่า การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่ง (Orthogonal First-Order Design) การออกแบบอันดับที่หนึ่งจะเป็นเชิงตั้งฉากถ้าส่วนประกอบทุกตัวของเมทริกซ์ $(X'X)$ ที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งบอกให้ทราบว่า ผลคูณไขว้ของคอลัมน์ของเมทริกซ์ X รวมกันเท่ากับศูนย์

ตัวอย่างของการออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่ง คือ 2^k แฟกทอเรียล และเศษส่วนของอนุกรม ซึ่ง 2^k มีผลหลักไม่ได้เป็นคู่แฝดแฝง (Alias) ซึ่งกันและกัน ในการใช้การออกแบบนี้ เราสมมติว่าระดับต่ำและสูงของปัจจัย k ถูกเข้ารหัสให้อยู่ในรูปของ ± 1

ในการออกแบบ 2^k นั้นเราจะไม่สามารถประมาณความผิดพลาดของการทดลองได้นอกเสียจากว่า บางรันถูกเรพลิเคต วิธีการทั่วไปสำหรับการทำเรพลิเคตให้แก่การออกแบบ 2^k คือเพิ่มหลายค่าสังเกตเข้าไปที่ศูนย์กลางของการออกแบบ การเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไปยังการออกแบบ 2^k นี้จะไม่ส่งผลกับ $\hat{\beta}_i$ สำหรับ

$i \geq 1$ แต่ตัวประมาณ β_0 จะกลายเป็นค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด ยิ่งกว่านั้น การเพิ่มจุดศูนย์กลางยังไม่ได้เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของการออกแบบแต่ประการใด

การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่งอีกตัวอย่างหนึ่ง คือ ซิมเพล็กซ์ (Simplex) ซึ่งเป็นรูปประกอบด้านข้างทั่วไปที่มีจุดยอด $k + 1$ จุดใน k มิติ ดังนั้นสำหรับ $k = 2$ การออกแบบซิมเพล็กซ์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และสำหรับ $k = 3$ จะเป็นรูปทรงสี่หน้าหรือกรวยสามเหลี่ยม (Tetrahedron) การออกแบบซิมเพล็กซ์ใน 2 และ 3 มิติถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.27

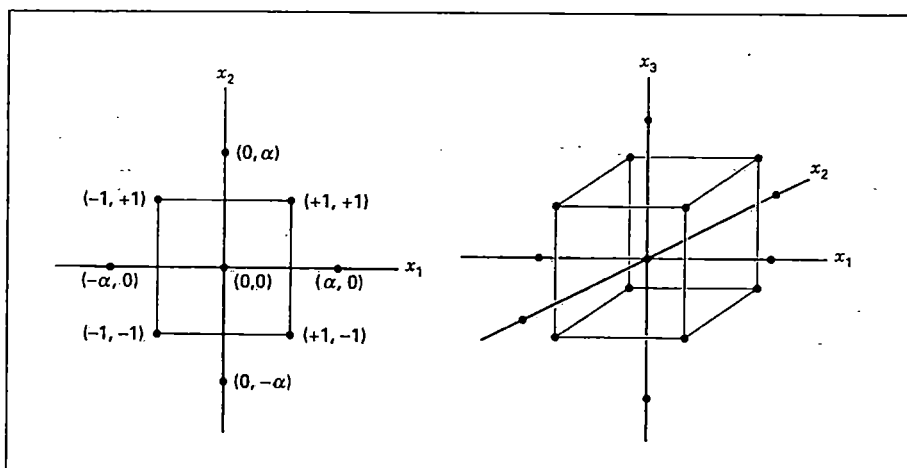


รูปที่ 2.27 การออกแบบซิมเพล็กซ์สำหรับตัวแปร (a) $k=2$ และ (b) $k=3$

2.6.2.2 การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง

เราได้กล่าวถึงการออกแบบส่วนประสมกลาง หรือ CCD ซึ่งใช้ในการพิตแบบจำลองอันดับที่สองมาก่อนหน้านี้แล้ว การออกแบบนี้เป็นประเภทหนึ่งของการออกแบบที่นิยมกันมากสำหรับการพิตแบบจำลองลักษณะเช่นนี้ โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี n_f รันในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง รูปที่ 2.28 แสดง CCD สำหรับ $k=2$ และ $k=3$ บ้าง

การพัฒนาของ CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ 2^k ถูกนำมาใช้เพื่อพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่งแล้วพบว่า แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับข้อมูลนี้ ดังนั้น จึงได้มีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้เราสามารถใส่พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือ ระยะทาง α ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนต่อไป



รูปที่ 2.28 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k=2$ และ $k=3$

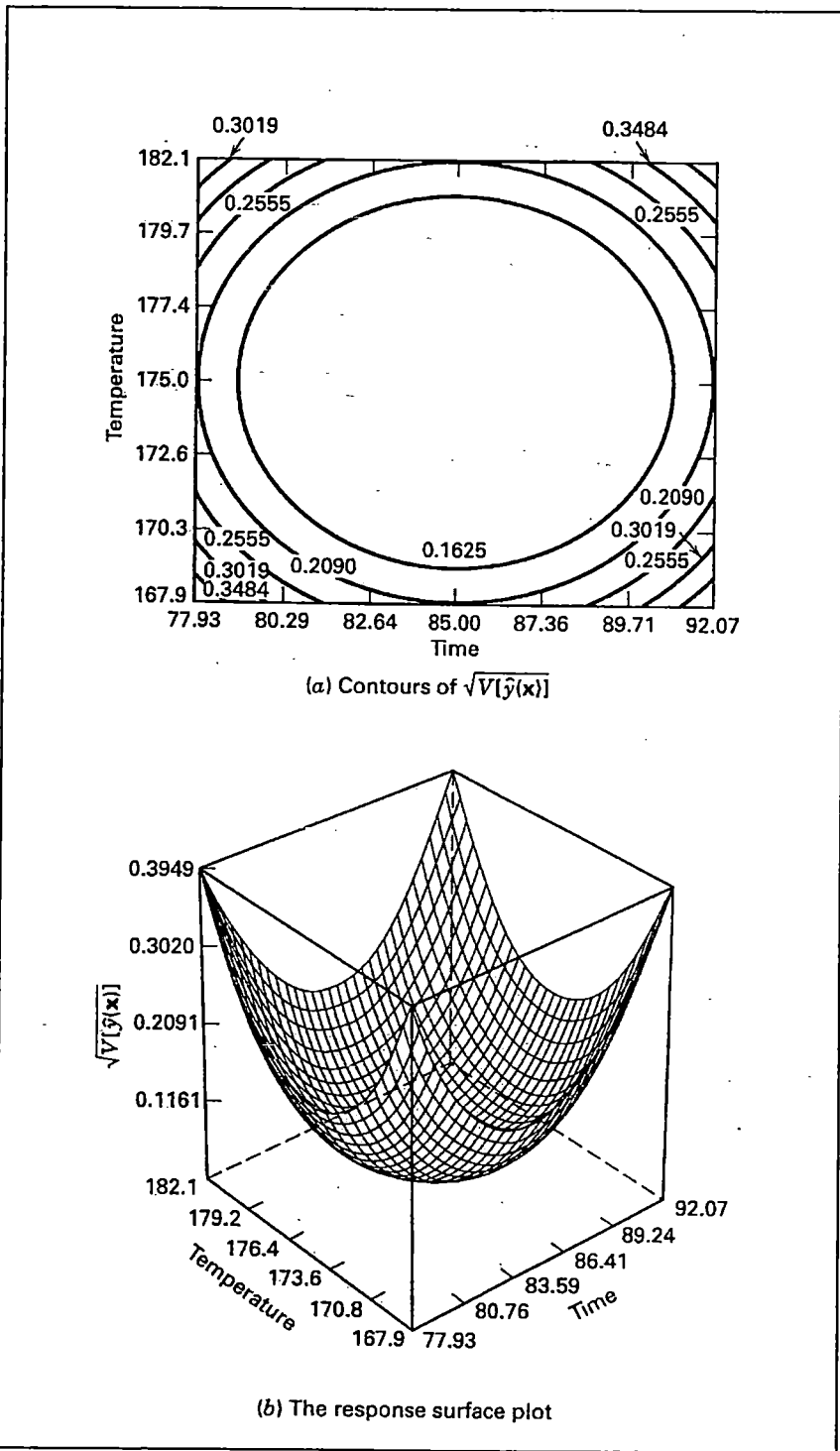
2.6.2.2.1 ความสามารถในการหมุน

เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ “ดี” ก็คือ แบบจำลองนี้จะต้องอยู่กับร่องกับรอยอย่างมีเหตุผล และมีความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์ที่บางจุด x คือ

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x'(x'x)^{-1}x \quad (2.18)$$

ซึ่งถูกแนะนำว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบอันดับที่สองควรจะสามารถในการหมุน ซึ่งหมายความว่า $V[\hat{y}(x)]$ คือจุด x ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม

รูปที่ 2.29 แสดงเส้นโครงร่างของค่าคงตัว $\sqrt{V[\hat{y}(x)]}$ สำหรับแบบจำลองอันดับที่สองที่ถูกพิตโดยใช้ CCD สังเกตว่า เส้นโครงร่างของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าคงตัวของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะเป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางร่วมกัน การออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ \hat{y} ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง $(0,0,\dots,0)$ ดังนั้นทำให้เราเรียกการออกแบบเช่นนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้ (Rotatable Design)



รูปที่ 2.29 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ที่ถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้

ความสามารถในการหมุนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบเพราะว่า วัตถุประสงค์ของ RSM คือ การหาค่าที่ดีที่สุด และเราไม่ถือว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดก่อนที่จะรันการทดลอง ดังนั้นจะมีเหตุผลดีกว่า ที่จะใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวประมาณที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง (เราสามารถแสดงได้ว่า การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่งจะเป็นแบบที่สามารถหมุนได้)

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดย การเลือกค่าของ α ค่าของ α สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟคทอเรียลของการออกแบบ ความจริงแล้ว $\alpha = (n_f)^{1/4}$ จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลาง ที่สามารถหมุนได้โดยที่ n_f คือจำนวนของจุดที่ถูกใช้ส่วนแฟคทอเรียลของการออกแบบ

2.6.2.2.2 CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Sphere) นั่นคือจะเป็นการดีมากถ้าจะใช้เกณฑ์ในการออกแบบเช่นนี้เมื่อบริเวณที่เรากำลังสนใจมีรูปทรงกลม อย่างไรก็ตามการออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้องร้อยเปอร์เซ็นต์ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณของทรงกลมที่เรากำลังสนใจนั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ α หาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งกำหนดให้ $\alpha = \sqrt{k}$ การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งจะกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล และการออกแบบในแนวแกน ให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลม ซึ่งมีรัศมี \sqrt{k}

2.6.2.2.3 จุดศูนย์กลางของการรันใน CCD

การเลือก α ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อจะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างเป็นที่ยอมรับได้ ตามปกติแล้ว ขอแนะนำให้ใช้ 3-5 การทดลอง

2.6.2.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

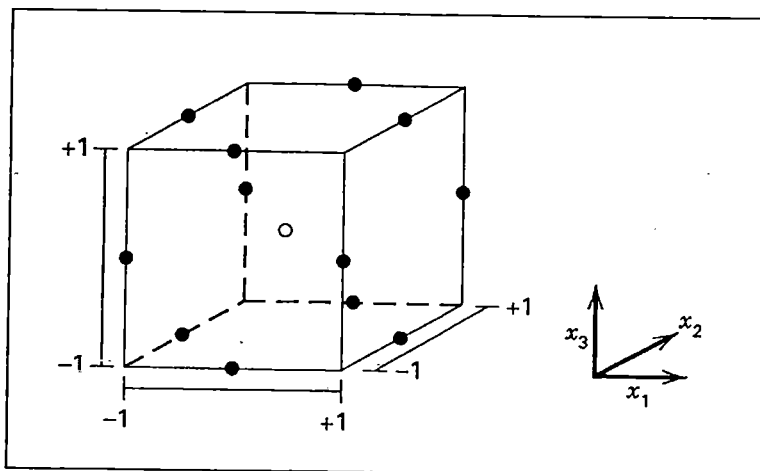
การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพีคพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.30 สังเกตว่า การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนั้นการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ไม่ได้รวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมตัวของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

ตารางที่ 2.3 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร

A Three-Variable Box-Behnken Design

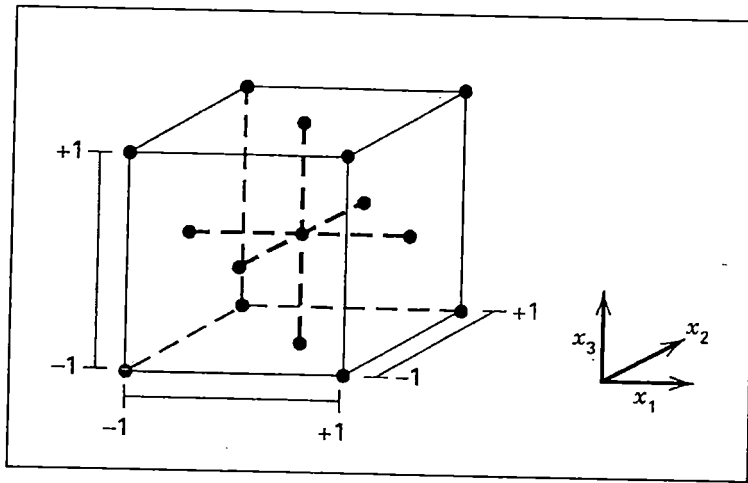
Run	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 2.30 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร

2.6.2.4 บริเวณที่สนใจแบบคิวบอยด์

มีเหตุการณ์มากมายที่บริเวณที่อยู่ในความสนใจเป็นแบบคิวบอยด์ (Cuboidal) แทนที่จะเป็นรูปทรงกลม ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบที่เรียกว่า Face-Centered Central Composite หรือ Face-Center Cube ที่มี $\alpha = 1$ พัฒนาการมาจากส่วนประสมกลางจะเป็น การออกแบบที่มีประโยชน์อย่างมาก การออกแบบนี้วางจุดดาว หรือจุดในแนวแกน อยู่บนจุด ศูนย์กลางของหน้าของรูปทรงลูกบาศก์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 สำหรับ $k=3$ การออกแบบนี้ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากการออกแบบนี้ต้องการเพียง 3 ระดับของแต่ละปัจจัยเท่านั้น และการ เปลี่ยนระดับของปัจจัยทำได้ยากในทางปฏิบัติอีกด้วย อย่างไรก็ตาม จะต้องจำไว้ว่า การ ออกแบบนี้ไม่สามารถหมุนได้



รูปที่ 2.31 การออกแบบ Face-Centered ส่วนประสมกลางสำหรับ $k=3$

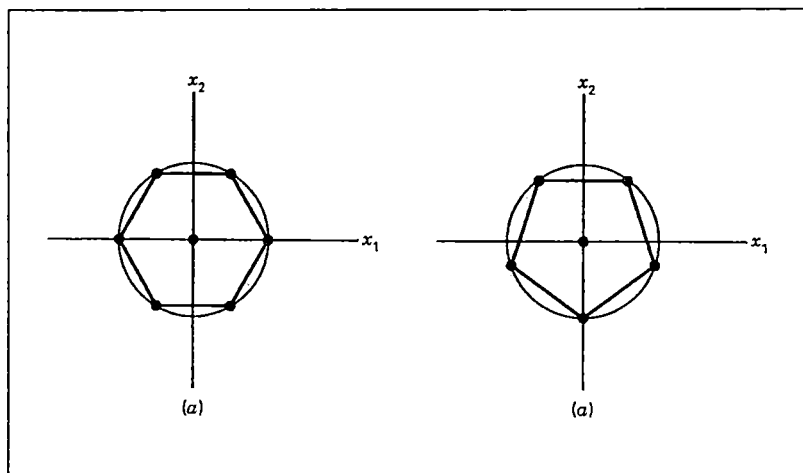
การออกแบบ Face-Centered Cube ไม่ต้องการใช้จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมาก เหมือนกับ CCD รูปทรงกลม ในทางปฏิบัติ $n_c = 2$ จะพอเพียงที่จะทำให้ความแปรปรวนของการพยากรณ์อยู่ในระดับที่ติดลอคบริเวณของการออกแบบ ให้จำไว้ว่า บางครั้งการที่เราต้องรันที่จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมากขึ้นเนื่องจากต้องการให้ค่าประมาณของความผิดพลาดของการทดลองเป็นที่ยอมรับได้

2.6.2.5 การออกแบบชนิดอื่น

ยังมีการออกแบบพื้นผิวผลตอบอีกเป็นจำนวนมากที่อาจจะเป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติบางโอกาสสำหรับกรณี 2 ตัวแปร เราสามารถใช้การออกแบบที่เกิดจากจุดที่มีระยะห่างเท่ากันบนวงกลม และการออกแบบลักษณะนี้จะทำให้เกิดรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) เนื่องจาก

จุดของการออกแบบนี้มีระยะห่างจากจุดกำเนิดเท่ากัน การจัดวางเช่นนี้ถูกเรียกว่า การออกแบบรัศมีเท่ากัน (Equiradial Design)

สำหรับ $k = 2$ การออกแบบรัศมีเท่ากันที่สามารถหาค่าได้หาได้จากการรวมจุด $n_2 \geq 5$ จุดที่มีระยะห่างเท่ากันบนวงกลมที่มีจุด $n_1 \geq 1$ จุดศูนย์กลางของวงกลม การออกแบบที่สำคัญสำหรับ $k = 2$ คือ รูป 5 เหลี่ยม และ 6 เหลี่ยม การออกแบบนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 การออกแบบรัศมีเท่ากันสำหรับ 2 ตัวแปร (a) หกเหลี่ยม (b) ห้าเหลี่ยม [36,37,38,39]

2.7 พฤติกรรมทางกลของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงพฤติกรรมทางกลของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนที่มีโครงสร้างจุลภาคต่าง ๆ ดังที่อธิบายมาแล้วได้แก่ เฟอร์ไรต์ทั้งชนิดหยาบและละเอียด คาร์ไบด์กลม เบนไนต์ และมาร์เทนไซต์ และเราจะได้หาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับโครงสร้างจุลภาคที่จะปรากฏในโลหะผสมเหล่านี้

2.7.1 เฟอร์ไรต์

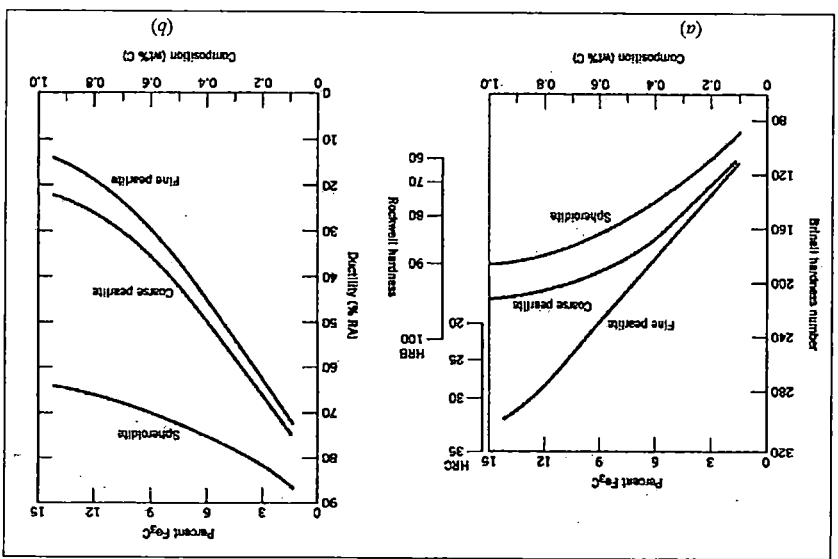
ซีเมนต์ไคต์แข็งและเปราะบางกว่าเฟอร์ไรต์มาก ดังนั้น หากโลหะผสมของเหล็กกล้ามีปริมาณ(อัตราส่วน)ของ Fe_3C สูงขึ้นในขณะที่ส่วนประกอบทางจุลภาคอื่นคงที่ จะทำให้วัสดุนั้นแข็งและแข็งแรงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.33(a) ซึ่งแสดงค่าความต้านแรงดึง ความเค้นจุดคราก ตลอดจนความแข็งแบบบริเนลเป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอน (ซึ่งเทียบได้กับเปอร์เซ็นต์ของ Fe_3C) ในเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ละเอียด ค่าสมบัติทางกลทั้งสามเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเหล็กมีคาร์บอนเข้มข้นขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน เนื่องจากซีเมนต์ไคต์เปราะกว่า ดังนั้นการมีซีเมนต์ไคต์เพิ่มขึ้น จะทำให้ทั้งความเหนียวและความแกร่ง(หรือพลังงานแรงกระแทก) ลดลงทั้งคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.33(b) สำหรับเหล็กกล้าเฟอร์ไรต์ละเอียดเช่นกัน

โครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ

2.7.2 โครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (สเฟียไรต์)

รูปที่ 2.34 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนที่ละลายในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ กับปริมาณคาร์บอนที่ละลายในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนที่ละลายในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ กับปริมาณคาร์บอนที่ละลายในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ

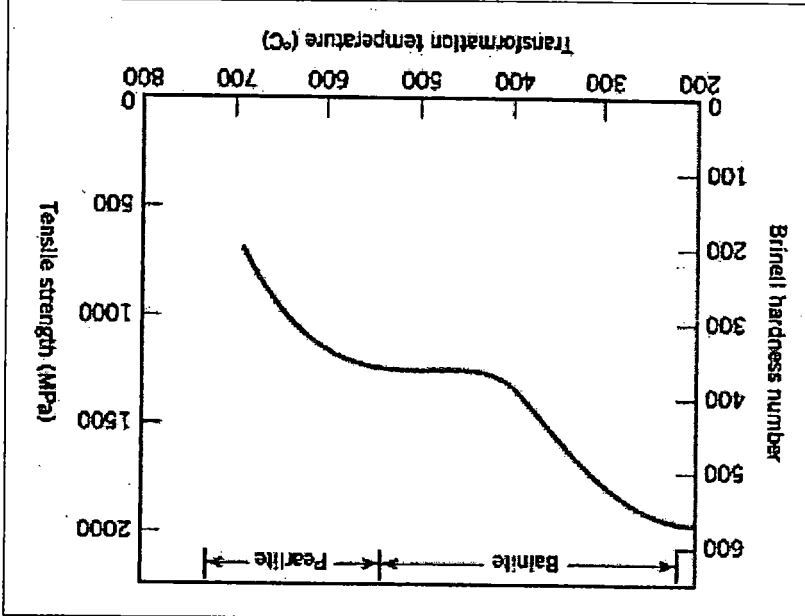


การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนและการชุบแข็งด้วยวิธีต่างๆ

ชนิดหนึ่ง “เกรง” มากด้วยเนื้อเยื่อจากกรอแยกแ้วใด ๆ ก็ตามที่กล้าของเยื่อใยในตัวเนื้อเยื่อของ
 ขยายตัวผ่านโครงสร้างที่เป็นโพโรไรต์เท่านั้น โดยไม่มีโอกาสไปพบที่ปลายของแขนงใน
 เนื้อเยื่อ

2.7.3 เบนไนต์

เนื่องจากเหล็กกล้าเบนไนต์มีโครงสร้างที่ละเอียดกว่า (กล่าวคือ มีเกรนของเฟอร์
 ไรต์ α และอนุภาคของ Fe_3C ที่เล็กกว่า) ดังนั้น มันจึงแข็งแรงและแข็งกว่าเหล็กที่เป็นโพไรต์
 นอกจากนี้มันยังมีความแข็งแรงและความเหนียวในเกณฑ์ที่ดีด้วย รูปที่ 2.35 แสดงอิทธิพล
 ของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของความเค้นแรงดึงและความเหนียวของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มี
 ส่วนผสมยูเทคติกโดยเฉลี่ยในรูปได้ระหว่างอุณหภูมิที่เหล็กโครงสร้างโพไรต์และเบนไนต์



รูปที่ 2.35 แสดงความแข็งแรงแบบรูปเหนียวและค่าความเค้นแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีส่วนผสมยูเทคติกโดย

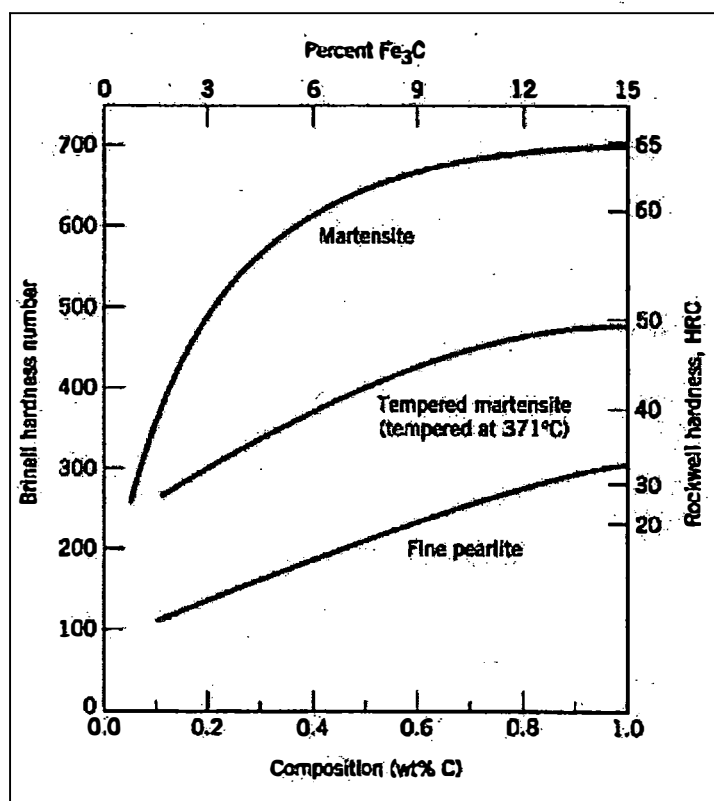
แบบโพไรต์หรือเบนไนต์ของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน ที่มีส่วนผสมยูเทคติกโดยเฉลี่ยคือ

ครอปอุณหภูมิช่วงที่เหล็กเบนไนต์และโพไรต์

2.7.4 มาร์เทนไซต์

ในบรรดาโครงสร้างจุลภาคแบบต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นในเหล็กกล้าชนิดหนึ่ง ๆ
 โครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์คือ โครงสร้างที่แข็งแรงและแข็งที่สุด ความเหนียวที่ลดลงโดย
 ในความจริงแล้วมาร์เทนไซต์ไม่มีความเหนียวอยู่เลยกล่าวได้ ความแข็งแรงของมาร์เทนไซต์นั้นกับ
 ปริมาณคาร์บอนจนถึง 0.6% โดยน้ำหนักคู่แข่งในรูปที่ 2.36 ซึ่งพลังของความแข็งแรงของมาร์เทน

