

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยของ ทวีป จีระประดิษฐ์ ได้ศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็มโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) และสร้างสมการ โท โคนัล โพลีโนเมียลของอัตราการตัดเนื้อวัสดุ อัตราการสึกหรอ ความหยาบผิว และโอเวอร์คัต ซึ่งมีตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปรคือ กระแสในการตัด เซอร์โว โวลต์เทจ และช่วงพัลส์ ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าเมื่อมีกระแสเพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อการเพิ่มของอัตราการตัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ โอเวอร์คัต และความหยาบผิวลดลง แต่โอเวอร์คัตเพิ่มขึ้นที่เซอร์โวระดับ 4 จะให้อัตราการตัดเนื้อโลหะและ โอเวอร์คัตที่สูง แต่ที่เซอร์โวระดับ 2 และ 4 จะให้อัตราการสึกหรอลดลง แต่ความหยาบของผิวงานเพิ่มขึ้น [1]

ในงานวิจัยของ ประสพ อนุชาติ ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดระหว่างกรณีที่มีช่วงค่าพัลส์คงที่และกรณีที่มีการปรับ โดยอัตโนมัติ โดยการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล (Factorial Design) ซึ่งมีตัวแปรอยู่ 2 ตัวแปร คือ กระแส (Peak Current) และช่วงเวลาหยุดพัลส์ (Off time) จากผลการทดลองสรุปได้ว่ากรณีที่มีการปรับ โดยอัตโนมัติจะให้ผลการตัดที่กระทำได้นานต่อเนื่องและอายุการใช้งานของอิเล็กโทรดยาวนานกว่า โดยที่ความเร็วในการตัดจะลดลงประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ ความหยาบของผิวอยู่ในช่วง 18-20 μm และผลการทดลองทั้งหมดได้นำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดซึ่งมีรูปแบบเป็นสมการโพลีโนเมียลอันดับสอง เพื่อใช้ในการประมาณค่าความเร็วในการตัดและความหยาบของผิวงาน [2]

ในงานวิจัยของ สมจิตร ลาก โนนเนา ได้ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขของการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด โดยการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล (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 การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไว้โหลด จะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มอัตราการขาดของเส้นลวด อัตราการตัด และ ความหยาบของผิวงาน [3]

ในงานวิจัยของ วีระศักดิ์ บุตรเดือน ได้ศึกษาเงื่อนไขของการแปรรูปโลหะด้วยกรรมวิธีอีดีเอ็ม โดยการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล (Factorial Design) ซึ่งมีตัวแปรอยู่ 3 ตัวแปร คือ เวลาดีสชาร์จ กระแสดีสชาร์จ และ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานที่มีผลกระทบต่อ ความหยาบผิว อัตราการตัดเนื้อโลหะและ ขนาดของเศษ ผลจากการทดลองของอิเล็กโทรดทรงกระบอกพบว่า เมื่อเวลาดีสชาร์จเพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อการเพิ่มความหยาบผิว อัตราการตัดเนื้อโลหะ และ ขนาดของเศษ การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จจะมีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อโลหะและ ขนาดของเศษ การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะมีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อโลหะและขนาดของเศษสูงสุด แต่ความหยาบผิวมีผลกระทบเล็กน้อย สำหรับอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมเมื่อเวลาดีสชาร์จเพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อการเพิ่มความหยาบผิว อัตราการตัดเนื้อโลหะ และ ขนาดของเศษ การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จจะมีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อโลหะสูงสุดและขนาดของเศษมีผลกระทบน้อย การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะมีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อโลหะและขนาดของเศษ [4]

ในงานวิจัยของ บุญธรรม ลิมป์ปิยพันธ์ ได้ศึกษาเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแบบอีดีเอ็ม 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 จะให้อัตราการแปรรูปที่ดีในขณะที่อิเล็กโทรดทองแดงและทั้งสแตนจะให้อัตราการสึกหรอ และ ความหยาบผิวที่ต่ำ [5]

ในงานวิจัยของ ณรงค์สร ศรีอบเชย ได้ศึกษาและหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือดีซี 53 ด้วยกระบวนการตัดแบบเส้นลวดโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ Response Surface Methodology ที่เป็นการออกแบบส่วนประสมกลางที่หมุนได้ ภายใต้ตัวแปรคือระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน ระยะเวลาในการหยุดสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน ความตึงของเส้นลวด และ ความเร็วของเส้นลวด ผลจากการทดลองพบว่ากรณีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดจะได้ค่าความหยาบผิวเท่ากับ 2.4 μm และความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ 1.97 mm/min กรณีค่าความหยาบผิวมากที่สุดจะได้ค่าความหยาบผิวเท่ากับ 3.31 μm และความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ 3.45 mm/min ซึ่งผลลัพธ์ของทั้งสองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนในการทำน้อยกว่า 5% [6]

ในงานวิจัยของ Huang และคณะ ได้ศึกษาการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิง

เส้น (Non-linear) ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดแบบละเอียด (Finish-Cutting) ด้วยการใช้การสปาร์คด้วยเส้นลวด (WEDM) ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่จำเป็นกับกรรมวิธีนี้ได้แก่ เวลาหยุดและปล่อยพัลส์, อัตราการป้อน, แรงดันของน้ำที่ใส่เข้าไป, ระยะห่างระหว่างเส้นลวดและพื้นผิวชิ้นงาน และจากการทำงานของเครื่อง ซึ่งพบว่า ตัวแปรที่มีผลกับคุณภาพผิวของชิ้นงานที่สำเร็จที่พิจารณาจากความหยาบและความลึกของพื้นผิวงานในชั้น White layer ได้แก่ เวลาที่กระแสปล่อยและระยะห่างระหว่างขอบของเส้นลวดและผิวของชิ้นงาน 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 ที่มีกลไกการควบคุมแบบเดียวกันกับ Sodick Mark XI A500 EDW โดยใช้ความหนาของชิ้นงานและประเภทของวัสดุและสามารถเลือกตารางและผังอย่างง่าย ๆ เพื่อค้นหาค่าตัวแปรรวมกันที่เหมาะสมที่สุดสอดคล้องกับความหยาบของพื้นผิวที่ต้องการได้ [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 และความดันของของเหลวไดอิเล็กทริกถูกทดสอบว่ามีผลกระทบกับความหยาบผิวและโครงสร้างทางโลหะวิทยาโดยการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนและการตรวจสอบความแข็งแบบจุลภาค จากผลการทดลองพบว่าความรุนแรงของกระบวนการของพลังงานจะมีผลต่อการเปลี่ยนรูปใหม่ของชิ้นงาน ความหยาบผิวและการเกิดรอยร้าวแบบจุลภาค ซึ่งความเร็วของเส้นลวดและความดันของของเหลวไดอิเล็กทริกไม่มีอิทธิพลมากในการเปลี่ยนรูปของชิ้นงาน [12]

ในงานวิจัยของ Tosun และคณะได้ศึกษาในส่วนของความกว้างของรอยตัด (Kerf) และอัตราการตัดเนื้อวัสดุในกระบวนการตัดชิ้นงาน WEDM โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi experimental design method) แบบ Taguchi orthogonal array (L18) 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 (L_{18}) ซึ่งมีปัจจัยในการทดลองอยู่ 6 ปัจจัย และใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร ซึ่งผลที่ได้ คือ ความหยาบของพื้นผิว และ ความเบี่ยงเบนของขนาดนั้น เป็นอิสระจากเวลาหยุดของพัลส์ ลักษณะนี้เป็นลักษณะที่สำคัญมาก ภายใต้เวลาหยุดของพัลส์ ตามเงื่อนไขการขึ้นรูปที่สำคัญที่แตกต่างกันไปได้ตามความต้องการที่จะทำให้เกิดสเถียรภาพดีขึ้นและมีความแม่นยำมากขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำและพื้นผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ [15]

ในงานวิจัยของ Kuriakose ได้ศึกษาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ Multi-objective ของกระบวนการขึ้นรูปแบบตัดด้วยเส้นลวดโดยใช้อัลกอริทึม Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm โดยใช้ วิธีการออกแบบการทดลอง Factorial design บนพื้นฐานของ Taguchi orthogonal array (L_{18}) 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) หลังจากนั้นได้พัฒนาและสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีของสมการการถดถอย (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 ในการทำนายลักษณะของผลการทำงานอัน ได้แก่ อัตราการตัดเนื้อวัสดุและความหยาบของพื้นผิวนั้น รูปแบบของ Artificial neural network (ANN) ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยใช้ Back-propagation algorithms และใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงตัวแปรค่าต่าง ๆ ของทากูชิ การวิเคราะห์ความแปรปรวนหรือ ANOVA ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดลงไปถึงระดับความสำคัญของค่าของการขึ้นรูป ซึ่งสรุปได้ว่า รูปแบบ

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

ในงานวิจัยของ Sarkar และคณะได้ศึกษาการทำนายสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำมีกระบวนการตัดชิ้นงานด้วยวิธี 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) ในการส่องดูความหยาบและความเสียหายของผิวชิ้นงานซึ่งชิ้นงานตัวอย่างจะถูกกัดกร่อนและวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรมิเตอร์พลังงาน X-ray (EDS) และมีการทดสอบกับเส้นลวดขนาดเล็กเพื่อเพิ่มอัตราการเจือปนและพื้นผิว นอกจากนี้ยังทำการทดสอบขนาดกระแสสูงสุดที่ลวดแต่ละชนิดสามารถรับได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อผิวชิ้นงาน ซึ่งผลจากการทดลองที่ได้พบว่า สามารถใช้ Gallium ในกระบวนการ WEDM ได้โดยไม่ต้องเติมความสามารถในการนำไฟฟ้า (ไม่ต้องทำให้เป็น p-type) โดยอัตราการเจือปนจะขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้า, ปริมาตร รวมถึงชนิดและขนาดของลวด โดยขนาดของกระแสที่เหมาะสมกับลวดแต่ละชนิดจะต่างกันและหากปล่อยเกินกระแสสูงสุดที่ลวดแต่ละชนิดสามารถรับได้จะทำให้โดยที่ผิวชิ้นงานเกิดเป็นลิ้มเล็กๆ ลวดที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดความสูญเสียของรอยตัดน้อยกว่า ในขณะที่ลวดแบบอื่นๆจะอาจทำให้เกิดลิ้มเล็กๆเนื่องจากต้องให้กระแสที่สูงเพื่อต้องการอัตราการตัดที่สูง และการใช้ลวด Germanium แบบไม่ต้องเติมสิ่งเจือปนจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการแบบที่เติม Silicon [23]

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

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

ในงานวิจัยของ Mohammadi และคณะได้ใช้การออกแบบการทดลองโดยวิธีทากูชิ (แบบ $L_{18} 2^1 \times 3^7$ orthogonal array) ในการศึกษาการออกแบบแกนหมุนเพื่อให้มีความแม่นยำ, ยืดหยุ่น และ ทนต่อการสึกกร่อน โดยพิจารณาผลของ กำลังงาน, เวลาหยุดพัลส์, แรงดัน ไฟฟ้า, 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 เพื่อใช้ในการตรวจสอบล่วงหน้าถึงการเสียดของเครื่องมือตัดหรือเส้นเส้นลวดซึ่งเป็นการลดลงของประสิทธิภาพของกระบวนการและความแม่นยำที่ต้องการ 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 ของวัสดุที่ขึ้นรูปยากโดยการพัฒนารูปแบบของ Employing dimensional analysis และ Semi-empirical model ผลของการศึกษาพบว่าค่าความเหนียวนำความร้อนที่สูงขึ้นและกำลังของความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ขึ้นรูปนั้นก่อให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพของกระบวนการ WEDM และประสิทธิภาพของการตัดก็จะลดลงสำหรับวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า [27]

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

ในงานวิจัยของ Saha ได้ศึกษากระบวนการสปาร์คด้วยไฟฟ้าแบบแห้งโดยให้ฉนวนเหลวแทนที่ด้วยสื่อก๊าซ วิเคราะห์ค่าตัวแปรในกระบวนการนี้ทำได้ด้วยการใช้ท่อขั้วไฟฟ้าทองแดงและแผ่นเหล็กอ่อน การทดลองทำขึ้นด้วยการใช้อากาศเป็นสื่อกลางเพื่อศึกษาผลกระทบของช่องว่างแรงดันไฟฟ้า การปล่อยกระแส จังหวะเวลา อัตราส่วน แรงดันอากาศ และความเร็วของแรงหมุน โดยแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง ได้รับการพัฒนาด้วยการออกแบบการทดลองด้วยที่มีพื้นฐานมาจาก Central Composite Design ของการทดลอง และ Response Surface Analysis และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย (Analysis of variance) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าลักษณะการไหลของอากาศใน Inter-electrode ส่งผลต่อ MRR และ R_a การคงอยู่ของจำนวนช่องให้อากาศผ่านดีที่สุดในอุปกรณ์ที่ทำให้ได้ MRR สูงที่สุด และ R_a ต่ำที่สุดและจากการออกแบบชุดทดลองบน CCD พบว่า การปล่อยกระแสไฟฟ้า, Duty factor, แรงดันอากาศ และความเร็วของแกนหมุนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ MRR และ TWR และจะเพิ่มขึ้นหากปัจจัยเหล่านี้ ในค่าเฉลี่ยมีการเพิ่มขึ้นและ จากการทดลอง CCD พบว่า นอกจากความต่างของแรงดันไฟฟ้าแล้ว ตัวแปรอื่นๆ (การปล่อยกระแสไฟ, Pulse-on time, Duty factor, แรงดันอากาศ และความเร็วแกนหมุน) มีผลสำคัญต่อค่าความหยาบผิว R_a โดยค่า R_a ลดลงด้วยการลดลงของค่ากระแสไฟฟ้า และ Duty factor รวมทั้งค่า R_a ยังลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันอากาศ และความเร็วแกนหมุน [29]

ในงานวิจัยของ Wang และคณะได้ศึกษาและใช้การออกแบบการทดลองโดยวิธีทาคุชิแบบ L_{18} และ L_9 orthogonal array เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการตกแต่งชั้นผิวใหม่โดยใช้วัสดุ Ni-based super alloys หลังจากกระบวนการ EDM โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกทำ EDM ด้วยพลังงานขนาดใหญ่ซึ่งจะใช้ Taguchi L_{18} analytical method สำหรับ recast layer ที่หนานี้ ขั้นที่สองจะทำการตกแต่งส่วนที่เกิด recast แล้วใช้ Taguchi L_9 analytical method ในการวิเคราะห์คุณภาพ แล้วทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของ Ni-based superalloys เป็นขั้นตอนสุดท้าย ผลจากการทดลองดังกล่าวพบว่าไฟฟ้าบวกจะให้ชั้น recast ที่หนากว่าการใช้ไฟลบ และการลบชั้น recast ด้วยกรด Phosphoric และกรด Hydrochloric ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมจะมีอัตราการลบชั้น recast ที่เพิ่มขึ้นสำหรับวัสดุ Inconel 718 alloy และจากการใช้ การวิเคราะห์ EPMA พบว่าการใช้กรด Phosphoric และกรด Hydrochloric พิสูจน์ว่าสามารถลดคาร์บอนลงอย่างรวดเร็วในกระบวนการกัดกร่อน ซึ่งเมื่อทำการทดสอบ Micro-hardness พบว่ากรดทั้งสองจะมีผลต่อวัสดุในชั้น recast เท่านั้น โดยที่ชั้นวัสดุพื้นฐานจะไม่ได้ได้รับความเสียหายเลย ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ Taguchi นั้นจะช่วยให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพการทำงานที่ดี [30]

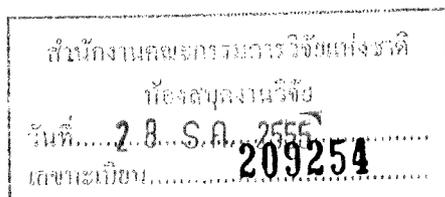
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

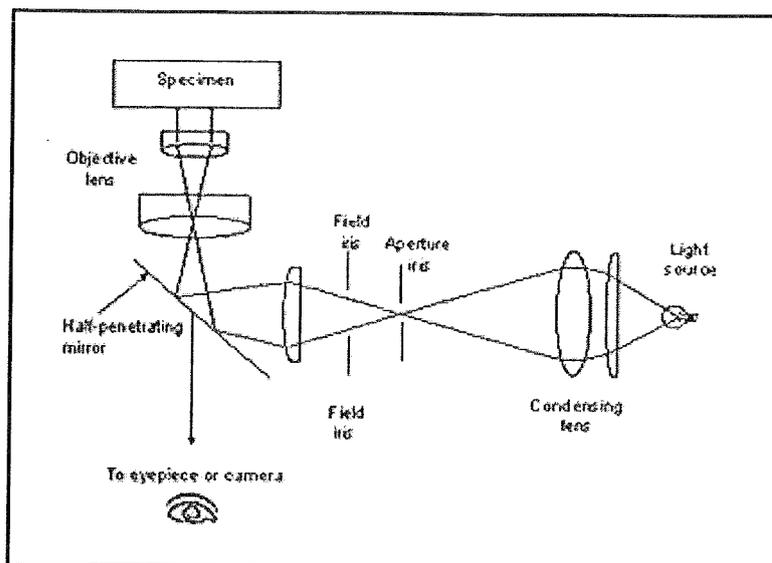
2.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

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

2.2.1.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสง สำหรับวัสดุที่บดแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และพอลิเมอร์บางชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกัน ในบริเวณต่างๆ การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนเรียบให้สะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากกัดด้วยสารเคมีและนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงจะมองเห็นโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเช่นนี้เพราะเกรนมีทิศทางที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนออกจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันหลังผ่านการกัดผิว โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนจะขึ้นอยู่กับการสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังการกัดผิวที่ขอบเกรนเกิดร่องขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรน โดยร่องขนาดเล็กนี้สามารถมองเห็นได้เนื่องจากการสะท้อนแสงที่แตกต่างจากบริเวณพื้นเกรน

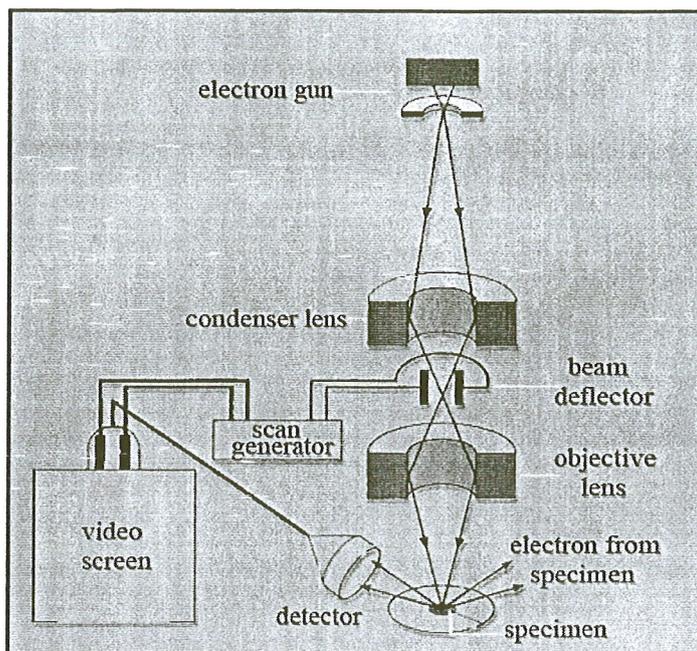




รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แสง

2.2.1.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

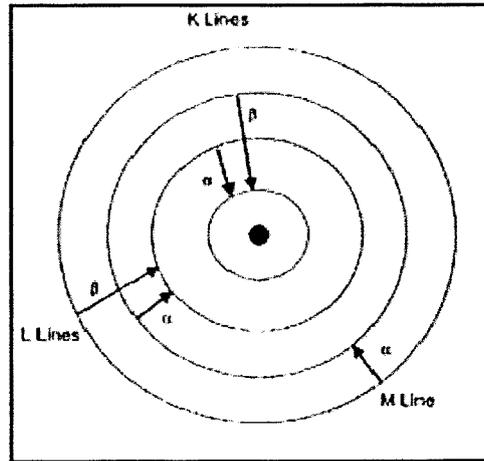
กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ซึ่งยิงลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนเป้าซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง จะรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic signals) ซึ่งปล่อยออกมา โดยชิ้นงานที่ใช้ทำเป็นเป้าไม่จำเป็นต้องผ่านการขัดผิว แต่จะต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ ถ้าวัสดุไม่นำไฟฟ้าจะต้องเคลือบผิวด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทองคำ หรือคาร์บอน รูปที่ 2.2 แสดงรายละเอียดและหลักการทำงาน โดยปืนอิเล็กตรอนจะผลิตลำอิเล็กตรอน (Electron beam) และควบคุมให้พุ่งมาตกกระทบบจุดเล็กๆ บนเป้าตัวอย่าง โดย Scanning coils จะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างลำอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็กๆ (Low-angle back-scattered electrons) จะทำอันตรกิริยากับส่วนที่นูนของพื้นผิว และทำให้เกิดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่สอง (Secondary back-scattered electrons) เพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดภาพสามารถขยายได้ถึง 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 สำหรับรังสีเอ็กซ์ คือ 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)

