บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 การขึ้นรูปโลหะทางกล

การขึ้นรูปโลหะ คือ กระบวนการแปรรูปโลหะให้ได้รูปร่างตามต้องการ โดยการขึ้นรูปโลหะที่งานวิจัยนี้สนใจคือ การขึ้นรูปโลหะทางกล

การขึ้นรูปโลหะทางกล คือ วิธีการทำให้โลหะเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรโดยใช้แรงหรือความเค้นจากภายนอก โลหะส่วนใหญ่ค่อนข้างเหนียวจึงสามารถเปลี่ยนรูปด้วยการขึ้นรูปทางกลได้โดยไม่มีรอยร้าวหรือแตกหัก เทคนิคการขึ้นรูปทางกลที่สนใจในงานวิจัยนี้คือ การลากขึ้นรูปลึก (deep drawing) และการขึ้นรูปแบบยืด (stretch forming)

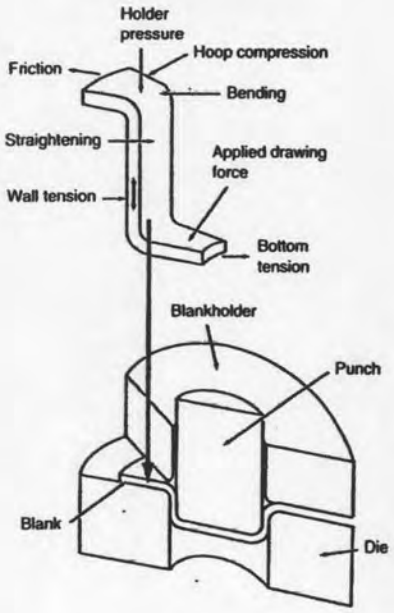
2.1.1 การลากขึ้นรูปลึก

การลากขึ้นรูปเป็นกระบวนการแปรรูปโลหะแผ่นโดยยึดชิ้นงาน ในขณะที่กึ่งกลางของชิ้นงานนั้นถูกกดด้วยแม่พิมพ์เพื่อแปรรูปชิ้นงานโลหะให้ได้รูปร่างตามต้องการ โดยที่ความหนาของชิ้นงานมีการลดขนาดน้อยหรือไม่มีการลดขนาดเลย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

ความสามารถการลากขึ้นรูปลึกของโลหะนั้นจะมีตัวแปรสำคัญอยู่ 2 ชนิด [1] ซึ่งก็คือ

1. ความสามารถของวัสดุที่บริเวณปีก (flange) ที่ไหลไปในระนาบที่ชิ้นงานได้รับแรงเฉือนได้โดยง่าย
2. ความสามารถของขอบข้างวัสดุต่อการต้านทานการเปลี่ยนขนาดในทิศทางของความหนา

ซึ่งสิ่งที่ใช้บ่งบอกความสามารถการต้านทานการเปลี่ยนขนาดในทิศทางของความหนา นั้นคือ ค่า Rm ซึ่งเป็นค่าที่งานวิจัยนี้สนใจ



รูปที่ 2.1 การลากขึ้นรูปลึก

2.1.2 การขึ้นรูปแบบยืด

การขึ้นรูปแบบยืด เป็นกระบวนการแปรรูปโลหะแผ่น โดยส่วนที่ต้องการจะแปรรูปจะอยู่บนแม่พิมพ์หรือแบบที่มีรูปร่างตามต้องการ ในขณะที่ชิ้นงานถูกยึดด้วยแรงดึง ซึ่งได้จากการยึดของตัวยึดจับทางกล และชิ้นงานถูกยืดให้เลยความยืดตัวที่จุดคราก เพื่อให้ชิ้นงานมีรูปร่างเป็นไปตามแบบอย่างถาวร สิ่งที่ใช้บ่งชี้ถึงความสามารถการขึ้นรูปแบบยืดนั้น คือ strain-hardening exponent (n)