ไซด์และเฟิร์ลไลต์ละเอียดเป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอน ตรงกันข้ามกับเหล็กกล้าชนิดเฟิร์ลไลต์ ความแข็งแรงและความแข็งของมาร์เทนไซด์ที่สูงนี้ ไม่เกี่ยวข้องกับลักษณะของโครงสร้างจุลภาค แต่ถูกอธิบายว่าเป็นผลจากการที่อะตอมแทรกของคาร์บอนขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันอย่างมีประสิทธิภาพ และการที่โครงสร้างแบบ BCT มีระบบสลิปจำนวนน้อยให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้มันเอง



รูปที่ 2.36 ความแข็งเป็นฟังก์ชันของปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซด์ เทมเปอร์มาร์เทนไซด์ (อบคืนตัวที่ 371°C (700°F)) และเฟิร์ลไลต์

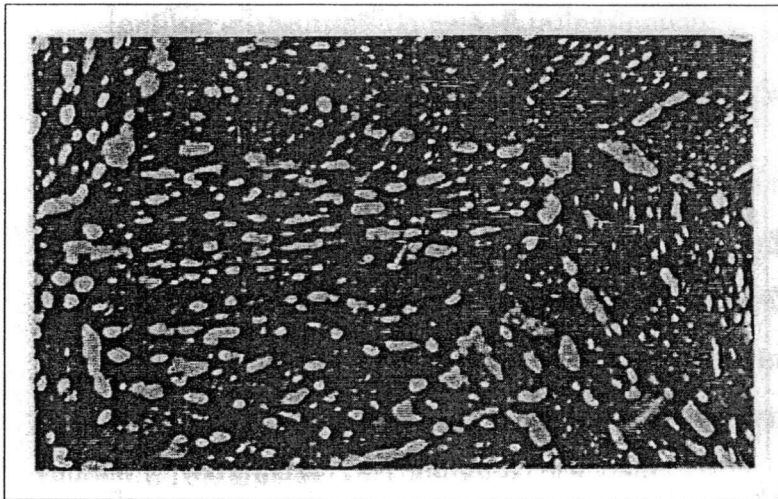
ออสเตนไนต์มีความหนาแน่นสูงกว่ามาร์เทนไซด์เล็กน้อย ดังนั้น ระหว่างที่เกิดการแปลงเฟสในขณะที่ชุบเย็นลงมานั้น จะเกิดการเพิ่มของปริมาตรสุทธิ เป็นผลให้ชิ้นงานใหญ่ที่ชุบให้เย็นเร็ว ๆ เกิดการแตกร้าวได้เนื่องจากความเค้นภายใน สิ่งนี้เป็นปัญหามากโดยเฉพาะเมื่อปริมาณคาร์บอนสูงกว่าประมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก

2.7.5 เทมเปอร์มาร์เทนไซด์ (Tempered martensite)

ในสภาพถูกชุบมาใหม่ๆ มาร์เทนไซด์นอกจากจะแข็งมากแล้วยังเปราะมากอีกด้วย จนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ในทันที ไม่ว่างานลักษณะใดก็ตาม อีกทั้งความเค้นภายในที่เกิดขึ้น

ระหว่างการชุบยังเป็นจุดอ่อนของชิ้นงานอีกด้วย ความเหนียวและความแกร่งของมาร์เทนไซต์จะถูกเพิ่มขึ้น รวมทั้งลดความเค้นภายในได้ โดยกรรมวิธีทางความร้อนที่เรียกว่า การอบคืนตัว (Tempering) การอบคืนตัวทำได้โดยให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าที่เป็นมาร์เทนไซต์ จนมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอยด์เป็นเวลาตามที่กำหนดไว้ โดยปกติ การอบคืนตัวจะทำให้อุณหภูมิระหว่าง 250 ถึง 650°C (480-1200°F) แต่หากต้องการเฉพาะคลายความเค้นภายใน อุณหภูมิต่ำ ๆ เพียง 200°C (390°F) ก็เพียงพอ กรรมวิธีอบคืนตัวจะทำให้เกิดการแพร่ และเกิดปฏิกิริยาแปลงเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (tempered martensite) หรือเรียกอีกอย่างว่ามาร์เทนไซต์ที่ผ่านการอบคืนตัว ดังนี้

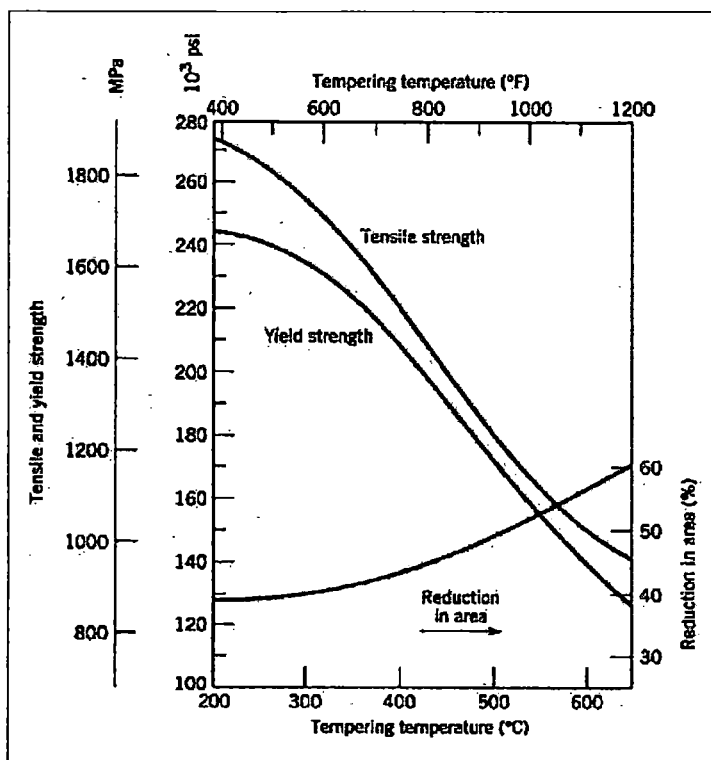
Martensite (BCT, single phase) → Tempered Martensite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ phases) โดยที่มาร์เทนไซต์เฟสเดียว (เป็น BCT) ซึ่งก็คือ เฟสที่มีคาร์บอนละลายอยู่อย่างอิ่มตัวยิ่งยวด แปลงสภาพเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ซึ่งประกอบด้วย เฟสเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ที่เสถียร ดังที่ระบุในแผนภูมิสมดุลเฟสของเหล็ก-คาร์บอน โครงสร้างจุลภาคของเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กมากของซีเมนไตต์ฝังตัวกระจายอย่างสม่ำเสมอบนเนื้อพื้นต่อเนื้อของเฟอร์ไรต์ โครงสร้างนี้คล้ายกับโครงสร้างแบบคาร์ไบด์เม็ดกลม ต่างกันตรงที่อนุภาคของซีเมนไตต์จะเล็กกว่ากันมาก ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ที่กำลังขยายสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.37



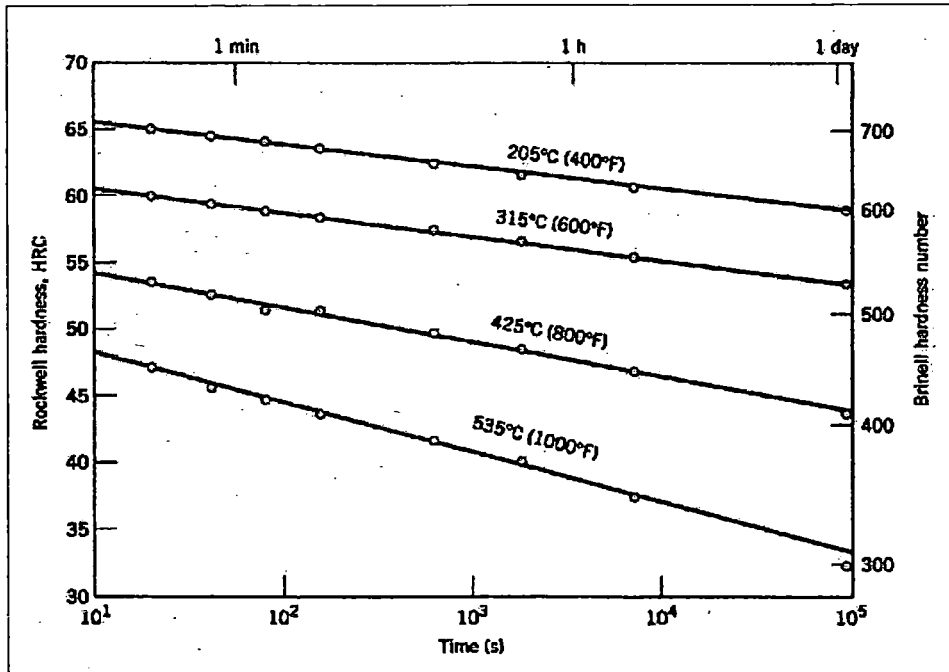
รูปที่ 2.37 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ 594°C (1100°F) อนุภาคเล็ก ๆ คือเฟสซีเมนไตต์ พื้นคือเฟอร์ไรต์ กำลังขยาย 9300

เทมเปอร์มาร์เทนไซต์อาจมีความแข็งและความแข็งแรงสูงเท่า ๆ กับมาร์เทนไซต์ แต่จะมีความเหนียวและความแข็งแกร่งดีกว่ากันพอสมควร ดังกราฟความแข็ง-เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ของคาร์บอน ในรูปที่ 2.36 ซึ่งแสดงเส้นกราฟของเทมเปอร์เมนต์ไชต์ไว้ด้วยนั้น ความแข็งและความแข็งแรงของโครงสร้างนี้อธิบายด้วยการที่มันมีพื้นผิวสัมผัสระหว่างเฟอไรต์-ซีเมนไตต์ (ต่อหน่วยปริมาตร) มากนั่นเอง อนุภาคซีเมนไตต์ซึ่งแข็งทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพื้นเฟอไรต์ตลอดแนวผิวสัมผัส และผิวสัมผัสนี้ยังขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันระหว่างการแปรรูปถาวรอีกด้วย ในขณะที่เฟสเฟอไรต์ซึ่งมีความต่อนั้นเป็นเฟสที่เหนียวและแกร่งอยู่แล้ว เหล่านี้ส่งผลให้สมบัติทั้งสองด้านของเทมเปอร์เมนต์ไชต์ค่อนข้างดี ขนาดของอนุภาคซีเมนไตต์ส่งผลต่อสมบัติทางกลของเทมเปอร์เมนต์ไชต์ หากอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสเฟอไรต์-ซีเมนไตต์ ส่งผลให้วัสดุนั้นนุ่มและอ่อนลง ในขณะที่จะเหนียวและแกร่งขึ้น ยิ่งกว่านั้น กรรมวิธีอบคืนตัวเป็นกำหนดขนาดของอนุภาคซีเมนไตต์ ตัวแปรของกรรมวิธีทางความร้อนนี้คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ โดยที่กรรมวิธีโดยมากจะทำที่อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากการแพร่ของคาร์บอนมีบทบาทสำคัญในการแปลงสภาพจากมาร์เทนไซต์เป็นเทมเปอร์เมนต์ไชต์ที่อุณหภูมิสูงกว่า จะเร่งการแพร่ให้เร็วขึ้น เป็นผลให้อนุภาคของซีเมนไตต์โตเร็วขึ้น และวัสดุจะอ่อนลง รูปที่ 2.38 แสดงผลของอุณหภูมิอบคืนตัวที่มีต่อความต้านแรงดึง ความเค้นจุดครากและความเหนียวของเหล็กกล้าชนิดหนึ่ง วัสดุนี้ถูกชุบเย็นในน้ำมันเพื่อทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ก่อนที่จะนำไปอบคืนตัวต่อไป เวลาที่ใช้ในการอบคืนตัว ณ แต่ละอุณหภูมิเป็น 1 ชั่วโมง ข้อมูลการอบคืนตัวในลักษณะนี้โดยทั่วไปผู้ผลิตเหล็กกล้าจะต้องเตรียมไว้ให้



รูปที่ 2.38 ความต้านแรงดึง ความเค้นจุดคราก และความเหนียว (%RA) เทียบกับอุณหภูมิอบคืนตัวของเหล็กกล้าผสม (ชนิด 4340) ที่ผ่านการชุบเย็นในน้ำมัน



รูปที่ 2.39 ความแข็งเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบคืนตัวของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา ส่วนผสมยูเทคเตอร์ (หรือชนิด 1080) ที่ผ่านการชุบน้ำ

ผลของเวลาต่อความแข็งของเหล็กกล้าที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.39 สำหรับเหล็กกล้าส่วนผสมยูเทคตอยด์ที่ผ่านการชุบเย็นในน้ำ (มาตราของแกนเวลาเป็นแบบลอการิทึม) เมื่อใช้เวลานานขึ้น ความแข็งจะลดลง ซึ่งเป็นผลจากการโตขึ้นและการรวมตัวของอนุภาคซีเมนไตต์ ที่อุณหภูมิใกล้เคียง ๆ กับยูเทคตอยด์ (เช่นที่ 700°C (1300°F)) หลังจากเวลาผ่านไปหลายชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคจะกลายเป็นแบบคาร์ไบด์เม็ดกลม ประกอบด้วยเม็ดกลมของซีเมนต์เม็ดโตฝังอยู่ในเฟสต่อเนื่องของเฟอร์ไรต์ มาร์เทนไซต์ที่ถูกอบคืนตัวมากเกินไปจะนิ่มและเหนียวขึ้นอย่างมาก

2.7.6 สภาพเปราะจากการอบคืนตัว (Temper embrittlement)

เหล็กกล้าบางชนิดเมื่อนำมาอบคืนตัวกลับทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังที่วัดได้จากการทดสอบแรงกระแทก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สภาพเปราะจากการอบคืนตัว (Temper Embrittlement) พบเมื่อเหล็กถูกอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 575°C (1070°F) แล้วปล่อยให้เย็นตัวช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง หรือเมื่ออบคืนตัวที่อุณหภูมিরะหว่างช่วง 375 กับ 575°C (700 กับ 1070°F) โดยประมาณ เหล็กกล้าที่เสี่ยงต่อการเกิดสภาพเปราะจากการอบคืนตัวแบบนี้ คือเหล็กที่มีธาตุผสมแมงกานีส นิกเกิล หรือโครเมียมในปริมาณพอควร และมีธาตุมลทินพวกพลวง ฟอสฟอรัส สารหนู และดีบุกตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกันในปริมาณค่อนข้างต่ำ ธาตุผสมและธาตุ

มลทินเหล่านี้จะเลื่อนอุณหภูมิเปลี่ยนจากสภาพเหนียวเป็นเปราะ (Ductile-to-brittle transition) ให้สูงขึ้นมาก (สูงกว่าอุณหภูมิห้อง) ส่งผลให้วัสดุมีพฤติกรรมเปราะแม้ที่อุณหภูมิได้มีการค้นพบว่ารอยแตกที่ขยายตัวในวัสดุที่มีสภาพเปราะเหล่านี้ จะแตกร้าวยไปตามรอยต่อระหว่างเกรน (Intergranular) นั่นคือ รอยแตกจะผ่าไปตามขอบเกรนของออสเตนไนต์เดิม นอกจากนี้ก็ยังพบว่าธาตุผสมและธาตุมลทินดังกล่าวมักมารวมตัวกันหนาแน่นบริเวณนี้ด้วย

เราสามารถหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดสภาพเปราะจากการอบคืนตัวได้โดย

- 1) ควบคุมส่วนผสมทางเคมีและ
- 2) หากอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 575°C หรือต่ำกว่า 375°C ให้ชุบชิ้นงานลงมาที่อุณหภูมิแทนปล้อยให้เย็นเองนอกจากนั้นยังอาจปรับปรุงความแกร่งของเหล็กกล้าที่เกิดสภาพเปราะไปแล้วได้ โดยการให้ความร้อนไปที่ ประมาณ 600°C (1100°F) แล้วทำให้เย็นอย่างรวดเร็วมาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C (570°F)

2.8 ระบบเหล็ก-คาร์บอน

ในระบบโลหะผสมสององค์ประกอบ ระบบที่สำคัญคือ ระบบเหล็ก- คาร์บอน ทั้งเหล็กกล้า เหล็กหล่อ เป็นโลหะผสมที่สำคัญที่ใช้ในงานโครงสร้าง ล้วนแล้วแต่เป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กกับคาร์บอนทั้งสิ้น ในส่วนนี้จะอธิบายถึงแผนภูมิเฟสของระบบนี้รวมทั้งโครงสร้างจุลภาคที่อาจเกิดขึ้น

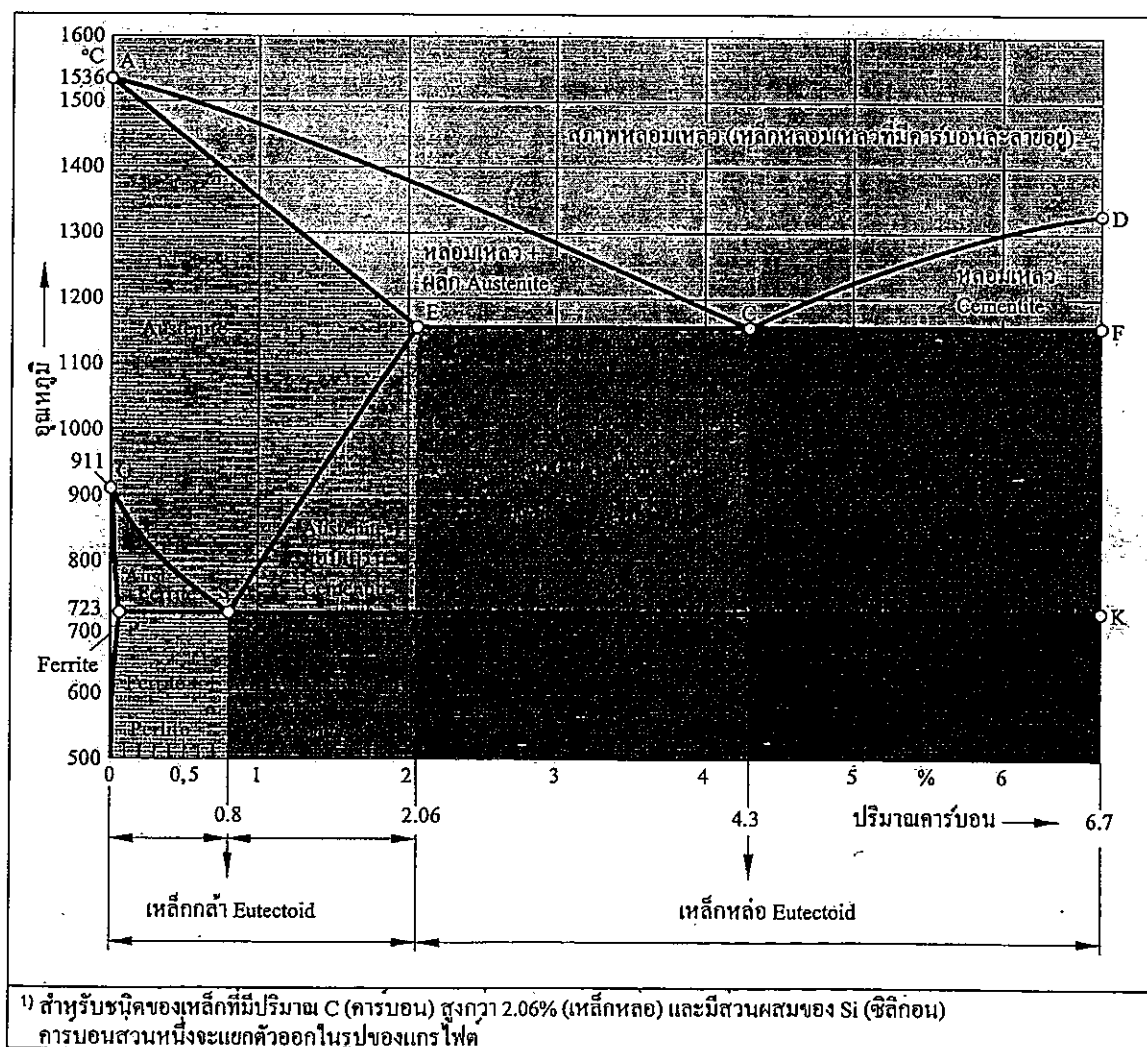
2.8.1 แผนภูมิเฟสเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ (Fe-Fe₃C)

ส่วนหนึ่งของแผนภูมิเฟสเหล็ก- คาร์บอนถูกแสดงไว้ในรูปที่ 9.21 เมื่อเหล็กบริสุทธิ์ถูกทำให้ร้อนจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก 2 ครั้งก่อนที่จะหลอมเหลว ที่อุณหภูมิห้อง รูปแบบที่เสถียรของเหล็กจะเรียกว่า เฟอร์ไรต์ หรือเหล็ก α และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ BCC เหล็กซึ่งเป็นโลหะที่มีหลายอัญรูปจะเปลี่ยนจากเฟอร์ไรต์เป็นออสเตนไนต์ (หรือเหล็ก γ ที่มีโครงสร้างผลึก FCC) ที่อุณหภูมิ 912°C (1674°C) เฟสออสเตนไนต์จะยังคงอยู่จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 1394°C (2541°F) และที่อุณหภูมินี้เหล็กจะเปลี่ยนกลับไปเป็นเฟสที่มีโครงสร้างผลึกเป็น BCC อีกครั้งซึ่งเรียกว่า เฟอร์ไรต์เดลตา ซึ่งจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1538°C (2800°F) การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นตามแกนด้านซ้ายของแผนภูมิ

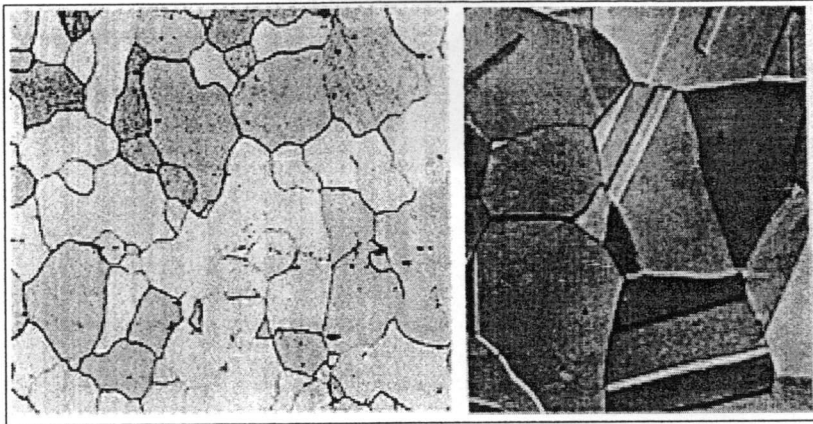
แกนแสดงส่วนผสมในรูปที่ 9.21 แสดงถึงส่วนผสม 6.7 %C ที่จุดนี้เป็นส่วนผสมของสารประกอบระหว่างกลางของเหล็กคาร์ไบด์หรือซีเมนไต์ และแสดงในแผนภูมิเป็นเส้นตั้ง ดังนั้น แผนภูมิเฟสเหล็กคาร์บอนจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีเหล็กมาก (ดังรูปที่ 9.21) และอีกส่วนที่เหลือ คือ คาร์บอนมากกว่า 6.7% จนถึง 100% (แกรไฟต์บริสุทธิ์) ซึ่งไม่ได้แสดงในรูปที่ 9.21 ในทางปฏิบัติ เหล็กกล้าและเหล็กหล่อที่ใช้งานกันมีคาร์บอนน้อยกว่า 6.7 % โดยน้ำหนัก ดังนั้น เราจึงสนใจศึกษาเฉพาะระบบของเหล็กคาร์ไบด์นี้เท่านั้น นอกจากนี้แผนภูมิที่

แสดงในรูปที่ 9.21 อาจจะเรียกว่าเป็นแผนภูมิเฟสเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ก็ได้ เพราะเราสามารถถือได้ว่าเหล็กคาร์ไบด์เป็นองค์ประกอบหนึ่งของระบบได้ แต่เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจะยังคงแสดงปริมาณ %C ในแผนภูมิแทนที่จะแสดงเป็น %Fe₃C หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อ %C=6.7% โดยน้ำหนักก็คือ 100%Fe₃C นั่นเอง

คาร์บอนเป็นสารเจือแบบแทรกที่ในเหล็ก ทำให้เกิดเป็นสารละลายของแข็งเหล็ก-คาร์บอนของเฟสเฟอร์ไรต์ เดลตา เฟอร์ไรต์ และออสเตนไนต์ดังรูปที่ 2.40 คาร์บอนสามารถละลายได้น้อยในเฟอร์ไรต์จึงจะเห็นได้จากขีดจำกัดการละลายสูงสุดเท่ากับ 0.022% โดยน้ำหนักที่ 727°C (1341°F) ความสามารถในการละลายที่จำกัดนี้สามารถอธิบายจากรูปร่างและขนาดของตำแหน่งแทรกที่ในโครงสร้าง BCC ซึ่งทำให้คาร์บอนละลายอยู่ได้ยาก ถึงแม้ความเข้มข้นของคาร์บอนต่ำ แต่ก็มีความสำคัญต่อสมบัติทางกล เฟสของสารละลายเหล็ก-คาร์บอนเฟสนี้จะค่อนข้างนิ่มและสามารถทำให้เป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมิต่ำกว่า 768 °C (1414 °F) และมีความหนาแน่น 7.88 g/cm³ รูปที่ 2.41 (a) แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเฟอร์ไรต์



รูปที่ 2.40 แผนภูมิสมดุล Fe-Fe₃C (เหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์) [39]



รูปที่ 2.41 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาค (a) เฟอร์ไรต์แอลฟา กำลังขยาย 90 เท่า (b) ออสเทนไนต์ กำลังขยาย 325 เท่า

ออสเทนไนต์หรือเฟส γ ของเหล็กเมื่อมีคาร์บอนผสมอยู่ จะไม่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 727°C (2097°F) ดังแสดงในรูปที่ 2.40 ชีคจำกัดการละลายสูงสุดของคาร์บอนใน γ เท่ากับ 2.14% ที่อุณหภูมิ 1147°C (2097°F) ความสามารถในการละลายนี้มากกว่าของในเฟอร์ไรต์ BCC เป็น 100 เท่า เนื่องจากตำแหน่งที่จะแทรกที่สำหรับใน FCC มีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้น ความเครียดที่เกิดขึ้นในอะตอมของเหล็กรอบ ๆ ตำแหน่งแทรกที่ใน FCC จะต่ำกว่าใน BCC มาก จากการอธิบายจะเห็นว่า การแปลงเฟสของออสเทนไนต์มีความสำคัญมากต่อกรรมวิธีความร้อนดังจะได้ อธิบายต่อไป และออสเทนไนต์นี้ไม่เป็นแม่เหล็ก รูปที่ 2.41 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเฟส ออสเทนไนต์