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

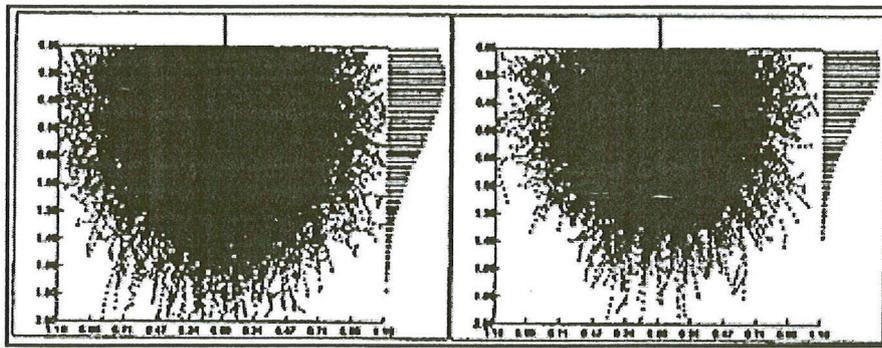
เมื่อ I คือ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่มากกระทบตัวอย่าง I_0 คือ ความเข้มเริ่มต้นของรังสีเอ็กซ์ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง และ x คือ ความหนาของวัสดุที่รังสีเอ็กซ์ผ่าน โดยปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับจะเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีเอ็กซ์ และคุณลักษณะเฉพาะทางเคมีของวัสดุ สำหรับอัตราการสูญเสียพลังงานของลำแสง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

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

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

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

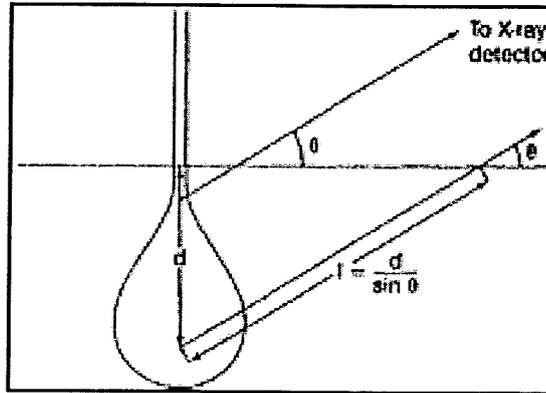
พลังงานจะอยู่ที่ประมาณ 7.48 keV และ L line ประมาณที่ 0.85 keV ถึงแม้ว่า Al K line มีพลังงานประมาณ 1.49 keV การเลือกพลังงานอิเล็กตรอนสำหรับการวิเคราะห์มีความเข้มข้นประมาณ 20 keV เมื่อลำอิเล็กตรอนแทรกซึมไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นรังสีเอ็กซ์ของ Ni K แต่สำหรับการกระตุ้น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



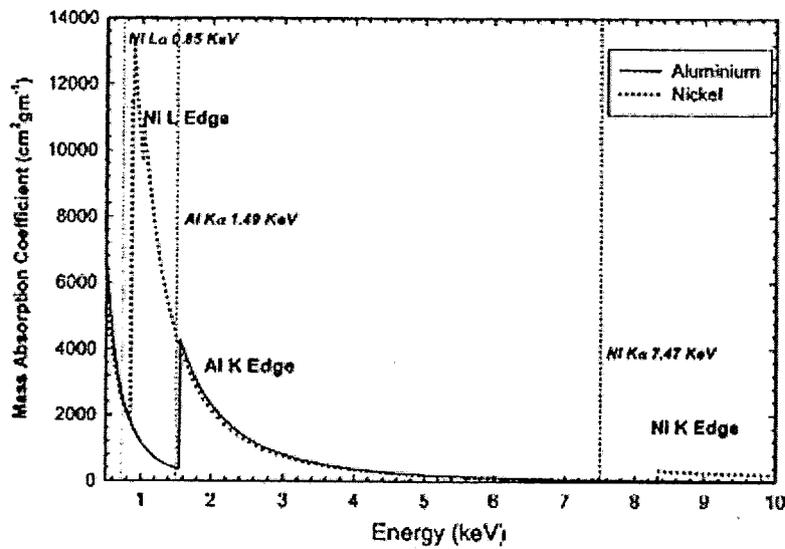
รูปที่ 2.4 แบบจำลองรังสีเอ็กซ์ของระดับพลังงานหลัก K ของ AL (ซ้าย) และ Ni (ขวา) ของ NiAl จากการทำให้ SEM ที่ 20 kV

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 เป็นสาเหตุให้การตรวจจ็บริังสีเอ็กซ์ทำมุม 40 องศา กับระนาบพิจารณาผลขณะรังสีเอ็กซ์ของ Al k_{α} เกิดที่ 1 μm ได้พื้นผิวและเริ่มเคลื่อนที่ไปสู่การตรวจจ็บริังสีเอ็กซ์เมื่อเปลี่ยนไปเป็น 1.6 μm



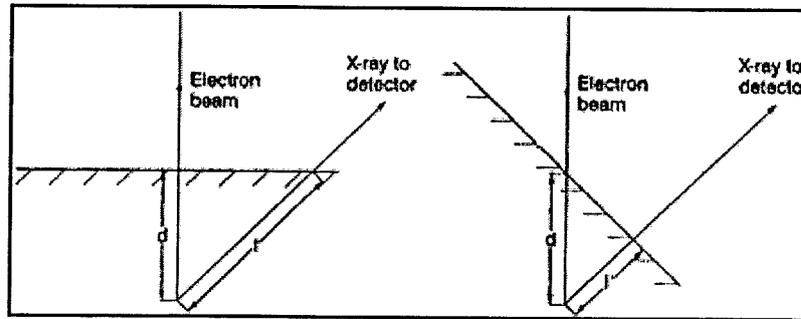
รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งปฏิกิริยาที่แตกต่างของการเกิดรังสีเอ็กซ์



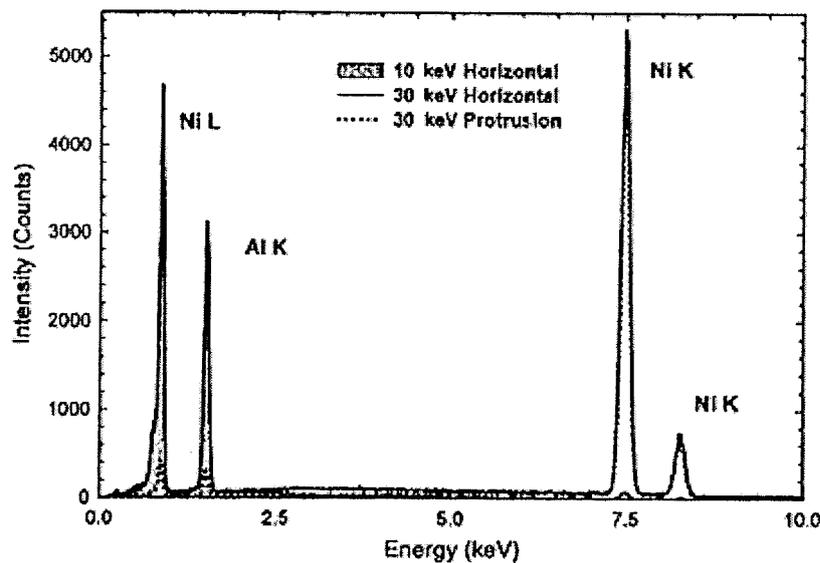
รูปที่ 2.6 ปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีเอ็กซ์ของ Ni และ Al ขณะเป็นฟังก์ชันของพลังงานรังสีเอ็กซ์

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

ตรวจจับ 17 เปอร์เซ็นต์ สำหรับบางจุดมีผลกระทบต่อ การดูชัดสำหรับพื้นผิวตัวอย่างที่มีลักษณะเอียง เพราะระยะความยาวของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นอยู่กับความเอียงของพื้นผิวแสดงได้ดังรูปที่ 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 ในปริมาณมากนั้นจะเป็นทิศทางการเคลื่อนที่สู่พื้นผิวตัวอย่างที่สะท้อนกลับ อย่างไรก็ตามรังสีเอ็กซ์ของ Ni K ที่ผ่านไปสู่ตัวอย่างก่อให้เกิดไอออนของ Al L หรือ Ni L และบางครั้งรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นโดยบังเอิญ (ผลที่ตามมาของรังสีเอ็กซ์ของ Ni K เป็นระยะห่างในตัวอย่างที่กว้าง) เพราะฉะนั้นมีผลทำให้ Ni L หรือ Al สูงในกรณีของรังสีเอ็กซ์ของ Al ถึงแม้ว่ามีความแตกต่าง จึงเป็นการดูดซับโดยเปรียบเทียบความเข้มข้น โดย Ni และมีในระยะเวลาที่สั้นเนื่องจากเปรียบเทียบกับความลึกที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์มีทุกทิศทางและมีทั่วทั้งตัวอย่างทำให้เกิดรังสีนำไปสู่การอธิบายในกระบวนการสเปกตรัม

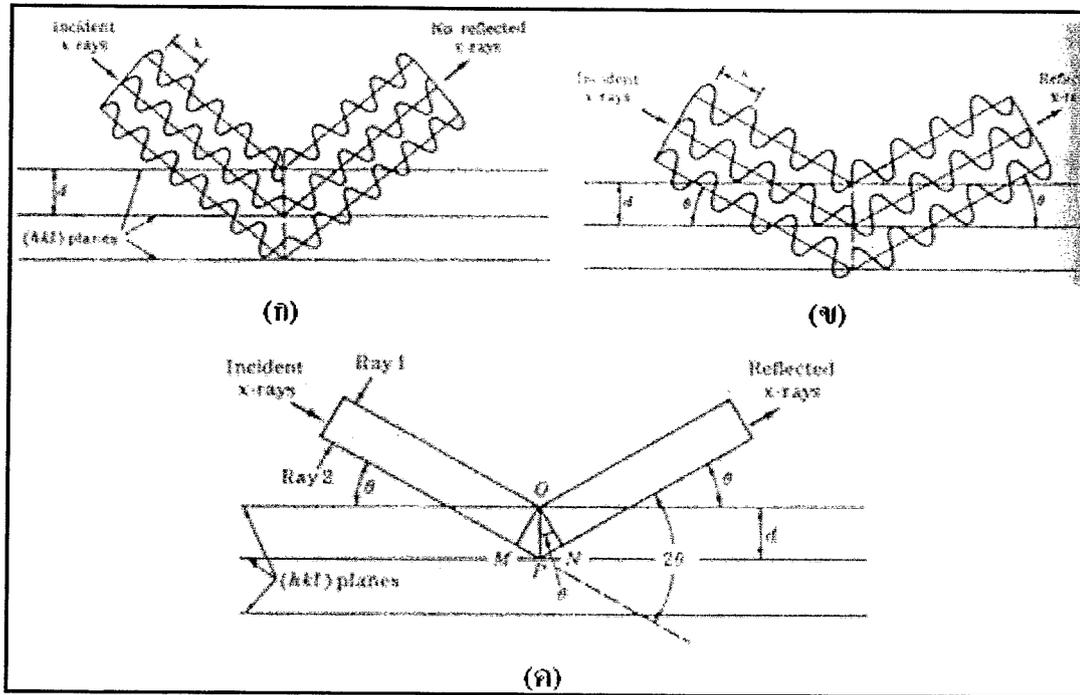
2.2.1.4 การวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

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)

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.4)$$

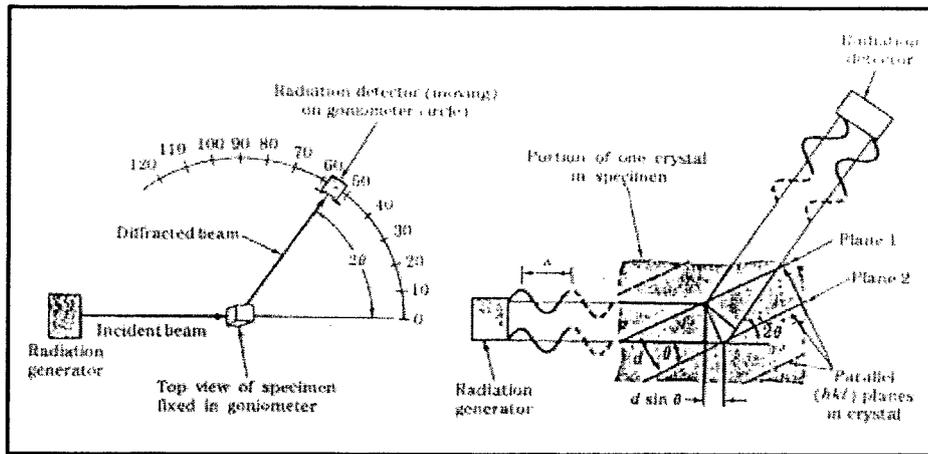


รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบผลึก (hkl) (ก) ไม่มีลำคลื่นเลี้ยวเบนปรากฏที่มุมตกกระทบที่กำหนด (ข) ที่มุมของแบรกก์ θ รังสีสะท้อนมีเฟสตรงกันและมีการเสริมซึ่งกันและกัน (ค) มีลักษณะคล้ายกับรูป (ข) แต่ไม่แสดงรูปคลื่น

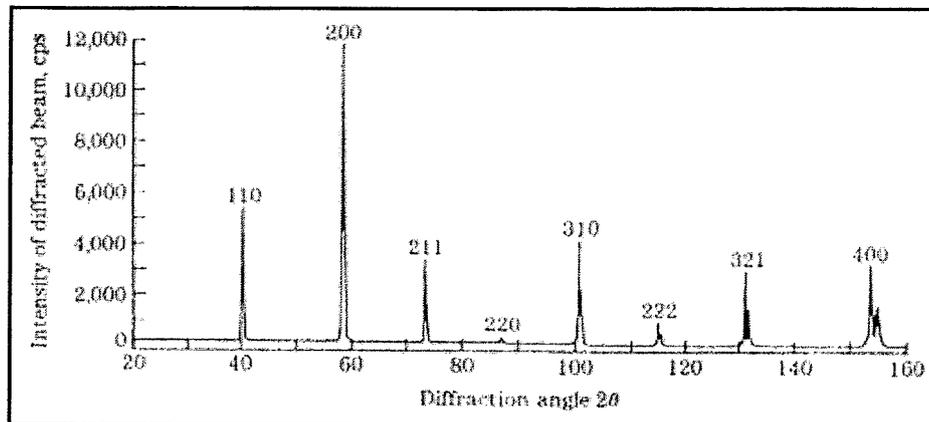
จากสมการของแบรกก์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของตำแหน่งลำคลื่นที่เลี้ยวเบนเสริมกันในรูปความยาวคลื่น λ ของรังสีที่เปล่งออกมาและช่องว่างระหว่างระนาบ d_{hkl} ของระนาบของผลึก โดยทั่วไปจะใช้การเลี้ยวเบนลำดับที่ 1 ($n = 1$) กฎของแบรกก์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.5)$$

การวิเคราะห์ผลึกโดยใช้รังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีซึ่งมีที่รับการแผ่รังสีเพื่อหาค่ามุมและความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนของลำคลื่น เครื่องบันทึกจะพล็อตค่าความเข้มข้นของการเลี้ยวเบน ในขณะที่ตัวรับรังสีเคลื่อนที่ไปบนเครื่องวัดมุมของผลึกซึ่งมีลักษณะเป็นรูปวงกลมแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 พร้อมๆ กันในช่วงของค่ามุม 2θ รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนของลำคลื่นกับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ที่บันทึกโดยเครื่องบันทึก การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สำหรับตัวอย่างที่เป็นวัสดุทดลองที่เป็นโลหะผงบริสุทธิ์ 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

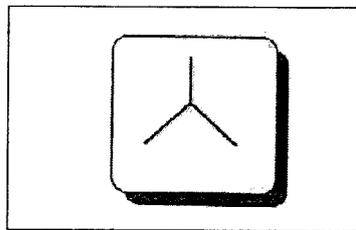
2.3.1 การกำหนดแกนพิกัดมาตรฐาน (Normal Coordinate System)

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

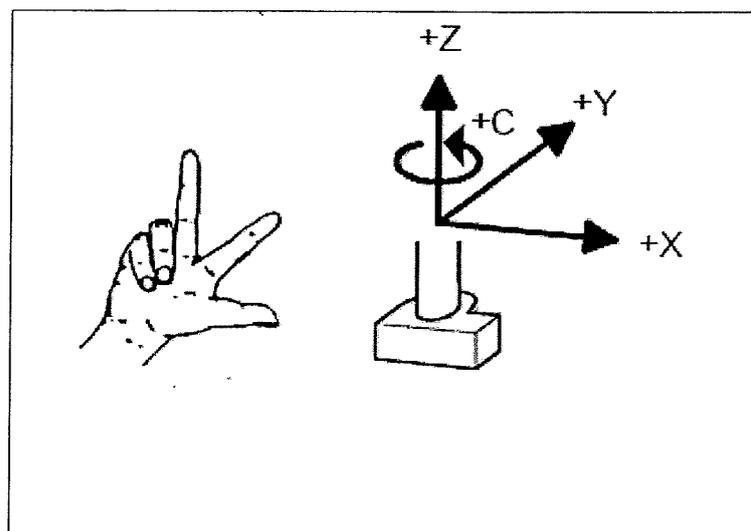
ชิ้นงานอยู่ในแกนหมุนให้ถือการมองเครื่องมือตัดจากแกนหลักเป็นทิศทาง (+) ดูได้จากรูปที่ 2.14 เครื่องมือตัดอยู่ในแกนหมุนให้ถือการมองชิ้นงานจากแกนหลักเป็นทิศทางบวก (+) ดูได้จากรูปที่ 2.15 แกนหมุนและแกนเสริม

แกนหมุนเป็นแกนที่หมุนและขนานกับแกนพิกัด ให้ถือทิศทางของการหมุนของเกลียวมือขวาเป็นทิศทางบวก (+)

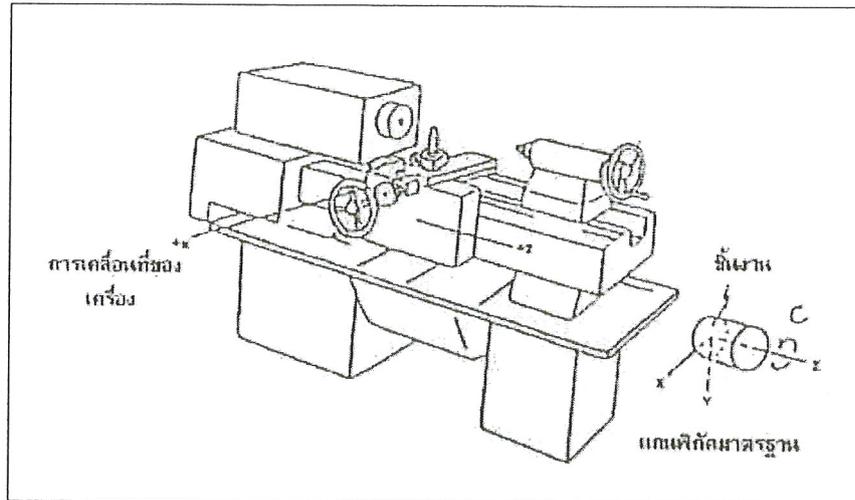
แกนเสริมเป็นแกนที่ช่วยในการเคลื่อนที่อื่น ๆ นอกเหนือจากแกนพิกัดและแกนหมุน