2.2 ความสามารถการขึ้นรูป

ความสามารถการขึ้นรูปคือสิ่งซึ่งใช้บอกความสามารถที่จะขึ้นรูปชิ้นงานโดยชิ้นงานไม่เกิดความแตกหักเสียโดยสามารถบอกได้จากสมบัติทางกล เพราะว่าสมบัติทางกลนั้นมีผลต่อความสามารถการขึ้นรูปทั้งทางตรงและทางอ้อม และข้อมูลสมบัติทางกลที่สำคัญส่วนใหญ่ได้จากการทดสอบแรงดึงซึ่งก็คือ ความแข็งแรงจุดคราก (yield strength) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) อัตราการการยืดตัวทั้งหมด (total elongation) การยืดตัวที่สม่ำเสมอ (uniform elongation) การยืดตัวของจุดคราก (yield point elongation) ค่า plastic strain ratio เฉลี่ย (Rm) planar anisotropy (Δr) และค่า stain hardening exponent (n) การทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียวอาจจะถูกทดสอบโดยใช้ชิ้นงานที่เตรียมมาตามแนวยาว ทำมุมทแยง ทำมุมตั้งฉาก หรือในทิศทางใดๆที่สัมพันธ์กับทิศทางการรีดก็ได้ สมบัติทางกลพื้นฐานของเกรดทั่วไปของเหล็กกล้ารีดร้อน ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลทั่วไปของเหล็กกล้ารีดร้อน [2]

Type or quality	Special feature	Yield strength		Tensile strength		Elongation in 50 mm (2 in.), %	Hardness, HRB	Strain-hardening exponent, n	Plastic-strain ratio, r_m
		MPa	ksi	MPa	ksi				
Commercial	Standard properties	262	38	359	52	30	55	0.15	0.9
Drawing (rimmed)	Improved properties	241	35	345	50	35	50	0.18	1.0
Drawing (special killed)	Nonaging	241	35	345	50	40	50	0.20	1.0
Medium strength	Inclusion shape control	345	50	414	60	25	70	0.15	0.9
High strength	Inclusion shape control	552	80	620	90	15	90	...	...

ข้อมูลสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงมีดังนี้

ความแข็งแรงจุดคราก (yield strength) ของเหล็กกล้าแผ่นเป็นเครื่องแสดงทั้งความสามารถการขึ้นรูปและความแข็งแรงหลังขึ้นรูป พฤติกรรมของจุดครากหลายแบบได้ถูกสังเกตพบในเหล็กกล้าแผ่นดังรูปที่ 2.2 เมื่อการยืดตัวของจุดครากปรากฏ (yield point elongation) ค่าความเค้นที่ต่ำที่สุดในระหว่างความไม่ต่อเนื่องของจุดครากได้ถูกบันทึกว่าเป็นความแข็งแรงจุดคราก ในกรณีที่ไม่มีการยืดตัวของจุดครากใช้การลากเส้นขนานกับความเค้นที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซ็นต์ (0.2 % offset) หรือ ลากตั้งฉากกับการยืดตัว 0.5 เปอร์เซ็นต์ถูกบันทึกว่าเป็นความแข็งแรงจุดคราก

การขึ้นรูปเหล็กกล้าแผ่น ค่าความแข็งแรงจุดคราก 240 MPa หรือมากกว่าจะเพิ่มโอกาสการเกิด springback มากเกินไปและการแตกหักในขณะการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงจุดครากต่ำกว่า 140 MPa อาจจะเป็นผลให้ชิ้นส่วนจะมีความแข็งแรงไม่เพียงพอ

การยืดตัวทั้งหมด (total elongation) หลังการแตกหัก ชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่แตกหักมาวางต่อกันและวัดความยาวระหว่าง gage length ที่ทำเครื่องหมายไว้ การกระทำนี้เป็นการวัดเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและบันทึกว่าเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจากความยาวเดิมซึ่งโดยทั่วไปมีความยาวเดิมประมาณ 50 มิลลิเมตร (อาจจะมีค่าเท่ากับ 200 มิลลิเมตรในกรณีที่เป็นโลหะที่มี gage length มากกว่า) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจากการทดสอบของชิ้นงานต่างกันแต่ใช้วัสดุชนิดเดียวกันอาจมีค่าต่างกันได้ เนื่องจากความแตกต่างของความยาว gage length ความหนาของแผ่น การเตรียมขอบและขอบสุดท้าย วิธีการทดสอบหรือตัวแปรอื่นๆ

โดยทั่วไปค่าของปริมาณการยืดตัวของชิ้นงานที่มี gage length 50 มิลลิเมตรได้ให้ไว้ในตารางที่ 1 สำหรับเหล็กกล้าแผ่นเกรดที่ใช้ในงานขึ้นรูปทั่วไป ส่วนใหญ่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ 35 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชิ้นงานที่มี gage length ยาว 50 มิลลิเมตรเป็นค่าทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนปกติ เปอร์เซ็นต์การยืดตัวยิ่งสูงความสามารถในการขึ้นรูปก็ยิ่งดี