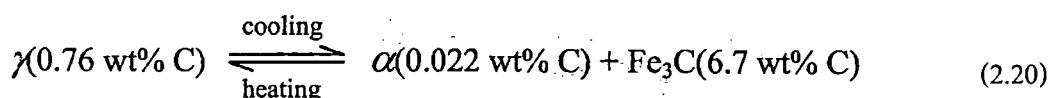
เฟอร์ไรต์เซลล์ตา δ มีลักษณะเหมือนเฟอร์ไรต์ α ยกเว้นว่าอุณหภูมิที่เสถียรต่างกัน กล่าวคือ เฟอร์ไรต์เซลล์ตาจะเสถียรที่อุณหภูมิสูงและไม่มีความสำคัญทางเทคนิคมากนักจึงจะไม่ อธิบายถึงในที่นี้ ซีเมนไตต์ เกิดขึ้นเมื่อปริมาณการละลายของคาร์บอนมากกว่าขีดจำกัดการละลาย ของเฟอร์ไรต์แอลฟา ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 727°C (1341°F) ดังรูปที่ 2.40 นอกจากนี้ Fe_3C ยังเกิดขึ้น ผสมกับ γ ที่ช่วงอุณหภูมิ 727 ถึง 1147°C ($1341-2097^{\circ}\text{F}$) ซีเมนไตต์มีคุณสมบัติทางกลคือ ค่อนข้างแข็ง เปราะ ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของเหล็กได้ แต่ถ้าพิจารณาอย่างละเอียด ซีเมน ไตต์นั้นจัดเป็นสารกึ่งเสถียร กล่าวคือ ถ้าอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ซีเมนไตต์จะคงอยู่ได้ แต่เมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้น เช่น ประมาณ $600-700^{\circ}\text{C}$ ($1200-1300^{\circ}\text{F}$) แล้วทิ้งไว้หลายปี ซีเมนไตต์ที่เป็นสารกึ่งเสถียรนี้ จะเปลี่ยนเป็นเหล็ก α และคาร์บอนในสภาพแกรไฟต์ ดังนั้น แผนภูมิในรูปที่ 2.40 จึงไม่อาจ กล่าวได้ว่าเป็นแผนภูมิสมดุลเฟสจริงเนื่องจากซีเมนไตต์เป็นสารประกอบกึ่งเสถียร อย่างไรก็ตาม อัตราการสลายตัวของ Fe_3C ต่ำมาก ทำให้คาร์บอนทั้งหมดจะอยู่ในสภาพ Fe_3C ไม่ใช่ในสภาพ แกรไฟต์ เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติแล้ว แผนภูมิเฟสของเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์จึงสามารถใช้อ้างอิง

ได้ การเติมธาตุ เช่น Si ลงในเหล็กหล่อ จะทำให้การสลายตัวของซีเมนไตต์กลายเป็นแกรไฟต์เร็วขึ้น

ในบริเวณที่มี 2 เฟสดังแสดงในรูปที่ 2.40 จะเห็นว่ามีการเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่ 4.3% C และอุณหภูมิ 1147°C (2097°F) ปฏิกิริยายูเทคติกนี้คือ



ของเหลวจะแข็งตัวเป็นออสเทนไนต์และซีเมนไตต์ และเมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องก็จะมี การเปลี่ยนแปลงเฟสอีกที่จุดตายตัวอีกจุดหนึ่ง คือ ยูเทคตอยด์ที่ผสม 0.76% C โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 727°C (1341°F) ปฏิกิริยายูเทคตอยด์นี้แสดงโดย



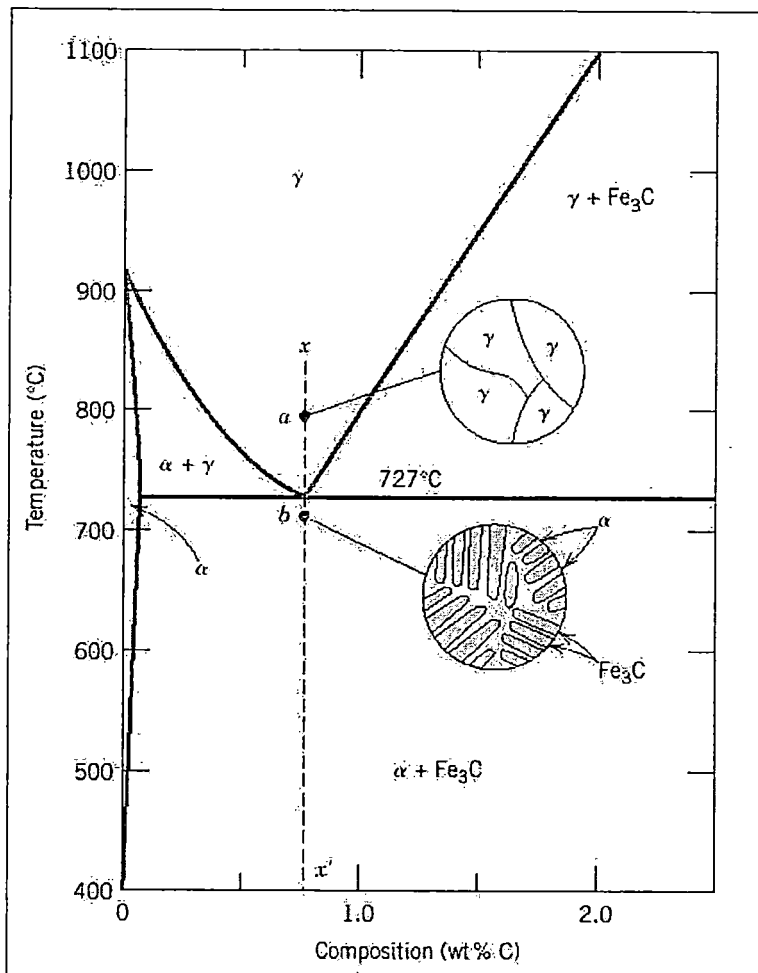
กล่าวคือ ระหว่างการเย็นตัวลง เฟสของแข็ง γ จะเปลี่ยนเป็นเหล็ก α และซีเมนไตต์ การเปลี่ยนเฟสจากปฏิกิริยายูเทคตอยด์ที่แสดงในสมการ 2.20 เป็นสมการสำคัญและเป็นหลักในกรรมวิธีทางความร้อน โลหะผสมในกลุ่มเหล็กจะมีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและมีคาร์บอน รวมทั้งธาตุอื่น ๆ เป็นธาตุผสม ในการแบ่งชนิดของโลหะผสมในกลุ่มเหล็ก จะแบ่งโดยปริมาณคาร์บอนเป็น 3 ชนิด คือ เหล็ก (iron) เหล็กกล้า (steel) และเหล็กหล่อ (cast iron) ในทางการค้าเหล็ก หรือเหล็กบริสุทธิ์จะกำหนดให้ปริมาณคาร์บอนได้สูงสุด 0.008% และจากแผนภูมิเฟสจะเห็นว่าเหล็กชนิดนี้มีเพียงเฟส α เท่านั้นที่อุณหภูมิห้อง ถ้าหากมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.008% แต่น้อยกว่า 2.14% จะจัดเป็นเหล็กกล้า เหล็กกล้าเกือบทั้งหมดมีโครงสร้างประกอบด้วย α และ Fe_3C โลหะผสมที่มีส่วนผสมช่วงนี้เมื่อเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องจะต้องผ่านส่วนของเฟส γ โครงสร้างที่ได้จะอธิบายต่อไป แม้ว่าเหล็กกล้าจะมี %C มากที่สุดได้ถึง 2.14% แต่ในทางปฏิบัติความเข้มข้นของคาร์บอนมักจะไม่เกิน 1% เหล็กหล่อซึ่งจัดเป็นโลหะผสมในกลุ่มเหล็กจะมีคาร์บอน 2.14-6.7% C อย่งไรก็ตาม ในทางการค้า เหล็กหล่อจะมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 4.5%

2.8.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน

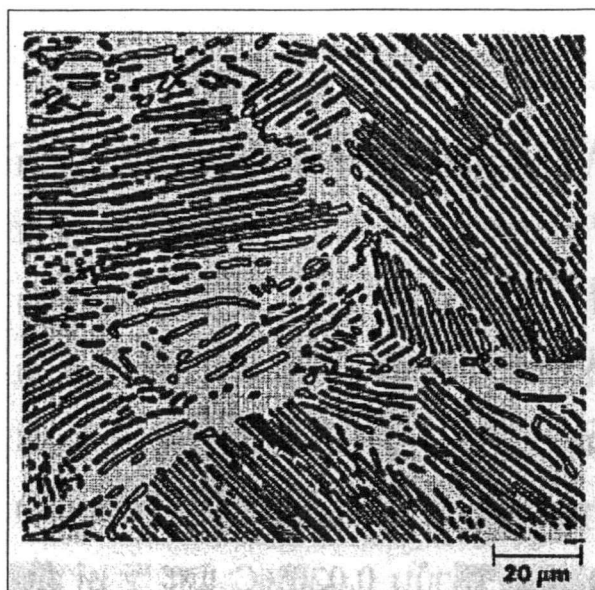
ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างจุลภาคแบบต่าง ๆ ในเหล็กกล้า รวมถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างกับแผนภูมิเฟสเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะขึ้นกับปริมาณคาร์บอน

และกรรมวิธีความร้อน การอธิบายต่อไปจะถือว่าการเย็นตัวเกิดขึ้นช้ามาก การแปลงเฟสจึงเป็นไปตามแผนภูมิเฟสเหล็กคาร์ไบด์

การเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นผ่านบริเวณของ γ เข้าสู่บริเวณของ $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ นั้นค่อนข้างซับซ้อน และเหมือนกับระบบยูเทกติก เช่น เมื่อพิจารณาโลหะผสมที่มีส่วนผสมยูเทกตอยด์ (0.76%C โดยน้ำหนัก) เมื่อเย็นตัวลงจากบริเวณที่เป็น γ เช่น อุณหภูมิ 800°C หรือจุด α ในรูปที่ 2.42 และเย็นตัวลงตามเส้นแนวตั้ง xx' ในตอนเริ่มต้นโลหะผสมทั้งหมดประกอบด้วย γ เท่านั้น โดยมีส่วนผสม 0.76%C ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.42 เมื่อโลหะผสมเย็นลงจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิยูเทกตอยด์ (727°C) เมื่อเย็นตัวลงผ่านอุณหภูมิยูเทกตอยด์ถึงจุด b ออสเตนไนต์จะเปลี่ยนเฟสตามสมการ 2.20

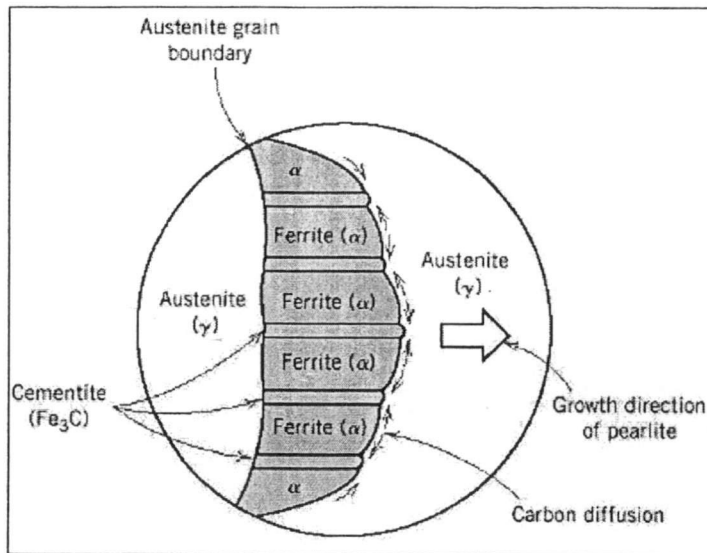


รูปที่ 2.42 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนส่วนผสมยูเทกตอยด์ (0.76%C) ที่อุณหภูมิเหนือและต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทกตอยด์



รูปที่ 2.43 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ประกอบด้วยชั้นแอลฟาเฟอร์ไรต์สีขาวและชั้น Fe_3C สีดำ กำลังขยาย 500 เท่า

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ที่เย็นตัวอย่างช้า ๆ ผ่านอุณหภูมิยูเทคตอยด์จะประกอบด้วยชั้นสลับของ 2 เฟส คือ α และ Fe_3C ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันระหว่างการแปลงเฟส ในกรณีนี้ความหนาของเฟสทั้งสองที่เกิดขึ้นจะมีอัตราส่วน 8:1 โครงสร้างจุลภาคแบบนี้(จุดb) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.42 ด้วย เรียกว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไลต์(pearlite) เพราะมีลักษณะเหมือนเปลือกหอยมุก (pearl) เมื่อมองด้วยกำลังขยายต่ำ รูปที่ 2.43 แสดงโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไลต์ในเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ เฟอร์ไรต์จะอยู่ในเกรน (grain) หรือกลุ่ม (colonies) ขึ้นที่ปรากฏจะเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละเกรนหรือแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะแตกต่างกันไปจากเกรนอื่น หรือกลุ่มอื่น ชั้นหนาสีขาวหรือสีอ่อนในรูป คือ เฟส α ส่วนซีเมนไตต์ Fe_3C จะเป็นชั้นสีดำบาง Fe_3C บางชั้นบางมากและอยู่ติดกับขอบของเฟส ทำให้ไม่สามารถแยกออกได้ ทำให้เห็นชั้นเหล่านี้เป็นสีดำที่กำลังขยายนี้ เฟอร์ไรต์ไลต์มีสมบัติทางกลอยู่ระหว่าง α ที่นุ่มและเหนียวกับซีเมนไตต์ที่แข็งและเปราะ



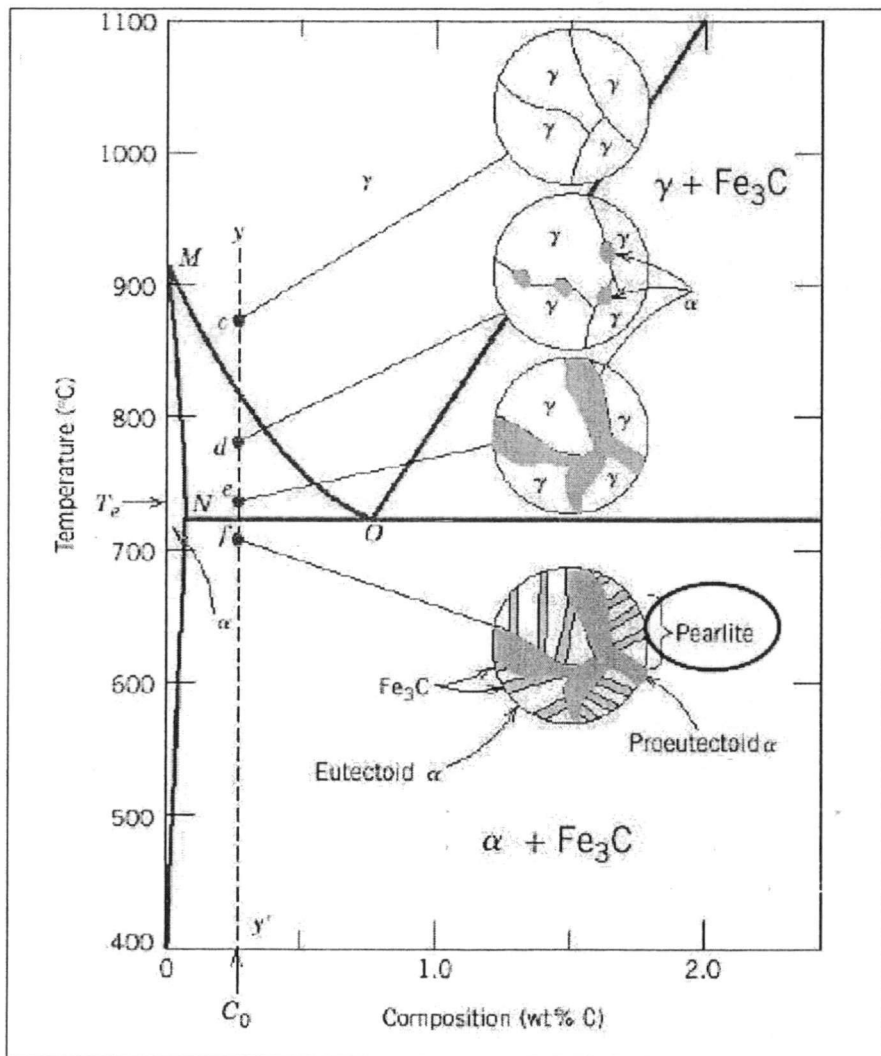
รูปที่ 2.44 รูปแสดงการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์จากออสเทนไนต์ ทิศทางการแพร่ของคาร์บอน แสดงดังลูกศรในรูป

ชั้นสลับของ α และ Fe_3C ในเพิร์ลไลต์เกิดจากปฏิกิริยาเหมือนกับยูเทคติก และเนื่องจากส่วนผสมของเฟสตั้งต้น (ในกรณีนี้คือ γ 0.76%C โดยน้ำหนัก) ต่างกับเฟสที่เกิดขึ้น (ในกรณีนี้คือ α 0.022%C และ Fe_3C 6.7%C) ดังนั้น การแปลงเฟสจึงต้องอาศัยการกระจายตัวใหม่ของคาร์บอนด้วยการแพร่ รูปที่ 2.44 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างด้วยปฏิกิริยายูเทคตอยด์ ทิศทางการแพร่ของคาร์บอนเป็นไปตามลูกศรที่แสดงในรูป คาร์บอนจะแพร่ออกจาก α ซึ่งมีคาร์บอนอยู่ 0.022% ไปสู่ชั้นของ Fe_3C ซึ่งมีคาร์บอนอยู่ 6.7% เพิร์ลไลต์จะเกิดขึ้นจากขอบเกรนและโตเข้าไปสู่ส่วนที่ยังคงเป็น γ อยู่ การที่เพิร์ลไลต์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ก็เนื่องเพราะต้องการระยะทางการแพร่ของคาร์บอนให้น้อยที่สุดนั่นเอง หลังจากนั้น เมื่อเย็นตัวลงหลังจากจุด b จะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างอย่างชัดเจน

2.8.3 โลหะผสมไฮโปยูเทคตอยด์

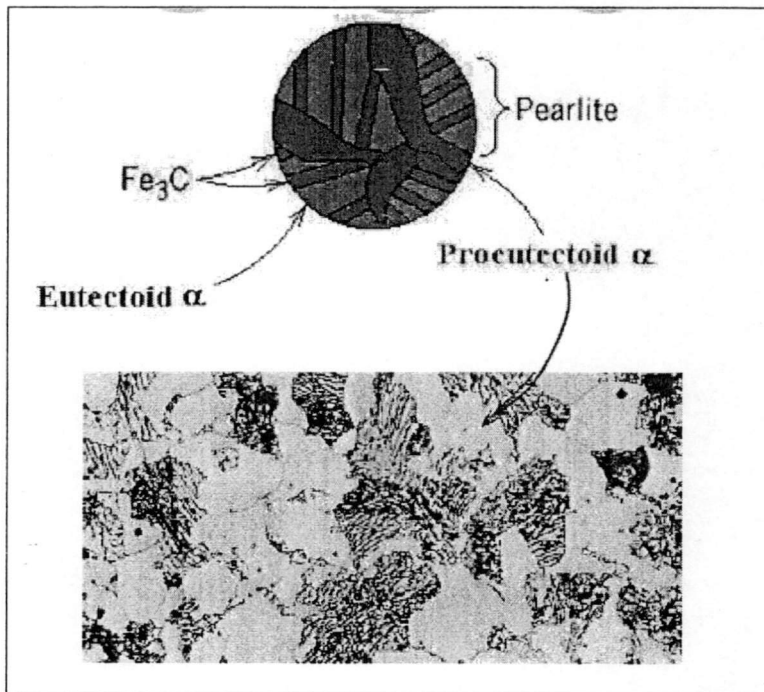
โครงสร้างจุลภาคที่ประกอบจากเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์มีแบบอื่น ๆ อีกนอกจากแบบยูเทคตอยด์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณีได้เหมือนระบบยูเทคติก พิจารณาสถผสม C₀ ซึ่งอยู่ทางซ้ายของยูเทคตอยด์ระหว่าง 0.022-0.76%C โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าโลหะผสมไฮโปยูเทคตอยด์ เมื่อโลหะผสมชนิดนี้เย็นตัวลงตามเส้นแนวตั้ง yy' ในรูปที่ 2.45 ที่จุด C อุณหภูมิ 875°C โครงสร้างทั้งหมดจะประกอบด้วยเกรนของ γ ดังรูป เมื่อเย็นตัวลงถึงจุด d ที่อุณหภูมิประมาณ 775°C ซึ่งอยู่ในบริเวณ $\alpha + \gamma$ จะปรากฏทั้งเฟส α และ γ สามารถหาได้จากการใช้ไทไลน์ ซึ่งจะได้ว่า ส่วนผสม α เท่ากับ 0.020%C และ γ เท่ากับ 0.4%C ตามลำดับ

เมื่อโลหะผสมเย็นตัวลงผ่านบริเวณ $\alpha + \gamma$ ส่วนผสมของเฟส α จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิ โดยเปลี่ยนไปตามเส้นแบ่งบริเวณ α กับบริเวณ $\alpha + \gamma$ หรือก็คือเส้น MN ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในขณะที่ส่วนผสมของ γ เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน คือจะเปลี่ยนตามเส้นแบ่งบริเวณของ $\alpha + \gamma$ กับบริเวณ γ หรือเส้น MO ตามอุณหภูมิที่ลดลง การเย็นตัวลงระหว่างจุด d และ e ซึ่งอยู่เหนืออุณหภูมิยูเทกตอยด์ และยังอยู่ในบริเวณของ $\alpha + \gamma$ จะมีผลให้อัตราส่วนของ α เพิ่มขึ้นและเฟส α จะโตขึ้นดังรูปแสดงโครงสร้างจุลภาคที่จุดนี้ส่วนผสมของ α และ γ สามารถหาได้จากการใช้ไทไลน์ที่อุณหภูมิ T_e ซึ่งจะได้ผลว่าเฟส α มีปริมาณคาร์บอนอยู่ 0.022% และเฟส γ มีส่วนผสมยูเทกตอยด์คือ 0.76%C

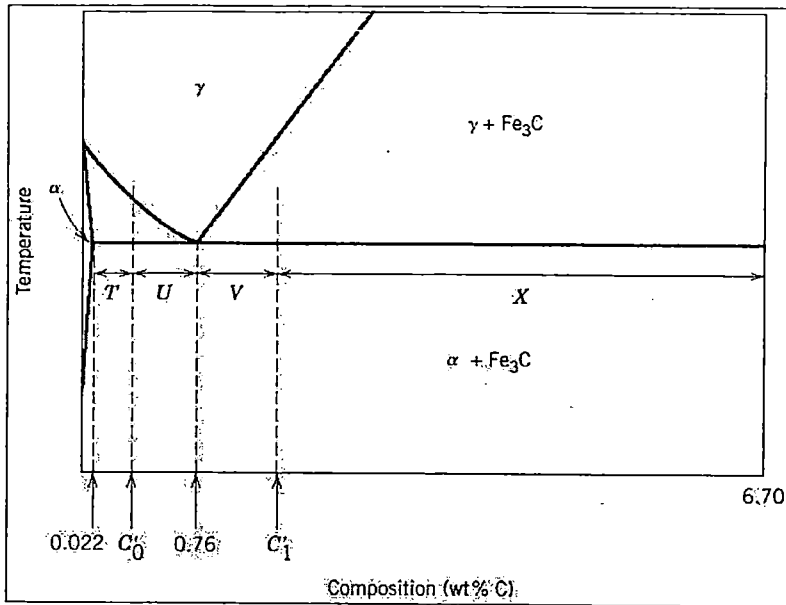


รูปที่ 2.45 รูปแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็กคาร์บอนแบบไฮโปยูเทกตอยด์ ส่วนผสม C_0 (มีคาร์บอนน้อยกว่า 0.76% โดยน้ำหนัก) เมื่อเย็นตัวลงจากเฟส ออสเทนไนต์ผ่านอุณหภูมิยูเทกตอยด์

เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่ายูเทกตอยด์ที่จุด f เฟส γ ทั้งหมดที่ยังคงเหลือที่อุณหภูมิ T_e (ซึ่งมีส่วนผสมยูเทกตอยด์) จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์ไลต์ตามสมการ 2.20 และขณะผ่านอุณหภูมิยูเทกตอยด์จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของเฟส α ที่เกิดก่อนจุด e โดยปกติ โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟสพื้นและกลุ่มของเฟอร์ไรต์ไลต์ โครงสร้างจุลภาคที่จุด f ดังแสดงในรูปเล็กในรูปที่ 2.45 เฟอไรต์จะมีอยู่ทั้งในเฟอร์ไรต์ไลต์ เรียกว่า ยูเทกตอยด์เฟอไรต์ (eutectoid ferrite) และในเฟสซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวลงผ่านบริเวณ $f + \gamma$ ที่อยู่เหนือ T_e เรียกว่าโปรยูเทกตอยด์เฟอไรต์ (proeutectoid ferrite ซึ่งหมายถึงเฟอไรต์ที่เกิดขึ้นก่อนยูเทกตอยด์) หรือเฟอไรต์ปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.46 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้า 0.38%C ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ไลต์และเฟอไรต์ปฐมภูมิ กำลังขยาย 635 เท่า



รูปที่ 2.47 ส่วนของแผนภูมิเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ที่ใช้ในการคำนวณอัตราส่วนของเฟสปฐมภูมิและเฟิร์ลไลต์ของเหล็กสำหรับส่วนผสมไฮโปยูเทคตอยด์ และไฮเปอร์ยูเทคตอยด์

สำหรับรูปที่ 2.46 เป็นโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 0.35% C ส่วนที่ขนาดใหญ่ คือ เฟอร์ไรต์ปฐมภูมิสำหรับเฟิร์ลไลต์ ความหนาของ α และ Fe_3C จะแตกต่างกันในแต่ละเกรน จะเห็นว่าเฟิร์ลไลต์บางเกรนจะเป็นสีเกือบดำเพราะความหนาของแต่ละชั้นค่อนข้างน้อยมาก ทำให้กำลังขยายที่ใช้ไม่เพียงพอที่จะแยกความเป็นชั้นได้ ในหน้าแรกของบทแสดงรูปถ่ายของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (0.44% C) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด จากโครงสร้างมีทั้งเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิและเฟิร์ลไลต์ จึงอาจกล่าวได้ว่า ส่วนประกอบจุลภาคมี 2 ส่วน คือ เฟอร์ไรต์ปฐมภูมิและเฟิร์ลไลต์ซึ่งจะปรากฏในโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนแบบไฮโปยูเทคตอยด์ที่เย็นตัวอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเทคตอยด์ อัตราส่วนของ α ปฐมภูมิต่อเฟิร์ลไลต์ สามารถใช้กฎของคานังคและไทไลน์ที่เชื่อมระหว่างขอบเขตของบริเวณ α กับ $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (ประมาณ 0.022% โดยน้ำหนัก) และส่วนผสมยูเทคตอยด์ ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาโลหะผสมที่มีส่วนผสม Co ในรูปที่ 2.47 อัตราส่วนของเฟิร์ลไลต์ W_P อาจหาได้โดย

$$W_P = \frac{T}{T + U} = \frac{C'_0 - 0.022}{0.76 - 0.022} = \frac{C'_0 - 0.022}{0.74} \quad (21)$$