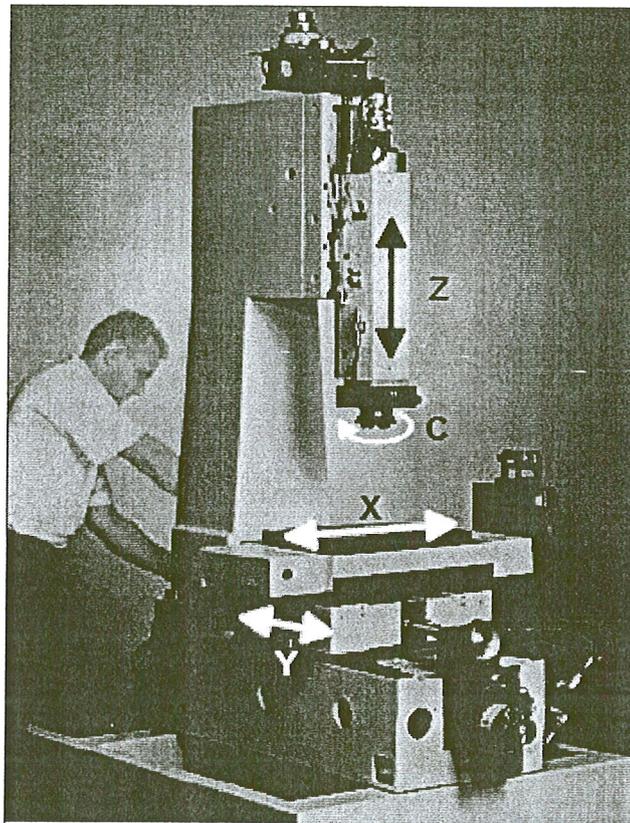
รูปที่ 2.12 ระบบพิกัดตั้งฉาก



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

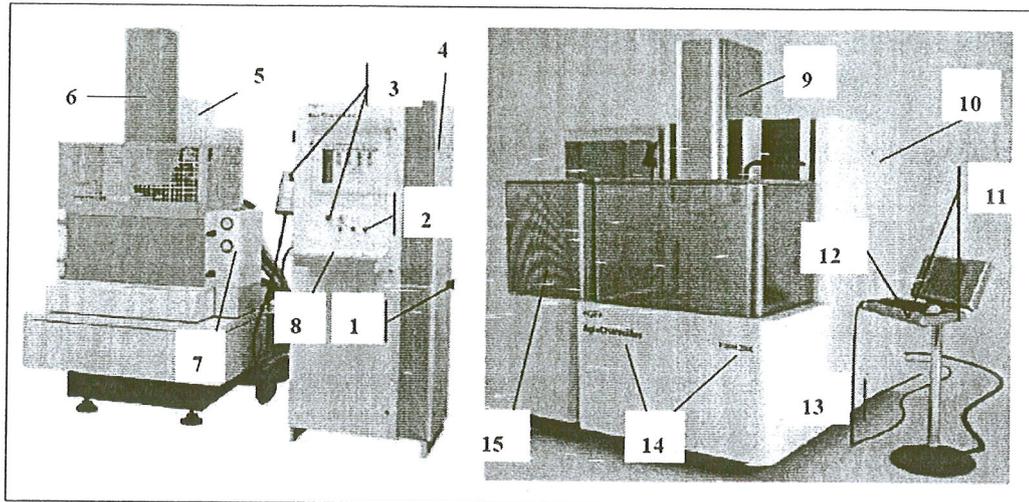
เครื่อง EDM สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เครื่อง EDM และ เครื่อง Wire Cut EDM แต่ทั้งสองประเภทมีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกัน คือ การจัดวางขั้วไฟฟ้า และ ชิ้นงานในสารละลายและให้แรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างขั้ว เพื่อให้เกิดการสปาร์กขึ้น โดยมีจังหวะเกิดและหยุดสปาร์กสลับกันไป

2.4.1 ลักษณะจำเพาะของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM ประเภทนี้เป็นเครื่องที่ใช้ในงานขึ้นรูป ประเภท Die sinking ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. สวิตช์เปิดปิดเพาเวอร์ซัพพลาย
2. สวิตช์ควบคุมการทำงานของเครื่อง
3. สวิตช์ฉุกเฉิน
4. เพาเวอร์ซัพพลายระบบซีเอ็นซี
5. ชุดเสาของเครื่อง (Column)
6. ส่วนของแกน Z ของเครื่องจักร (Z Axis)
7. ชุดควบคุมการเปิดปิดของสารละลาย
8. ชุดคีย์บอร์ดควบคุมการทำงานของเครื่อง
9. ส่วนของแกน Z ของเครื่องจักร (Z Axis)
10. เพาเวอร์ซัพพลายระบบซีเอ็นซี
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 ให้ทำงานอย่างเต็มความสามารถในการขึ้นรูปตามเส้นขอบ โดยการควบคุมแกน X-Y-Z พร้อมกันนั้นทำให้สามารถที่จะขึ้นรูปที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ด้วย

2.4.1.2 โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง EDM

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

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

วิธีการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนมีหลายอย่าง แต่ในปัจจุบันจะควบคุมด้วยอุปกรณ์ระบบ CNC ดังนั้นส่วนมากจึงใช้แรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ไฟฟ้า อนึ่งสมรรถนะขององค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งรวมถึงตัวนำ (Guide) ด้วยนั้นจะเป็นปัจจัยในการกำหนดระดับความละเอียดของเครื่องจักร

ถูกขึ้นรูปสำหรับบรรจุสารละลาย ลักษณะจำเพาะอย่างหนึ่งของเครื่อง EDM คือ ใช้สารละลาย (การขึ้นรูปในของเหลว) ที่จะให้ระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าความต้านทานของฉนวนสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการขึ้นรูปเพิ่มที่จะเก็บสารละลายนี้ไว้ 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

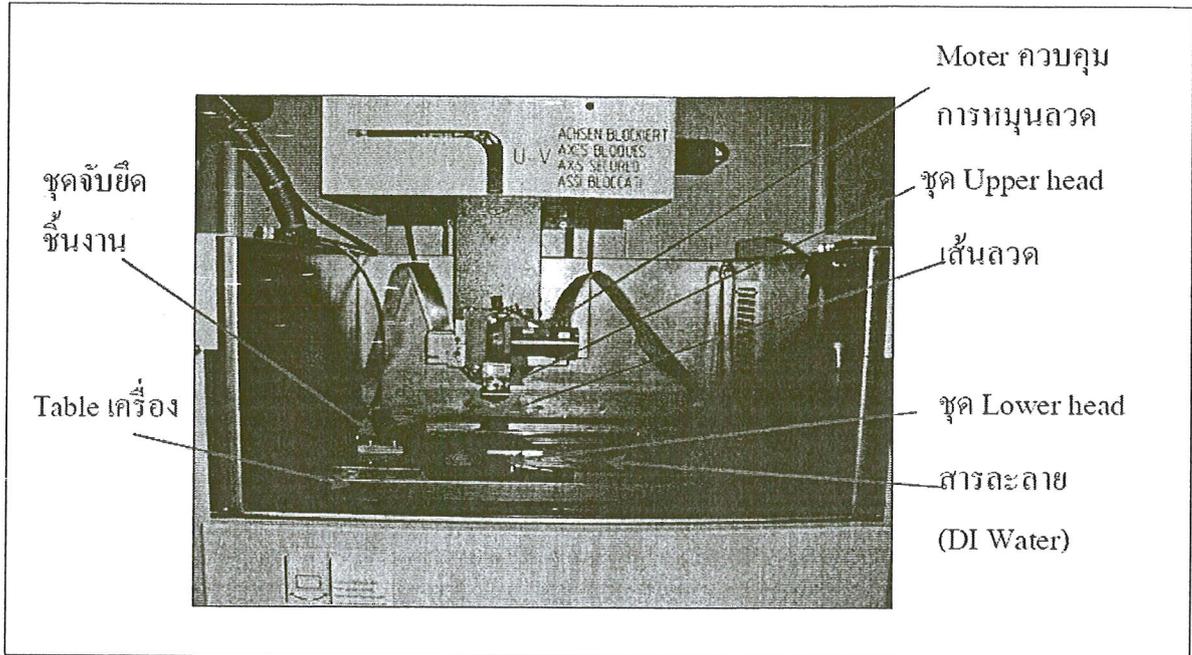
เครื่อง Wire Cut EDM ดังรูปที่ 2.17 ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การขึ้นรูปพื้นผิว นอกจากนั้นแล้ว การใช้อุปกรณ์ระบบ CNC ควบคุมการเรียงของลวดก็สามารถใช้ในงานขึ้นรูปประเภทเอียง (Taper) หรืองานขึ้นรูปที่มีรูปทรงบนล่างต่างกันได้อีกด้วย ดังรูปที่ 2.18

ตัวเส้นลวดของ เครื่อง Wire Cut EDM จะมีการสึกหรอ อันเนื่องมาจากการสปาร์ค ดังนั้นลวดที่ใช้ไปครั้งหนึ่งแล้วจะถูกทิ้งไปเลย

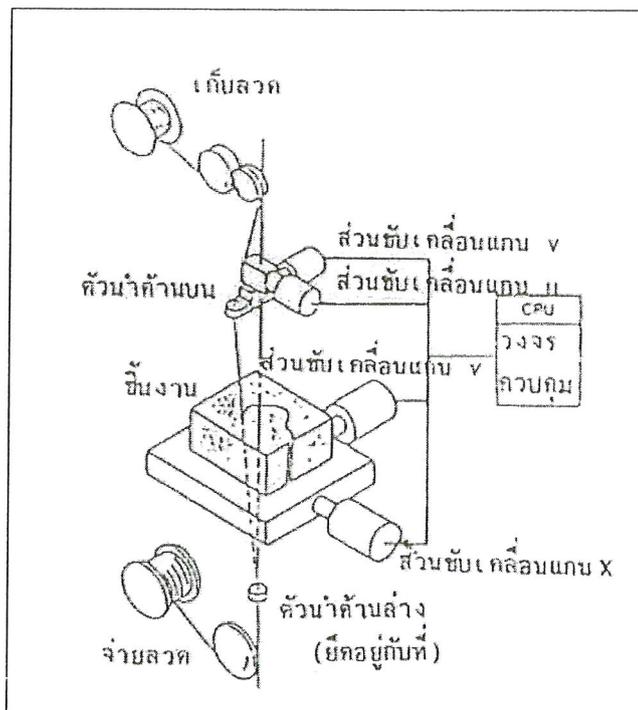
โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง Wire Cut EDM นั้นเกือบจะเหมือนกันกับเครื่อง EDM ประเภท Die sinking แต่เนื่องจากว่าใช้ลวดเป็นขั้วไฟฟ้าจึงต้องมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมประกอบติดอยู่ที่เสาด้วย

ส่วนป้อนลวด	ทำหน้าที่ส่งป้อนลวดออกมาและควบคุมแรงดึงของเส้นลวด
ส่วนที่ม้วนเก็บลวด	ทำหน้าที่ม้วนเก็บรวบรวมลวดที่ใช้งานแล้ว และควบคุมความเร็วของเส้นลวด
ส่วนที่เป็นตัวนำลวด	ทำหน้าที่ประคองรักษาเส้นลวดเป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับพักสัการสปาร์คการไหลของสารละลาย
Taper Cut Unit	อุปกรณ์การเสริมสำหรับการขึ้นรูปประเภทชิ้นงานเอียง (Taper)

AWT (Automatic Wire Threader) อุปกรณ์การต่อลวดแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.17 เครื่อง Wire Cut EDM



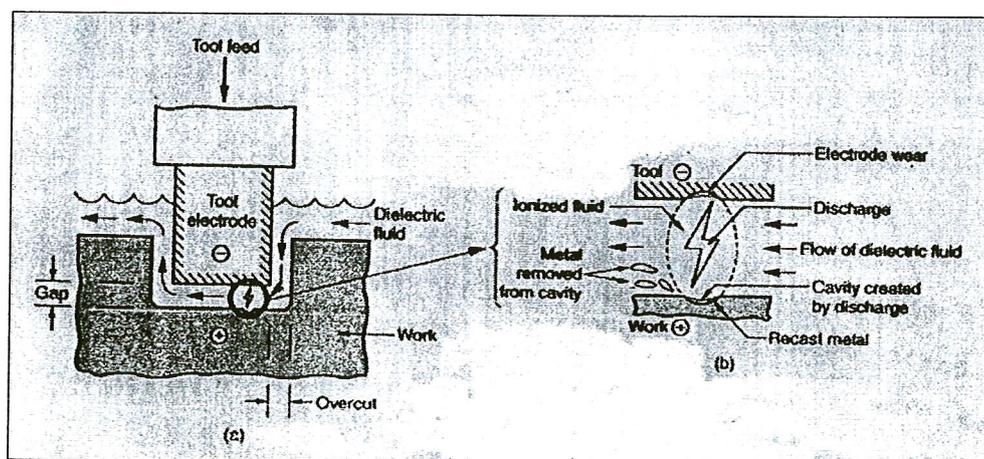
รูปที่ 2.18 หลักการตัดชิ้นงานรูปแบบ Taper

2.5 กระบวนการตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า (Electric discharge processes)

กระบวนการตัดด้วยพลังงานความร้อนในกลุ่มนี้จะใช้การปลดปล่อยประจุไฟฟ้าหรือการสปาร์คที่จะทำให้อุณหภูมิบนชิ้นงาน ณ จุดใดจุดหนึ่งสูงพอที่จะหลอมละลายชิ้นงานหรือแม้กระทั่งทำให้กลายเป็นไอ กระบวนการการตัดที่สำคัญในกลุ่มนี้ คือ การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า และการตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด ซึ่งกระบวนการทั้งสองกระบวนการนี้ใช้ได้กับชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้เท่านั้น

2.5.1 การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า (Electric discharge machining: EDM)

EDM ตัดเนื้อโลหะได้โดยการปล่อยประจุไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ อย่างต่อเนื่องไปยังชิ้นงานเพื่อทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นบางจุดบนชิ้นงาน อุณหภูมินี้สูงพอที่จะหลอมละลายเนื้อโลหะหรือแม้กระทั่งทำให้ระเหยกกลายเป็นไอ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ EDM บริเวณผิวของชิ้นงานที่โดนตัดจะมีความเสียหายเกิดขึ้นทั้งในทางกายภาพและทางโลหะวิทยา EDM ใช้ตัดได้เฉพาะชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้เท่านั้น ลักษณะของ EDM แสดงในรูปที่ 2.19 (a) รูปร่างของชิ้นงานที่ได้จะเป็นรูปร่างที่ตรงกันข้ามกับรูปร่างของอิเล็กโทรดที่ใช้ในระหว่างการตัด การสปาร์คที่เกิดขึ้นจะเกิดในลักษณะเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่องตามการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงที่เป็นแหล่งกำเนิดของพลังงาน การสปาร์คเกิดขึ้นข้ามช่องระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ซึ่งระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะมีของเหลวไดอิเล็กทริก เป็นตัวกลางในการนำกระแสไฟฟ้าโดยของเหลวไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนสภาพเป็นไอออน ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานในระหว่างที่มีการสปาร์คเกิดขึ้น การสปาร์คจะเกิดขึ้นตรงบริเวณที่อิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานอยู่ใกล้กันมากที่สุดชิ้นส่วนที่ถูกตัดจะถูกพาออกไปโดยการไหลของของเหลวไดอิเล็กทริก



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 และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดึงออกจากฝั่งขั้วลบไปสู่ฝั่งขั้วบวก ซึ่งในระยะนี้จะเริ่มมีการไหลของกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กมาก

2. การสปาร์คแบบโคโรนา (Corona discharge)

การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric breakdown) ของของเหลวไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นสภาพการสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพเป็นอย่างมาก

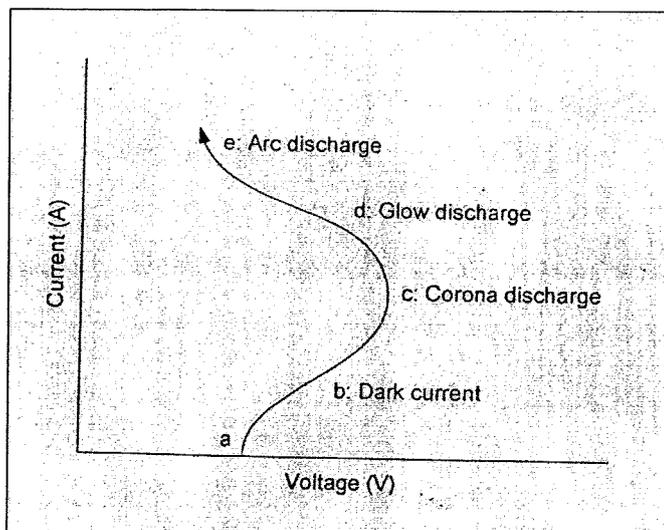
3. การสปาร์คแบบโกลว์ (Glow discharge)

การที่บริเวณส่วนที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้นมีอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย เป็นสภาพการสปาร์คที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

4. การสปาร์คแบบอาร์ค (Arc discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์คแบบโกลว์ได้มีขนาดถึงกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้วการสปาร์คจะเข้าสู่สภาพขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นการสปาร์คแบบอาร์ค สภาพการสปาร์คแบบนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ เป็นสภาพ

ที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมพลังงานก่อนที่จะเข้าสู่สภาพการสปาร์กแบบอาร์กนี้



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าในการสปาร์ก

การสปาร์กที่เกิดขึ้นเป็นประกายไฟในกระบวนการ EDM มีปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสปาร์กเกิดขึ้นทุกขั้นตอนตามที่ได้กล่าวมา ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหลจนถึงสภาพของการสปาร์กแบบอาร์กภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก ๆ โดยปกติการสปาร์กที่เป็นประกายไฟจะมีช่วงระยะเวลาที่สั้นมากดังนั้นการสปาร์กที่เป็นประกายไฟจะปลดปล่อยพลังงานระดับสูงมากออกมาในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก ๆ

ในการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM นั้นจะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องเหมือนกับกรณีการเชื่อมอาร์ก แต่ใช้วิธีการเปิด-ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากการสปาร์กหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรงวิธีการขึ้นรูปประเภทนี้อาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้นมาก ในการใช้งานจริงจะใช้ระบบ NC ควบคุมให้เกิดการสปาร์กหลายแสนครั้งใน 1 วินาที และสภาพของพัลส์ในแต่ละครั้งของการสปาร์กจะเป็นดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ไล่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการไล่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 30-280 V) ระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด โดยปกติในการขึ้นรูปนั้นจะใช้ของเหลวไดอิเล็กทริกรักษาความต้านทานไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรดหรือความเป็นฉนวนให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้สามารถลดระยะห่าง

2. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อช่วงระยะระหว่างขั้วให้เข้าใกล้เรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

3. สปาร์คหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสีย ความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบ จะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือ การสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ขนาดตั้งแต่ 0.1 A จนถึงหลายร้อย A จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก (3000°C ขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์คก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไปและเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

4. เย็นตัว

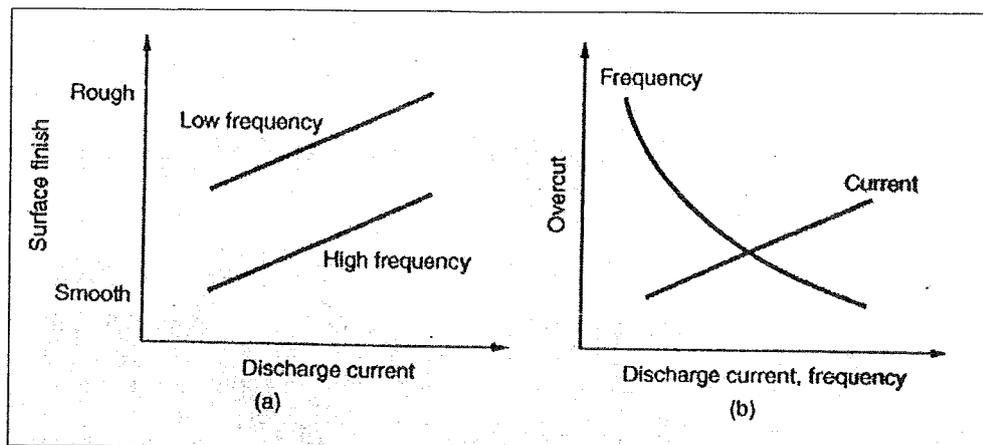
ความดันที่เกิดขึ้นระหว่างการสปาร์ค จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานจะระบายความร้อนไปสู่ของเหลวไดอิเล็กทริก รอบข้างและเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็ก ๆ

5. กลับสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์ค หนึ่งครั้งแล้วจบลงแล้วจะรอจนกว่า สารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนั้นจะช่วยป้องกันการเกิดสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น สปาร์คซ้ำ ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก

การสปาร์คซ้ำ คือ การสปาร์คที่เกิดขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของระบบ NC ในกรณีที่ สภาวะแวดล้อมของการสปาร์คเลวลง อาจจะมีการสปาร์คขึ้นได้โดยไม่สัมพันธ์กับช่วงจังหวะของพัลส์ของการสปาร์ค ซึ่งถูกส่งมาจากวงจรการสปาร์ค เนื่องจากว่า การสปาร์คประเภทนี้เป็นปรากฏการณ์นอกเหนือการควบคุม จน ไม่อาจถือได้ว่าเป็นสภาพการสปาร์คที่เหมาะสมได้

ในกระบวนการ EDM มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวคือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมา (Discharge current) และความถี่ในการสปาร์ค (Discharge frequency) ถ้าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งสองตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตัวแปรทั้งสองตัวนี้ยังมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (a) ผิวชิ้นงานที่ได้จะเรียบที่สุดเมื่อตัดด้วยค่ากระแสไฟฟ้าต่ำๆ และมีความถี่ของการสปาร์คสูงๆ ในรูปที่ 2.21 (b) แสดงลักษณะที่สำคัญในการตัดชิ้นงานอีกอย่างหนึ่ง คือ ระยะเวลาตัดเกิน (Overcut) หรือ ระยะเวลาห่างระหว่างผิวชิ้นงานที่ได้กับผิวด้านข้างของอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 2.19(a) โดยทั่วไปแล้วการตัดที่ดีจะให้ระยะเวลาตัดเกินที่ต่ำ ในกระบวนการ EDM การเกิดระยะเวลาตัดเกินจะเกิดการสปาร์คระหว่างผิวด้านข้างของอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน จากรูปที่ 2.21(b) จะเห็นได้ว่าระยะเวลาตัดเกินจะขึ้นอยู่กับทั้งขนาดกระแสไฟฟ้าและความถี่ของการสปาร์คระยะเวลาตัดเกินจะมีค่ามากขึ้นเมื่อตัดด้วยค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น และระยะเวลาตัดเกินจะมีค่าน้อยลงเมื่อตัดด้วยความถี่ของการสปาร์คมากขึ้น