การยืดตัวสม่ำเสมอ (uniform elongation) การยืดตัวทั้งหมดนั้นประกอบด้วยสองส่วน นั้นก็คือ การยืดตัวที่สม่ำเสมอ และการยืดตัวหลังการยืดตัวสม่ำเสมอ สำหรับวัสดุที่เป็นไปตาม power relationship $\sigma = K\varepsilon^n$ การยืดตัวสม่ำเสมอ (วัดเป็นความเครียดแท้จริง) มีค่าเท่ากับ strain-hardening exponent (n) เปอร์เซ็นต์การยืดตัวหลังการยืดตัวสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับพฤติกรรม strain-hardening และ strain rate sensitivity ที่ตอบสนองกับโลหะที่ถูกใส่ความเค้น เมื่อเกิดการคอดความเครียดและอัตราความเครียด (strain rate) ในบริเวณที่คอดจะมากกว่าบริเวณอื่น และ strain hardening ที่เพิ่มขึ้นอาจจะชดเชยต่อความนิ่มลงเนื่องจากความหนาตัดขวางที่ลดลง เนื่องจากการเลื่อนของการแปรรูปไปยังบริเวณเลยจากส่วนที่คอด

การยืดตัวทางวิศวกรรมจนถึงแรงที่สูงที่สุด (e_u)มีความสัมพันธ์กับ strain-hardening exponent (n) ตามสมการ

$$n = \ln(1 + e_u) \qquad \text{สมการที่ 1}$$

โดยทั่วไปค่าของ e_u สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะอยู่ในช่วง 20-30 เปอร์เซ็นต์ ค่า e_u และ ค่า n สามารถระบุอัตรา work-hardening ของโลหะแผ่นและความสามารถการขึ้นรูปของโลหะเพื่อใช้ขึ้นรูปแบบยืด (stretch) plain-strain และการขึ้นรูปแบบดัด ตัวแปรอื่นเช่น strain rate sensitivity สามารถเพิ่มหรือลดได้จากความสามารถของโลหะเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วน ตัวอย่างเช่น ค่า n ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและอะลูมิเนียมเกรด 1100-O มีค่าโดยประมาณเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามทั้งค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมดและขีดจำกัดการขึ้นรูปของอะลูมิเนียมนั้นมีค่าต่ำกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เพราะว่าอะลูมิเนียมนั้นมีค่า strain rate sensitivity (m) ที่เป็นค่าลบ โดยค่า m หาได้จากสมการ

$$m = \frac{\ln(\sigma_1/\sigma_2)}{\ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2)} \qquad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น และ ε คืออัตราความเครียด (strain rate)

สำหรับโลหะแผ่นที่ซึ่งเกิดการแตกหักเสียหายเนื่องจากการคอด ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสม่ำเสมอนั้นอาจจะไม่ให้ค่าประมาณของความสามารถการขึ้นรูปที่แท้จริง การประมาณซึ่งมีพื้นฐานมาจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมดถูกพิจารณาว่ามีความน่าเชื่อถือมากกว่า

การยืดตัวของจุดคราก (yield point elongation) เป็นสัดส่วนของการยืดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระหว่างที่เกิดความไม่ต่อเนื่องของจุดคราก (discontinuous yielding) ที่ความเค้นจุดคราก โดยมีปัญหา Luders Lines หรือ stretcher strain เกิดขึ้นตามมาทำให้เกิดลักษณะที่ไม่น่ามองหรือผิวที่ขรุขระ ซึ่งถูกพิจารณาเป็นข้อบกพร่องในการใช้งานโลหะแผ่น การยืดตัวของจุดครากที่พบในการทดสอบแรงดึงบ่งบอกว่า Luders Lines เป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป

การยืดตัวของจุดครากเกิดจากการมีอยู่ของธาตุผสมแบบแทรกที่ซึ่งเหลืออยู่เป็นอะตอมอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์บอนหรือไนโตรเจน ดังนั้นเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมแบบแทรกที่น้อยจึงไม่เกิดปรากฏการณ์นี้ การยืดตัวของจุดครากสามารถถูกยับยั้งได้โดยการ temper rolling เหล็กกล้าแผ่นโดยใช้การรีด อย่างไรก็ตามถ้าไนโตรเจนไม่รวมกับธาตุอื่น (ส่วนใหญ่เป็นอะลูมิเนียม) แต่ละลายอยู่ในเนื้อเหล็ก เหล็กกล้าจะเกิดการ age hardening ขึ้นเมื่อเวลาผ่านช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งอาจจะเป็นระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมงไปจนถึงเป็นปีหรือมากกว่า (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บและตัวแปรอื่นๆ) เหล็กกล้าที่เกิดการ aging ถูกใช้ในการขึ้นรูปทั่วไป โดยอาจจะเป็นระดับการรีด (roller leveled) หรือ ระดับที่ยืดหยุ่น (flex leveled) ทันทีก่อนเกิดข้อบกพร่องดังกล่าว ถึงแม้ว่าวิธีเหล่านี้จะให้ผลได้น้อยกว่าการทำ temper rolling ก็ตาม