และอัตราส่วนของ α ปฐมภูมิ ($W_{\alpha'}$) คำนวณได้จาก

$$W_p = \frac{T}{T + U} = \frac{0.76 - C'_0}{0.76 - 0.022} = \frac{0.76 - C'_0}{0.74} \quad (22)$$

สำหรับอัตราส่วนของ α ทั้งหมด (ในยูเทคตอยด์และเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ) และซีเมนไตต์ สามารถคำนวณได้จากกฎของคานังด์และไทไลน์ที่ลากผ่านบริเวณของ $\alpha + Fe_3C$ ก็คือ 0.022% ถึง 6.7%C

2.8.4 โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคตอยด์

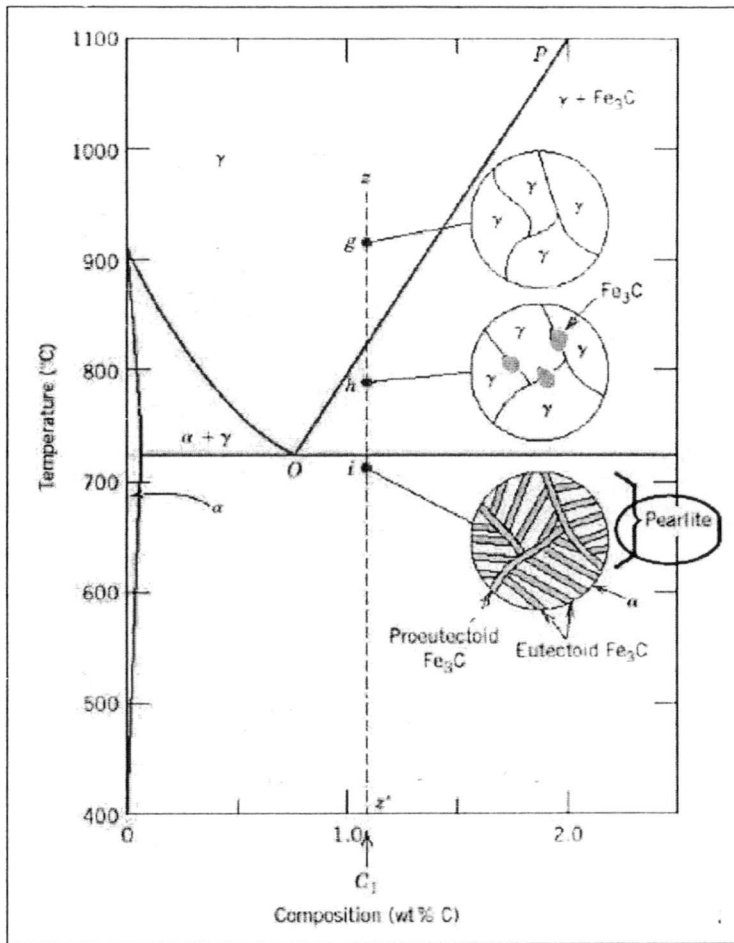
โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคตอยด์มีส่วนผสมตั้งแต่ 0.76-2.14%C และเย็นตัวลงจากบริเวณที่เป็น γ เฟสเดียวจะได้โครงสร้างของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ พิจารณาโลหะผสมส่วนผสม C1 ในรูปที่ 2.48 เมื่อเย็นตัวลงตามเส้น zz' ที่จุด g จะมีเพียงเฟส γ เท่านั้น ดังโครงสร้างที่วาดแสดงในรูป เมื่อเย็นลงตัวผ่านบริเวณ $\gamma + Fe_3C$ เช่นที่จุด h จะเริ่มเกิดเฟสซีเมนไตต์ที่ตามขอบเกรนของ γ เหมือนกับกรณีของ α ในรูปที่ 2.45 ที่จุด d ซีเมนไตต์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ซีเมนไตต์ปฐมภูมิ ซึ่งเกิดก่อนปฏิกิริยายูเทคตอยด์ และซีเมนไตต์ที่เกิดขึ้นจะมีส่วนผสมมากที่คือ 6.7%C ไม่ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม แต่ส่วนผสมของ γ จะเปลี่ยนแปลงตามเส้น PO จนถึงยูเทคตอยด์ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าจุดยูเทคตอยด์ (จุดที่ i) γ ที่เหลือจะมีส่วนผสมเป็นยูเทคตอยด์พอดีก็จะเปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรต์ ดังนั้น โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จึงประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ปฐมภูมิ และจัดเป็นส่วนประกอบจุลภาคด้วย (รูปที่ 2.48) ในรูปที่ 2.49 ของเหล็กกล้า 1.4%C โดยน้ำหนัก แสดงซีเมนไตต์ปฐมภูมิตีขาวเหมือนกับเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิในรูปที่ 2.46 จึงทำให้การแยกเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์และไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จากโครงสร้างจุลภาคค่อนข้างยาก

อัตราส่วนของประกอบจุลภาคเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ปฐมภูมิของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีเหมือนกับไฮโปยูเทคตอยด์ คือ ลากไทไลน์จาก 0.76 ถึง 6.7%C ดังนั้น โลหะผสมที่มีส่วนผสม C_i ในรูปที่ 2.47 อัตราส่วนของเฟอร์ไรต์ W_p และอัตราส่วนของซีเมนไตต์ปฐมภูมิ W_{Fe_3C} สามารถหาได้จากกฎของคานังด์

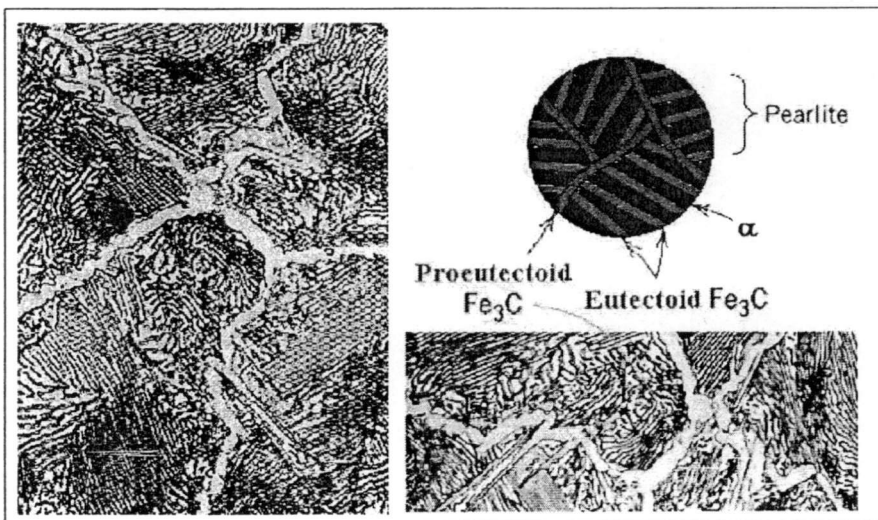
$$W_p = \frac{X}{V + X} = \frac{6.7 - C'_i}{6.7 - 0.76} = \frac{6.7 - C'_i}{5.94} \quad (23)$$

และ

$$W_{Fe_3C} = \frac{V}{V + X} = \frac{C'_i - 0.76}{6.7 - 0.76} = \frac{C'_i - 0.76}{5.94} \quad (24)$$



รูปที่ 2.48 รูปแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็กคาร์บอนแบบไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ส่วนผสม C_1 (มีคาร์บอน 0.76-2.14% โดยน้ำหนัก) เมื่อเย็นตัวลงจากเฟสออสเทนไนต์ ผ่านอุณหภูมิยูเทคตอยด์



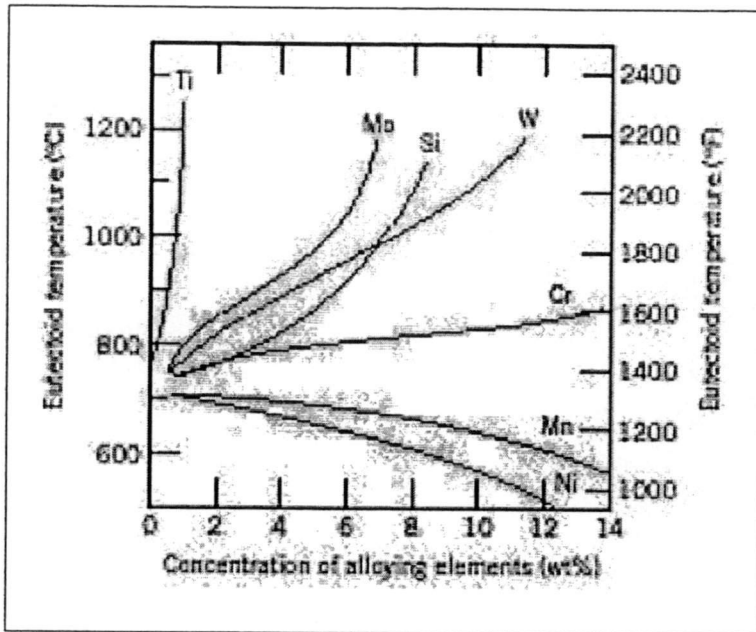
รูปที่ 2.49 รูปแสดงโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้า 1.4%C ประกอบด้วยเฟิร์ลไลต์และตะขำซีเมนไนต์ ปฐมภูมิกำลังขยาย 1000 เท่า

2.8.4 การเย็นตัวแบบไม่สมดุล (Nonequilibrium cooling)

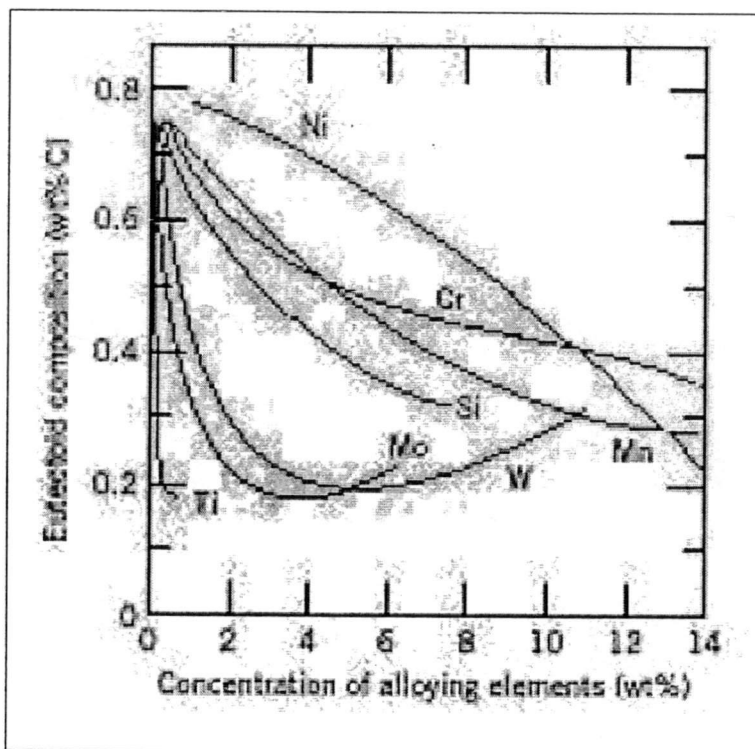
ในการอธิบายต่อไปเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนจะตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า การเย็นตัวเป็นไปตามสมดุลแบบกึ่งเสถียร (metastable equilibrium-คำว่าสมดุลแบบกึ่งเสถียรนี้ถูกใช้ในที่นี่ เนื่องจากเฟส Fe_3C เป็นสารประกอบกึ่งเสถียร) ดังนั้นหมายความว่าอุณหภูมิใด ๆ จะต้องมีเวลาเพียงพอให้เกิดการเปลี่ยนส่วนผสมของแต่ละเฟส และอัตราส่วนของแต่ละเฟสให้เป็นไปตามแผนภูมิเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์โดยส่วนมากแล้ว อัตราการเย็นตัวดังกล่าวช้าเกินกว่าที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ ในทางกลับกัน หลายๆ กรณีเราก็ต้องการการเย็นตัวแบบไม่สมดุลมีผลที่สำคัญที่ใช้ในทางปฏิบัติคือ (1) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิหรือขอบเขตของแต่ละเฟสที่ไม่เป็นไปตามแผนภูมิเฟส (2) ที่อุณหภูมิห้อง เฟสที่เกิดจากการเย็นตัวแบบไม่สมดุลจะไม่ปรากฏในแผนภูมิเฟส

2.8.4 ผลของธาตุผสมอื่น ๆ

แผนภูมิเฟสเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่อมีการเติมธาตุผสมอื่น ๆ (เช่น Cr Ni Ti และอื่น ๆ) ดังรูปที่ 2.40 ขอบเขตของแต่ละบริเวณรวมทั้งรูปร่างของแผนภูมิเฟสเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและปริมาณของธาตุผสม สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณคาร์บอน ณ จุดยูเทกตอยด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.50 และ 2.51 รูปที่ 2.50 แสดงถึงผลของธาตุผสมต่ออุณหภูมิยูเทกตอยด์ ในขณะที่รูปที่ 2.51 แสดงผลของธาตุผสมต่อปริมาณคาร์บอน ณ จุดยูเทกตอยด์ แสดงว่าการเติมธาตุผสมไม่ได้มีผลต่อจุดยูเทกตอยด์เท่านั้น แต่ยังมีผลถึงอัตราส่วนของเฟอร์ไรต์และเฟสปฐมภูมิด้วย อย่างไรก็ตาม การเติมธาตุผสมลงในเหล็กกล้าเกิดจากเหตุผลหลาย ๆ อย่าง เช่น ปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อน หรือเพื่อเพิ่มสมบัติด้านกรรมวิธีทางความร้อน [39, 40, 41]



รูปที่ 2.50 อุณหภูมิยูเทคตอยด์ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณธาตุผสมในเหล็กกล้า



รูปที่ 2.51 ส่วนผสมยูเทคตอยด์ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณธาตุผสมในเหล็กกล้า

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการตัดเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 (1.2510) ค่าความแข็ง 59 HRC เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Die Steel) ซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่จะนำมาใช้ในการผลิต ลักษณะเด่นคือ มีความทนต่อการสึกหรอดี มีการเปลี่ยนรูปร่างน้อย และรักษาคมตัดได้ดี รวมทั้งมีความเหนียว และความหนาแน่นสูง ความแข็งสูง เมื่อผ่านการชุบแข็ง ชุบแข็งง่าย สามารถชุบ Nitriding ได้ ทนต่อการเสียดสีได้ดี ทนต่อแรงกดอัดได้ดี และมีความเหนียว ความแกร่งพอสมควร คุณภาพสูง ทนทานการเสียดสีสูง เหมาะกับงานทำแม่พิมพ์กรรไกร แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ทำลูกกรีดเกลียว ลูกกรีดแป๊ป ไบมีดตัดเหล็กแผ่นบาง ไบมีดตัดกระดาษ ดอกตัดปั๊ม คัทเตอร์กัดไม้ คัทเตอร์กัดเฟือง เหมาะกับงานทำแม่พิมพ์กรรไกรที่ต้องการความแม่นยำสูง

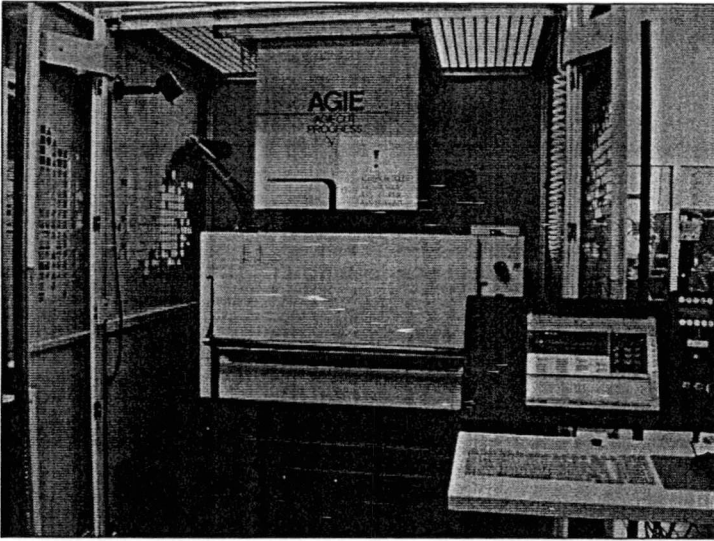
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460

ส่วนผสมทางเคมี (%)					
C	Cr	W	Si	Mn	V
0.95	0.55	0.55	0.25	1.10	0.10

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีขนาด (กว้าง×ยาว×หนา) 95×150×20 มิลลิเมตร และทำการเจียรระโนผิวเพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่มีความเรียบ

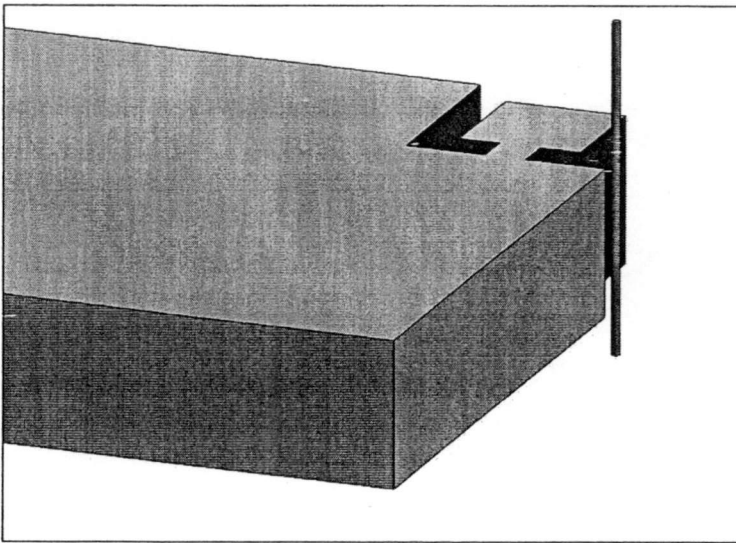
3.2 การตัดชิ้นงาน

ใช้เครื่องจักรในการทดลอง ผลิตโดย AGIE CHARMILLES รุ่น Agie Cut Progress V2 ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่อง CNC Wire Cut EDM

เส้นลวดที่ใช้ในการตัดชิ้นงานเป็นลวด Cobra Cut มีส่วนผสมของทองแดง (Cu) และเคลือบด้วยสังกะสี (Zn) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.150 มิลลิเมตร และทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาด (กว้าง×ยาว×หนา) 5×5×20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 รูปแบบของการตัดชิ้นงานทดลอง

3.3 การแบ่งส่วนการวิจัย

3.3.1 การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการตัดชิ้นงานในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 (Trim cut 2) โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองอยู่ 2 ปัจจัย คือ เวลาในการสปาร์กของเส้นลวดกับชิ้นงาน (Pulse on Time: Ton) และ แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ก (Discharge power: P) โดยอาศัยวิธีการออกแบบการทดลอง Full Factorial Design (3^k)

3.3.2 การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการตัดชิ้นงานในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 (Trim cut 3) โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองอยู่ 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (Cutting Speed: CS) กระแสที่ใช้ในการตัด (Discharge current: IP) และ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Path corrections: Offset) โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM)

3.4 การกำหนดปัจจัย ระดับของปัจจัย และ ค่าตอบสนองที่เลือกใช้ในการวิจัย

3.4.1 การกำหนดปัจจัย

3.4.1.1 กระแสที่ใช้ในการตัด (IP) มีค่า 1, 2 และ 3 แอมแปร์ (A)

3.4.1.2 ความเร็วในการตัดชิ้นงานมีค่าอยู่ในช่วง 3.5, 4.5 และ 5.5 mm/min.

3.4.1.3 เวลาการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (Ton) อยู่ในช่วง 18, 19 และ 20 μ s.

3.4.1.4 แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (P) มีค่า 53, 55 และ 57 โวลต์ (V)

3.4.1.5 ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset) มีค่า 770, 780 และ 790 μ m.

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

กระบวนการตัด	ปัจจัย				
	Cutting Speed (mm/min)	IP (A)	Ton (μ s.)	P (V.)	Offset (μ m.)
Main cut	2.5	11	32	60	1440
Trim1 cut	3.5	5	20	40	990
Trim2 cut	8.5	2	18, 19 และ 20	53, 55 และ 57	900
Trim3 cut	3.5, 4.5 และ 5.5	1, 2 และ 3	-	-	770, 780 และ 790

3.4.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษา

3.4.2.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษาการตัดชิ้นงาน ในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 (Trim cut 2) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการตัด โดยระดับของปัจจัยที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงระดับของปัจจัยในการตัดละเอียดครั้งที่ 2 (Trim cut 2)

ปัจจัย	ระดับ/รหัส			หน่วย
	1/-1	2/0	3/+1	
1. เวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (Ton)	18	19	20	μ s
2. แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (P)	53	55	57	V

3.4.2.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษาการตัดชิ้นงาน ในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 (Trim cut 3) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการตัด โดยระดับของปัจจัยที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงระดับของปัจจัยในการตัดละเอียดครั้งที่ 3 (Trim cut 3)

ปัจจัย	ระดับ/รหัส			หน่วย
	1/-1	2/0	3/+1	
1. ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (CS)	3.5	4.5	5.5	mm/min.
2. กระแสที่ใช้ในการตัด (IP)	1	2	3	A.
3. ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset)	770	780	790	μ m.

3.4.2 ค่าตอบสนองที่เลือกใช้

ค่าตอบสนองหรือผลของการศึกษาที่เลือกใช้นี้ เนื่องจากการตัดชิ้นงานที่ต้องการค่าความละเอียดผิวของชิ้นงานที่สูง และการควบคุมขนาดของชิ้นงาน ให้ได้ขนาดตามแบบที่กำหนด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้กำหนดค่าตอบสนองหรือผลของการศึกษาดังนี้

3.4.2.1 ค่าความหยาบของผิวชิ้นงาน (Ra) ในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 (Trim cut 2) เท่ากับ $1.00 \mu\text{m} \pm 0.050 \mu\text{m}$ หรือเลือกตัวแปรการตัดที่ให้ค่าความหยาบของผิวที่น้อยที่สุด และขนาดของชิ้นงาน กว้าง×ยาว เท่ากับ 5.010×5.010 มิลลิเมตร ± 0.002 มิลลิเมตร

3.4.2.2 ค่าความหยาบของผิวชิ้นงาน (Ra) ในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 (Trim cut 3) เท่ากับ $0.30 \mu\text{m} \pm 0.030 \mu\text{m}$ หรือเลือกตัวแปรการตัดที่ให้ค่าความหยาบของผิวที่น้อยที่สุด และขนาดของชิ้นงาน กว้าง×ยาว เท่ากับ 5.000×5.000 มิลลิเมตร ± 0.002 มิลลิเมตร

3.5 การออกแบบการทดลอง

3.5.1 การออกแบบการทดลองของการตัดชิ้นงานในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 (Trim cut 2) โดยในการศึกษานี้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล แบบ 3^k เมื่อ k คือ

จำนวนตัวแปรป้อนเข้าหรือในการทดลองนี้ คือ ตัวแปรการตัด ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 2 ตัวแปรด้วยกันคือ ระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน Pulse on Time (Ton) และแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค Power of discharge (P) ซึ่งตัวแปรป้อนเข้าและระดับของตัวแปรป้อนเข้าที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงในตารางที่ 3.3 ส่วนลักษณะเฉพาะของการตัดที่ศึกษาได้แก่ ความหยาบผิว และ ขนาดของชิ้นงาน ซึ่งความหยาบผิวของชิ้นงานต้องการให้น้อยที่สุดและขนาดของชิ้นงานต้องการให้ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด ในการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ที่มีตัวแปรในการทดลอง 2 ตัวแปร ซึ่งแต่ละตัวแปร มี 3 ระดับการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และได้กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 3 ครั้งสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้นจำนวนการทดลองในการศึกษานี้จะมีจำนวนเท่ากับ 27 การทดลอง ดังแสดงการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงการออกแบบตารางการทดลองเบื้องต้นของการตัดละเอียดครั้งที่ 2

(Trim cut 2)

Std. Order	Run Order	Ton	P	Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
				Ra	Dim.	Ra	Dim.	Ra	Dim.
				(μm)	(mm.)	(μm)	(mm.)	(μm)	(mm.)
9	1	1	1						
1	2	-1	-1						
3	3	-1	1						
7	4	1	-1						
6	5	0	1						
8	6	1	0						
4	7	0	-1						
5	8	0	0						
2	9	-1	0						

3.5.2 การออกแบบการทดลองของการตัดชิ้นงานในกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 (Trim cut 3) โดยในการศึกษานี้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) โดยการใช้ตัวแบบการทดลองของ Box-Behnken Design ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (CS) กระแสที่ใช้ในการตัด (IP) และ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset) ซึ่งตัวแปรป้อนเข้าและระดับของตัวแปรป้อนเข้าที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงในตารางที่ 3.4 ส่วนลักษณะเฉพาะของการตัดที่ศึกษาได้แก่ ความหยาบผิว และ ขนาดของชิ้นงาน ซึ่งความหยาบผิว

ของชิ้นงานต้องการให้น้อยที่สุดและขนาดของชิ้นงานต้องการให้ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด ในการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ ที่มีตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปร ซึ่งแต่ละตัวแปรมี 3 ระดับการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และได้กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 3 ครั้งสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้นจำนวนการทดลองในการศึกษานี้จะมีจำนวนเท่ากับ 45 การทดลอง ดังแสดงการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงการออกแบบตารางการทดลองเบื้องต้นของการตัดละเอียดครั้งที่ 3

(Trim cut 3)

Std. Order	Run Order	CS	IP	Offset	Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
					Ra (μm)	Dim. (mm)	Ra (μm)	Dim. (mm)	Ra (μm)	Dim. (mm)
3	1	-1	1	0						
1	2	-1	-1	0						
10	3	0	1	-1						
8	4	1	0	1						
6	5	1	0	-1						
12	6	0	1	1						
9	7	0	-1	-1						
7	8	-1	0	1						
14	9	0	0	0						
13	10	0	0	0						
4	11	1	1	0						
15	12	0	0	0						
2	13	1	-1	0						
5	14	-1	0	-1						
11	15	0	-1	1						

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงข้อมูลผลการทดลอง (จากตารางที่ 3.5) ของการตัดละเอียดครั้งที่ 2
(Trim cut 2)

Std. Order	Run Order	Ton	P	Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
				Ra	Dim.	Ra	Dim.	Ra	Dim.
				(μm)	(mm)	(μm)	(mm)	(μm)	(mm)
9	1	20	57	5.001	5.001	5.001	5.001	5.001	5.001
1	2	18	53						
3	3	18	57						
7	4	20	53						
6	5	19	57						
8	6	20	55						
4	7	19	53						
5	8	19	55						
2	9	18	55						

ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงข้อมูลผลการทดลอง (จากตารางที่ 3.6) ของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 (Trim
cut 3)

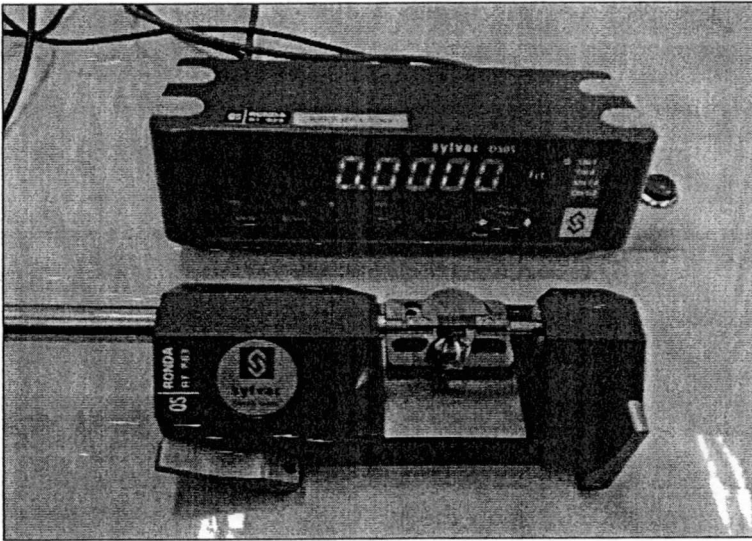
Std. Order	Run Order	CS	IP	Offset	Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
					Ra	Dim.	Ra	Dim.	Ra	Dim.
					(μm)	(mm)	(μm)	(mm)	(μm)	(mm)
3	1	3.5	3	780						
1	2	3.5	1	780						
10	3	4.5	3	770						
8	4	5.5	2	790						
6	5	5.5	2	770						
12	6	4.5	3	790						
9	7	4.5	1	770						
7	8	3.5	2	790						
14	9	4.5	2	780						
13	10	4.5	2	780						
4	11	5.5	3	780						
15	12	4.5	2	780						

ตารางที่ 3.8 (ต่อ) ตารางแสดงข้อมูลการทดลอง (จากตารางที่ 3.6) ของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 (Trim cut 3)

Std.	Run	CS	IP	Offset	Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
					Ra	Dim.	Ra	Dim.	Ra	Dim.
Order	Order				(μm)	(mm)	(μm)	(mm)	(μm)	(mm)
2	13	5.5	1	780						
5	14	3.5	2	770						
11	15	4.5	1	790						

3.5 การวัดขนาดของชิ้นงาน

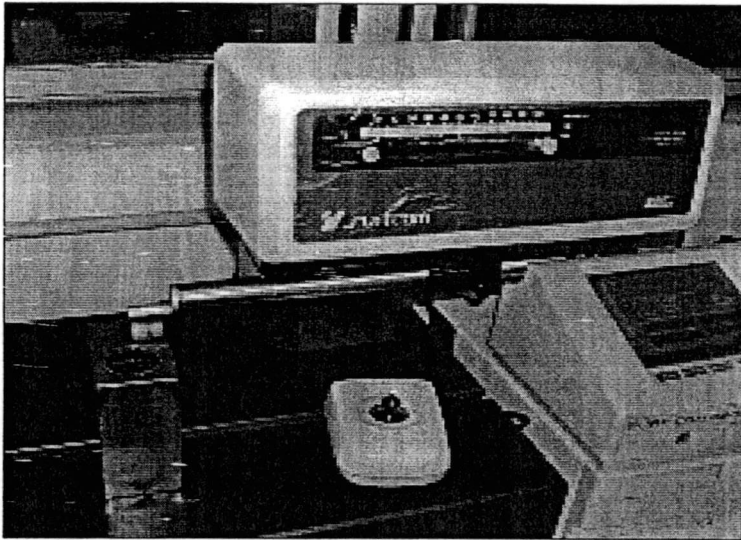
โดยใช้ ไมโครมิเตอร์วัดขนาดชิ้นงาน แบบดิจิตอล ของ Sylvac รุ่น D505 มีหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร และสามารถปรับทศนิยมการวัดได้ 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดขนาดชิ้นงาน

3.6 การวัดความหยาบผิว Surface Roughness (Ra)

หลังจากตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขทั้งหมดแล้ว นำชิ้นงานไปวัดค่า Surface Roughness (Ra) โดยใช้เครื่อง SURFCOM 480A ของ TOKYO SEIMITSU โดยทำการวัดค่า (Ra) ที่ตำแหน่งผิวของชิ้นงานตามแนวการตัด โดยใช้ Stroke เท่ากับ 2 mm ความเร็วในการวัดเท่ากับ 0.3 mm/s และ Cut-off Length เท่ากับ 0.80 mm. แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหยาบผิว

3.7 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคมีจุดมุ่งหมายเพื่อสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณผิวชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเครื่อง Wire EDM และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการปรับเปลี่ยนระดับปัจจัยในการทดลองซึ่งมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของวัสดุชิ้นงาน ตลอดจนสังเกตถึงจุดบกพร่องต่างๆของวัสดุชิ้นงาน ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายมากๆ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.7.1 นำชิ้นงานมาทำการตัดมุมเอียง 20 องศา ด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง ดังรูปที่ 3.4 เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เนื่องจากระนาบที่เอียง 20 องศา จะขยายให้ชั้นบางมีความหนาเพิ่มขึ้นถึง 2.92 เท่า และนำตัวอย่างที่ผ่านการตัด ดังรูปที่ 3.5 มาทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ผสมกับน้ำ (H_2O) ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร และทำความสะอาดในเอทานอล (Ethanol) โดยปล่อยให้แห้งในอากาศเพื่อให้มีพื้นที่ในการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคมากขึ้น ซึ่งจำนวนตัวอย่างชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบ โครงสร้างระดับจุลภาค มีดังนี้

3.7.1.1 วัสดุชิ้นงาน (Material) ก่อนตัดด้วยเครื่อง Wire EDM 1 ชิ้น

3.7.1.2 วัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดหยาบ ด้วยเครื่อง Wire EDM 1 ชิ้น

3.7.1.3 วัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดละเอียดครั้งที่หนึ่ง (Trim cut 1) ด้วยเครื่อง Wire EDM 1 ชิ้น

3.7.1.4 วัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดละเอียดครั้งที่สอง (Trim cut 2) ด้วยเครื่อง Wire EDM 1 ชิ้น

3.7.1.5 วัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดละเอียดครั้งที่สาม (Trim cut 3) ด้วยเครื่อง Wire EDM 8 ชั้น

3.7.2 ทำตัวเรือนขึ้นทดสอบ โดยอัดด้วยเรซินแบบ Cold mounting ดังรูปที่ 3.6

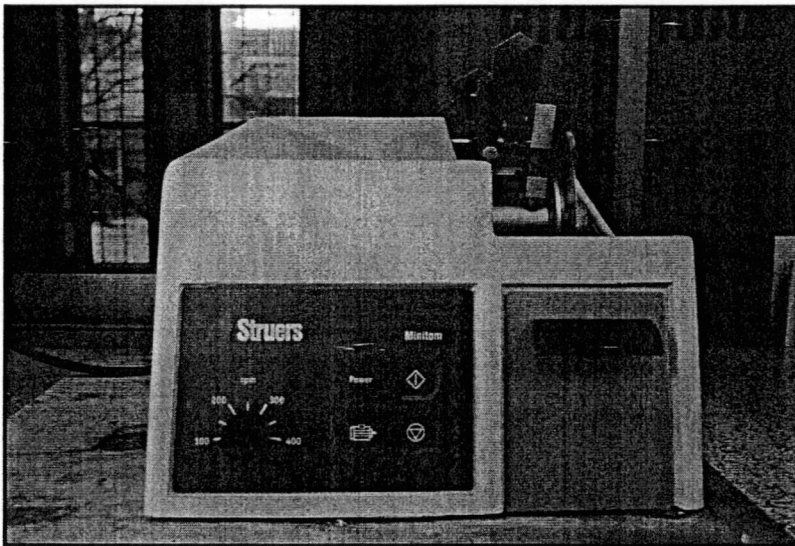
3.7.3 ขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1,000, 1,200, 1500, 2000 ตามลำดับ

3.7.4 ขัดมัน (Polishing) ด้วยล้อยัดแผ่นสักลวดจานหมุน โดยใช้ผงขัดอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

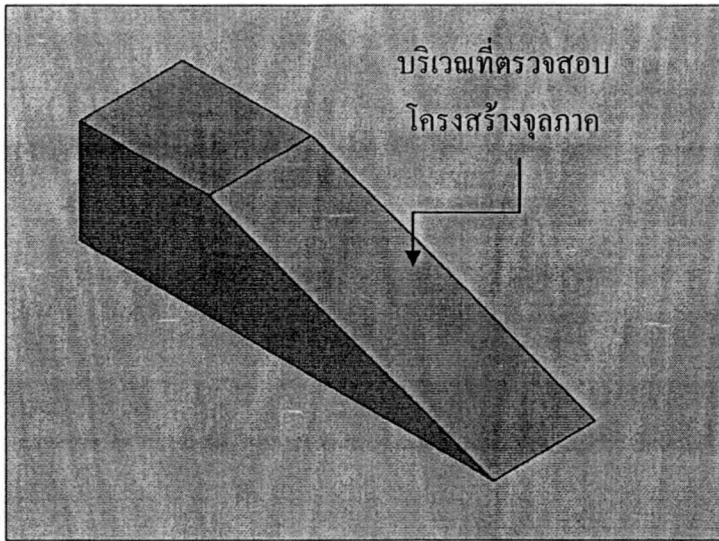
3.7.5 ทำความสะอาดแล้วจึงกัดกรด (Etching) ด้วยกรดไนตริก (Nitric Acid) โดยมีส่วนผสมของกรดไนตริก (HNO_3) 2 เปอร์เซ็นต์ (2 มิลลิลิตร) และ เมทิลแอลกอฮอล์ 98 เปอร์เซ็นต์ (98 มิลลิลิตร) จุ่มชิ้นงานตรวจสอบนาน 10-30 วินาที เพื่อเปิดโครงสร้างเหล็กกล้าและล้างน้ำไหลอีกครั้ง

3.7.6 เช็ดผิวหน้าด้วยแอลกอฮอล์และเป่าลมร้อนให้แห้ง

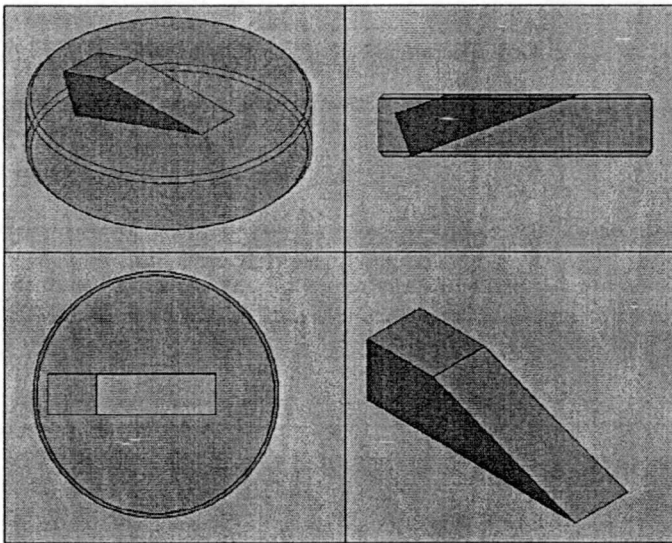
3.7.7 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดขนาดชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์และถ่ายภาพโครงสร้าง



รูปที่ 3.4 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 3.5 บริเวณที่ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดขนาดชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์และถ่ายภาพโครงสร้าง



รูปที่ 3.6 ลักษณะการทำตัวเรือนด้วยเรซินแบบ Cold mounting

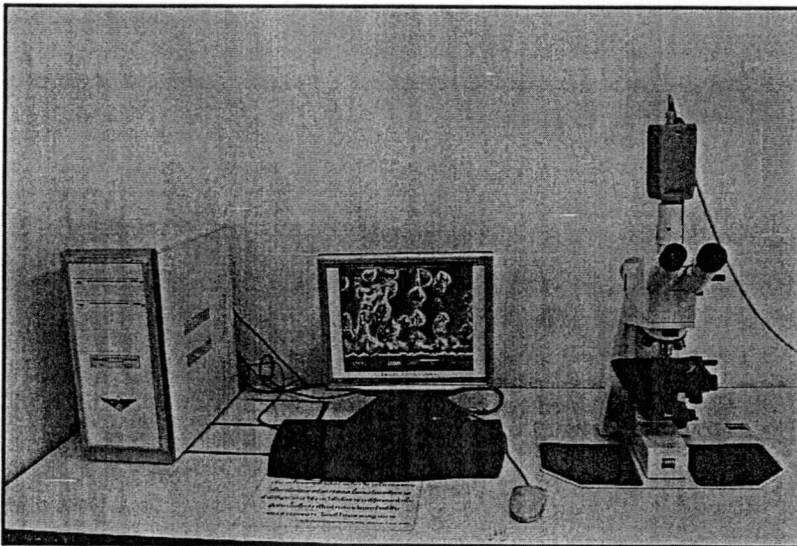
3.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ในเบื้องต้นจะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้าง การกระจายตัว รวมถึงลักษณะและขนาดของเกรน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเหล่านั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของรอยต่อบัดกรี โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซินแล้วไปขัดด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1,000, 1,200, 1500, 2000 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการขัดโดยใช้ผงอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 1.0 และ 0.3 ไมครอน บน

สักราดโดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 แล้วจึงทำการกัดผิวหน้าชิ้นงาน (Etching) ด้วยสารละลายที่ประกอบด้วย 98 % Ethanol: 2 % Nitric แล้วจึงนำไปตรวจดูโครงสร้างด้วยกล้อง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ซึ่งมีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 เครื่องขัดชิ้นงาน



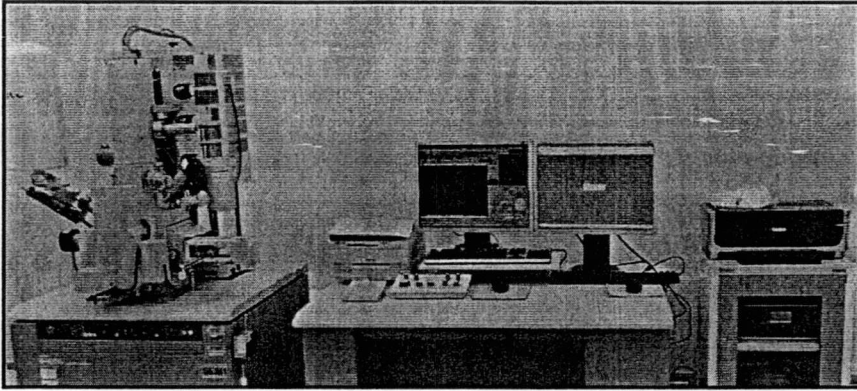
รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีจะทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง

Scanning electron microscope (SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-4700 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ดัง

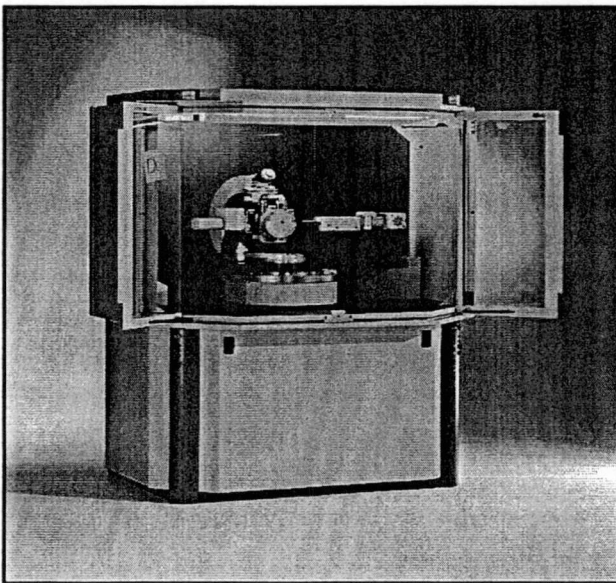
แสดงในรูปที่ 3.9 และใช้ Energy dispersive X-ray (EDX) ยี่ห้อ IXRF SYSTEMS รุ่น Sphinx 130 S-4700 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.10 การตรวจสอบโครงสร้างผลึก

ในการศึกษาเฟสและตัวแปร โครงผลึกของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Discover ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในการตรวจสอบใช้ความต่างศักย์ 40 kV, กระแสไฟฟ้า 40 mA, ความเร็วในการสแกน 0.2 นาที ต่อ 0.02° กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ในช่วงความยาวคลื่น $25-75^\circ$



รูปที่ 3.10 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2

ผลการทดลองของขนาดของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 โดยในการศึกษานี้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบ 3^k เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปรป้อนเข้าหรือในการทดลองนี้ คือ ตัวแปรการตัด ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 2 ตัวแปรด้วยกันคือ ระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน Pulse-on Time (Ton) และแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค Power of Discharge (P) ซึ่งผลของการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของขนาดของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานของการตัดละเอียดครั้งที่ 2

ลำดับ การ ทดลอง	ตัวแปร ป้อนเข้า		Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
	Ton (μ s)	P (V)	Ra. (μ m)	Dimension (mm.)	Ra. (μ m)	Dimension (mm.)	Ra. (μ m)	Dimension (mm.)
1	20	57	1.289	5.0145	1.314	5.0143	1.307	5.0147
2	18	53	1.146	5.0135	1.147	5.0129	1.155	5.0138
3	18	57	1.188	5.0139	1.194	5.0137	1.176	5.0133
4	20	53	1.240	5.0145	1.249	5.014	1.250	5.0138
5	19	57	1.232	5.0144	1.236	5.0146	1.228	5.0142
6	20	55	1.242	5.0125	1.264	5.0129	1.263	5.0132
7	19	53	1.213	5.0149	1.206	5.0151	1.199	5.0152
8	19	55	1.099	5.0112	1.019	5.0115	1.095	5.0119
9	18	55	1.224	5.0131	1.219	5.0122	1.228	5.0124

4.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน สามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 โดยในกรณีนี้พบว่า ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 93.56 % และ Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 90.70 % และจากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัว

แปร ON (Pulse on Time), P (Power of Discharge) และ Interaction ON*P เป็นตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรทั้งสามมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปร P มีอิทธิพลต่อขนาดของชิ้นงานมากที่สุดเนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด

สำหรับผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิว แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยในกรณีนี้พบว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 95.50 % และ Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 93.49 % และจากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปร ON (Pulse on Time), P (Power of Discharge) และ Interaction ON*P เป็นตัวแปรที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรทั้งสามมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 โดยในกรณีนี้ตัวแปร ON เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุด (มีค่า F-ratio สูงสุด)

ตารางที่ 4.2 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ขนาดของชิ้นงาน

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of Square	Adj Sum of Square	Adj Mean Square	F-ratio	p-value
Pulse on Time (ON)	2	0.0000019	0.0000019	0.0000009	8.44	0.003
Power of discharge (P)	2	0.0000208	0.0000208	0.0000104	92.90	<0.001
ON*P	4	0.0000066	0.0000066	0.0000016	14.75	<0.001
Error	18	0.0000020	0.0000020	0.0000001		
Total	26	0.0000313				

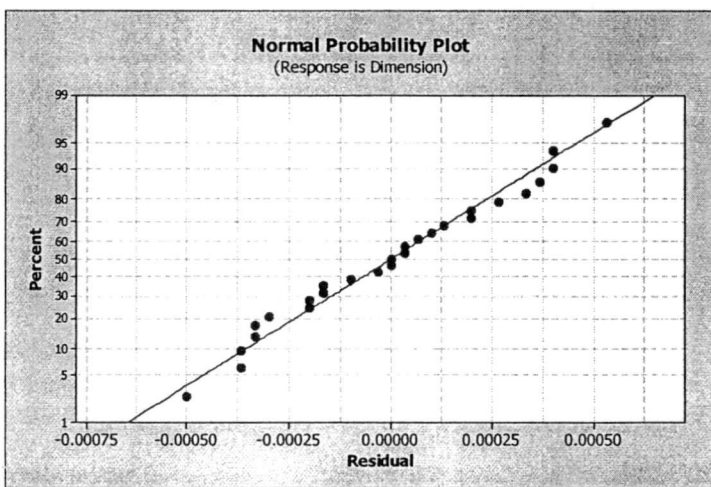
ตารางที่ 4.3 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ความหยาบผิว

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of Square	Adj Sum of Square	Adj Mean Square	F-ratio	p-value
Pulse on Time (ON)	2	0.050573	0.050573	0.025286	88.32	<0.001
Power of discharge (P)	2	0.015300	0.015300	0.007650	26.72	<0.001
ON*P	4	0.043368	0.043368	0.010842	37.87	<0.001
Error	18	0.005153	0.005153	0.000286		
Total	26	0.114395				

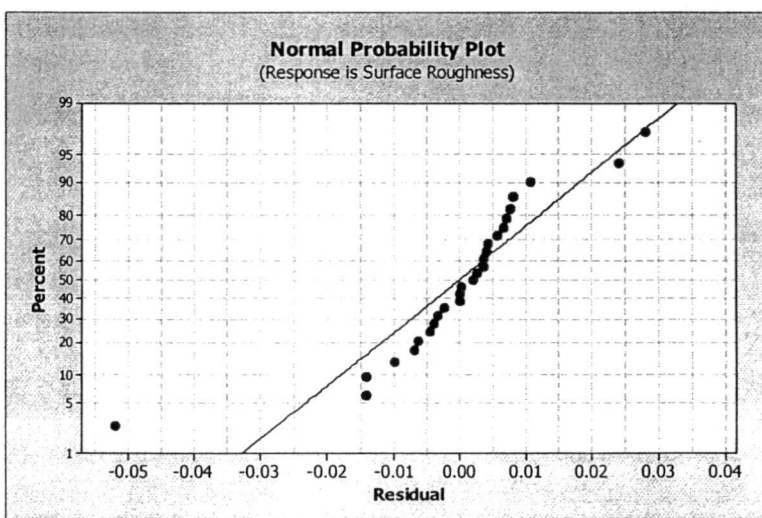
4.1.2 ตรวจสอบความถูกต้อง (Model adequacy checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ 2 ประเภท คือ

4.1.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 4.1 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าขนาดของชิ้นงาน



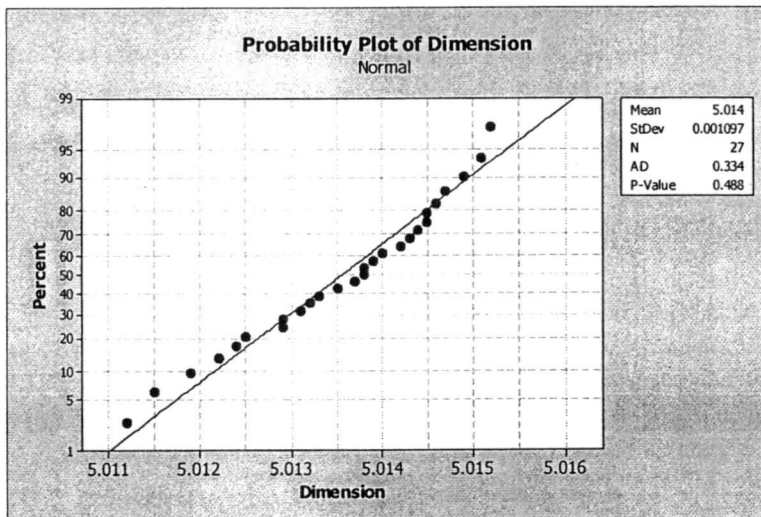
รูปที่ 4.2 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าของความหยาบผิว

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตค้ำของขนาดของชิ้นงานและความหนาผิว จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตค้ำเกาะกลุ่มกันเป็นลักษณะไม่เป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบไม่ปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถเชื่อถือได้ โดยสามารถตรวจสอบความเป็น Normal ของขนาดของชิ้นงานและความหนาผิว ได้โดยวิธีการ Anderson-Darling

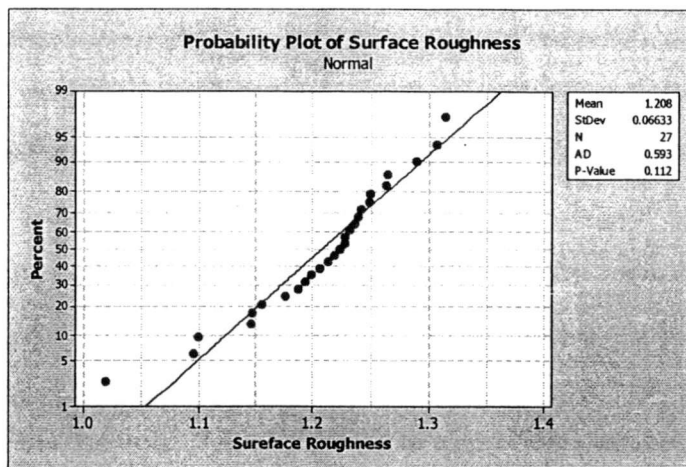
4.1.2.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตค้ำจะใช้วิธี Anderson-Darling ในการตรวจสอบ โดยถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 นั้นหมายถึงส่วนตค้ำมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.3 เป็นการทดสอบด้วยวิธี Anderson-Darling เพื่อตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของขนาดชิ้นงาน พบว่าค่า P-value ของการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.488 ซึ่งจะมีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าส่วนตค้ำ มีการแจกแจงแบบปกติ

จากรูปที่ 4.4 เป็นการทดสอบด้วยวิธี Anderson-Darling ของความหนาผิวของชิ้นงาน พบว่าค่า P-value ของการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.112 ซึ่งจะมีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าส่วนตค้ำมีการแจกแจงแบบปกติเช่นกัน