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาและความถี่ในการสปาร์กกับ ความหยาบผิวและระยะตัดเกิน

ในระหว่างการตัดด้วยกระบวนการ EDM นอกจากจะมีการหลุดออกไปของเนื้อชิ้นงานแล้ว ส่วนของอิเล็กโทรดก็จะมีการหลอมละลายเนื่องจากความร้อนและหลุดออกไปเช่นกัน โดยปกติการสึกหรอของอิเล็กโทรดในกระบวนการ EDM จะวัดเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเนื้อชิ้นงานที่หลุดออกไปเทียบกับปริมาตรของเนื้ออิเล็กโทรดที่สูญเสียไปในการตัดดังกล่าว อัตราส่วนของการสึกหรอนี้พบว่าอยู่ระหว่าง 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)

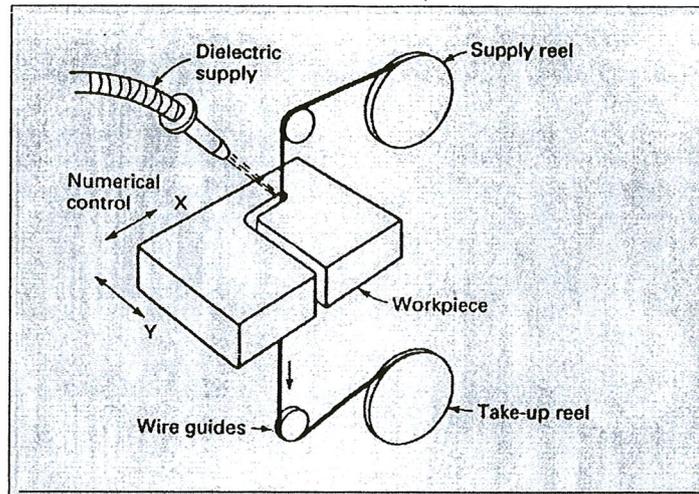
ของเหลวไดอิเล็กทริกที่ใช้ใน EDM จะทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ยกเว้นเมื่อเกิดสภาพของไอออนขึ้นระหว่างที่มีการสปาร์กเกิดขึ้นของเหลวไดอิเล็กทริกสามารถทำมาจากวัสดุหลายชนิด เช่น น้ำกำจัดไอออน น้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำมันก๊าด หรือน้ำกลั่น นอกจากนี้ของเหลวไดอิเล็กทริกยังทำหน้าที่พัดพาเอาเศษวัสดุออกไปจากบริเวณที่มีการสปาร์กเกิดขึ้นและช่วยพาความร้อนออกจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด

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

2.5.2 การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Electric discharge wire cutting)

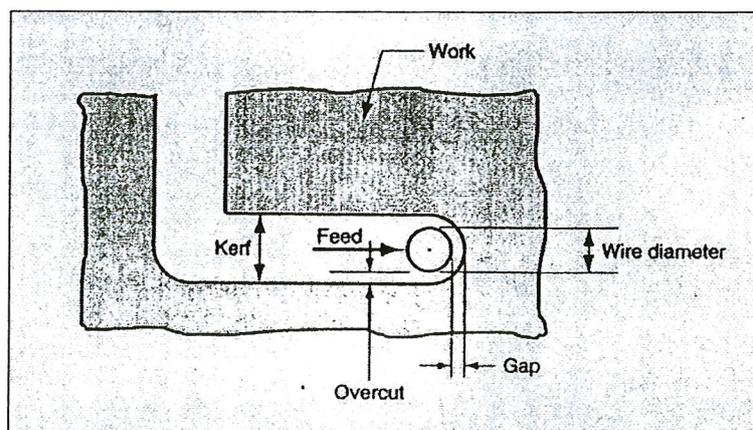
โดยทั่วไปจะเรียกกระบวนการนี้ว่า ไวร์อิตีเอ็ม (Wire EDM: WEDM) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ EDM ในกระบวนการนี้จะใช้ลวดเส้นเล็ก ๆ เป็นอิเล็กโทรดในการตัดชิ้นงาน รูปที่ 2.22 แสดงถึงลักษณะการตัดชิ้นงานด้วย WEDM ชิ้นงานจะเลื่อนเข้าหาลวดที่กำลังเคลื่อนที่

ไปเรื่อยๆ เพื่อให้การตัดชิ้นงานเกิดขึ้นกับอิเล็กโทรดใหม่ตลอดเวลาและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดคงที่เพื่อให้ได้ความกว้างของรอยตัดคงที่ สำหรับการเคลื่อนของชิ้นงานเข้าหาอิเล็กโทรดให้เป็นรูปร่างต่างๆ นั้น จะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การตัดด้วย WEDM จะเกิดขึ้นในของเหลวไดอิเล็กทริกเช่นเดียวกับกรณีของ EDM



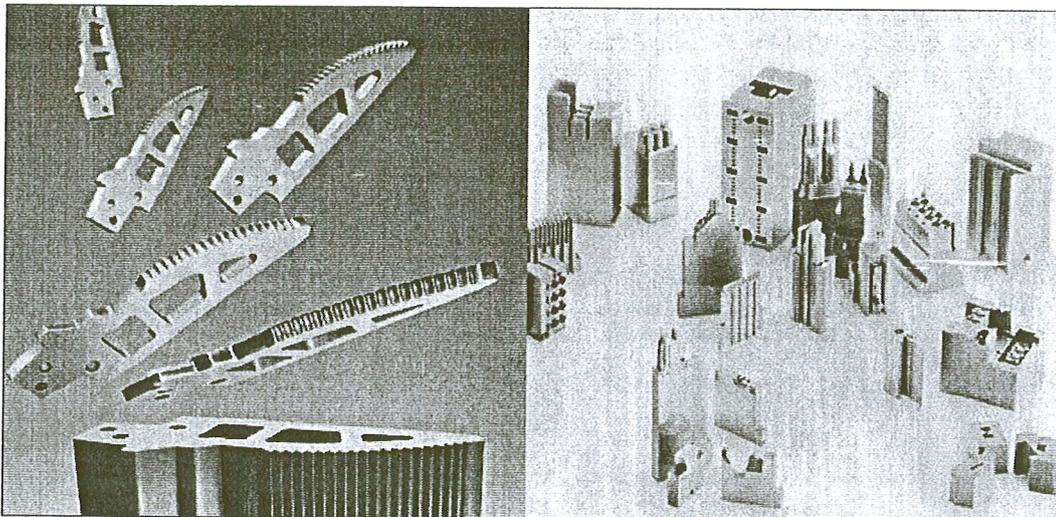
รูปที่ 2.22 การตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด

ลวดที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดมีหลายขนาดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 ถึง 0.30 mm ขึ้นอยู่กับความกว้างของรอยตัดที่ต้องการ วัสดุที่ใช้ทำลวด ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง ทังสเทน 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 จึงอาจนำไปใช้ตัดชุดพUNCHและตาย (Punch and die) 1 ชุด ได้จากการตัดเพียงครั้งเดียว โดยที่ชิ้นส่วนหนึ่งที่ถูกตัดออกมาจะกลายเป็นพUNCH และอีกชิ้นส่วนที่เหลือจะกลายเป็นตาย 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 “มัธมิมรวม (Overall Mean)” τ_i คือค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่ i หรือผลกระทบจากระดับที่ i และ ε คือองค์ประกอบความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random

Error) จุดประสงค์ของเราคือเพื่อทำการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของระดับต่างๆ และทำการประมาณค่าของมัน สำหรับการทดสอบสมมติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองถูกสมมติให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ และเป็นอิสระต่อกัน ด้วยมัธยฐานรวม เท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2 ซึ่งสมมติให้มีค่าคงตัวตลอดทุกระดับของปัจจัย

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลสำหรับการทดลองแบบปัจจัยเดียว

Treatment (Level)	Observations				Totals	Averages
1	y_{11}	y_{12}	\dots	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	\dots	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a	y_{a1}	y_{a2}	\dots	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 ในที่นี้เราต้องการที่จะทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับมัธยฐานของระดับ และบทสรุปที่เกิดขึ้นจะนำไปประยุกต์ได้กับระดับของปัจจัยที่เราพิจารณาเท่านั้น ข้อสรุปที่ได้ไม่สามารถไปใช้ได้กับระดับอื่นที่มีค่าใกล้เคียงที่เราไม่ได้พิจารณาหรือทำการทดลองได้ นอกจากนั้น เราก็อาจจะต้องการที่จะประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง (μ, τ_i, σ^2) ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model)” ในทางกลับกันถ้าระดับ a ถูกสุ่มเลือกจากประชากรขนาดใหญ่ของระดับต่างๆที่เป็นไปได้ ในกรณีนี้เราสามารถที่จะขยายผลสรุป (ซึ่งขึ้นกับระดับตัวอย่างที่ใช้) ของเราไปยังทุกระดับของประชากร ถึงแม้เราอาจจะไม่ได้ทำการพิจารณาระดับนั้นๆ อย่างชัดเจนก็ตาม ในการวิเคราะห์ในที่นี้ τ_i คือตัวแปรสุ่ม และความรู้เกี่ยวกับตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่งจะไม่มีประโยชน์แต่อย่างใด เราทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรผันของ τ_i 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

ปกติแล้วเราจะนิยมที่จะบอกค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 จะถูกปฏิเสธดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้วผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่ามีข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

การคำนวณหา P-Value ที่แม่นยำไม่ใช่สิ่งที่ทำได้ง่ายนักแต่โปรแกรมทางสถิติใหม่ๆก็จะมีค่านี้แสดงไว้หรือแม้แต่ในเครื่องคำนวณแบบที่สามารถพกพาได้

2.6.1.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ตอนนี้เราจะค้นหาว่า การทดสอบสมมติฐานอย่างเป็นทางการในกรณีที่ไม่มีความแตกต่างในมัธยฐาน ($H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$ หรือ $H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$) จะทำได้อย่างไร เนื่องจากเราต้องสมมติให้ ε_{ij} มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน มีมัธยฐาน = 0 และค่าความแปรปรวน = σ^2 ค่าสังเกต = y_{ij} มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระ มีมัธยฐาน = $\mu + \tau_i$ 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 ก็คือเมื่อ

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

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

จากค่าคาดหมายกำลังสองเฉลี่ยเราพบว่า โดยทั่วไป MS_E จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 ภายใต้อสมมติฐานหลัก $MS_{Treatment}$ จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าสมมติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหมายของ $MS_{Treatment}$ จะมากกว่า σ^2 ดังนั้นภายใต้สมมติฐานรอง ค่าคาดหมายของตัวตั้งของสถิติทดสอบ (สมการ 3-7) จะมากกว่าค่าคาดหมายของตัวหาร 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 หรือโดยการใช้ 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	$N - 1$		

การตรวจสอบส่วนตักข้างควรทำทุกครั้งในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าหากแบบจำลองถูกต้อง ส่วนตักข้างจะต้องไม่มีรูปแบบ โดยการศึกษาส่วนตักข้าง เราจะพบความไม่พอเพียงของสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองได้หลายรูปแบบ ในตอนต่อไปเราจะแสดงถึงการวินิจฉัยแบบง่าย ๆ ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์แบบกราฟิกของส่วนตักข้าง และการจัดการกับสิ่งผิดปกติอีกหลายอย่าง

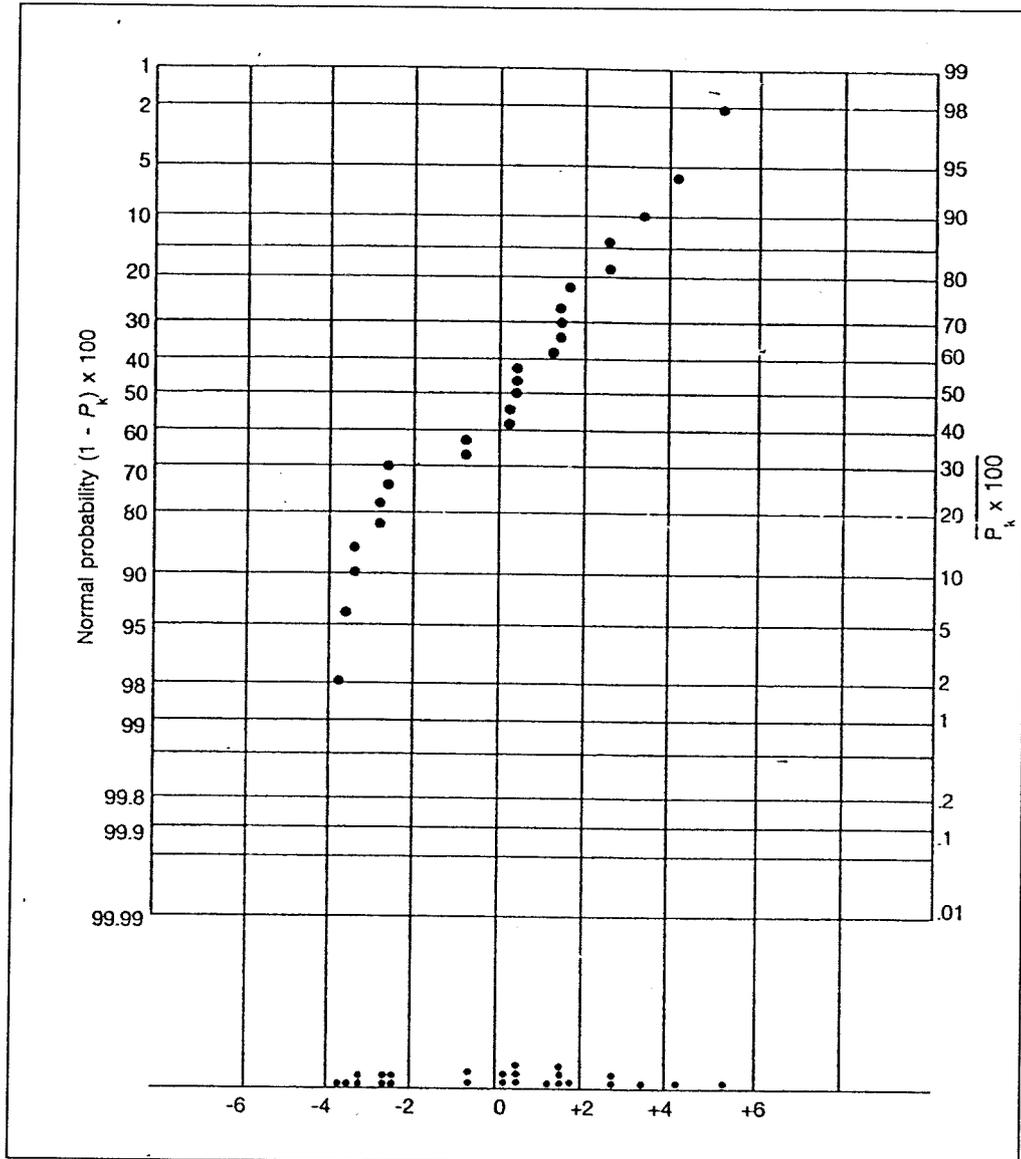
2.6.1.3 สมมติฐานของความเป็นปกติ

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

เป็นจริงแล้ว รูปแบบของส่วนตกค้างที่พล็อตออกมาควรมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างที่ได้จากการแจกแจงแบบปกติซึ่งจะมีมัธยฐานเท่ากับ 0 แต่ในกรณีที่มีตัวอย่างน้อย พบว่ามักเกิดการแกว่งของข้อมูลขึ้นบ่อยครั้ง ดังนั้นการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติในระดับปานกลางไม่ได้หมายถึงการฝ่าฝืนสิ่งที่กล่าวอยู่ในสมมติฐานอย่างรุนแรงแต่ในกรณีที่มีการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติอย่างมาก จะมีผลกระทบอย่างรุนแรงและต้องมีการวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง คือ การสร้าง Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ขั้นตอนการพล็อตดังกล่าวนี้มีประโยชน์อย่างมาก และทำได้โดยตรงไปตรงมา ถ้าหากการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นแบบปกติรูปที่พล็อตขึ้นมาจะเป็นเส้นตรง เราควรมุ่งเน้นการมองเส้นตรงนี้ไปที่มัธยฐานของรูปมากกว่าค่าที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด

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 รูปที่ถูกล็อตขึ้นมาไม่ได้แสดงความไม่เป็นปกติแต่อย่างใด



รูปที่ 2.25 Normal Probability Plot และแผนภาพแบบจุดของส่วนตกค้าง

โดยทั่วไปการเบี่ยงเบนปานกลางจากความเป็นปกติจะมีผลน้อยมากสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบผลกระทบบางที่ การกระจายของความผิดพลาดที่มีทางหนึ่งที่ใหญ่กว่าหรือบางกว่าปกติจะมีความสำคัญมากกว่าการบิดเบี้ยวของรูปร่าง เพราะว่าการทดสอบ F จะได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เรากล่าวได้ว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะมีความทนทานต่อการเบี่ยงเบนในสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติ การเบี่ยงเบนจากความเป็นปกติมักจะก่อให้เกิดระดับนัยสำคัญที่แท้จริงและทำให้กำลังของการทดสอบ (Power of Test) แดกต่าง (ลดลง) เพียงเล็กน้อยจากค่าที่คิดไว้สำหรับแบบจำลองแบบผลกระทบบวม (Random Effect Model) จะได้รับพบกระทบบวมแรงกว่าในกรณีที่เกิดความไม่เป็นปกติขึ้นในแบบจำลอง โดยเฉพาะระดับความเชื่อมั่นที่แท้จริงบนการประมาณช่วงของส่วนประกอบของความแปรปรวนอาจจะแตกต่างอย่างมากจากค่าที่คิดเอาไว้

สิ่งที่ผิดปกติที่เห็นบ่อยบน Normal Probability Plot คือ ส่วนตกค้างบางค่ามีค่ามากกว่าตัวอื่นๆ มาก หรือเรียกว่า “Outlier” การที่มี Outlier เพียง 1 ค่า หรือมากกว่าจะทำให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนบิดเบือนไป ดังนั้นถ้าหากมี Outlier ที่สำคัญปรากฏขึ้น เราควรมีการตรวจสอบอย่างระมัดระวังบ่อยครั้งการเกิด 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

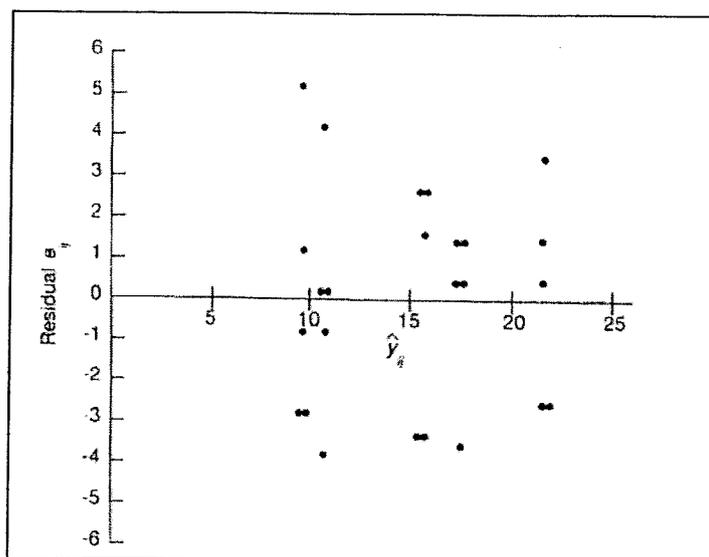
มีหลายวิธีการที่เป็นทางการในการตรวจหา Outlier ในการตรวจหา Outlier อย่างง่ายๆ อาจทำได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้างที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐาน

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

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 ของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถือเป็นการ Outlier ที่น่าจะถูกนำมาพิจารณา

2.6.1.4 การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

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



รูปที่ 2.26 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

สิ่งผิดปกติซึ่งแสดงให้เห็นในกราฟ คือ ความแปรปรวนที่ไม่คงตัว บางครั้งความแปรปรวนของค่าสังเกตเพิ่มในขณะที่จำนวนของการสังเกตเพิ่มขึ้น กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นถ้าหากความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวนที่อยู่เบื้องหลังในการทดลองมีขนาดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่คงที่เป็นจำนวนเท่าของขนาดของค่าสังเกต(ซึ่งเหตุการณ์เกิดขึ้นบ่อยๆ ในกรณีของเครื่องมือวัด กล่าวคือค่าความผิดพลาดจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการอ่านสากล) ถ้าเป็นเช่นนี้จริงค่าของส่วนตกค้างจะมากขึ้นเมื่อ y_{ij} เพิ่มขึ้น และกราฟของส่วนตกค้างกับ \hat{y}_{ij} จะมีรูปร่างเหมือนกรวยปลายเปิด ความแปรปรวนที่ไม่คงตัวจะเกิดในกรณีที่ข้อมูลนั้นไม่มีการแจกแจงแบบปกติและบิดเบี่ยวด้วย เพราะว่าการแจกแจงที่บิดเบี่ยวจะทำให้ความแปรปรวนมีแนวโน้มที่จะเป็นฟังก์ชันของมัชฌิม