Plastic Strain Ratios เฉลี่ย(Rm)

เนื่องจากความแข็งแรงจุดคราก (flow strength หรือ yield strength)ในทิศทางความหนามีความยากในการวัด ดังนั้นจึงมีการวัด plastic strain ratio แทนซึ่งplastic strain ratio (ค่า r) นั้นเป็นการเปรียบเทียบความแข็งแรงในแนวระนาบต่อแนวความหนา โดยหาจากค่าความเครียดแท้จริง (true strain) จากการทดสอบแรงดึง โดยจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$r = \varepsilon_w / \varepsilon_t \qquad \text{สมการที่ 3}$$

โดยที่ ε_w คือ ความเครียดแท้จริงในทิศทางความกว้าง และ ε_t คือความเครียดแท้จริงในทิศทางความหนา และเนื่องจากโลหะแผ่นมีสมบัติไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางดังนั้นจึงมีการหาค่าเฉลี่ยจากการนำค่า r จากทิศทางที่ขนานกับแนวการรีด ทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด และ ทิศทางที่ทำมุม 45 องศากับแนวการรีด โดยค่า Rm สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Rm = (r_L + r_T + 2r_{45}) / 4 \qquad \text{สมการที่ 4}$$

โดย r_L คือค่า r ที่หาได้จากทิศทางนานกับแนวการรีด r_T คือค่า r ที่หาได้จากทิศทางทำมุมตั้งฉากกับแนวการรีด และ r_{45} นั้นคือค่า r ที่หาได้ในทิศทางมุม 45 องศากับแนวการรีด

ถ้าความแข็งแรง (flow strength) ในแนวระนาบ (ขนานกับแนวรีด) เท่ากับในแนวความหนาจะส่งผลให้ค่า Rm มีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้าความแข็งแรงในแนวความหนามีค่ามากความแข็งแรงเฉลี่ยในแนวระนาบจะมีผลทำให้ค่า Rm มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งในกรณีหลังนี้จะพบว่า วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการบางลง (thinning) ของความหนา โดยทั่วไปนั้นยิ่งค่า Rm ยิ่งมากจะมีสมบัติในการขึ้นรูปลึกได้ดี

การทดสอบหาค่า Rm นั้นแตกต่างกับการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปที่การทดสอบหาค่า Rm นั้นเป็นการทดสอบโดยที่ชิ้นงานยังไม่ขาดแต่มีการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบอยู่ในช่วงที่มีการยืดตัวของแผ่นโลหะ 15 – 20 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนใหญ่ทำการทดสอบโดยเหล็กแผ่นมีการยืดตัวอยู่ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ และจะใช้การยืดตัว 15 เปอร์เซ็นต์ก็ต่อเมื่อเหล็กแผ่นมีการยืดตัวต่ำกว่า 20

เปอร์เซ็นต์ โดยค่า Rm ของเหล็กกล้าโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ 2 แต่ในทางทฤษฎีนั้นค่า Rm สำหรับโลหะที่มีโครงสร้างแบบ BCC นั้นสามารถมีค่าได้ถึง 3

ค่า Rm มีความสำคัญเนื่องจากค่า Rm ได้รับอิทธิพลมาจากการกระจายตัวของความเครียดในระหว่างการกดขึ้นรูป ซึ่งมีผลต่อแนวโน้มการเกิดการต้านทานการบางลงและความสามารถในขึ้นรูปลึกของเหล็กกล้าได้ โดยค่า Rm มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า LDR (Limiting Drawing Ratio) โดยพบว่า เหล็กกล้าที่ค่า Rm สูงมีความสม่ำเสมอของความหนาของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมากกว่าเหล็กกล้าที่มีค่า Rm ต่ำ

ค่า Rm ในเหล็กกล้ารีดเย็นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคด้วย โดยค่า Rm สัมพันธ์กับขนาดเกรนของเหล็กกล้ารีดเย็นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนในหน่วย ASTM No. กับค่า Rm โดยพบว่าค่า Rm เพิ่มขึ้นเมื่อเกรนมีขนาดโตขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงได้ดังสมการ