รูปที่ 4.3 การแจกแจงแบบปกติของขนาดชิ้นงาน ด้วยวิธี Anderson-Darling

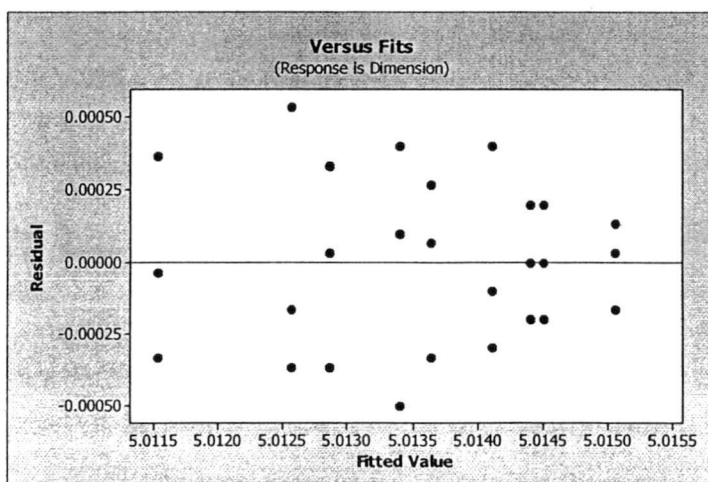


รูปที่ 4.4 การแจกแจงแบบปกติของความหยาบผิวของชิ้นงาน ด้วยวิธี Anderson-Darling

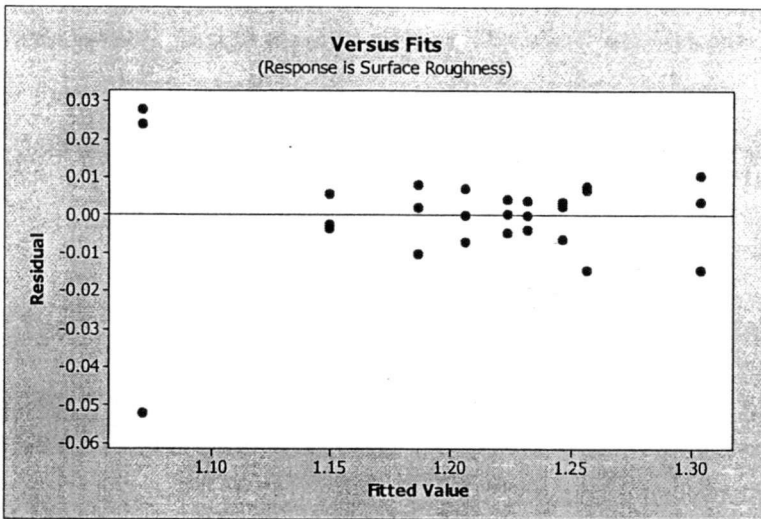
4.1.2.2 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่าเสมอของการกระจายตัวของส่วนตกค้าง โดยการใช้ค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือ ค่าของขนาดชิ้นงาน และความหยาบผิวของชิ้นงาน นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted)

จากลักษณะของกราฟของขนาดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.5 สรุปได้ว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูลไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใดๆ และมีความสม่าเสมอของความแปรปรวน

และจากลักษณะของกราฟของความหยาบผิวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.6 ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่ไม่สม่าเสมอ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์ห่าอาจจะไม่สามารถเชื่อถือได้ โดยสามารถตรวจสอบความสม่าเสมอของการกระจายตัวของส่วนตกค้าง ด้วยวิธี Brown-Forsythe test



รูปที่ 4.5 ค่าส่วนตกค้างกับค่าของขนาดชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 ค่าส่วนตกค้างกับค่าของความหยาบผิวของชิ้นงาน

4.1.2.2.1 การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ด้วยวิธี Brown-Forsythe test

การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ด้วยวิธี Brown-Forsythe test เป็นการคำนวณ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการพิจารณาจากกราฟ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{จาก } i_{BF}^* = \frac{\bar{d}_1 - \bar{d}_2}{\sqrt{s \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3} \right)}} \quad (4.1)$$

$$s^2 = \frac{\sum (d_{i1} - \bar{d}_1)^2 + (\sum d_{i2} - \bar{d}_2)^2 + (\sum d_{i3} - \bar{d}_3)^2}{n - 2} \quad (4.2)$$

$$d_{i1} = |e_{i1} - \tilde{e}_1| \quad (4.3)$$

$$d_{i2} = |e_{i2} - \tilde{e}_2| \quad (4.4)$$

$$d_{i3} = |e_{i3} - \tilde{e}_3| \quad (4.5)$$

โดยที่

n_1, n_2, n_3 = จำนวนตัวอย่างจากกลุ่มที่ 1 และที่ 2 ตามลำดับ

e_{i1}, e_{i2}, e_{i3} = ส่วนตกค้างของตัวอย่างที่ i จากกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และที่ 2

ตามลำดับ: $i = 1, 2,$ และ 3

$\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \tilde{e}_3$ = ค่ามัธยฐาน (median) ของส่วนตกค้างของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และที่ 2

ตามลำดับ

n = จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

วิธีการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

-แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม

-คำนวณหา d_{i1}, d_{i2}, d_{i3} โดยใช้สมการที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

-คำนวณหาค่า $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3$

ตารางที่ 4.4 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 1

กลุ่มที่ 1			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - \bar{d}_1$) ²
1	-0.01433333	0.01433333	0.00003512
2	-0.00333333	0.00333333	0.00002575
3	0.00200000	0.00200000	0.00004105
4	-0.00633333	0.00633333	0.00000430
5	0.00000000	0.00000000	0.00007068
6	-0.01433333	0.01433333	0.00003512
7	0.00700000	0.00700000	0.00000198
8	0.02800000	0.02800000	0.00038387
9	0.00033333	0.00033333	0.00006519
	Total	0.07566667	0.00066306
$\tilde{e}_1 = 0 \quad \bar{d}_1 = \frac{0.00216667}{9} = 0.00024074 \quad n_1 = 9$			

ตารางที่ 4.5 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 2			
ลำดับที่	Residual (e_{ii})	(d_{ii})	($d_{ii} - d_i$) ²
1	-0.00020000	0.00016667	0.00000000
2	-0.00050000	0.00046667	0.00000009
3	0.00006667	0.00010000	0.00000000
4	-0.00010000	0.00006667	0.00000001
5	0.00020000	0.00023333	0.00000000
6	0.00003333	0.00006667	0.00000001
7	0.00003333	0.00006667	0.00000001
8	-0.00003333	0.00000000	0.00000003
9	-0.00036667	0.00033333	0.00000003
	Total	0.00150000	0.00000018
$\bar{e}_1 = 0.0001333 \quad \bar{d}_2 = \frac{0.00150}{9} = 0.00025556 \quad n_1 = 9$			

ตารางที่ 4.6 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 3

กลุ่มที่ 3			
ลำดับที่	Residual (e_{ii})	(d_{ii})	($d_{ii} - d_i$) ²
1	-0.00020000	0.00016667	0.00000000
2	-0.00050000	0.00046667	0.00000009
3	0.00006667	0.00010000	0.00000000
4	-0.00010000	0.00006667	0.00000001
5	0.00020000	0.00023333	0.00000000
6	0.00003333	0.00006667	0.00000001
7	0.00003333	0.00006667	0.00000001
8	-0.00003333	0.00000000	0.00000003
9	-0.00036667	0.00033333	0.00000003
	Total	0.00150000	0.00000018
$\bar{e}_1 = 0.0001333 \quad \bar{d}_3 = \frac{0.00230}{9} = 0.00025556 \quad n_1 = 9$			

นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.2

$$S^2 = \frac{0.00000065}{27-2}$$

$$S = 0.00016132$$

นำค่า S ไปแทนลงในสมการ 4.1

$$t_{BF}^* = \frac{0.00016667 - 0.00024074 - 0.00025556}{0.00016132 \sqrt{\frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}}}$$

$$= 1.94850$$

จากการคำนวณค่าส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงานด้วยวิธี Brown-Forsythe test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.94850 จากตารางใน Percentiles of the t distribution ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ค่า $t(0.975, 25) = 2.060$ โดยถ้า $|t_{BF}^*| \leq 2.060$ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างจะมีค่าคงที่ และถ้า $|t_{BF}^*| > 2.060$ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างจะไม่เป็นค่าคงที่ ซึ่งจากการคำนวณได้ว่า $|t_{BF}^*| \leq 2.060$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างของการทดลองนี้มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว

ตารางที่ 4.7 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวกลุ่มที่ 1

กลุ่มที่ 1			
ลำดับที่	Residual (e_{1i})	(d_{1i})	($d_{1i} - d_{11}$) ²
1	-0.01433333	0.01433333	0.00003512
2	-0.00333333	0.00333333	0.00002575
3	0.00200000	0.00200000	0.00004105
4	-0.00633333	0.00633333	0.00000430
5	0.00000000	0.00000000	0.00007068
6	-0.01433333	0.01433333	0.00003512
7	0.00700000	0.00700000	0.00000198
8	0.02800000	0.02800000	0.00038387
9	0.00033333	0.00033333	0.00006519
	Total	0.07566667	0.00066306
$\bar{e}_1 = 0 \quad \bar{d}_1 = \frac{0.07566667}{9} = 0.00840741 \quad n_1 = 9$			

ตารางที่ 4.8 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 2			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	0.01066667	0.00800000	0.00002844
2	-0.00233333	0.00500000	0.00002426
3	0.00800000	0.00533333	0.00002109
4	0.00266667	0.00000000	0.00009852
5	0.00400000	0.00133333	0.00007383
6	0.00766667	0.00500000	0.00002426
7	0.00000000	0.00266667	0.00005270
8	-0.05200000	0.05466667	0.00200173
9	-0.00466667	0.00733333	0.00000672
	Total	0.08933333	0.00233157
$\tilde{e}_1 = 0.00266667$ $\bar{d}_2 = \frac{0.08933333}{9} = 0.00992593$ $n_1 = 9$			

ตารางที่ 4.9 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวกลุ่มที่ 3

กลุ่มที่ 3			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	0.00366667	0.00000000	0.00004153
2	0.00566667	0.00200000	0.00001975
3	-0.01000000	0.01366667	0.00005216
4	0.00366667	0.00000000	0.00004153
5	-0.00400000	0.00766667	0.00000149
6	0.00666667	0.00300000	0.00001186
7	-0.00700000	0.01066667	0.00001783
8	0.02400000	0.02033333	0.00019290
9	0.00433333	0.00066667	0.00003338
	Total	0.05800000	0.00041244
$\tilde{e}_1 = 0.00366667$ $\bar{d}_3 = \frac{0.05800000}{9} = 0.00644444$ $n_1 = 9$			

นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.2

$$S^2 = \frac{0.00340708}{27-2}$$

$$S = 0.01167404$$

นำค่า S ไปแทนลงในสมการ 4.1

$$t_{BF}^* = \frac{0.00840741 - 0.00992593 - 0.00644444}{0.01167404 \sqrt{\frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}}}$$

$$= 1.94850$$

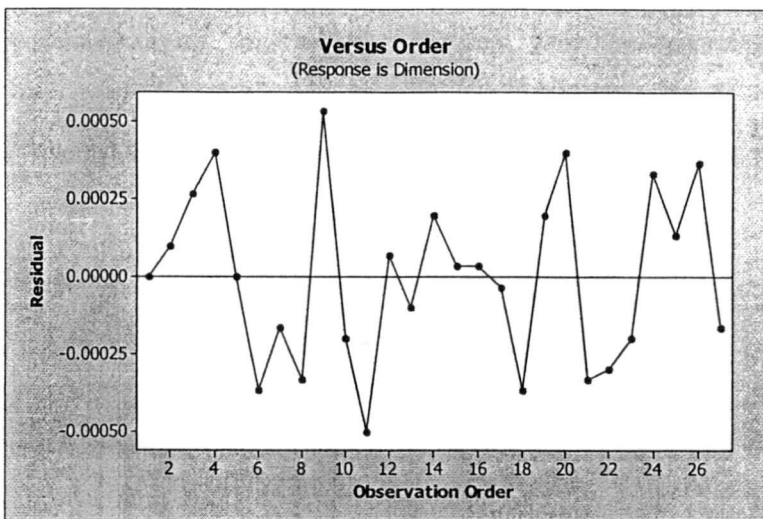
จากการตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนของส่วนตค้ำที่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยวิธี Brown-Forsythe test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.18145 จากตารางใน Percentiles of the t distribution ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ค่า $t(0.975, 25) = 2.060$ ซึ่งจากการคำนวณได้ว่า $|t_{BF}^*| \leq 2.060$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของส่วนตค้ำของการทดลองนี้มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว

4.1.2.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

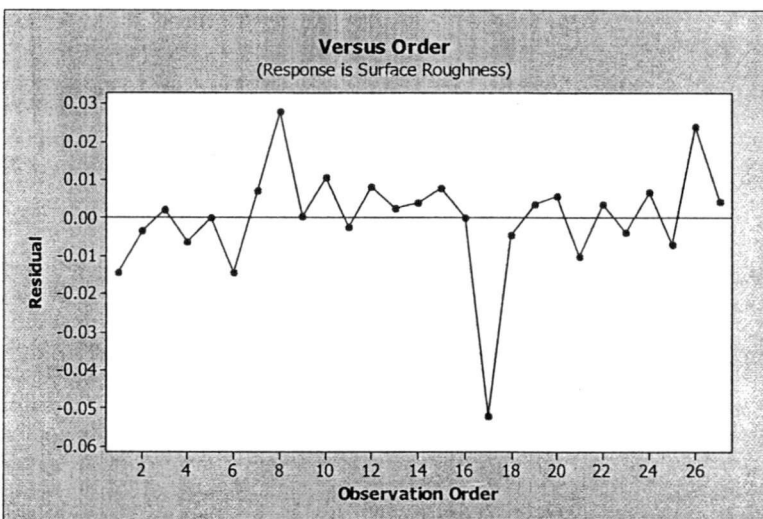
เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของส่วนตค้ำโดยใช้ค่าส่วนตค้ำและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตค้ำกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตค้ำอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

จากรูปที่ 4.7 ค่าส่วนตค้ำของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 4.8 ค่าส่วนตค้ำของความหยาบผิวของชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.7 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.8 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิวของชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3

4.1.2.3.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างโดยวิธี Durbin-Watson test

การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างอีกวิธีหนึ่งคือ วิธี Durbin-Watson test ซึ่งเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าการพิจารณารูป เนื่องจากสามารถคำนวณค่าเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้ โดยตั้งสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

$$H_0 : \rho = 0 \text{ ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ}$$

$$H_a : \rho > 0 \text{ ส่วนตกค้างไม่มีความเป็นอิสระ}$$

สมการ Durbin-Watson test

$$D = \frac{\sum_{t=1}^n 2(e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (4.6)$$

โดยที่

 D = ค่า Durbin-Watson test e_t = ส่วนตกค้างที่ลำดับการทดลองที่ t

ตารางที่ 4.10 การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของขนาดชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_t - e_{t-1}$	$(e_t - e_{t-1})^2$	e_t^2
1	0.00000000	-	-	0.00000000
2	0.00010000	0.00010000	0.00000001	0.00000001
3	0.00026667	0.00016667	0.00000003	0.00000007
4	0.00040000	0.00013333	0.00000002	0.00000016
5	0.00000000	-0.00040000	0.00000016	0.00000000
6	-0.00036667	-0.00036667	0.00000013	0.00000013
7	-0.00016667	0.00020000	0.00000004	0.00000003
8	-0.00033333	-0.00016667	0.00000003	0.00000011
9	0.00053333	0.00086667	0.00000075	0.00000028
10	-0.00020000	-0.00073333	0.00000054	0.00000004
11	-0.00050000	-0.00030000	0.00000009	0.00000025
12	0.00006667	0.00056667	0.00000032	0.00000000
13	-0.00010000	-0.00016667	0.00000003	0.00000001
14	0.00020000	0.00030000	0.00000009	0.00000004
15	0.00003333	-0.00016667	0.00000003	0.00000000
16	0.00003333	0.00000000	0.00000000	0.00000000
17	-0.00003333	-0.00006667	0.00000000	0.00000000

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของขนาดชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_t - e_{t-1}$	$(e_t - e_{t-1})^2$	e_t^2
18	-0.00036667	-0.00033333	0.00000011	0.00000013
19	0.00020000	0.00056667	0.00000032	0.00000004
20	0.00040000	0.00020000	0.00000004	0.00000016
21	-0.00033333	-0.00073333	0.00000054	0.00000011
22	-0.00030000	0.00003333	0.00000000	0.00000009
23	-0.00020000	0.00010000	0.00000001	0.00000004
24	0.00033333	0.00053333	0.00000028	0.00000011
25	0.00013333	-0.00020000	0.00000004	0.00000002
26	0.00036667	0.00023333	0.00000005	0.00000013
27	-0.00016667	-0.00053333	0.00000028	0.00000003
	Total		0.00000395	0.00000201

แทนค่าในสมการ 4.6

$$D = \frac{0.00000395}{0.00000201}$$

$$D = 1.9630$$

จากการคำนวณความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงานด้วยวิธีของ Durbin-Watson test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.9630 จากตาราง Durbin-Watson ที่ $n = 27$, $k = 3$ ได้ค่า $d_L = 1.162$, $d_U = 1.651$ โดยถ้า $D > d_U$ จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0), ถ้า $D < d_L$ จะยอมรับสมมติฐานรอง (H_a), และถ้า $d_L < D < d_U$ จะไม่สามารถทำการสรุปผลได้ ซึ่งค่า D ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่ามากกว่า D_U จึงยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือส่วนตกค้างสำหรับการทดลองขนาดของชิ้นงานมีความเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.11 การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของความหยาบผิว

ลำดับที่	Residual	$e_i - e_{i-1}$	$(e_i - e_{i-1})^2$	e_i^2
1	-0.01433333	-	-	0.00020544
2	-0.00333333	0.01100000	0.00012100	0.00001111
3	0.00200000	0.00533333	0.00002844	0.00000400
4	-0.00633333	-0.00833333	0.00006944	0.00004011
5	0.00000000	0.00633333	0.00004011	0.00000000
6	-0.01433333	-0.01433333	0.00020544	0.00020544
7	0.00700000	0.02133333	0.00045511	0.00004900
8	0.02800000	0.02100000	0.00044100	0.00078400
9	0.00033333	-0.02766667	0.00076544	0.00000011
10	0.01066667	0.01033333	0.00010678	0.00011378
11	-0.00233333	-0.01300000	0.00016900	0.00000544
12	0.00800000	0.01033333	0.00010678	0.00006400
13	0.00266667	-0.00533333	0.00002844	0.00000711
14	0.00400000	0.00133333	0.00000178	0.00001600
15	0.00766667	0.00366667	0.00001344	0.00005878
16	0.00000000	-0.00766667	0.00005878	0.00000000
17	-0.05200000	-0.05200000	0.00270400	0.00270400
18	-0.00466667	0.04733333	0.00224044	0.00002178
19	0.00366667	0.00833333	0.00006944	0.00001344
20	0.00566667	0.00200000	0.00000400	0.00003211
21	-0.01000000	-0.01566667	0.00024544	0.00010000
22	0.00366667	0.01366667	0.00018678	0.00001344
23	-0.00400000	-0.00766667	0.00005878	0.00001600
24	0.00666667	0.01066667	0.00011378	0.00004444
25	-0.00700000	-0.01366667	0.00018678	0.00004900
26	0.02400000	0.03100000	0.00096100	0.00057600
27	0.00433333	-0.01966667	0.00038678	0.00001878
	Total		0.00976822	0.00515333

แทนค่าในสมการ 4.6

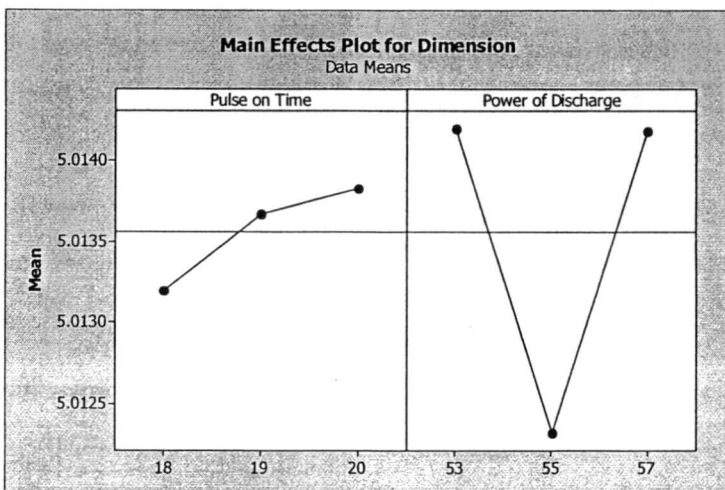
$$D = \frac{0.00976822}{0.00515333}$$

$$D = 1.89551530$$

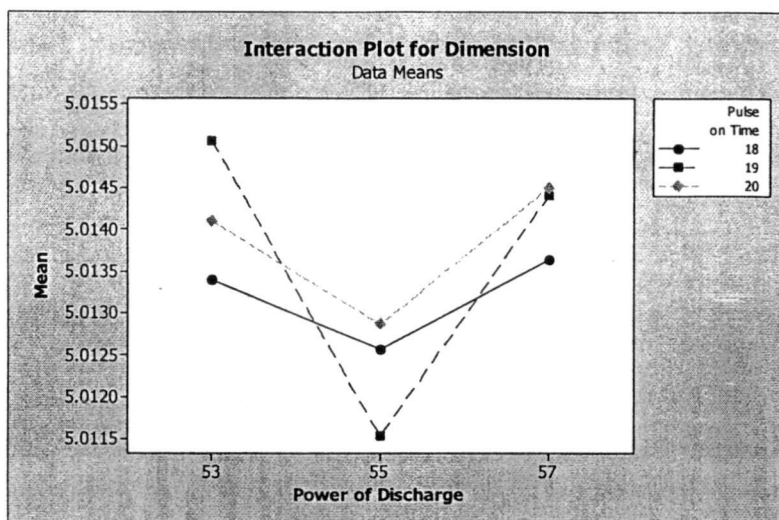
และการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยวิธีของ Durbin-Watson test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.89552 จากตาราง Durbin-Watson ที่ $n = 27$, $k = 3$ ได้ค่า $d_L = 1.162$, $d_U = 1.651$ ซึ่งค่า D ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่ามากกว่า D_U จึงยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือส่วนตกค้างสำหรับการทดลองความหยาบผิวของชิ้นงานมีความเป็นอิสระต่อกัน จากการตรวจสอบตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานของ ANOVA ทั้งสามข้อ ไม่พบการละเมิดสมมติฐานข้อใด การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลองด้วยวิธี ANOVA จึงมีความเชื่อถือได้

4.2 การวิเคราะห์อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม

จากกราฟอิทธิพลหลักของขนาดชิ้นงานเทียบกับตัวแปรการตัดคั่งแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรการตัดทั้งสองมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดของชิ้นงาน แต่จากตารางที่ 2 พบว่าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง ON และ P มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดของชิ้นงาน ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากกราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปรการตัดทั้งสองนี้ และเมื่อพิจารณาจากกราฟอิทธิพลร่วมของขนาดชิ้นงานเทียบกับตัวแปรการตัด คั่งแสดงในรูปที่ 4.10 ของระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (Pulse on Time) และ แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (Power of Discharge) ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าของระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน ที่ 19 μs และค่าของแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์คที่ 55 V จะให้ขนาดของชิ้นงานที่ได้จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด

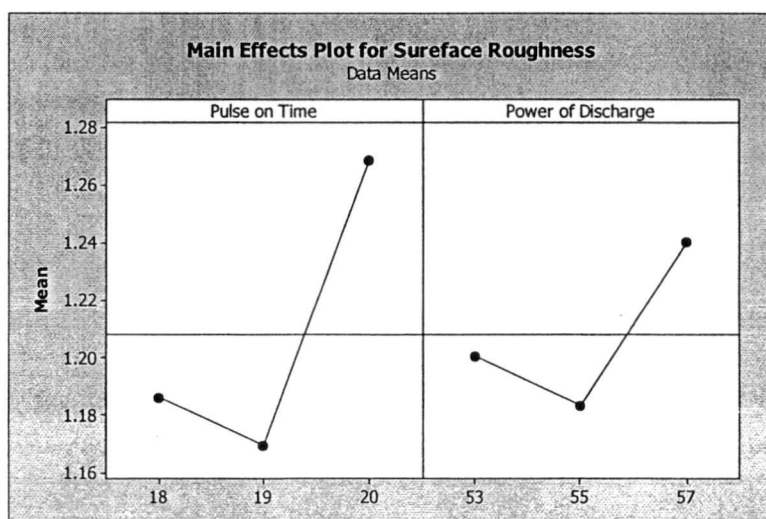


รูปที่ 4.9 กราฟอิทธิพลหลักของขนาดชิ้นงานเทียบกับตัวแปรการตัด

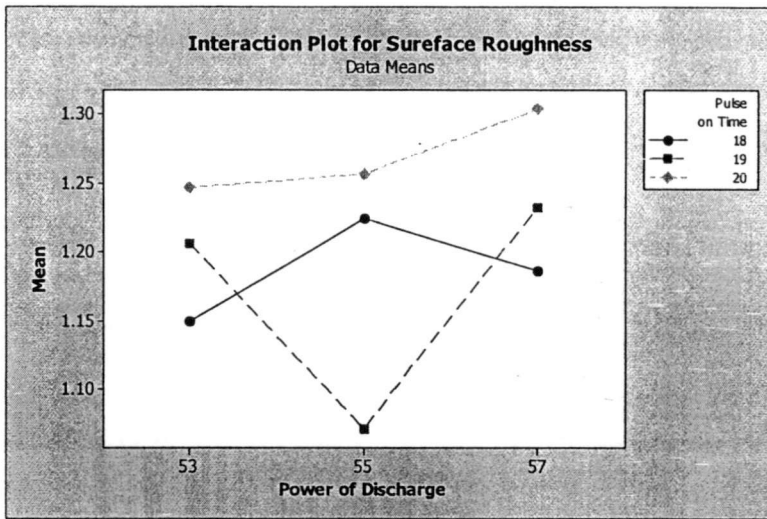


รูปที่ 4.10 กราฟอิทธิพลร่วมของขนาดชิ้นงานเทียบกับตัวแปรการตัด

จากกราฟอิทธิพลหลักของความหยาบผิวเทียบกับตัวแปรการตัดดังแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรการตัดทั้งสองมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิว แต่จากตารางที่ 3 พบว่าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง ON และ P มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหยาบผิว ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากกราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปรการตัดทั้งสองนี้ และเมื่อพิจารณาจากกราฟอิทธิพลร่วมของความหยาบผิวเทียบกับตัวแปรการตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ของระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (Pulse on Time) และ แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (Power of Discharge) ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่า ค่าของระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน ที่ 19 μs และค่าของแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์คที่ 55 V จะให้ความหยาบผิวที่ได้จะมีค่าที่น้อยที่สุด



รูปที่ 4.11 กราฟอิทธิพลหลักของความหยาบผิวเทียบกับตัวแปรการตัด



รูปที่ 4.12 กราฟอิทธิพลร่วมของความหยาบผิวเทียบกับตัวแปรการตัด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขของการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุดของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 ซึ่งมีเป้าหมายในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 สำหรับการศึกษาครั้งนี้คือ

1. ขนาดของชิ้นงาน เท่ากับ 5.010 ± 0.002 mm.
2. ความหยาบผิวของชิ้นงานที่น้อยที่สุด

เมื่อใช้เงื่อนไขในการตัดที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด คือ ระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (ON) ที่ 19 μ s และแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (P) ที่ 55 V ไปทำการตัดชิ้นงานเพื่อยืนยันผลการศึกษา ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.12 และผลจากการทดสอบในการศึกษานี้พบว่าค่าความหยาบผิว และขนาดของชิ้นงานมีค่าที่สอดคล้องกับค่าพิสัยความเผื่อ (Tolerance) ตามที่ได้กำหนดไว้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน

No.	Dimension (mm.)	Roughness ($\mu\text{m}.$)
1	5.0110	1.0240
2	5.0113	0.9840
3	5.0104	0.9920
4	5.0105	1.0770
5	5.0109	1.0000
6	5.0106	0.9210
7	5.0112	1.0570
8	5.0100	1.0590
9	5.0099	1.0650
10	5.0108	1.0470

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3

ผลการทดลองของขนาดของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 โดยในการศึกษานี้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ โดยการใช้ตัวแบบการทดลองของ Box-Behnken Design ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกันคือ ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (Cutting Speed: CS) กระแสที่ใช้ในการตัด (Current: IP) และ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Path Correction: Offset) ซึ่งผลของการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองของขนาดของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานของการตัด
ละเอียดครั้งที่ 3

ลำดับ การ ทดลอง	ตัวแปรป้อนเข้า			Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
	CS (mm/min.)	IP (A)	Offset (μm .)	Ra. (μm)	Dimension (mm.)	Ra. (μm)	Dimension (mm.)	Ra. (μm)	Dimension (mm.)
1	3.5	3	780	0.768	5.0032	0.734	5.0031	0.718	5.0026
2	3.5	1	780	0.199	5.0022	0.249	5.0021	0.247	5.0018
3	4.5	3	770	0.698	5.0006	0.719	5.0009	0.730	4.9995
4	5.5	2	790	0.190	5.0029	0.199	5.0032	0.206	5.0021
5	5.5	2	770	0.198	5.0005	0.205	4.9998	0.189	4.9991
6	4.5	3	790	0.725	5.0033	0.746	5.0043	0.747	5.0041
7	4.5	1	770	0.176	5.0006	0.173	5.0005	0.178	4.9997
8	3.5	2	790	0.244	5.0037	0.253	5.0026	0.250	5.0025
9	4.5	2	780	0.199	5.0011	0.195	5.0003	0.192	5.0005
10	4.5	2	780	0.195	5.001	0.190	5.0004	0.198	5.0006
11	5.5	3	780	0.676	5.0038	0.657	5.0023	0.670	5.0028
12	4.5	2	780	0.225	5.0012	0.227	5.0013	0.235	5.0009
13	5.5	1	780	0.242	5.0016	0.227	5.0015	0.237	5.0017
14	3.5	2	770	0.221	4.9996	0.224	5.0003	0.228	4.9994
15	4.5	1	790	0.207	5.0029	0.189	5.0033	0.199	5.0036

4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว และขนาดของชิ้นงาน สามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน แสดงไว้ในตารางที่ 4.14 และตารางที่ 4.15 โดยในกรณีนี้พบว่า ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 89.85% และ Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 87.24% และจากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปร กระแสที่ใช้ในการตัด (IP) ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset) และ Interaction ของ CS*CS และ IP*IP เป็นตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรทั้งสิ้นมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

สำหรับผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิว แสดงไว้ในตารางที่ 4.16 และตารางที่ 4.17 โดยในกรณีนี้พบว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 99.36% และ Adjusted

R^2 มีค่าเท่ากับ 99.19% และจากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปร ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (CS) กระแสที่ใช้ในการตัด (IP) ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset) และ Interaction ของ CS*IP และ IP*IP เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ที่ระดับนัยสำคัญ

$\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรทั้งห้ามีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 4.14 Estimated Regression Coefficients ของขนาดของชิ้นงาน

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5.00081	0.000169	29622.71	0.000
CS	-0.00008	0.000103	-0.725	0.473
IP	0.00037	0.000103	3.627	0.001
Offset	0.00158	0.000103	15.316	0.000
CS*CS	0.00047	0.000152	3.112	0.004
IP*IP	0.00111	0.000152	7.274	0.000
Offset*Offset	0.00002	0.000152	0.155	0.878
CS*IP	0.00011	0.000146	0.741	0.464
CS*Offset	-0.00006	0.000146	-0.399	0.692
IP*Offset	0.00014	0.000146	0.969	0.339

ตารางที่ 4.15 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ขนาดของชิ้นงาน

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of Square	Adj Sum of Square	Adj Mean Square	F-ratio	p-value
Regression	9	0.000079	0.000079	0.000009	34.41	0.000
Linear	3	0.000064	0.000064	0.000021	82.75	0.000
Square	3	0.000015	0.000015	0.000005	19.94	0.000
Interaction	3	0.000000	0.000000	0.000000	0.55	0.652
Residual Error	35	0.000009	0.000009	0.000000		
Lack-of-Fit	3	0.000001	0.000001	0.000000	1.44	0.249
Pure Error	32	0.000008	0.000008	0.000000		
Total	44					

ตารางที่ 4.16 Estimated Regression Coefficients ของความหยابผิว

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.206222	0.006802	30.318	0.000
CS	-0.018292	0.004165	-4.391	0.000
IP	0.252708	0.004165	60.67	0.000
Offset	0.009	0.004165	2.161	0.038
CS*CS	0.011222	0.006131	1.83	0.076
IP*IP	0.251222	0.006131	40.975	0.000
Offset*Offset	-0.000194	0.006131	-0.032	0.975
CS*IP	-0.019	0.005891	-3.225	0.003
CS*Offset	-0.005917	0.005891	-1.004	0.322
IP*Offset	0.00025	0.005891	0.042	0.960

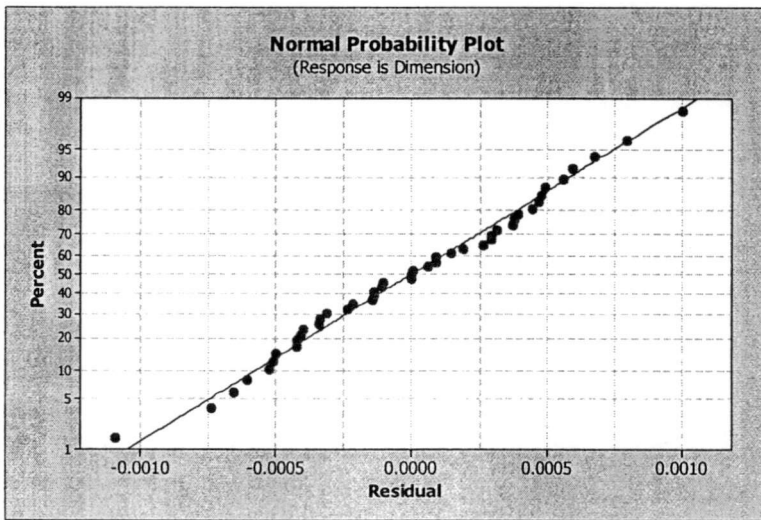
ตารางที่ 4.17 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ความหยابผิว

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of Square	Adj Sum of Square	Adj Mean Square	F-ratio	p-value
Regression	9	2.251250	2.251250	0.250138	600.720	0.000
Linear	3	1.542650	1.542650	0.514217	1234.930	0.000
Square	3	0.703840	0.703840	0.234614	563.440	0.000
Interaction	3	0.004750	0.004750	0.001584	3.800	0.018
Residual Error	35	0.014570	0.014570	0.000416		
Lack-of-Fit	3	0.007580	0.007580	0.002525	11.550	0.000
Pure Error	32	0.007000	0.007000	0.000219		
Total	44	2.265820				

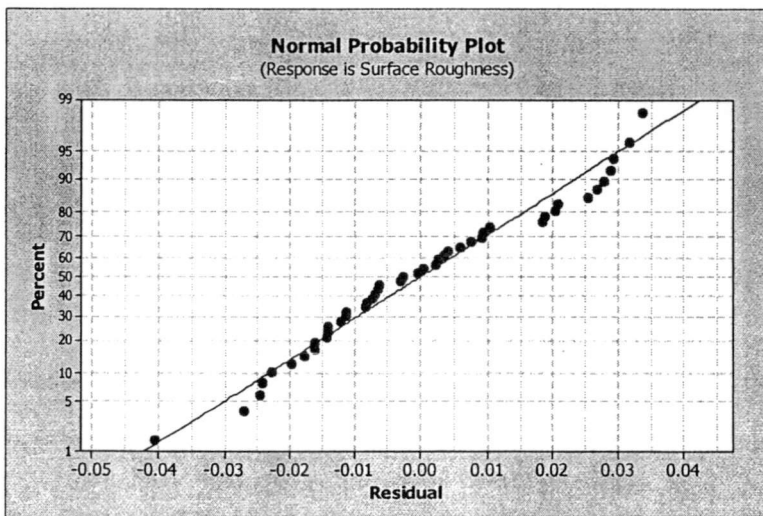
4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้อง (Model adequacy checking)

4.2.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตัก้างของขนาดของชิ้นงานและความหยาบผิว ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตัก้างเกาะกลุ่มกันเป็นลักษณะเกือบจะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์ที่สามารถเชื่อถือได้ และสามารถตรวจสอบความเป็น Normal ของขนาดของชิ้นงานและความหยาบผิวเชิงตัวเลข ได้โดยใช้วิธีการ Anderson-Darling เพื่อยืนยันการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ



รูปที่ 4.13 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตัก้างของค่าขนาดของชิ้นงาน

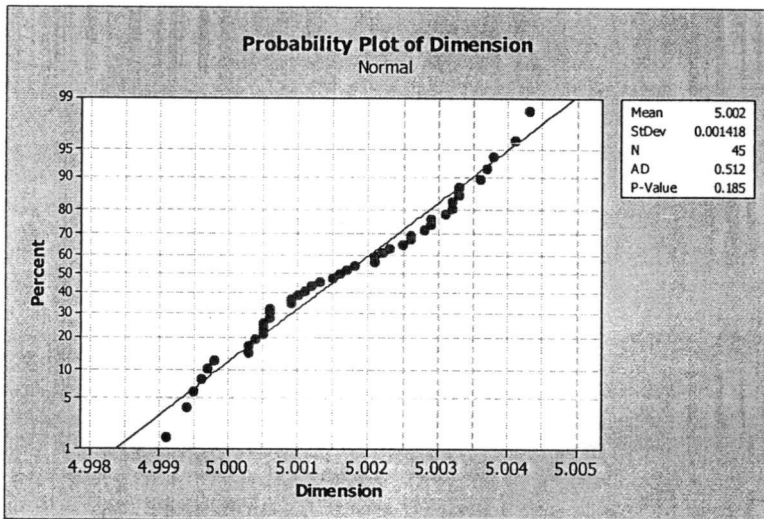


รูปที่ 4.14 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตัก้างของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

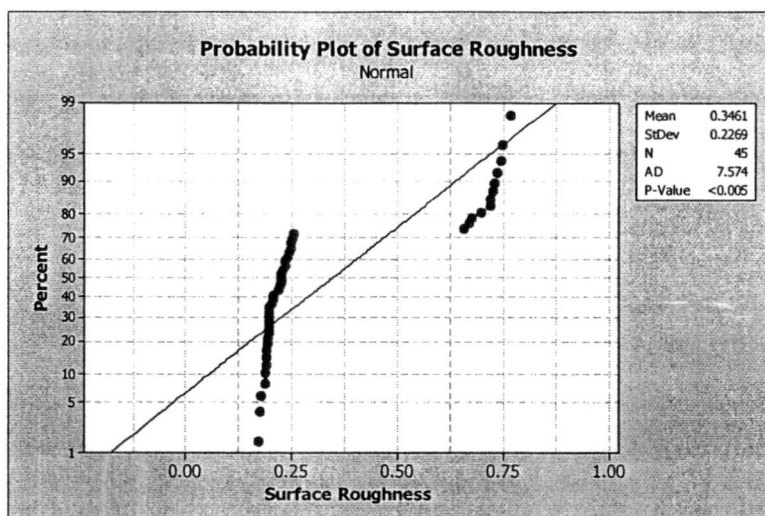
4.3.2.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกล้าจะใช้วิธี Anderson-Darling ในการตรวจสอบ โดยถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 นั้นหมายถึงส่วนตกล้ามีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

จากการทดสอบด้วยวิธี Anderson-Darling เพื่อตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของขนาดชิ้นงาน พบว่าค่า P-value ของการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.185 ซึ่งจะมีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าส่วนตกล้า มีการแจกแจงแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.15

และจากการทดสอบด้วยวิธี Anderson-Darling ของความหนาผิวของชิ้นงาน พบว่าค่า P-value ของการทดสอบมีค่าน้อยกว่า 0.005 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าส่วนตกล้า แสดงว่าส่วนตกล้าที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบไม่ปกติ นั้นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถเชื่อถือได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 การแจกแจงแบบปกติของค่าความหนาผิว ด้วยวิธี Anderson-Darling



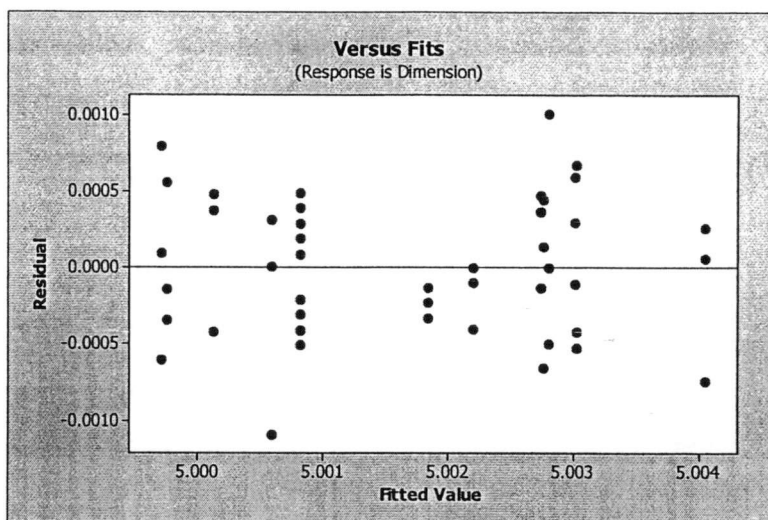
รูปที่ 4.16 การแจกแจงแบบปกติของขนาดชิ้นงาน ด้วยวิธี Anderson-Darling

4.3.2.2 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

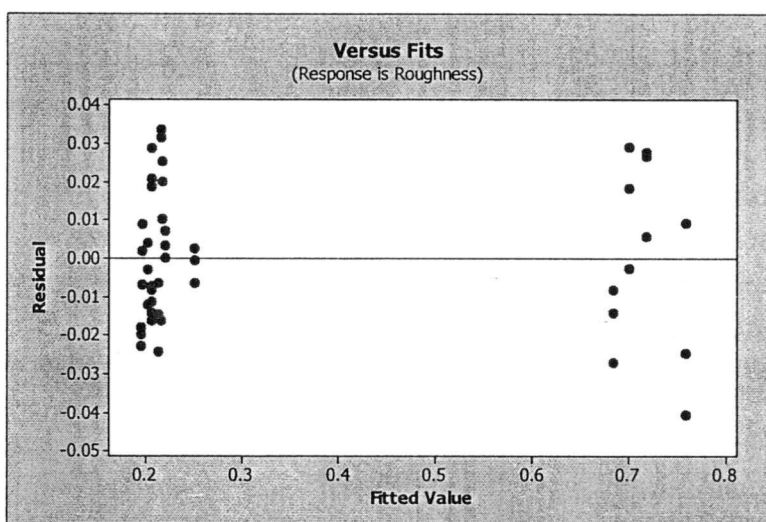
การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของส่วนตกค้าง โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือค่าขนาดของชิ้นงาน และค่าความหยาบผิวของชิ้นงานนำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted)

จากลักษณะของกราฟค่าขนาดของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.17 สรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูลไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใดๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

จากลักษณะของกราฟค่าของความหยาบผิวของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นปกติ ส่วนตกค้างมีการเกาะกลุ่มกันและไม่มีการกระจายตัวของส่วนตกค้าง นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถเชื่อถือได้ โดยสามารถตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน ด้วยวิธี Brown-Forsythe Test



รูปที่ 4.17 ค่าส่วนตกค้างกับขนาดของชิ้นงาน



รูปที่ 4.18 ค่าส่วนตกค้างกับความหยาบผิวของชิ้นงาน

4.3.1.2.1 การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ด้วยวิธี Brown-Forsythe test เป็นการคำนวณ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการพิจารณาจากกราฟ ในการศึกษานี้ ใช้การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างด้วยวิธี Brown-Forsythe test ในการตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานและความหยาบผิวของชิ้นงาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

วิธีการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

-แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม

-คำนวณหา d_{i1} , d_{i2} , d_{i3} โดยใช้สมการที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

-คำนวณหาค่า $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3$

ตารางที่ 4.18 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 1

กลุ่มที่ 1			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - \bar{d}_1$) ²
1	0.0004667	0.00027778	0.00000000
2	0.0000000	0.00018889	0.00000002
3	0.0000083	0.00018056	0.00000003
4	0.0001417	0.0004722	0.00000009
5	0.0007917	0.00060278	0.00000007
6	-0.0007417	0.00093056	0.00000034
7	0.0004750	0.00028611	0.00000000
8	0.0006750	0.00048611	0.00000002
9	0.0002889	0.00010000	0.00000006
10	0.0001889	0.00000000	0.00000012
11	0.0010000	0.00081111	0.00000022
12	0.0003889	0.00020000	0.00000002
13	-0.0002333	0.00042222	0.00000001
14	-0.0001417	0.00033056	0.00000000
15	-0.0001083	0.00029722	0.00000000
	Total	0.00516111	0.00000100
$\bar{e}_1 = 0.00018889 \quad \bar{d}_1 = \frac{0.00516111}{15} = 0.00034407 \quad n_1 = 15$			

ตารางที่ 4.19 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 2			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	0.0003667	0.00010833	0.00000002
2	-0.0001000	0.00035833	0.00000000
3	0.0003083	0.00005000	0.00000008
4	0.0004417	0.00018333	0.00000002
5	0.0000917	0.00016667	0.00000003
6	0.0002583	0.00000000	0.00000011
7	0.0003750	0.00011667	0.00000005
8	-0.0004250	0.00068333	0.00000012
9	-0.0005111	0.00076944	0.00000019
10	-0.0004111	0.00066944	0.00000011
11	-0.0005000	0.00075833	0.00000018
12	0.0004889	0.00023056	0.00000001
13	-0.0003333	0.00059167	0.00000007
14	0.0005583	0.00030000	0.00000000
15	0.0002917	0.00003333	0.00000009
	Total	0.00501944	0.00000109
$\bar{e}_1 = 0.00025833 \quad \bar{d}_2 = \frac{0.00501944}{15} = 0.00033463 \quad n_1 = 15$			

ตารางที่ 4.20 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 3

กลุ่มที่ 3			
ลำดับที่	Residual (e_{11})	(d_{11})	($d_{11} - d_1$) ²
1	-0.0001333	0.00020833	0.00000000
2	-0.0004000	0.00005833	0.00000003
3	-0.0010917	0.00075000	0.00000027
4	-0.0006583	0.00031667	0.00000001
5	-0.0006083	0.00026667	0.00000000
6	0.0000583	0.00040000	0.00000003
7	-0.0004250	0.00008333	0.00000002
8	-0.0005250	0.00018333	0.00000000
9	-0.0003111	0.00003056	0.00000004
10	-0.0002111	0.00013056	0.00000001
11	0.0000000	0.00034167	0.00000001
12	0.0000889	0.00043056	0.00000004
13	-0.0001333	0.00020833	0.00000000
14	-0.0034167	0.00310556	0.00000510
15	0.0059167	0.00622778	0.00002895
	Total	0.01271111	0.00003901
$\bar{e}_1 = 0.00034167$ $\bar{d}_3 = \frac{0.01271111}{15} = 0.00084741$ $n_1 = 15$			

นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.2

$$\tilde{e}_1 = \frac{0.00000006}{45-2}$$

$$s = 0.00024743$$

นำค่า s ไปแทนลงในสมการ 4.1

$$t_{BF} = \frac{0.00034407 - 0.00033463 - 0.00023178}{0.00024743 \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{1}{15} + \frac{1}{15}}}$$

$$= 2.00927$$

จากการตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนของส่วนตกค้างที่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว ของขนาดของชิ้นงานด้วยวิธี Brown-Forsythe test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 2.00927 จากตารางใน Percentiles of the t distribution ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ค่า $t(0.975,45) = 2.018$ ซึ่งจากการคำนวณได้ว่า $|t_{BF}^*| \leq 2.018$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของส่วนตกค้างของการทดลองนี้มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว

ตารางที่ 4.21 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวของชิ้นงานกลุ่มที่ 1

กลุ่มที่ 1			
ลำดับที่	Residual (e_n)	(d_n)	($d_n - d_1$) ²
1	0.0093333	0.01562500	0.00003950
2	-0.0162500	0.00995833	0.00000038
3	-0.0027083	0.00358333	0.00003314
4	-0.0120417	0.00575000	0.00001289
5	0.0021250	0.00841667	0.00000085
6	0.0057917	0.01208333	0.00000753
7	-0.0197917	0.01350000	0.00001731
8	-0.0064583	0.00016667	0.00008415
9	-0.0072222	0.00093056	0.00007072
10	-0.0112222	0.00493056	0.00001944
11	-0.0080833	0.00179167	0.00005697
12	0.0187778	0.02506944	0.00024742
13	0.0253333	0.03162500	0.00049663
14	0.0003750	0.00666667	0.00000715
15	-0.0062917	0.00000000	0.00008723
	Total	0.14009722	0.00118130
$\bar{e}_1 = -0.00629167$ $\bar{d}_1 = \frac{0.14009722}{15} = 0.00933981$ $n_1 = 15$			

ตารางที่ 4.22 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวของชิ้นงานกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 2			
ลำดับที่	Residual (e_{ii})	(d_{ii})	($d_{ii} - d_1$) ²
1	-0.0246667	0.02720833	0.00060844
2	0.0337500	0.03120833	0.00020805
3	0.0182917	0.01575000	0.00000107
4	-0.0030417	0.00558333	0.00012546
5	0.0091250	0.00658333	0.00010406
6	0.0267917	0.02425000	0.00005574
7	-0.0227917	0.02533333	0.00007309
8	0.0025417	0.00000000	0.00028171
9	-0.0112222	0.01376389	0.00000912
10	-0.0162222	0.01876389	0.00000392
11	-0.0270833	0.02962500	0.00016488
12	0.0207778	0.01823611	0.00000211
13	0.0103333	0.00779167	0.00008087
14	0.0033750	0.00083333	0.00025443
15	-0.0242917	0.02683333	0.00010098
	Total	0.25176389	0.00207394
$\tilde{e}_1 = 0.00254167 \quad \bar{d}_2 = \frac{0.25176389}{15} = 0.01678426 \quad n_1 = 15$			

ตารางที่ 4.23 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวของชิ้นงานกลุ่มที่ 3

กลุ่มที่ 3			
ลำดับที่	Residual (e_{1i})	(d_{1i})	($d_{1i} - d_1$) ²
1	-0.0406667	0.04020833	0.00050683
2	0.0317500	0.03220833	0.00021063
3	0.0292917	0.02975000	0.00014531
4	0.0039583	0.00441667	0.00017632
5	-0.0068750	0.00641667	0.00012721
6	0.0277917	0.02825000	0.00011140
7	-0.0177917	0.01733333	0.00000013
8	-0.0004583	0.00000000	0.00031313
9	-0.0142222	0.01376389	0.00001546
10	-0.0082222	0.00776389	0.00009863
11	-0.0140833	0.01362500	0.00001657
12	0.0287778	0.02923611	0.00013319
13	0.0203333	0.02079167	0.00000959
14	0.0073750	0.00783333	0.00009726
15	-0.0142917	0.01383333	0.00001492
	Total	0.26543056	0.00197657
$\bar{e}_1 = -0.00045833$ $\bar{d}_3 = \frac{0.26543056}{15} = 0.01769537$ $n_1 = 15$			

นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.2

$$S^2 = \frac{0.00012167}{45-2}$$

$$S = 0.01103042$$

นำค่า S ไปแทนลงในสมการ 4.1

$$t_{BF} = \frac{0.00933981 - 0.01678426 - 0.01769537}{0.01103042 \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{1}{15} + \frac{1}{15}}}$$

$$= 5.09630$$

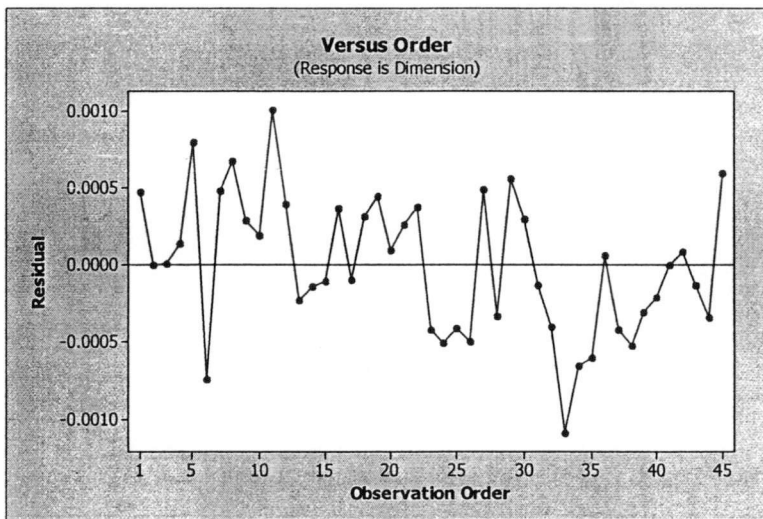
จากการตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนของส่วนตกค้างที่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว ของความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยวิธี Brown-Forsythe test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 5.09630 จากตารางใน Percentiles of the t distribution ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ค่า $t(0.975, 45) = 2.018$ ซึ่งจากการคำนวณได้ว่า $|t_{BF}^*| \geq 2.018$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของส่วนตกค้างของการทดลองนี้ไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว

4.3.2.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

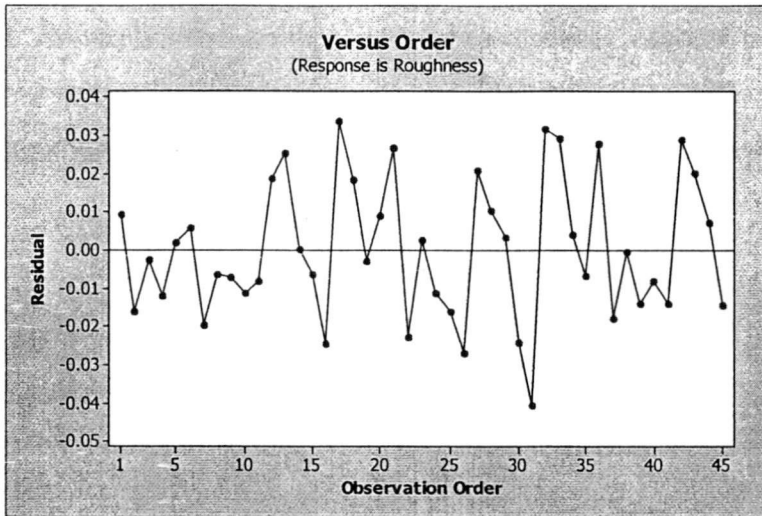
เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