ถ้าหากสมมติฐานของความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของความแปรปรวนไม่ถูกต้อง ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบคงที่แบบได้ดูล การทดสอบ F จะถูกกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการออกแบบที่ไม่ได้ดูล หรือกรณีที่ความแปรปรวนค่าหนึ่งมากกว่าค่าอื่นมากๆ ปัญหาจะมีความรุนแรงขึ้น ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม ความไม่เท่ากันของความแปรปรวนของความผิดพลาดจะมีผลกระทบต่อส่วนประกอบของความแปรปรวนอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบที่ได้ดูลก็ตาม

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

งานวิจัยจำนวนมากกำลังดำเนินการอยู่เพื่อศึกษาถึงการเลือกการแปลงที่เหมาะสม ถ้าหากผู้ทดลองทราบถึงการแจกแจงทางทฤษฎีของค่าสังเกต เขาควรจะใช้ข้อมูลนี้ในการทำการเลือกการแปลงที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าสังเกตเป็นไปตามการแจกแจงแบบปัวส์ซอง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโดยใช้รากที่สองโดย $y_{ij}^* = \sqrt{y_{ij}}$ หรือ $y_{ij}^* = \sqrt{(1 + y_{ij})}$ ควรจะถูกนำมาใช้ แต่ถ้าข้อมูลมีการแจกแจงแบบ Log-Normal ดังนั้นการแปลงแบบลอการิทึมโดย $y_{ij}^* = \log y_{ij}$ จะเป็นการแปลงที่เหมาะสมในกรณีของการแปลงข้อมูลแบบไบโนเมียลซึ่งจะแสดงในรูปเศษส่วน การแปลงแบบ Arcsin โดย $y_{ij}^* = \arcsin \sqrt{y_{ij}}$ จะเป็นการแปลงที่ดี แต่เมื่อไม่มีการแปลงที่เด่นชัดที่จะนำมาใช้ ผู้ทดลองควรจะหาการแปลงซึ่งทำให้ความแปรปรวนมีค่าเท่ากัน โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าเฉลี่ย ในการทดลองเชิงแฟคทอเรียลซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ให้เลือกการแปลงที่ทำให้ค่าอันตรกิริยากำลังสองเฉลี่ย (Interaction Mean Square) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้การทดลองสามารถแปลความหมายได้ง่าย

2.6.2 การออกแบบการทดลองสำหรับพืชพื้นผิวผลตอบ

การพืชและวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะทำได้ง่ายขึ้น ถ้าเราเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ในส่วนนี้ จะขออธิบายเกี่ยวกับแนวทางในการเลือกการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับพืชพื้นผิวผลตอบเมื่อจะเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบ 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 การออกแบบสำหรับพืชแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง

สมมติว่าเราต้องการพืชแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (First-Order Model) ที่มี k ตัวแปร

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

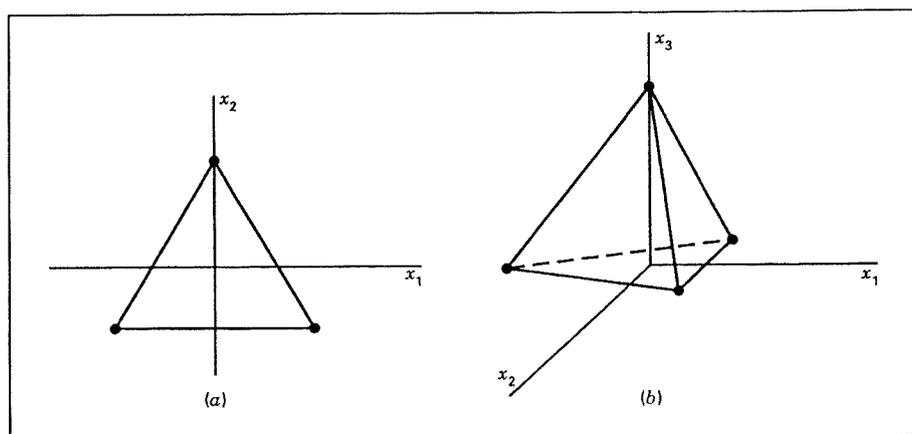
ซึ่งเป็นประเภทของการออกแบบพิเศษชนิดหนึ่งที่จะทำให้ความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์ของการถดถอย $\{\hat{\beta}_i\}$ มีค่าต่ำที่สุด และเรียกว่า การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่ง (Orthogonal First-Order Design) การออกแบบอันดับที่หนึ่งจะเป็นเชิงตั้งฉากถ้าส่วนประกอบทุกตัวของเมทริกซ์ $(X'X)$ ที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมมีค่าเท่ากับศูนย์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

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

ในการออกแบบ 2^k นั้นเราจะไม่สามารถประมาณความผิดพลาดของการทดลองได้นอกจากว่า 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

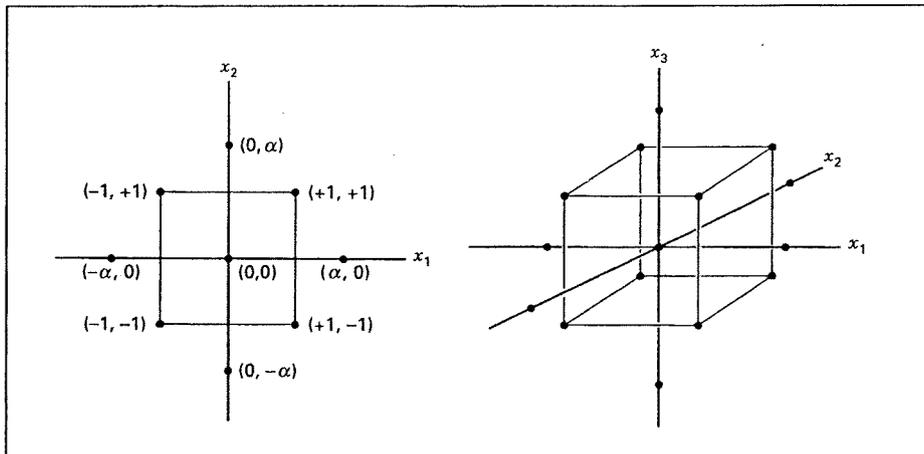


รูปที่ 2.27 การออกแบบซิมเพล็กซ์สำหรับตัวแปร (a) $k=2$ และ (b) $k=3$

2.6.2.2 การออกแบบสำหรับพีตแบบจำลองอันดับที่สอง

เราได้กล่าวถึงการออกแบบส่วนประสมกลาง หรือ CCD ซึ่งใช้ในการพีตแบบจำลองอันดับที่สองมาก่อนหน้านี้แล้ว การออกแบบนี้เป็นประเภทหนึ่งของการออกแบบที่นิยมกันมากสำหรับการพีตแบบจำลองลักษณะเช่นนี้ 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 ถูกนำมาใช้เพื่อพีตแบบจำลองอันดับที่หนึ่งแล้วพบว่า แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับข้อมูลนี้ ดังนั้น จึงได้มีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้เราสามารถใส่พจน์ควอดราติกลงไปในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพีตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือ ระยะทาง α ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนต่อไป



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

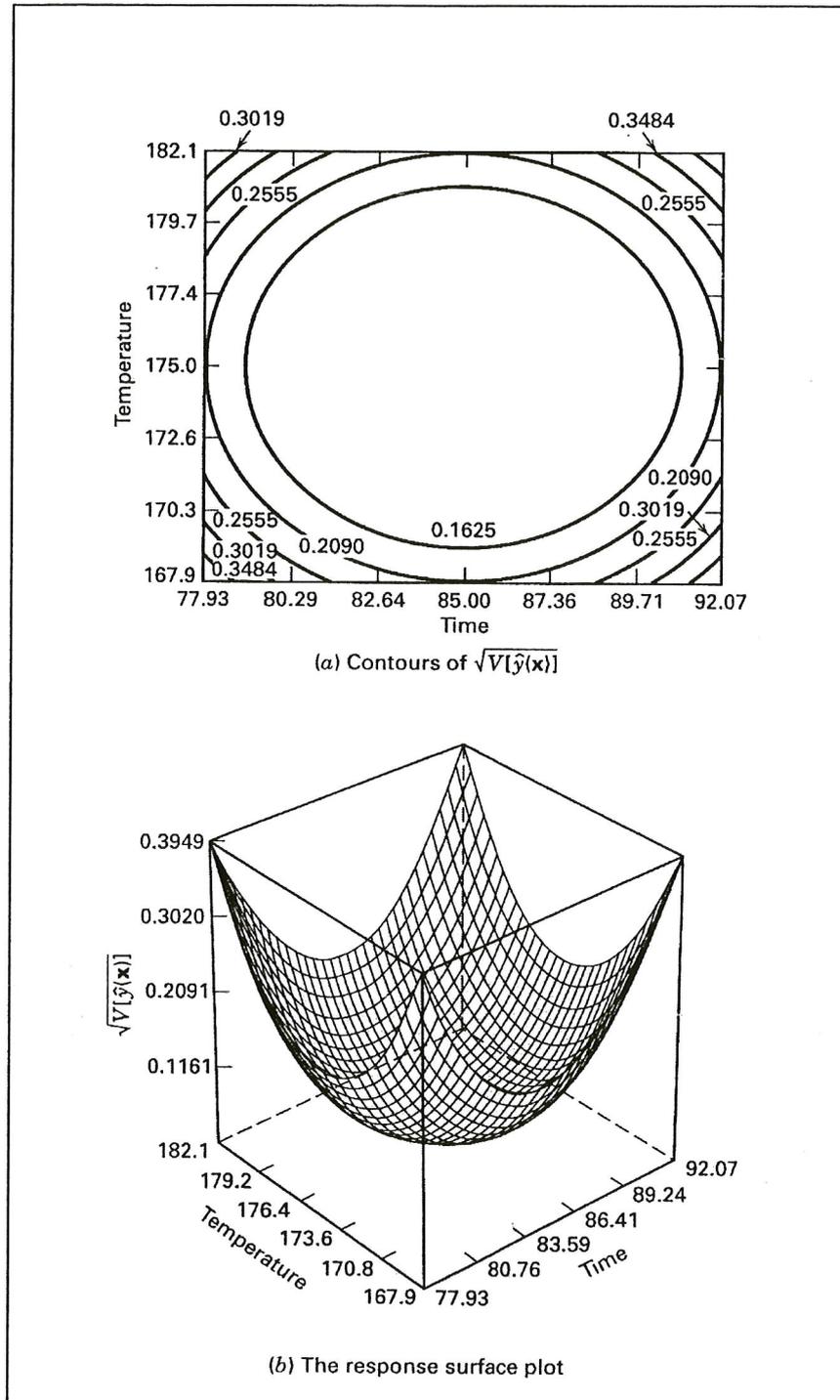
2.6.2.2.1 ความสามารถในการหมุน

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 ที่จะใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวแปรที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง (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 ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างเป็นที่ยอมรับ ได้ ตามปกติแล้ว ขอแนะนำให้ใช้ 3-5 การทดลอง

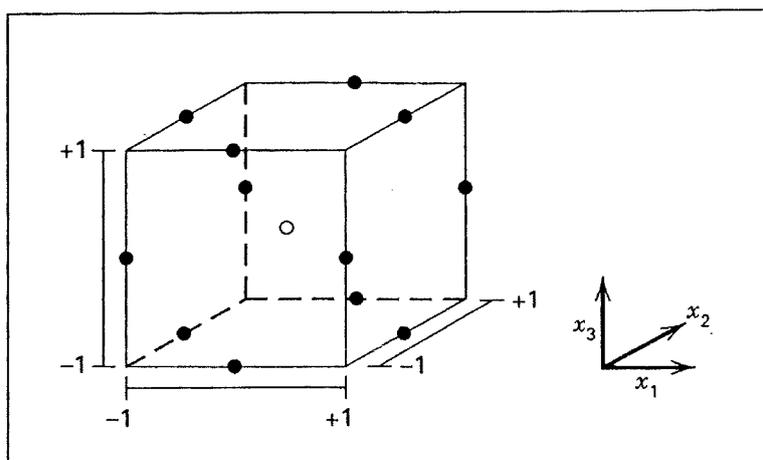
2.6.2.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นผิวผลตอบ 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

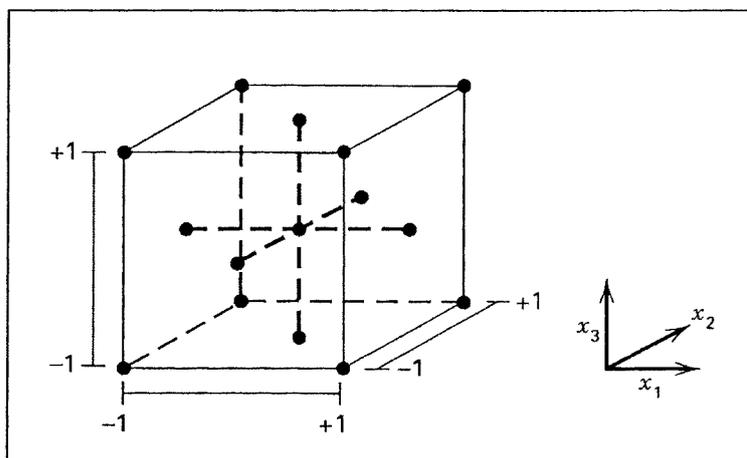
A Three-Variable Box–Behnken Design			
Run	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 2.30 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร

2.6.2.4 บริเวณที่สนใจแบบคิวบอยดัล

มีเหตุการณ์มากมายที่บริเวณที่อยู่ในความสนใจเป็นแบบคิวบอยดัล (Cuboidal) แทนที่จะเป็นรูปทรงกลม ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบที่เรียกว่า Face-Centered Cental Composite หรือ Face-Center Cube ที่มี $\alpha = 1$ พัฒนาการมาจากส่วนประสมกลาง จะเป็นการออกแบบที่มีประโยชน์อย่างมาก การออกแบบนี้วางจุดดาว หรือจุดในแนวแกน อยู่บนจุดศูนย์กลางของหน้าของรูปทรงลูกบาศก์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 สำหรับ $k = 3$ การออกแบบนี้ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากการออกแบบนี้ต้องการเพียง 3 ระดับของแต่ละปัจจัยเท่านั้น และการเปลี่ยนระดับของปัจจัยทำได้ยากในทางปฏิบัติอีกด้วย อย่างไรก็ตาม จะต้องจำไว้ว่า การออกแบบนี้ไม่สามารถหมุนได้



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

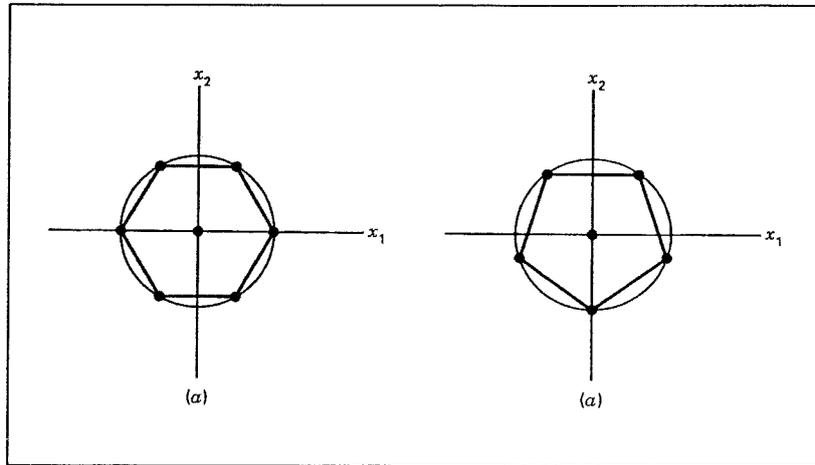
การออกแบบ Face-Centered Cube ไม่ต้องการใช้จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมาก เหมือนกับ CCD รูปทรงกลม ในทางปฏิบัติ $n_c = 2$ จะพอเพียงที่จะทำให้ความแปรปรวนของการพยากรณ์อยู่ในระดับที่ดีตลอดบริเวณของการออกแบบ ให้จำไว้ว่า บางครั้งการที่เราต้องรันที่จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมากขึ้นเนื่องจากต้องการให้ค่าประมาณของความผิดพลาดของการทดลองเป็นที่ยอมรับได้

2.6.2.5 การออกแบบชนิดอื่น

ยังมีการออกแบบพื้นผิวผลตอบอีกเป็นจำนวนมากที่อาจจะเป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติบางโอกาสสำหรับกรณี 2 ตัวแปร เราสามารถใช้การออกแบบที่เกิดจากจุดที่มีระยะห่างเท่ากันบนวงกลม และการออกแบบลักษณะนี้จะทำให้เกิดรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) เนื่องจาก

จุดของการออกแบบนี้มีระยะห่างจากจุดกำเนิดเท่ากัน การจัดวางเช่นนี้ถูกเรียกว่า การออกแบบรัศมีเท่ากัน (Equiradial Design)

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



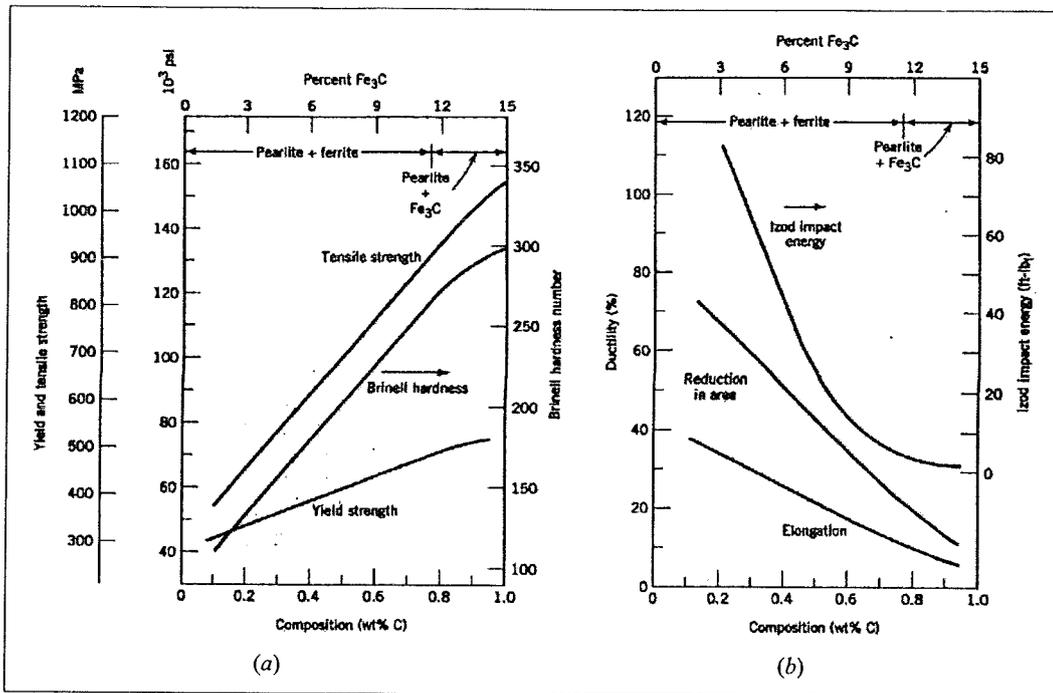
รูปที่ 2.32 การออกแบบรัศมีเท่ากันสำหรับ 2 ตัวแปร (a) หกเหลี่ยม (b) ห้าเหลี่ยม [36,37,38,39]

2.7 พฤติกรรมทางกลของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงพฤติกรรมทางกลของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนที่มีโครงสร้างจุลภาคต่าง ๆ ดังที่อธิบายมาแล้วได้แก่ เฟอไรต์ ไลต์ทั้งชนิดหยาบและละเอียด คาร์ไบด์กลม เบนไนต์ และมาร์เทนไซต์ และเราจะได้หาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับ โครงสร้างจุลภาคที่จะปรากฏในโลหะผสมเหล่านี้

2.7.1 เฟอไรต์ไลต์

ซีเมนไตต์แข็งและเปราะบางกว่าเฟอร์ไรต์มาก ดังนั้น หากโลหะผสมของเหล็กกล้ามีปริมาณ(อัตราส่วน)ของ Fe_3C สูงขึ้นในขณะที่ส่วนประกอบทางจุลภาคอื่นคงที่ จะทำให้วัสดุนั้นแข็งและแข็งแรงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.33(a) ซึ่งแสดงค่าความต้านแรงดึง ความเค้นจุดคราก ตลอดจนความแข็งแบบบริเนลเป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอน (ซึ่งเทียบได้กับเปอร์เซ็นต์ของ Fe_3C) ในเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างเป็นเฟอไรต์ไลต์ละเอียด ค่าสมบัติทางกลทั้งสามเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเหล็กมีคาร์บอนเข้มข้นขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน เนื่องจากซีเมนไตต์เปราะกว่า ดังนั้นการมีซีเมนไตต์เพิ่มขึ้น จะทำให้ทั้งความเหนียวและความแกร่ง(หรือพลังงานแรงกระแทก) ลดลงทั้งคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.33(b) สำหรับเหล็กกล้าเฟอไรต์ไลต์ละเอียดเช่นกัน