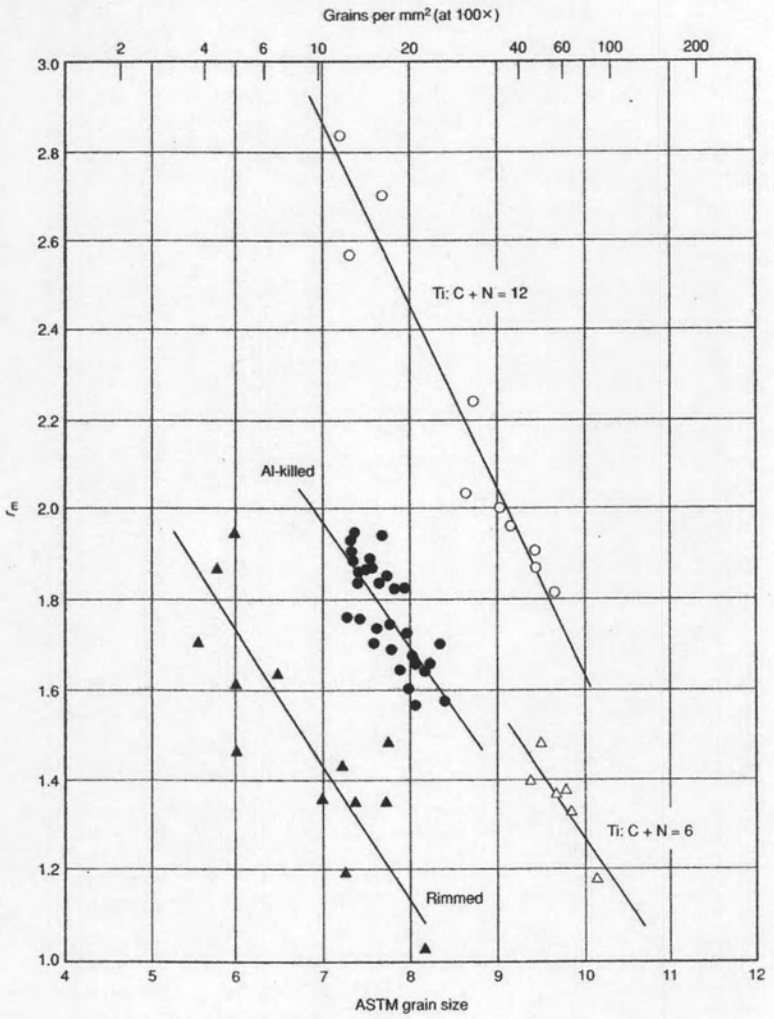
$$Rm = r_0 - kN \qquad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ r_0 และ k เป็นค่าคงที่ โดยที่ N คือ ขนาดเกรนในหน่วยเป็น ASTM No.

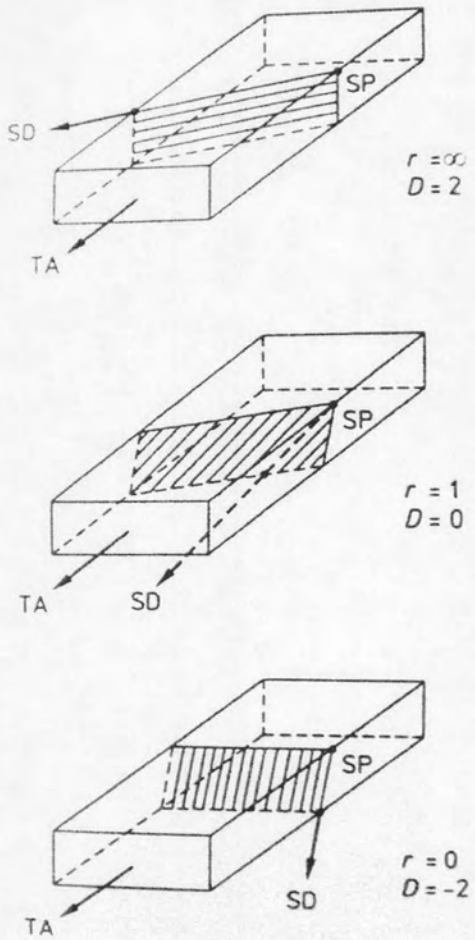
นอกจากนี้ ค่า Rm ก็ยังมีความสัมพันธ์กับการเรียงตัวของผลึกในทิศทางเฉพาะหรือเรียกว่า texture ของเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐานในการหาค่า Rm โดยใช้การทดสอบแรงดึงได้ถูกกำหนดใน ASTM E 517 ค่านี้จะแปรผันไปตามทิศทางในการทดสอบ (สัมพันธ์กับทิศทางในการรีดของม้วน)