จากรูปที่ 4.19 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 4.20 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิวกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.19 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.20 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3

4.2.1.3.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล โดยใช้วิธีการตรวจสอบความเป็นอิสระของ Durbin-Watson test โดยตั้งสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

$H_0 : \rho = 0$ ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ

$H_a : \rho > 0$ ส่วนตกค้างไม่มีความเป็นอิสระ

จากสมการที่ 4.6

$$D = \frac{\sum_{t=1}^n 2(e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

D = ค่า Durbin-Watson test

e_t = ส่วนตกค้างที่ลำดับการทดลองที่ t

ตารางที่ 4.24 การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของขนาดชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_i - e_{i-1}$	$(e_i - e_{i-1})^2$	e_i^2
1	0.0004667	-	-	0.00000000
2	0.0000000	-0.00046667	0.00000022	0.00000000
3	0.0000083	0.00000833	0.00000000	0.00000000
4	0.0001417	0.00013333	0.00000002	0.00000002
5	0.0007917	0.00065000	0.00000042	0.00000063
6	-0.0007417	-0.00153333	0.00000235	0.00000055
7	0.0004750	0.00121667	0.00000148	0.00000023
8	0.0006750	0.00020000	0.00000004	0.00000046
9	0.0002889	-0.00038611	0.00000015	0.00000008
10	0.0001889	-0.00010000	0.00000001	0.00000004
11	0.0010000	0.00081111	0.00000066	0.00000100
12	0.0003889	-0.00061111	0.00000037	0.00000015
13	-0.0002333	-0.00062222	0.00000039	0.00000005
14	-0.0001417	0.00009167	0.00000001	0.00000002
15	-0.0001083	0.00003333	0.00000000	0.00000001
16	0.0003667	0.00047500	0.00000023	0.00000013
17	-0.0001000	-0.00046667	0.00000022	0.00000001
18	0.0003083	0.00040833	0.00000017	0.00000010
19	0.0004417	0.00013333	0.00000002	0.00000020
20	0.0000917	-0.00035000	0.00000012	0.00000001
21	0.0002583	0.00016667	0.00000003	0.00000007
22	0.0003750	0.00011667	0.00000001	0.00000014
23	-0.0004250	-0.00080000	0.00000064	0.00000018
24	-0.0005111	-0.00008611	0.00000001	0.00000026
25	-0.0004111	0.00010000	0.00000001	0.00000017
26	-0.0005000	-0.00008889	0.00000001	0.00000025
27	0.0004889	0.00098889	0.00000098	0.00000024
28	-0.0003333	-0.00082222	0.00000068	0.00000011
29	0.0005583	0.00089167	0.00000080	0.00000031
30	0.0002917	-0.00026667	0.00000007	0.00000009

ตารางที่ 4.24 (ต่อ) การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของขนาดชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_t - e_{t-1}$	$(e_t - e_{t-1})^2$	e_t^2
31	-0.0001333	-0.00042500	0.00000018	0.00000002
32	-0.0004000	-0.00026667	0.00000007	0.00000016
33	-0.0010917	-0.00069167	0.00000048	0.00000119
34	-0.0006583	0.00043333	0.00000019	0.00000043
35	-0.0006083	0.00005000	0.00000000	0.00000037
36	0.0000583	0.00066667	0.00000044	0.00000000
37	-0.0004250	-0.00048333	0.00000023	0.00000018
38	-0.0005250	-0.00010000	0.00000001	0.00000028
39	-0.0003111	0.00021389	0.00000005	0.00000010
40	-0.0002111	0.00010000	0.00000001	0.00000004
41	0.0000000	0.00021111	0.00000004	0.00000000
42	0.0000889	0.00008889	0.00000001	0.00000001
43	-0.0001333	-0.00022222	0.00000005	0.00000002
44	-0.0034167	-0.00328333	0.00001078	0.00001167
45	0.0059167	0.00933333	0.00008711	0.00003501
Total	0.00010975	0.00005497		

แทนค่าในสมการ 4.6

$$D = \frac{0.00010975}{0.00005497}$$

$$D = 1.996$$

จากการคำนวณความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงานด้วยวิธีของ Durbin-Watson test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.996 จากตาราง Durbin-Watson ที่ $n = 45$, $k = 3$ ได้ค่า $d_L = 1.383$, $d_U = 1.666$ โดยถ้า $D > d_U$ จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0), ถ้า $D < d_L$ จะยอมรับสมมติฐานรอง (H_2), และถ้า $d_L < D < d_U$ จะไม่สามารถทำการสรุปผลได้ ซึ่งค่า D ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าอยู่ระหว่าง d_L D d_U จึงยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือส่วนตกค้างสำหรับการทดลองขนาดของชิ้นงานมีความเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.25 การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของความหยาบผิวชั้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_t - e_{t-1}$	$(e_t - e_{t-1})^2$	e_t^2
1	0.0093333	-	-	0.00008711
2	-0.0162500	-0.02558333	0.00065451	0.00026406
3	-0.0027083	0.01354167	0.00018338	0.00000734
4	-0.0120417	-0.00933333	0.00008711	0.00014500
5	-0.0021250	0.01416667	0.00020069	0.00000452
6	0.0057917	0.00366667	0.00001344	0.00003354
7	-0.0197917	-0.02558333	0.00065451	0.00039171
8	-0.0064583	0.01333333	0.00017778	0.00004171
9	-0.0072222	-0.00076389	0.00000058	0.00005216
10	-0.0112222	-0.00400000	0.00001600	0.00012594
11	-0.0080833	0.00313889	0.00000985	0.00006534
12	0.0187778	0.02686111	0.00072152	0.00035260
13	0.0253333	0.00655556	0.00004298	0.00064178
14	0.0003750	-0.02495833	0.00062292	0.00000014
15	-0.0062917	-0.00666667	0.00004444	0.00003959
16	-0.0246667	-0.01837500	0.00033764	0.00060844
17	0.0337500	0.05841667	0.00341251	0.00113906
18	0.0182917	-0.01545833	0.00023896	0.00033459
19	-0.0030417	-0.02133333	0.00045511	0.00000925
21	0.0267917	0.01766667	0.00031211	0.00071779
22	-0.0227917	-0.04958333	0.00245851	0.00051946
23	0.0025417	0.02533333	0.00064178	0.00000646
24	-0.0112222	-0.01376389	0.00018944	0.00012594
25	-0.0162222	-0.00500000	0.00002500	0.00026316
26	-0.0270833	-0.01086111	0.00011796	0.00073351
27	0.0207778	0.04786111	0.00229069	0.00043172

ตารางที่ 4.25 (ต่อ) การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของความหยาบผิวชั้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_i - e_{i-1}$	$(e_i - e_{i-1})^2$	e_i^2
28	0.0103333	-0.01044444	0.00010909	0.00010678
29	0.0033750	-0.00695833	0.00004842	0.00001139
30	-0.0242917	-0.02766667	0.00076544	0.00059009
31	-0.0406667	-0.01637500	0.00026814	0.00165378
32	0.0317500	0.07241667	0.00524417	0.00100806
33	0.0292917	-0.00245833	0.00000604	0.00085800
34	0.0039583	-0.02533333	0.00064178	0.00001567
35	-0.0068750	-0.01083333	0.00011736	0.00004727
36	0.0277917	0.03466667	0.00120178	0.00077238
37	-0.0177917	-0.04558333	0.00207784	0.00031654
38	-0.0004583	0.01733333	0.00030044	0.00000021
39	-0.0142222	-0.01376389	0.00018944	0.00020227
40	-0.0082222	0.00600000	0.00003600	0.00006760
41	-0.0140833	-0.00586111	0.00003435	0.00019834
42	0.0287778	0.04286111	0.00183707	0.00082816
43	0.0203333	-0.00844444	0.00007131	0.00041344
44	0.0073750	-0.01295833	0.00016792	0.00005439
45	-0.0142917	-0.02166667	0.00046944	0.00020425
Total	0.02764350	0.01457381		

แทนค่าในสมการ 4.6

$$D = \frac{0.02764350}{0.01457381}$$

$$D = 1.897$$

จากการคำนวณความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของความหยาบผิวชั้นงาน ด้วยวิธีของ Durbin-Watson test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.897 จากตาราง Durbin-Watson ที่ $n = 45$, $k = 3$ ได้ค่า $d_L = 1.383$, $d_U = 1.666$ โดยถ้า $D > d_U$ จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0), ถ้า $D < d_L$ จะยอมรับสมมติฐานรอง (H_a), และถ้า $d_L < D < d_U$ จะไม่สามารถทำการสรุปผลได้ ซึ่งค่า D ที่ได้จากการทดลองนี้

มีค่ามากกว่า D_u จึงยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือส่วนตักข้างสำหรับการทดลองขนาดของชิ้นงาน มีความเป็นอิสระต่อกัน

4.3.3 การหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองแบบ Response Surface Methodology

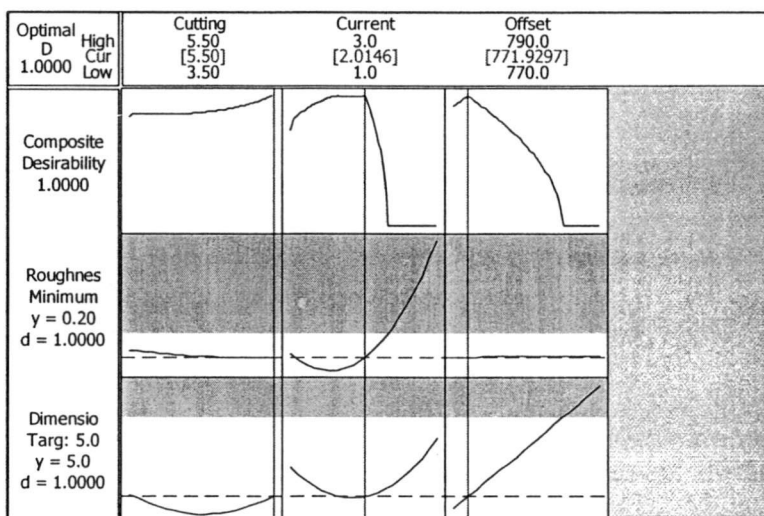
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขของการตัดที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุดของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ซึ่งมีเป้าหมายในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 สำหรับการศึกษาี้คือ

1. ขนาดของชิ้นงาน เท่ากับ 5.000 ± 0.002 mm.
2. ความหยาบผิวของชิ้นงานสูงสุด เท่ากับ 0.300 μ m.

โดยการกำหนดเป้าหมายค่าขนาดของชิ้นงานเป็นแบบ Target และเป้าหมายของความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นแบบยิ่งน้อยยิ่งดี (Minimum) ดังแสดงในตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.26 การกำหนดค่าเป้าหมายของการตัด

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Roughness	Minimum	0.2	0.2	0.3	1	1
Dimension	Target	4.998	5	5.002	1	1



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด

ซึ่งให้ค่าของตัวแปรการตัดที่เหมาะสมของดังนี้

ความเร็วในการตัดชิ้นงาน CS เท่ากับ 5.5 mm/min

กระแสที่ใช้ในการตัด IP เท่ากับ 2.01460 A

ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน Offset เท่ากับ 771.930 μm

เมื่อใช้เงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ ไปทำการตัดทดสอบเพื่อยืนยันผลการศึกษา ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.27 และผลจากการทดลองของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ในกรณีนี้พบว่าค่าความหยาบผิว และขนาดของชิ้นงานมีค่าที่สอดคล้องกับค่าพิสัยความเผื่อ (Tolerance) ตามที่กำหนด

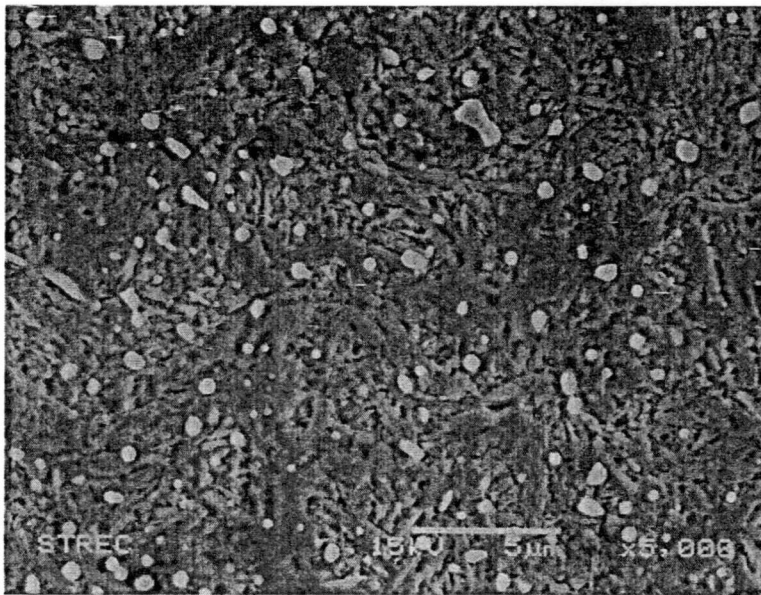
ตารางที่ 4.27 ตารางผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน

No.	Dimension (mm.)	Roughness ($\mu\text{m}.$)
1	5.0006	0.1810
2	5.0008	0.1900
3	5.0011	0.2020
4	5.0011	0.2150
5	5.0011	0.1900
6	5.0008	0.2000
7	5.0012	0.1950
8	5.0008	0.2020
9	5.0010	0.1880
10	5.0006	0.1950

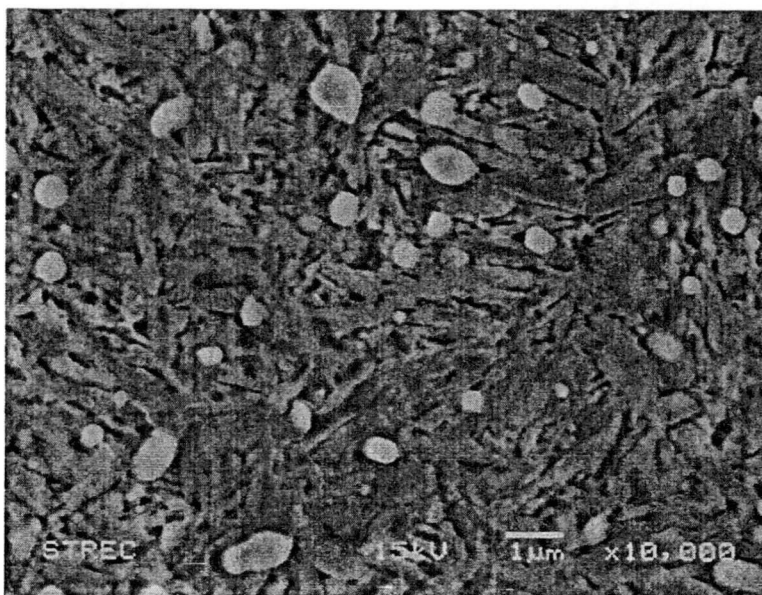
4.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ที่ผ่านการตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ จะถูกนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM เพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ก่อนทำการตัด ซึ่งจากการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบปรากฏว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากการตัดด้วยวิธี EDM ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ เนื่องจากการตัดด้วยวิธี Wire-EDM เป็นการตัดที่ใช้พลังงานในการตัดไปเฉพาะที่หรือเฉพาะจุด ทำให้เกิดความเสียหายหรือการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยากับส่วน

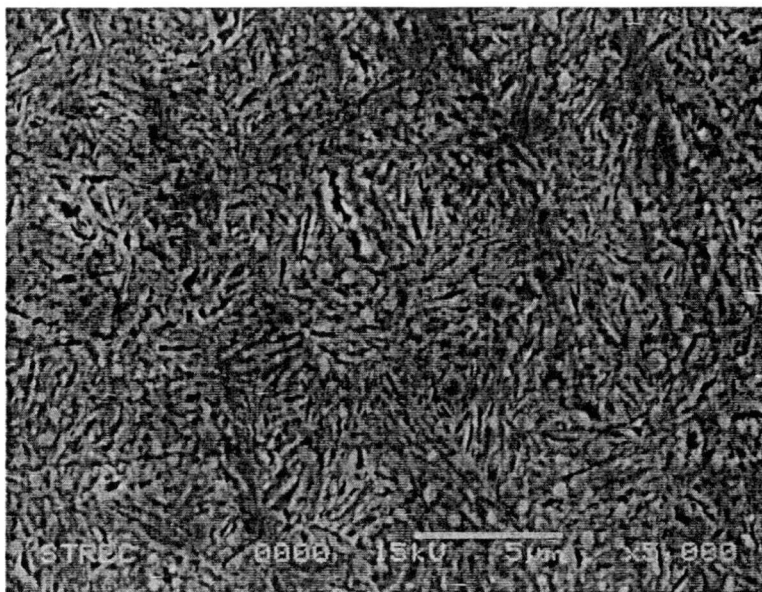
ใกล้เคียงน้อยมาก จึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 หลังจากการตัดด้วยวิธี Wire-EDM รูปที่ 4.21 – 4.22 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ก่อนการตัด และรูปที่ 4.23 – 4.24 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 หลังจากการตัดด้วยวิธี Wire-EDM



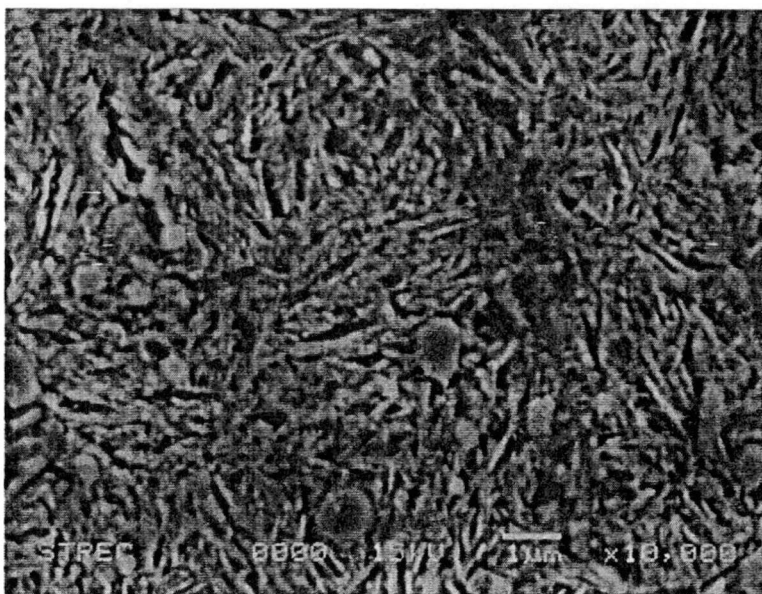
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วย Wire EDM เป็นระบบที่มีความซับซ้อนมาก จึงทำให้เกิดปัญหาในการปรับตั้งตัวแปรการตัด และหาค่าที่เหมาะสมในการตัดชิ้นงาน ในขณะที่ตัวแปรตอบสนอง เช่น ขนาดและคุณภาพผิวชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการนำไปผลิตชิ้นงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงๆ ผลิตเป็นจำนวนมากๆ เช่น ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ในการผลิตและประกอบนาฬิกา ในงานวิจัยนี้ได้การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดที่มีต่อขนาดความหยาบผิวและการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดใหม่ที่ใช้การทำเป็นแม่พิมพ์สำหรับการผลิตชิ้นส่วนโลหะที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง ในการศึกษาได้ทำการออกแบบการทดลอง โดยทำการหาค่าตัวแปรการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดและให้ขนาดใกล้เคียงที่ต้องการมากที่สุด ในการศึกษาได้ทำการศึกษากการตัดชิ้นงานแบบตัดละเอียดสองครั้ง โดยการตัดครั้งแรกศึกษาเฉพาะระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน และแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค จากการศึกษาโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 3^k full factorial design พบว่า ค่าของตัวแปรการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดและให้ขนาดของชิ้นงานใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด คือ เวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงานที่ $19 \mu\text{s}$ และ แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์คที่ 55 V สำหรับในการตัดละเอียดครั้งที่สองมีตัวแปรการตัดที่ศึกษา คือ ความเร็วในการตัด กระแสที่ใช้ในการตัด และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน ในการศึกษาโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design พบว่า ค่าของตัวแปรการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดและให้ขนาดของชิ้นงานใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด คือ ความเร็วในการตัดเท่ากับ 5.5 mm/min กระแสที่ใช้ในการตัด เท่ากับ 2.0 A และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานเท่ากับ $9 \mu\text{m}$ ในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดในโครงการวิจัยนี้พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดนี้

บรรณานุกรม

- [1] ทวีป จีระประดิษฐ์. “การศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็ม.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณนนทบุรี. 2538.
- [2] ประสพ อนุชาติ. “การศึกษาเปรียบเทียบผลของการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดระหว่างกรณีที่มีช่วงค่าพัลส์คงที่และกรณีที่มีการปรับโดยอัตโนมัติ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณนนทบุรี. 2539
- [3] สมจิตร ลากโนนเขวา. “ทำการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขของการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณนนทบุรี. 2543
- [4] วีระศักดิ์ บุตรเดือน. “การศึกษาลักษณะของเศษจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบการอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณนนทบุรี. 2544
- [5] บุญธรรม ลิ้มปิยพันธ์. “การศึกษาเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแบบอีดีเอ็ม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบการอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณนนทบุรี. 2544
- [6] ณรงค์สร ศรีอบเชย. “การศึกษาและหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือตีซี 53.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550
- [7] Huang J.T. and Hsue W.J. “Determination of finish-cutting operation number and machining parameters setting in wire electrical discharge machining.” *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 87, 1999. pp. 69-81.
- [8] Liao Y.S. and Chang C.C. “A neural network approach for the on-line estimation of workpiece height in WEDM.” *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 121, 2002. pp 252-258.
- [9] Alp Mithat Ozanozgu “Experimental investigation of effects of cutting parameters on surface roughness in the WEDM process.” *International Journal of Machine Tools & Manufacture.*, vol. 40, 2000. pp.1831- 1848.
- [10] Can Cogun “An investigation on wire wear in WEDM.” *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 134, 2003. pp. 273-278.

- [11] Bhattacharyya B. "An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* ., vol. 43, 2003. pp. 151-159.
- [12] Ulas Caydas "Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 148, 2004. pp.362-367.
- [13] Can Cogun and Gul Tosun "A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 152, 2004. pp. 316-322.
- [14] Spedding T.A. and Wang Z.Q. "Study on modeling of wire EDM process." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 69, 1997. pp. 18-28.
- [15] Mitra S. and Bhattacharyya B. "Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 159, 2005. pp. 286-294.
- [16] Shajan Kuriakose "Multi-objective optimization of wire-electro discharge machining process by Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 170, 2005. pp. 133-141.
- [17] Hewidy M.S. and El-Safty M.F. "Modelling the machining parameters of wire electrical discharge machining of Inconel 601 using RSM." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 169, 2005. pp. 328-336
- [18] Fu-Ping Chang "Optimization of the WEDM process of particle-reinforced material with multiple performance characteristics using grey relational analysis." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 180, 2006. pp. 96-101.
- [19] Rodil J.L., A. Herrero A., Lopez de Lacalle L.N., and Lamikiz A. "On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 182, 2007. 574-579.
- [20] Kanlayasiri K., and Boonmung S. "Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC 53 die steel: Design of experiments and regression model." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 192-193, 2007. pp. 459-464.
- [21] Karunamoorthy L. "Modeling and multi-response optimization of Inconel 718 on machining of CNC WEDM process." *Journal of Materials Processing Technology*., vol. 207, 2008. pp. 343-349.

- [22] Sekh M., Mitra S., and Bhattacharyya B. "Modeling and optimization of wire electrical discharge machining of α -TiAl in trim cutting operation." *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 205, 2008. pp. 376-387.
- [23] Dinesh Rakwal "Experimental investigation of wire electrical discharge machining of gallium-doped germanium." *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 197, 2008. pp. 419-427.
- [24] Alireza Fadaei Tehrani "Investigation of cylindrical wire electrical discharge turning (CWEDT) of AISI D3 tool steel based on statistical analysis." *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 198, 2008. pp. 77-85.
- [25] Alireza Fadaei Tehrani, Ehsan Emanian and Davoud Karimi "Statistical analysis of wire electrical discharge turning on material removal rate." *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 205, 2008. pp. 283-289.
- [26] Marcos M., Cabanes I., and Zubizarreta A. "Recurrent ANN for monitoring degraded behaviours in a range of workpiece thicknesses." *Engineering Applications of Artificial Intelligence.*, vol. 22, 2009. 1270-1283
- [27] Stanislaw Zaborski "Semi-empirical model of efficiency of wire electrical discharge machining of hard-to-machine materials." *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 209, 2009. pp.1247-1253
- [28] Arlindo Araujo "Influence of workpiece hardness on EDM performance." *International Journal of Machine Tools & Manufacture.*, vol. 49, 2009. pp. 744-748.
- [29] S.K. Choudhury S.K. "Experimental investigation and empirical modeling of the dry electric discharge machining process." *International Journal of Machine Tools & Manufacture.*, vol. 49, 2009. pp. 297-308.
- [30] Che-Chung Wang, Lieh-Dai Yang, and Chun-Te Lu "Recast layer removal after electrical discharge machining via Taguchi analysis: A feasibility study." *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 209, 2009. pp. 4134-4140.
- [31] นิวัฒน์ มูเก็ม การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นรองทองแดงเนื่องจากการบ่มด้วยความร้อน วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
- [32] Agie cut Agie vision 5 Equipment manual C Wire-cut EDM 2006.
- [33] Agie Charmilles user manual AT Spirit 2006.
- [34] Agie Agie drill Equipment manual C manual Drill-EDM 2006.

- [35] Agie Charmilles Operating manual Machining center VCE Pro / VCE Pro-X
- [36] ปารเมศ ชูติมา “การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร, 2545.
- [37] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. “การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์การ ทดลอง”. สำนักพิมพ์ท็อป. กรุงเทพมหานคร 2551.
- [38] Douglas C.Montgomery. International student Version. Seventh Edition. Design and Analysis of Experiments. 2009.
- [39] Verlag Europa-Lehrmittel. Nourney, Vollmer Gmbh & Co.KG สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี. แปลและเรียบเรียงโดย รศ.บรรเลง ศรีนิต และ รศ.สมนึก วัฒนศรียกุล. ตารางงานโลหะ. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
- [40] William F.Smith and Javad Hashemi, แปลและเรียบเรียงโดย รศ.แม่น อมรสิทธิ์, รศ.ดร. สมชัย อัครทิวา และ อ.ธรรมนุญ อุคมนัน. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล. 2551.
- [41] William D. Callister, Jr. แปลและเรียบเรียงโดย สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ. กรุงเทพฯ: วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด 2548