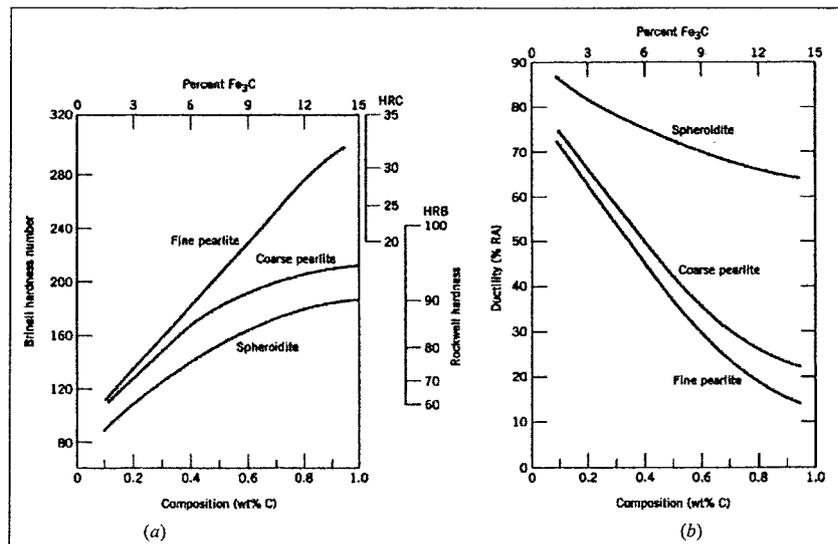


รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ของ (a) ความเค้นจุดคราก ความต้านแรงดึงและความแข็งแบบบริเนลกับปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเพิร์ลไลต์ละเอียด (b) ความเหนียว (%EL และ %RA) และพลังงานแรงกระแทกแบบไอซอดกับปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเพิร์ลไลต์ละเอียด

ความหนาของชั้นแต่ละชั้นของเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ในโครงสร้างจุลภาค ก็ส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุด้วย โครงสร้างเพิร์ลไลต์ละเอียดจะแข็งและแข็งแรงกว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์หยาบ

เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ อธิบายได้จากปรากฏการณ์ผิวสัมผัสระหว่างเฟส α -Fe₃C ก่อนอื่น จะมีระดับการยึดติด (degree of adherenc) ก่อนข้างสูงระหว่างเฟสทั้งสองตรงบริเวณผิวสัมผัส ดังนั้น เฟสซีเมนไตต์ซึ่งแข็งและเกร็ง (rigid) กว่าจะจำกัดการแปรรูปของเฟอร์ไรต์ที่นิ่มกว่าอย่างรุนแรง โดยเฉพาะตรงบริเวณใกล้ๆกับผิวสัมผัส กล่าวได้ว่า ซีเมนไตต์ช่วยเสริมแรงให้กับเฟอร์ไรต์นั่นเอง ระดับของการเสริมแรงนี้จะมากในโครงสร้างเพิร์ลไลต์ละเอียด เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรจะสูงกว่าของเพิร์ลไลต์หยาบนั่นเอง นอกจากนี้ผิวสัมผัสระหว่างเฟส ยังมีบทบาทเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในลักษณะเดียวกับของเกรนอีกด้วย ในโครงสร้างเพิร์ลไลต์ละเอียดจะมีผิวสัมผัสเช่นนี้ที่ดิสโลเคชันต้องข้ามผ่านเป็นจำนวนที่มากกว่าระหว่างการแปรรูปถาวร ดังนั้น ผลจากการเสริมแรงและการจำกัดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันที่รุนแรงกว่าในเพิร์ลไลต์ละเอียด จึงส่งผลให้มันมีความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่าเพิร์ลไลต์หยาบ

เฟิร์ล ไลด์หยาบเหนียวกว่าเฟิร์ล ไลด์ละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 2.34(b) ซึ่งพล็อตระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาณคาร์บอนของโครงสร้างจุลภาคทั้ง 2 แบบ พฤติกรรมแบบนี้เป็นผลจากการจำกัดการแปรรูปถาวรที่มีมากกว่าในเฟิร์ล ไลด์ละเอียดนั่นเอง



รูปที่ 2.34 (a) ความแข็งแบบบริเนลล์และร็อกเวลล์เป็นฟังก์ชันของปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาที่มีโครงสร้างเป็นเฟิร์ล ไลด์ละเอียด เฟิร์ล ไลด์หยาบและคาร์ไบด์กลม (b) ความเหนียว (%RA) เป็นฟังก์ชันของปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาที่มีโครงสร้างเป็นเฟิร์ล ไลด์ละเอียด เฟิร์ล ไลด์หยาบ และคาร์ไบด์กลม

2.7.2 โครงสร้างคาร์ไบด์กลม (สเฟียรอยไคต์)

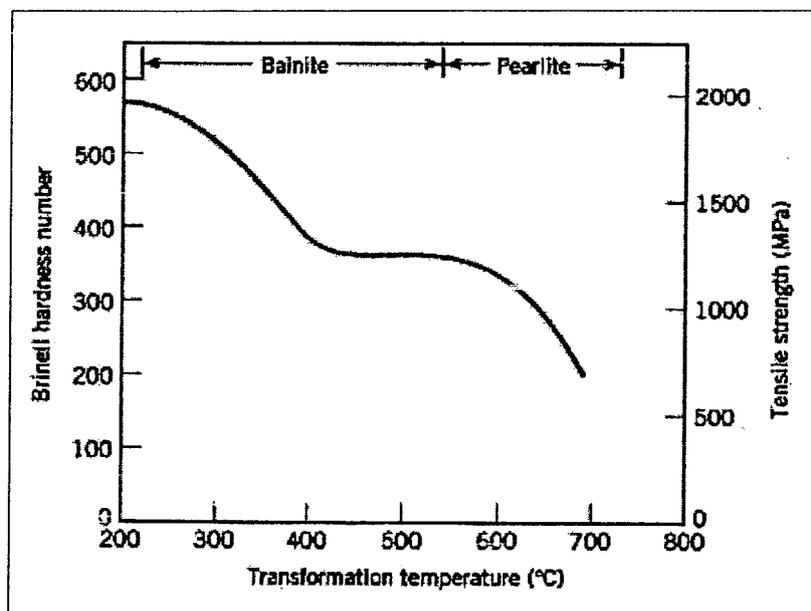
ปัจจัยด้าน โครงสร้างจุลภาคอีกด้านหนึ่ง คือ รูปร่างและการกระจายตัวของเฟสที่ปรากฏ ซีเมนต์ไคต์จะปรากฏอย่างแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ทั้งแง่ของรูปร่างและการกระจายตัวในโครงสร้างแบบเฟิร์ล ไลด์และแบบสเฟียรอยไคต์ โลหะผสมที่มีโครงสร้างเฟิร์ล ไลด์จะมีความแข็งสูงกว่าโครงสร้างคาร์ไบด์กลม ดังแสดงในรูปที่ 2.34(a) ซึ่งเปรียบเทียบความแข็งเป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอน ในโลหะผสมทั้งแบบเฟิร์ล ไลด์และแบบคาร์ไบด์กลม พฤติกรรมทางกลนี้ อธิบายได้ในแง่ของการเสริมแรง รวมทั้งการหน่วงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์-ซีเมนต์ไคต์ดังได้กล่าวไปแล้ว ในโครงสร้างคาร์ไบด์กลม มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่า ส่งผลให้การแปรรูปถาวรแทบจะไม่ถูกจำกัดเลย ทำให้วัสดุนี้เหนียวและนิ่มในทางปฏิบัติ ในบรรดาโลหะผสมของเหล็กกล้าต่าง ๆ ตัวที่นิ่มที่สุดคือ เหล็กที่มีโครงสร้างเป็นคาร์ไบด์กลมนี้เอง

ไม่ต้องสงสัยเลยว่า เหล็กกล้าที่มีโครงสร้างแบบคาร์ไบด์กลมจะเหนียวกว่าเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างเฟิร์ล ไลด์มาก ทั้งเฟิร์ล ไลด์หยาบและละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 2.34(b)นอกจากนี้เหล็ก

ชนิดนี้ยัง “แกร่ง” มากด้วยเนื่องจากรอยแตกร้าวใด ๆ ก็ตามที่กำลังขยายตัวในเนื้อเหล็กนี้จะต้องขยายตัวผ่านโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรต์เท่านั้น โดยมีโอกาสไปพบเฟสที่เปราะของซีเมนไตต์ น้อยมาก

2.7.3 เบนไนต์

เนื่องจากเหล็กกล้าเบนไนต์มีโครงสร้างที่ละเอียดกว่า (กลางคือ มีเกรนของเฟอร์ไรต์ α และอนุภาคของ Fe_3C ที่เล็กกว่า) ดังนั้น มันจึงแข็งและแข็งแรงกว่าเหล็กที่เป็นเพิร์ลไลต์ นอกจากนี้มันยังมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวในเกณฑ์ดีอีกด้วย รูปที่ 2.35 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิแปลงเฟสต่อความเค้นแรงดึงและความแข็งของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนที่มีส่วนผสมยูเทคตอยด์ ในรูป ได้ระบุช่วงอุณหภูมิที่เกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์และเบนไนต์

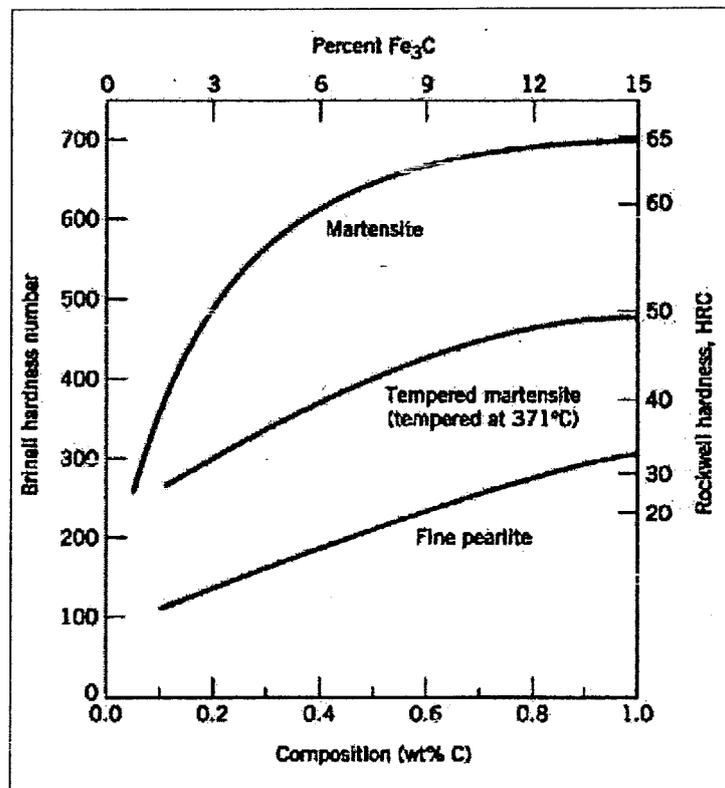


รูปที่ 2.35 แสดงความแข็งแบบบริเนลล์และความเค้นแรงดึงสัมพันธ์กับอุณหภูมิการแปลงเฟสแบบไอโซเทอร์มอลของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน ที่มีส่วนผสมยูเทคตอยด์โดยครอบคลุมอุณหภูมิช่วงที่เกิดเบนไนต์และเพิร์ลไลต์

2.7.4 มาร์เทนไซต์

ในบรรดาโครงสร้างจุลภาคแบบต่าง ๆ ที่จะเกิดได้ในเหล็กกล้าชนิดหนึ่ง ๆ โครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์คือ โครงสร้างที่แข็งและแข็งแรงที่สุด รวมทั้งมันยังเปราะที่สุดอีกด้วย ในความจริงเราถือว่ามีมาร์เทนไซต์ไม่มีความเหนียวอยู่เลยก็ได้ ความแข็งของมาร์เทนไซต์ขึ้นกับปริมาณคาร์บอนจนถึง 0.6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.36 ซึ่งพล็อตความแข็งของมาร์เทน

ไซต์และเฟิร์ลไลต์ละเอียดเป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอน ตรงกันข้ามกับเหล็กกล้าชนิดเฟิร์ลไลต์ ความแข็งแรงและความแข็งของมาร์เทนไซต์ที่สูงนี้ ไม่เกี่ยวข้องกับลักษณะของโครงสร้างจุลภาค แต่ถูกอธิบายว่าเป็นผลจากการที่อะตอมแทรกของคาร์บอนขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันอย่างมีประสิทธิภาพ และการที่โครงสร้างแบบ BCT มีระบบสลิปจำนวนน้อยให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้มันเอง



รูปที่ 2.36 ความแข็งเป็นฟังก์ชันของปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (อบคืนตัวที่ 371°C (700°F)) และเฟิร์ลไลต์

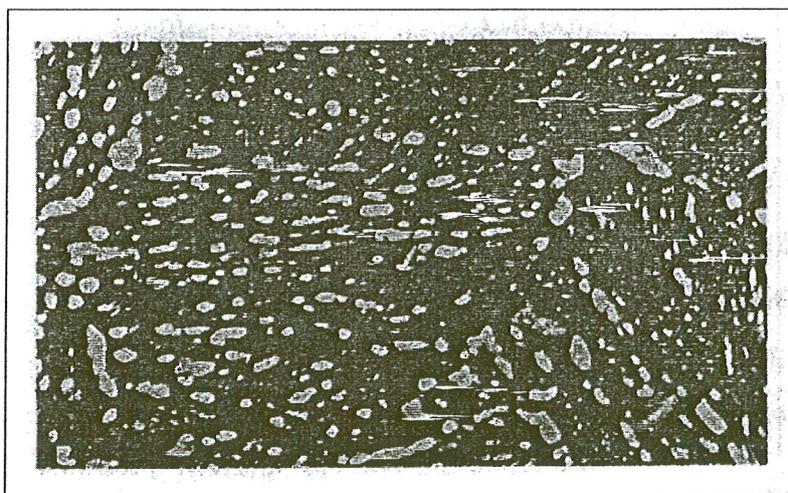
ออสเทนไนต์มีความหนาแน่นสูงกว่ามาร์เทนไซต์เล็กน้อย ดังนั้น ระหว่างที่เกิดการแปลงเฟสในขณะที่ชุบเย็นลงมานั้น จะเกิดการเพิ่มของปริมาตรสุทธิ เป็นผลให้ชิ้นงานใหญ่ที่ชุบให้เย็นเร็ว ๆ เกิดการแตกร้าวได้เนื่องจากความเค้นภายใน สิ่งนี้เป็นปัญหามากโดยเฉพาะเมื่อปริมาณคาร์บอนสูงกว่าประมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก

2.7.5 เทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered martensite)

ในสภาพถูกชุบมาใหม่ๆ มาร์เทนไซต์นอกจากจะแข็งมากแล้วยังเปราะมากอีกด้วย จนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ในทันที ไม่ว่างานลักษณะใดก็ตาม อีกทั้งความเค้นภายในที่เกิดขึ้น

ระหว่างการชุบแข็งเป็นจุดอ่อนของชิ้นงานอีกด้วย ความเหนียวและความแกร่งของมาร์เทนไซต์จะถูกเพิ่มขึ้น รวมทั้งลดความเค้นภายในได้ โดยกรรมวิธีทางความร้อนที่เรียกว่า การอบคืนตัว (Tempering) การอบคืนตัวทำได้โดยให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าที่เป็นมาร์เทนไซต์ จนมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเทคตอยด์เป็นเวลาตามที่กำหนดไว้ โดยปกติ การอบคืนตัวจะทำที่อุณหภูมิระหว่าง 250 ถึง 650°C (480-1200°F) แต่หากต้องการเฉพาะคลายความเค้นภายใน อุณหภูมิต่ำ ๆ เพียง 200°C (390°F) ก็เพียงพอ กรรมวิธีอบคืนตัวจะทำให้เกิดการแพร่ และเกิดปฏิกิริยาแปลงเป็น เเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (tempered martensite) หรือเรียกอีกอย่างว่ามาร์เทนไซต์ที่ผ่านการอบคืนตัว ดังนี้

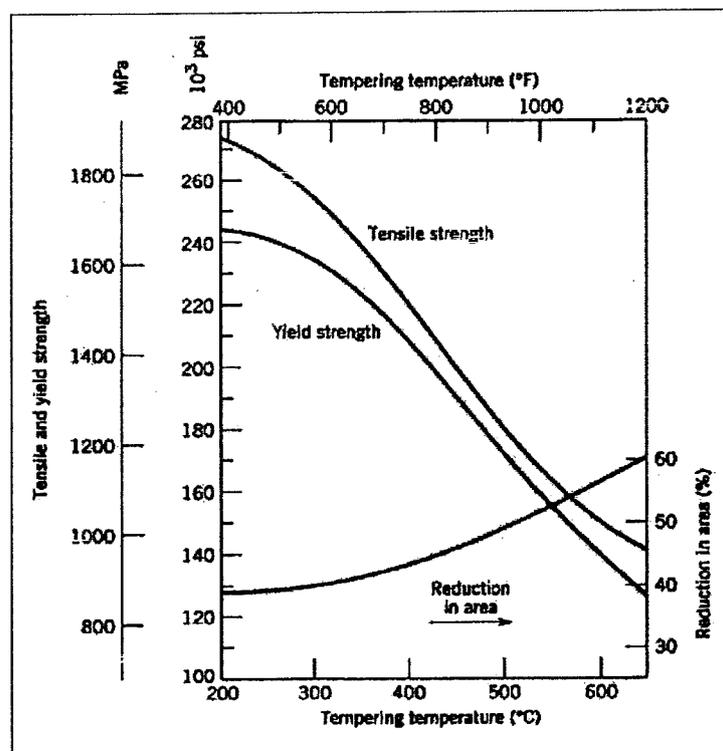
Martensite (BCT, single phase) → Tempered Martensite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ phases) โดยที่มาร์เทนไซต์เฟสเดียว (เป็น BCT) ซึ่งก็คือ เฟสที่มีคาร์บอนละลายอยู่อย่างอิ่มตัวยิ่งยวด แปลงสภาพเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ซึ่งประกอบด้วย เฟสเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ที่เสถียร ดังที่ระบุในแผนภูมิสมดุลเฟสของเหล็ก-คาร์บอน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



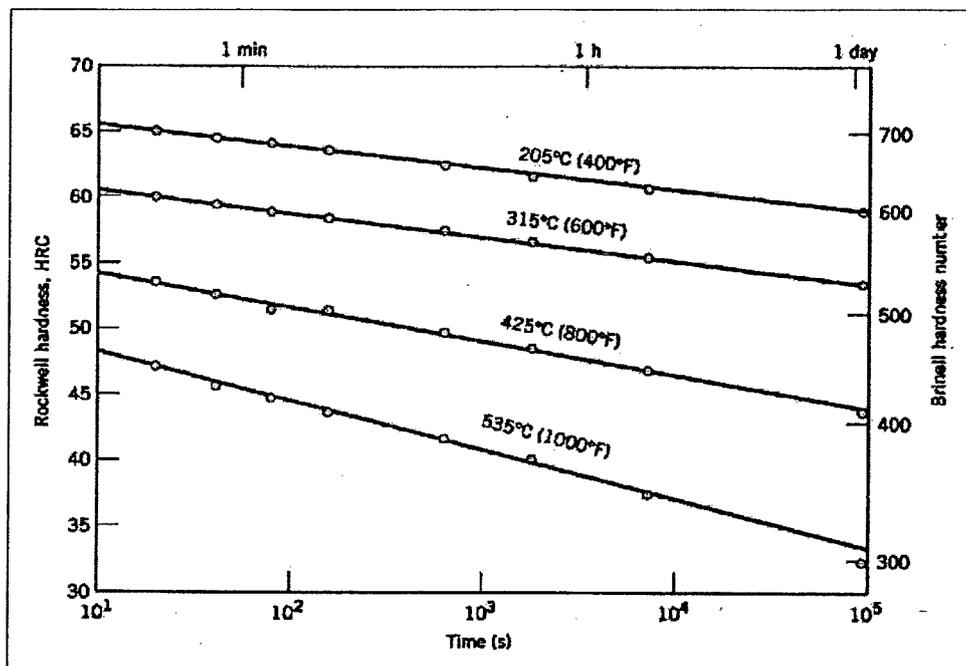
รูปที่ 2.37 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ 594°C (1100°F) อนุภาคเล็ก ๆ คือเฟสซีเมนไตต์ พื้นคือเฟอร์ไรต์ กำลังขยาย 9300