นอกจากนี้สิ่งที่มีอิทธิพลต่อ Rm มากก็คือ crystallographic orientation ของผลึก ดังรูปที่ 2.3 วิธีอย่างง่ายที่ทำนายค่า Rm โดยใช้ tanΘ เมื่อ Θ คือมุมระหว่างทิศทางการเลื่อน (slip direction) กับทิศทางตั้งฉากกับผิว ในวัสดุพหุผลึก (polycrystalline materials) ค่า Rm สัมพันธ์กับ crystallographic texture ซึ่งแปรตาม texture ที่เป็นส่วนประกอบหลักโดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกันกับ texture {111} ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า Rm เพิ่มขึ้นเมื่อ texture { 111 } เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ [4]

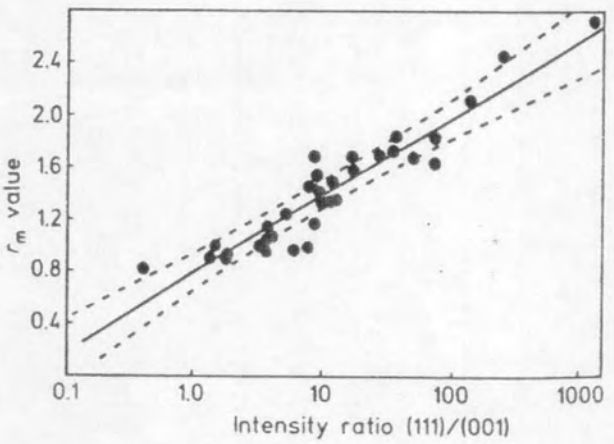
$$Rm = 0.8 + 0.6\log [I_{(111)}/I_{(100)}] \qquad \text{สมการที่ 6}$$



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรท์กับค่า Rm [3]



รูปที่ 2.3 แผนภาพของระบบการเลื่อนที่ให้ค่า r ต่างๆ TA คือแนวแรงดึง SD คือทิศทางการเลื่อนและ SP คือระนาบการเลื่อน [4]



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง texture กับค่า Rm [4]

Strain-hardening exponent (ค่า n)

Strain-hardening exponent (ค่า n) ถูกพิจารณาโดยความเป็นอิสระของความเค้นต่อระดับของความเครียด วัสดุที่มีค่า n สูงความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปในทิศทางเดียวกับความเครียด ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเครียดที่มากไปยังบริเวณที่มีความเครียดและความเค้นน้อยกว่าซึ่งช่วยให้การกระจายตัวของความเครียดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นส่วนที่ได้รับแปรรูปมากของชิ้นงานก็ไม่บางเกินไปและฉีกขาด ดังนั้น ค่า n ก็สามารถบอกได้ว่ามีความสามารถการขึ้นรูปแบบที่ดีในการขึ้นรูปแบบยืด

ค่า n นั้นสามารถคำนวณได้จาก Power law ซึ่งมีสมการเป็นดังสมการที่ 7

$$\sigma = k\varepsilon^{n} \qquad \text{สมการที่ 7}$$

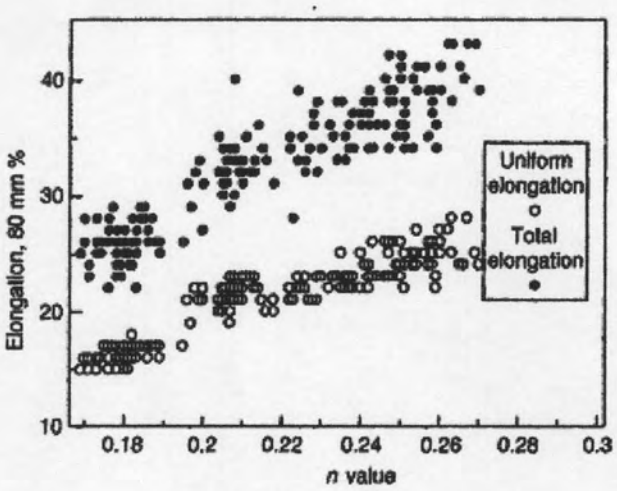
เมื่อค่า k คือ ค่าคงที่ซึ่งเป็นที่ถูกเรียกว่า strength coefficient

และนอกจากนี้สามารถใช้สมการที่ 1 ในการหาค่า n ได้เช่นกัน เหล็กกล้าส่วนใหญ่ที่มีความแข็งแรงจุดครากต่ำกว่า 345 MPa และโลหะผสมอะลูมิเนียมมีค่า n อยู่ในช่วง 0.2-0.3 [4] สำหรับเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงจุดครากสูงกว่าจำนวนมาก สามารถหาค่า n ได้จากสมการที่ 7

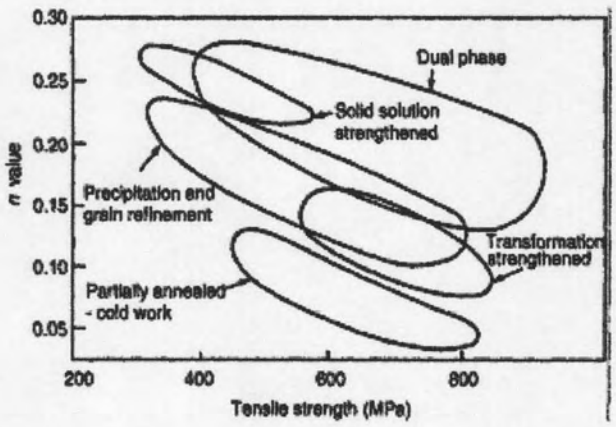
โดยทั่วไปค่า n ที่เหมาะกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ถูกใช้ขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนมีค่าประมาณ 0.22 ค่า n สูงให้ความแตกต่างระหว่างความแข็งแรงจุดครากและความต้านทานแรงดึงสูงสุดมากด้วย

ในเหล็กกล้าค่า n มีความสัมพันธ์กับการยืดตัวสม่ำเสมอและการยืดตัวทั้งหมดที่วัดได้จากการทดสอบแรงดึงอย่างมาก โดยความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถบอกได้ว่าค่า n จะมีค่าใกล้เคียงกับความเครียดที่จุดที่มีแรงดึงสูงที่สุดซึ่งก็คือ การยืดตัวสม่ำเสมอ [5]

ตัวแปรที่มีผลต่อค่า n ในเหล็กกล้าที่สำคัญคือ ความแข็งแรงของวัสดุและกลไกการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละประเภทของเหล็กกล้าค่า n ลดลงเมื่อความแข็งแรงเพิ่มขึ้นดังตัวอย่าง การเพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไกสารละลายของแข็ง (solid solution) มีค่า n ลดลงต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงน้อยกว่าการเพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไกการตกตะกอน (precipitation effect) และการทำให้เกรนละเอียด (grain refinement) จึงเป็นสาเหตุให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีความแข็งแรงต่ำจึงมีความสามารถการขึ้นรูปดีกว่าเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงกว่า



รูปที่ 2.5 การยืดตัวทั้งหมดและการยืดตัวสม่ำเสมอกับค่า n ในเหล็กกล้ารีดเย็น



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า n กับความต้านทานแรงดึง

2.2 งานวิจัยเกี่ยวข้อง

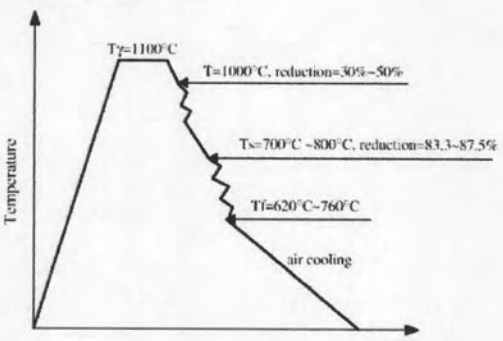
จากการศึกษาของเรื่อง การศึกษาทดลองสมบัติการขึ้นรูปลึกของเหล็กกล้ารีดร้อน IF [5] ของ H. Zhao, S.C. Rama , G.C. Barber , Z.Wang และ X. Wang ซึ่งจะได้ทำการทดลองกับเหล็กกล้ารีดร้อน IF ที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมของเหล็กกล้ารีดร้อน IF ในการศึกษา

Chemical composition of Ti-IF steel (%)