เทมเปอร์มาร์เทนไซต์อาจมีความแข็งและความแข็งแรงสูงเท่า ๆ กับมาร์เทนไซต์ แต่จะมีความเหนียวและความแข็งแกร่งดีกว่ากันพอสมควร ดังกราฟความแข็ง-เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ของคาร์บอน ในรูปที่ 2.36 ซึ่งแสดงเส้นกราฟของเทมเปอร์เตนไซด์ไว้ด้วยนั้น ความแข็งและความแข็งแรงของโครงสร้างนี้อธิบายด้วยการที่มันมีพื้นผิวสัมผัสระหว่างเฟอร์ไรต์-ซีเมนไตต์ (ต่อหน่วยปริมาตร) มากนั่นเอง อนุภาคซีเมนไตต์ซึ่งแข็งทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพื้นเฟอร์ไรต์ตลอดแนวผิวสัมผัส และผิวสัมผัสนี้ยังขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันระหว่างการแปรรูปถาวรอีกด้วย ในขณะที่เฟสเฟอร์ไรต์ซึ่งมีความต่อนั้นเป็นเฟสที่เหนียวและแครงอยู่แล้ว เหล่านี้ส่งผลให้สมบัติทั้งสองด้านของเทมเปอร์มาร์เตนไซด์ค่อนข้างดี ขนาดของอนุภาคซีเมนไตต์ส่งผลต่อสมบัติทางกลของเทมเปอร์มาร์เตนไซด์ หากอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์-ซีเมนไตต์ ส่งผลให้วัสดุนั้นนิ่มและอ่อนลง ในขณะที่จะเหนียวและแครงขึ้น ยิ่งกว่านั้น กรรมวิธีอบคืนตัวเป็นกำหนดขนาดของอนุภาคซีเมนไตต์ ตัวแปรของกรรมวิธีทางความร้อนนี้คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ โดยที่กรรมวิธีใดะมากจะทำให้อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากการแพร่ของคาร์บอนมีบทบาทสำคัญในการแปลงสภาพจากร์เตนไซด์เป็นเทมเปอร์มาร์เตนไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่า จะเร่งการแพร่ให้เร็วขึ้น เป็นผลให้อนุภาคของซีเมนไตต์โตเร็วขึ้น และวัสดุจะอ่อนลง รูปที่ 2.38 แสดงผลของอุณหภูมิอบคืนตัวที่มีต่อความต้านแรงดึง ความเค้นจุดครากและความเหนียวของเหล็กกล้าชนิดหนึ่ง วัสดุนี้ถูกชุบเย็นในน้ำมันเพื่อทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เตนไซด์ 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 ซึ่งเป็นผลจากการโตขึ้นและการรวมตัวของอนุภาคซีเมนไคต์ ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ กับยูเทคตอยด์ (เช่นที่ 700°C (1300°F)) หลังจากเวลาผ่านไปหลายชั่วโมงโครงสร้างจุลภาคจะกลายเป็นแบบคาร์ไบด์เม็ดกลม ประกอบด้วยเม็ดกลมของซีเมนต์เม็ดโตฝังอยู่ในเฟสต่อเนื่องของเฟอร์ไรต์ มาร์เทนไซต์ที่ถูกอบคืนตัวมากเกินไปจะนิ่มและเหนียวขึ้นอย่างมาก

2.7.6 สภาพเปราะจากการอบคืนตัว (Temper embrittlement)

เหล็กกล้าบางชนิดเมื่อนำมาอบคืนตัวกลับทำให้ความแกร่งลดลง ดังที่วัดได้จากการทดสอบแรงกระแทก ปรัชการณณ์นี้เรียกว่า สภาพเปราะจากการอบคืนตัว (Temper Embrittlement) พบเมื่อเหล็กถูกอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 575°C (1070°F) แล้วปล่อยให้เย็นตัวช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง หรือเมื่ออบคืนตัวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 375 ถึง 575°C (700 ถึง 1070°F) โดยประมาณ เหล็กกล้าที่เสี่ยงต่อการเกิดสภาพเปราะจากการอบคืนตัวแบบนี้ คือเหล็กที่มีธาตุผสมแมงกานีส นิกเกิล หรือโครเมียมในปริมาณพอควร และมีธาตุมลทินพวกพลวง ฟอสฟอรัส สารหนู และดีบุกตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน ในปริมาณค่อนข้างต่ำ ธาตุผสมและธาตุ

มลทินเหล่านี้จะเลื่อนอุณหภูมิเปลี่ยนจากสภาพเหนียวเป็นเปราะ (Ductile-to-brittle transition) ให้สูงขึ้นมาก (สูงกว่าอุณหภูมิห้อง) ส่งผลให้วัสดุมีพฤติกรรมเปราะแม้ที่อุณหภูมิได้มีการค้นพบว่ารอยแตกที่ขยายตัวในวัสดุที่มีสภาพเปราะเหล่านี้ จะแตกร้าไปตามรอยต่อระหว่างเกรน (Intergranular) นั่นคือ รอยแตกจะผ่าไปตามขอบเกรนของออสเทนไนต์เดิม นอกจากนั้นยังพบว่าธาตุผสมและธาตุมลทินดังกล่าวมักมารวมตัวกันหนาแน่นบริเวณนี้ด้วย

เราสามารถหลีกเลี่ยง ไม่ให้เกิดสภาพเปราะจากการอบคืนตัวได้โดย

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

2.8 ระบบเหล็ก-คาร์บอน

ในระบบโลหะผสมสององค์ประกอบ ระบบที่สำคัญคือ ระบบเหล็ก- คาร์บอน ทั้งเหล็กกล้า เหล็กหล่อ เป็นโลหะผสมที่สำคัญที่ใช้ในงานโครงสร้าง ล้วนแล้วแต่เป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กกับคาร์บอนทั้งสิ้น ในส่วนนี้จะอธิบายถึงแผนภูมิเฟสของระบบนี้รวมทั้งโครงสร้างจุลภาคที่อาจเกิดขึ้น

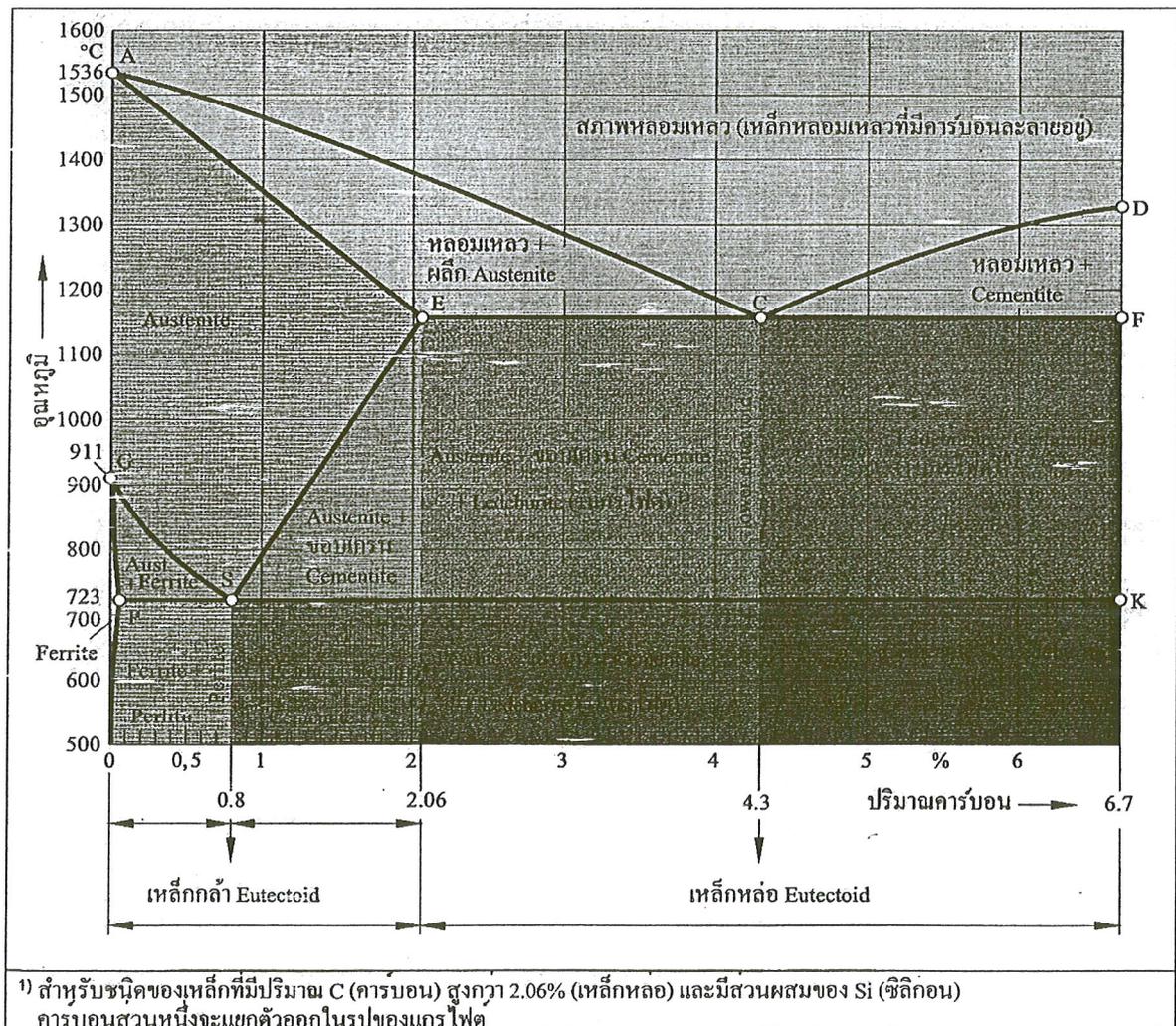
2.8.1 แผนภูมิเฟสเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ (Fe-Fe₃C)

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

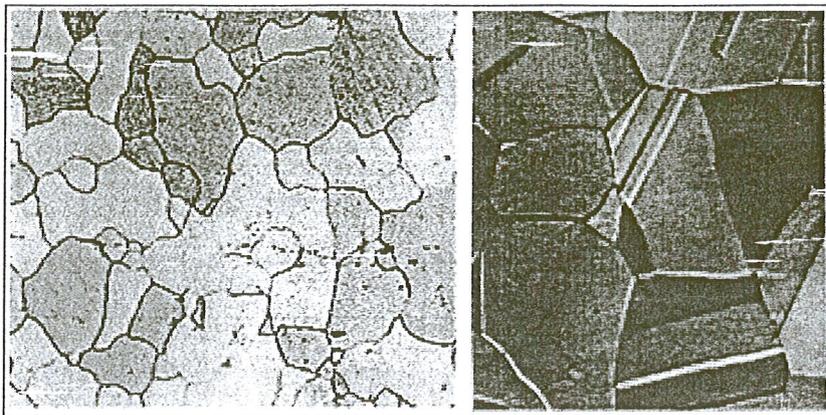
แกนแสดงส่วนผสมในรูปที่ 9.21 แสดงถึงส่วนผสม 6.7 %C ที่จุดนี้เป็นส่วนผสมของสารประกอบระหว่างกลางของเหล็กคาร์ไบด์หรือซีเมนไต์ และแสดงในแผนภูมิเป็นเส้นตั้ง ดังนั้น แผนภูมิเฟสเหล็กคาร์บอนจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีเหล็กมาก (ดังรูปที่ 9.21) และอีกส่วนที่เหลือ คือ คาร์บอนมากกว่า 6.7% จนถึง 100% (แกรไฟต์บริสุทธิ์)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

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

คาร์บอนเป็นสารเจือแบบแทรกที่ในเหล็ก ทำให้เกิดเป็นสารละลายของแข็งเหล็ก-คาร์บอนของเฟสเฟอร์ไรต์ เติลตา เฟอร์ไรต์ และออสเทนไนต์ดังรูปที่ 2.40 คาร์บอนสามารถละลายได้น้อยในเฟอร์ไรต์ดังจะเห็นได้จากขีดจำกัดการละลายสูงสุดเท่ากับ 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) ออสเตนไนต์ กำลังขยาย 325 เท่า

ออสเตนไนต์หรือเฟส γ ของเหล็กเมื่อมีคาร์บอนผสมอยู่ จะไม่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 727°C (2097°F) ดังแสดงในรูปที่ 2.40 ชิดจำกัดการละลายสูงสุดของคาร์บอนใน 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 การแปลงเฟสของออสเตนไนต์มีความสำคัญมากต่อกรรมวิธีความร้อนดังจะได้ อธิบายต่อไป และออสเตนไนต์นี้ไม่เป็นแม่เหล็ก รูปที่ 2.41 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเฟส ออสเตนไนต์

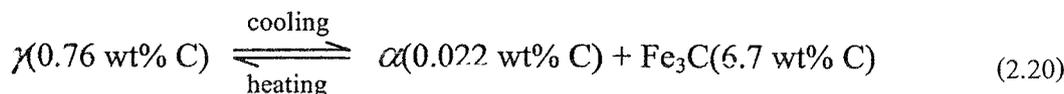
เฟอร์ไรต์เดลตา δ มีลักษณะเหมือนเฟอร์ไรต์ α ยกเว้นว่าอุณหภูมิที่เสถียรต่างกัน กล่าวคือ เฟอร์ไรต์เดลตาจะเสถียรที่อุณหภูมิสูงและไม่มี ความสำคัญทางเทคนิคมากนักจึงจะไม่ อธิบายถึงในที่นี้ ซีเมนไตต์ เกิดขึ้นเมื่อปริมาณการละลายของคาร์บอนมากกว่าขีดจำกัดการละลาย ของเฟอร์ไรต์แอลฟา ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 727°C (1341°F) ดังรูปที่ 2.40 นอกจากนี้ Fe_3C ยังเกิดขึ้น ผสมกับ γ ที่ช่วงอุณหภูมิ 727 ถึง 1147°C (1341 - 2097°F) ซีเมนไตต์มีคุณสมบัติทางกลคือ แข็งแรง แข็ง เปราะ ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของเหล็กได้ แต่ถ้าพิจารณาอย่างละเอียด ซีเมน ไตต์นั้นจัดเป็นสารกึ่งเสถียร กล่าวคือ ถ้าอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ซีเมนไตต์จะคงอยู่ได้ แต่เมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้น เช่น ประมาณ 600 - 700°C (1200 - 1300°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



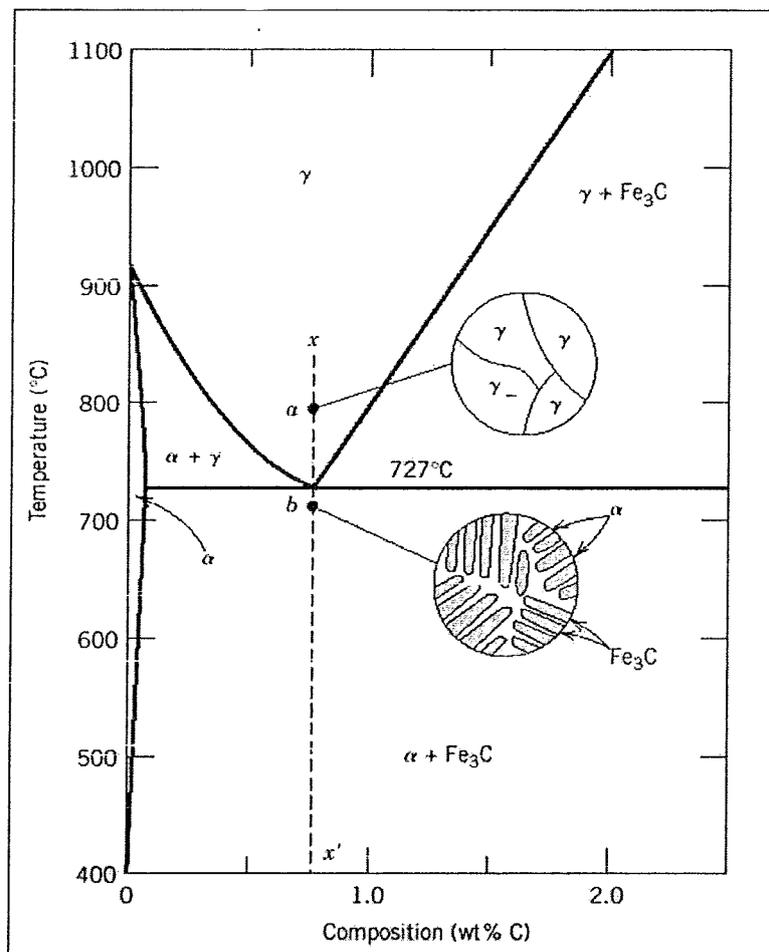
กล่าวคือ ระหว่างการเย็นตัวลง เฟสของแข็ง γ จะเปลี่ยนเป็นเหล็ก α และซีเมนไตต์ การเปลี่ยนเฟสจากปฏิกิริยายูเทคตอยด์ที่แสดงในสมการ 2.20 เป็นสมการสำคัญและเป็นหลักในกรรมวิธีทางความร้อน โลหะผสมในกลุ่มเหล็กจะมีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและมีคาร์บอนรวมทั้งธาตุอื่น ๆ เป็นธาตุผสม ในการแบ่งชนิดของโลหะผสมในกลุ่มเหล็ก 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 อย่างไรก็ตาม ในทางการค้าเหล็กหล่อจะมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 4.5%

2.8.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน

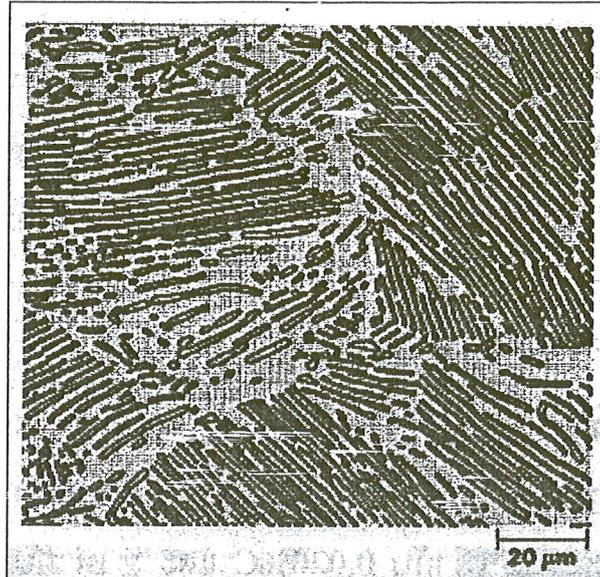
ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างจุลภาคแบบต่าง ๆ ในเหล็กกล้ารวมถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างกับแผนภูมิเฟสเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะขึ้นกับปริมาณคาร์บอน

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

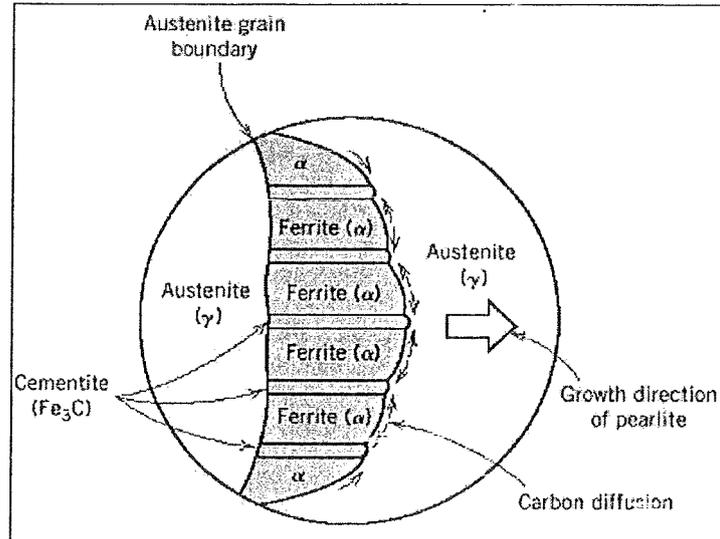


รูปที่ 2.42 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนส่วนผสมยูเทกตอยด์ (0.76% C) ที่อุณหภูมิเหนือและต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทกตอยด์



รูปที่ 2.43 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ที่มีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ประกอบด้วยชั้นแอลฟาเฟอร์ไรต์สีขาวและชั้น 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 เรียกว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์(pearlite) เพราะมีลักษณะเหมือนเปลือกหอยมุก (pearl) เมื่อมองด้วยกำลังขยายต่ำ รูปที่ 2.43 แสดง โครงสร้างเพิร์ลไลต์ในเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ เพิร์ลไลต์จะอยู่ในเกรน (grain) หรือกลุ่ม (colonies) ขึ้นที่ปรากฏจะเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละเกรนหรือแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะแตกต่างกันไปจากเกรนอื่น หรือกลุ่มอื่น ชั้นหนาสีขาวหรือสีอ่อนในรูป คือ เฟส α ส่วนซีเมนต์ไต์ Fe_3C จะเป็นชั้นสีดำบาง Fe_3C บางชั้นบางมากและอยู่ติดกับขอบของเฟส ทำให้ไม่สามารถแยกออกได้ ทำให้เห็นชั้นเหล่านี้เป็นสีดำที่กำลังขยายนี้ เพิร์ลไลต์มีสมบัติทางกลอยู่ระหว่าง α ที่นุ่มและเหนียวกับซีเมนต์ไต์ที่แข็งและเปราะ



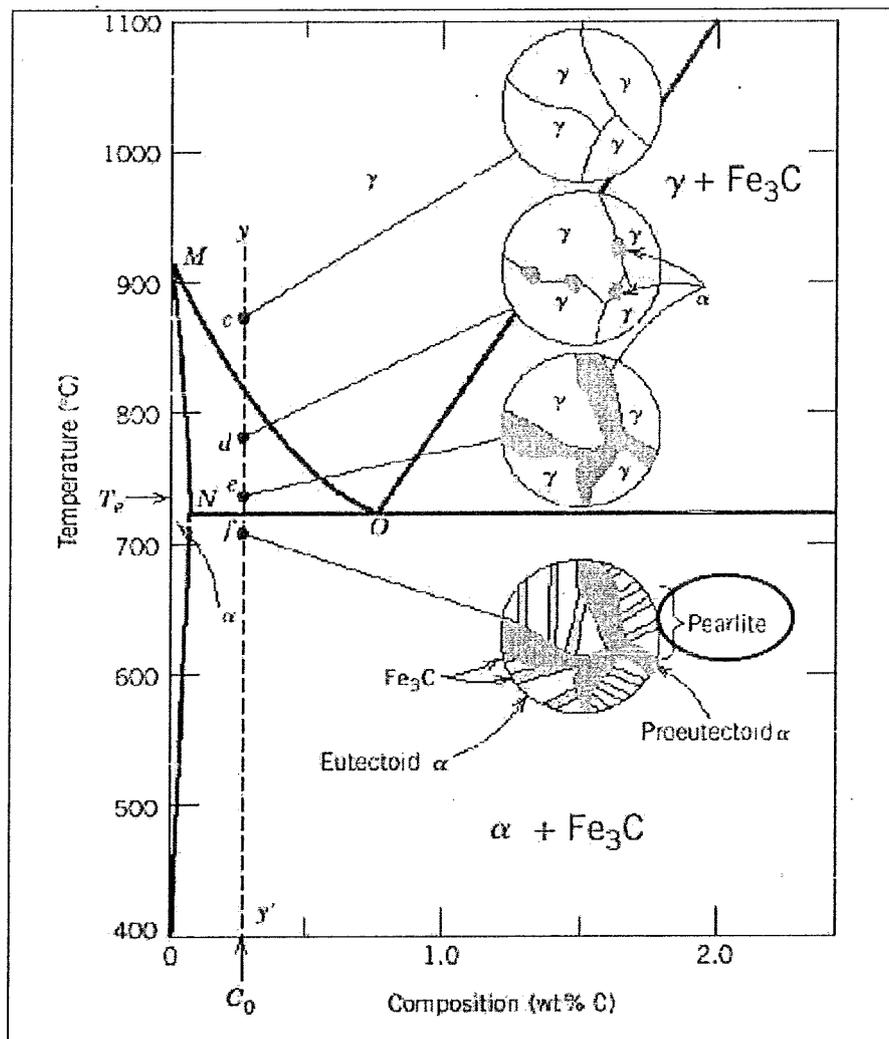
รูปที่ 2.44 รูปแสดงการเกิด โครงสร้างเพิร์ลไลต์จากออสเทนไนต์ ทิศทางการแพร่ของคาร์บอน แสดงดังลูกศรในรูป

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 ก็เนื่องเพราะต้องการลดระยะทางการแพร่ของคาร์บอนให้น้อยที่สุดนั่นเอง หลังจากนั้น เมื่อเย็นตัวลงหลังจากจุด b จะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างอย่างชัดเจน

2.8.3 โลหะผสมไฮโปยูเทคตอยด์

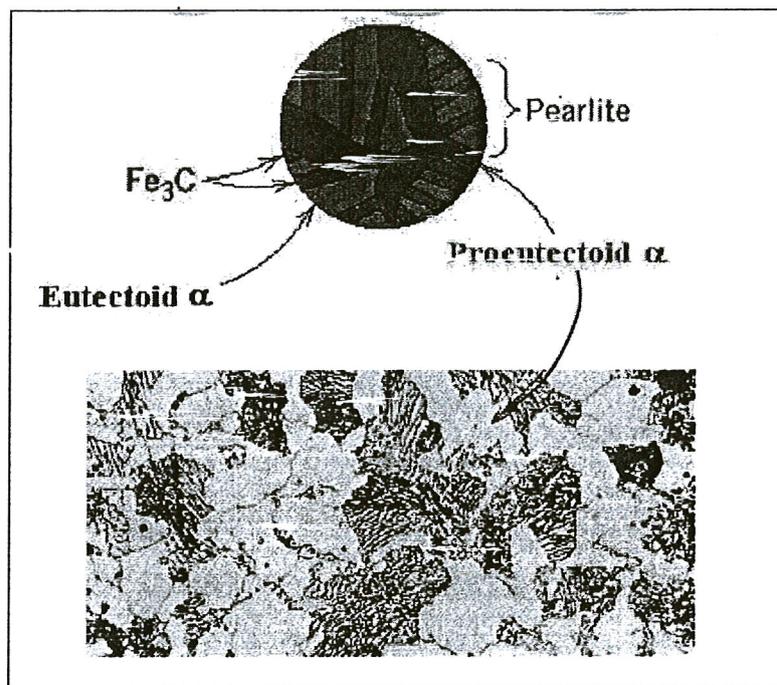
โครงสร้างจุลภาคที่ประกอบจากเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์มีแบบอื่น ๆ อีกนอกจากแบบยูเทคตอยด์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณีได้เหมือนระบบยูเทคติก พิจารณาส่วนผสม C₀ ซึ่งอยู่ทางซ้ายของยูเทคตอยด์ระหว่าง 0.022-0.76%C โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าโลหะผสมไฮโปยูเทคตอยด์ เมื่อโลหะผสมชนิดนี้เย็นตัวลงตามเส้นแนวตั้ง yy' ในรูปที่ 2.45 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

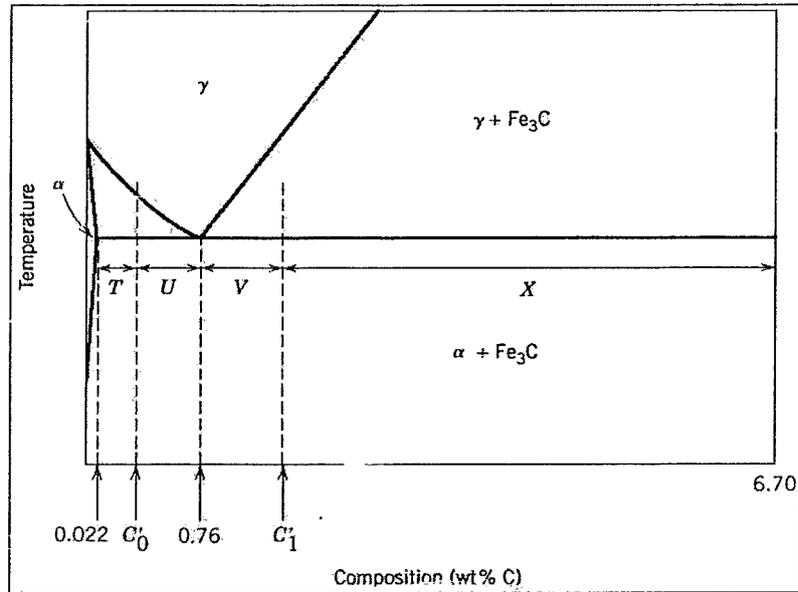


รูปที่ 2.45 รูปแสดง โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็กคาร์บอนแบบไฮโปยูเทกตอยด์ ส่วนผสม C_0 (มีคาร์บอนน้อยกว่า 0.76% โดยน้ำหนัก) เมื่อเย็นตัวลงจากเฟส ออสเทนไนต์ผ่านอุณหภูมิยูเทกตอยด์

เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่ายูเทกตอยด์ที่จุด f เฟส γ ทั้งหมดที่ยังคงเหลือที่อุณหภูมิ T_e (ซึ่งมีส่วนผสมยูเทกตอยด์) จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์ตามสมการ 2.20 และขณะผ่านอุณหภูมียูเทกตอยด์จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของเฟส α ที่เกิดก่อนจุด e โดยปกติ โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟสพื้นและกลุ่มของเฟอร์ไรต์ ไลต์ โครงสร้างจุลภาคที่จุด f ดังแสดงในรูปเล็กในรูปที่ 2.45 เฟอร์ไรต์จะมีอยู่ทั้งในเฟอร์ไรต์ ไลต์ เรียกว่า ยูเทกตอยด์เฟอร์ไรต์ (eutectoid ferrite) และในเฟสซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวลงผ่านบริเวณ $f + \gamma$ ที่อยู่เหนือ T_e เรียกว่า โปรยูเทกตอยด์เฟอร์ไรต์ (proeutectoid ferrite ซึ่งหมายถึงเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นก่อนยูเทกตอยด์) หรือเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.46 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้า 0.38%C ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ไลต์และเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ กำลังขยาย 635 เท่า



รูปที่ 2.47 ส่วนของแผนภูมิเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ที่ใช้ในการคำนวณอัตราส่วนของเฟสปฐมภูมิและเฟิร์ลไลต์ของเหล็กสำหรับส่วนผสมไฮโปยูเทคตอยด์ และไฮเปอร์ยูเทคตอยด์

สำหรับรูปที่ 2.46 เป็นโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 0.35%C ส่วนสีขาวขนาดใหญ่ คือ เฟอร์ไรต์ปฐมภูมิสำหรับเฟิร์ลไลต์ ความหนาของ α และ Fe_3C จะแตกต่างกันในแต่ละเกรน จะเห็นว่าเฟิร์ลไลต์บางเกรนจะเป็นสี่เกือบดำเพราะความหนาของแต่ละชั้นค่อนข้างน้อยมาก 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

$$\begin{aligned}
 W_p &= \frac{T}{T + U} \\
 &= \frac{C'_0 - 0.022}{0.76 - 0.022} = \frac{C'_0 - 0.022}{0.74} \quad (21)
 \end{aligned}$$

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 (ในยูเทกตอยด์และเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ) และซีเมนไตต์ สามารถคำนวณได้จากกฎของคานังด์และไทไลน์ที่ลากผ่านบริเวณของ $\alpha + Fe_3C$ ก็คือ 0.022% ถึง 6.7%C

2.8.4 โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทกตอยด์

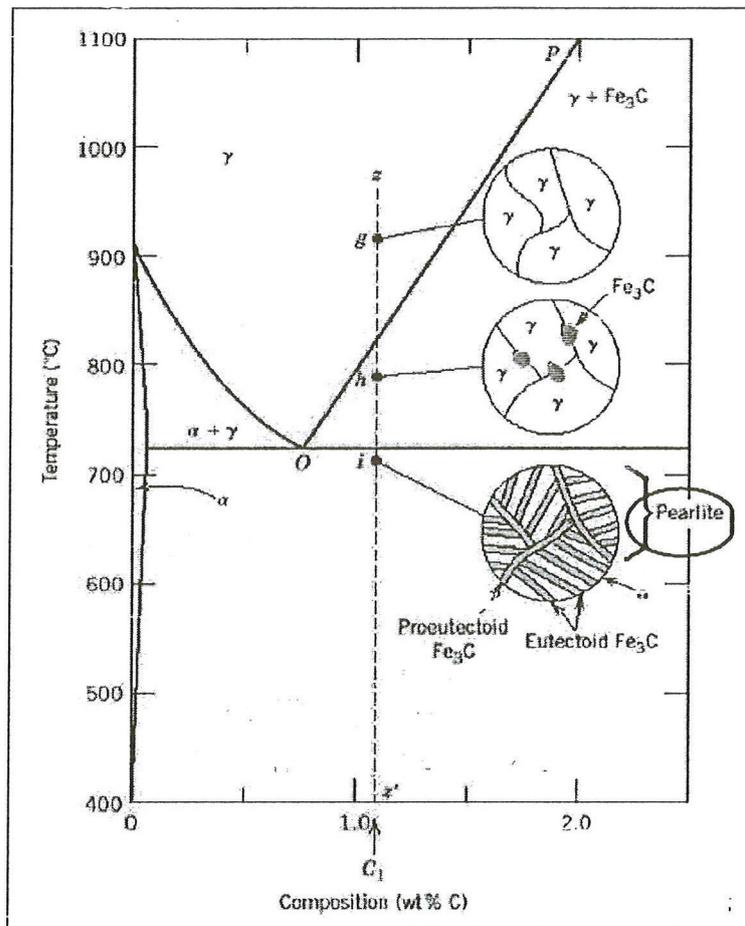
โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทกตอยด์มีส่วนผสมตั้งแต่ 0.76-2.14%C และเย็นตัวลงจากบริเวณที่เป็น γ เฟสเดียวจะได้โครงสร้างของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ พิจารณาโลหะผสมส่วนผสม C1 ในรูปที่ 2.48 เมื่อเย็นตัวลงตามเส้น zz' ที่จุด g จะมีเพียงเฟส γ เท่านั้น ดังโครงสร้างที่วาดแสดงในรูป เมื่อเย็นลงตัวผ่านบริเวณ $\gamma + Fe_3C$ เช่นที่จุด h จะเริ่มเกิดเฟสซีเมนไตต์ที่ตามขอบเกรนของ γ เหมือนกับกรณีของ α ในรูปที่ 2.45 ที่จุด d ซีเมนไตต์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ซีเมนไตต์ปฐมภูมิ ซึ่งเกิดก่อนปฏิกิริยายูเทกตอยด์ และซีเมนไตต์ที่เกิดขึ้นจะมีส่วนผสมคาร์บอนที่คือ 6.7%C ไม่ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม แต่ส่วนผสมของ γ จะเปลี่ยนแปลงตามเส้น PO จนถึงยูเทกตอยด์ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าจุดยูเทกตอยด์ (จุดที่ i) γ ที่เหลือจะมีส่วนผสมเป็นยูเทกตอยด์พอดีก็จะเปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรต์ ดังนั้น โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทกตอยด์จึงประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ปฐมภูมิ และจัดเป็นส่วนประกอบจุลภาคด้วย (รูปที่ 2.48) ในรูปที่ 2.49 ของเหล็กกล้า 1.4%C โดยน้ำหนัก แสดงซีเมนไตต์ปฐมภูมิสีขาวเหมือนกับเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิในรูปที่ 2.46 จึงทำให้การแยกเหล็กไฮโปยูเทกตอยด์และไฮเปอร์ยูเทกตอยด์จากโครงสร้างจุลภาคค่อนข้างยาก

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

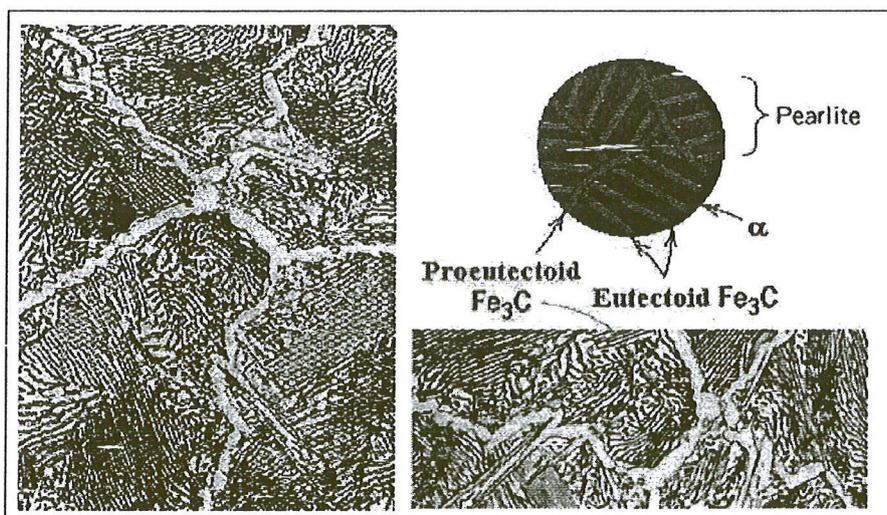
$$W_p = \frac{X}{V + X} = \frac{6.7 - C'_1}{6.7 - 0.76} = \frac{6.7 - C'_1}{5.94} \quad (23)$$

และ

$$W_{Fe_3C} = \frac{V}{V + X} = \frac{C'_1 - 0.76}{6.7 - 0.76} = \frac{C'_1 - 0.76}{5.94} \quad (24)$$



รูปที่ 2.48 รูปแสดง โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็กคาร์บอนแบบไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ส่วนผสม C₁ (มีคาร์บอน 0.76-2.14% โดยน้ำหนัก) เมื่อเย็นตัวลงจากเฟสออสเทนไนต์ ผ่านอุณหภูมิยูเทคตอยด์



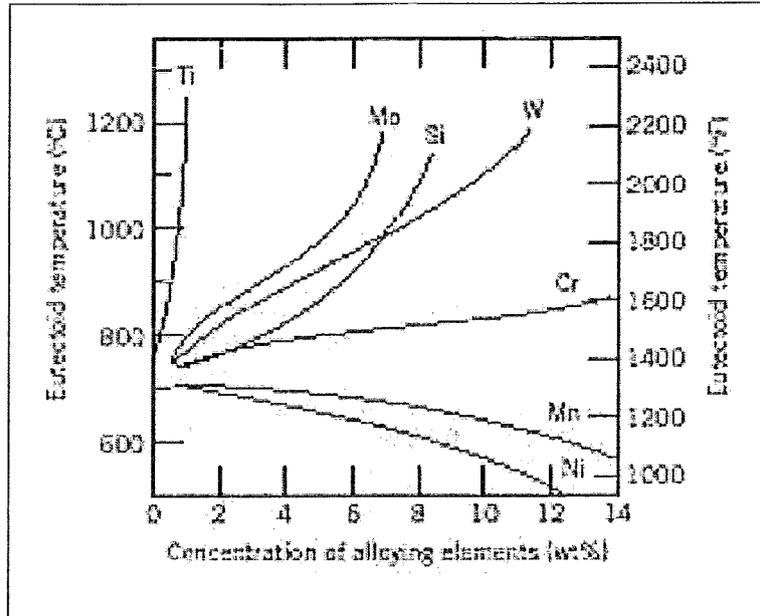
รูปที่ 2.49 รูปแสดง โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้า 1.4%C ประกอบด้วยเฟิร์ลไลต์และค้ำยซีเมนไตต์ ปฐมภูมิกำลังขยาย 1000 เท่า

2.8.4 การเย็นตัวแบบไม่สมดุล (Nonequilibrium cooling)

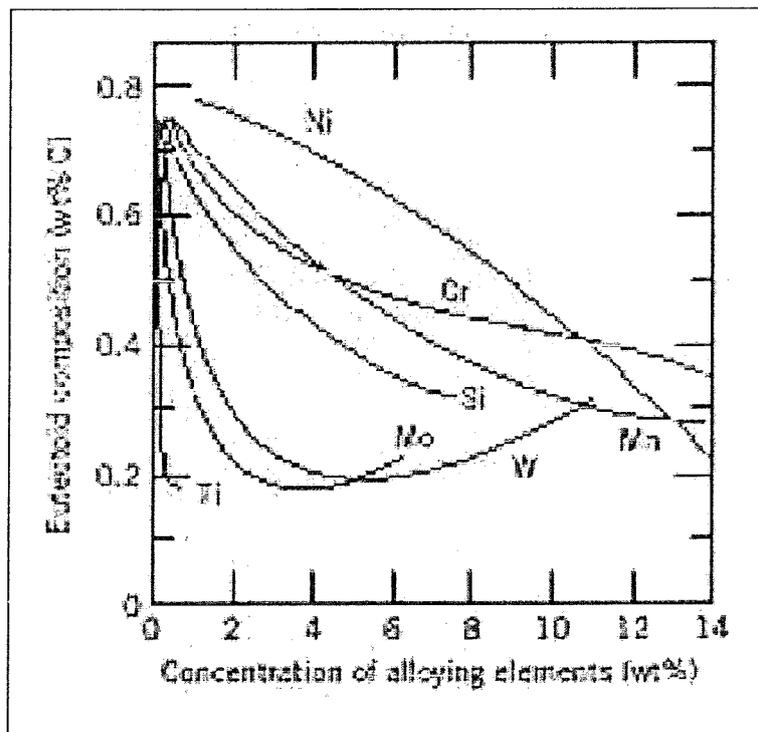
ในการอธิบายต่อไปเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนจะตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า การเย็นตัวเป็นไปตามสมดุลแบบกึ่งเสถียร (metastable equilibrium-คำว่าสมดุลแบบกึ่งเสถียรนี้ถูกใช้ในที่นี่ เนื่องจากเฟส Fe_3C เป็นสารประกอบกึ่งเสถียร) ดังนั้นหมายความว่าอุณหภูมิใด ๆ จะต้องมีเวลาเพียงพอให้เกิดการเปลี่ยนส่วนผสมของแต่ละเฟส และอัตราส่วนของแต่ละเฟสให้เป็นไปตามแผนภูมิเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์โดยส่วนมากแล้ว อัตราการเย็นตัวดังกล่าวช้าเกินกว่าที่ใช้ในงานจริงในทางปฏิบัติ 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 แต่ยังมีผลถึงอัตราส่วนของเฟอร์ไรต์ไลต์และเฟสปฐมภูมิด้วย อย่างไรก็ตาม การเติมธาตุผสมลงในเหล็กกล้าเกิดจากเหตุผลหลาย ๆ อย่าง เช่น ปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อน หรือเพื่อเพิ่มสมบัติด้านกรรมวิธีทางความร้อน [39, 40, 41]



รูปที่ 2.50 อุณหภูมิยูเทคตอยด์ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณธาตุผสมในเหล็กกล้า



รูปที่ 2.51 ส่วนผสมยูเทคตอยด์ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณธาตุผสมในเหล็กกล้า