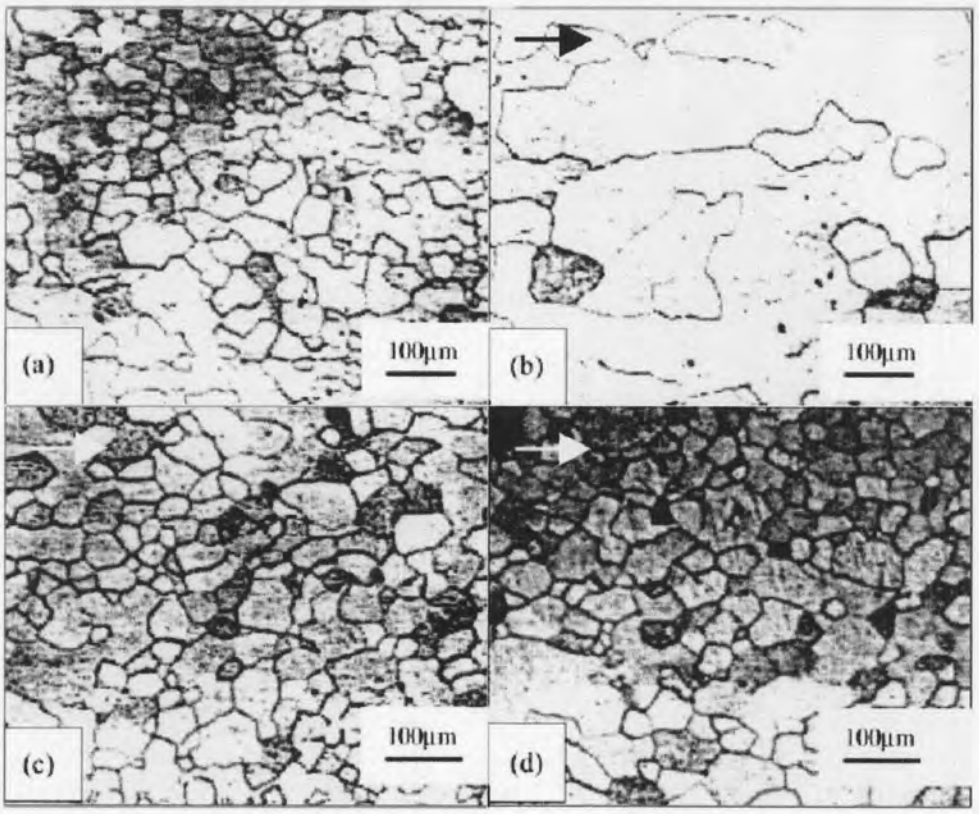
C	N	Ti	Nb	Si	Mn	S	P	Al
0.0045	0.0044	0.069	0.010	0.020	0.145	0.006	0.007	0.063

และผ่านขั้นตอนการรีดตามแผนผังดังรูปที่ 2.6



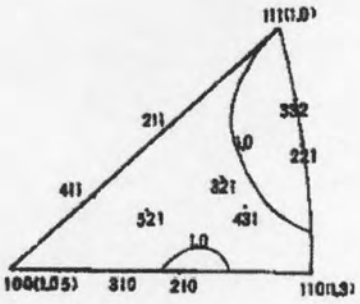
รูปที่ 2.6 แผนผังการรีดร้อนในการศึกษา

โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ การใช้สารหล่อลื่น อุณหภูมิรีดละเอียด และอัตราการลดขนาดต่อ Pass ซึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ศึกษาคือ ผลของการใช้สารหล่อลื่น และอุณหภูมิรีดละเอียด โดยผลการทดลองคือ เมื่อไม่มีการใช้สารหล่อลื่นทำให้โครงสร้างที่ได้ไม่สม่ำเสมอ และเกิดเกรนผสม (mixed grain) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7

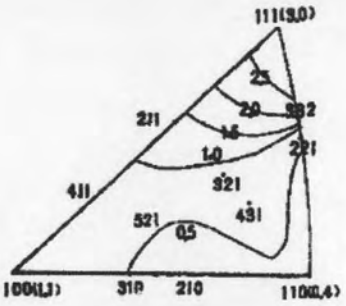


รูปที่ 2.7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงของตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่นในขณะทำการรีด หลังผ่านการอบอ่อน โดยรูป (a) และ (b) เป็นตัวอย่างที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 800 องศาเซลเซียสบริเวณผิวของตัวอย่าง และกลางตัวอย่างตามลำดับ ส่วนรูป (c) และ (d) เป็นตัวอย่างที่อุณหภูมิรีดละเอียด 750 และ 700 องศาเซลเซียสตามลำดับ

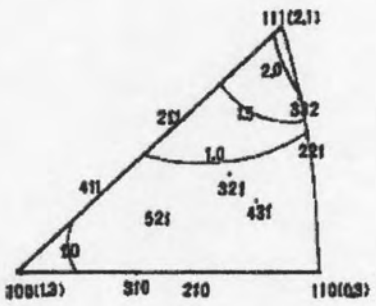
โดยผลของการมีเกรนผสม (mixed grain) ทำให้ texture ที่ได้มีความเข้มของ texture {111} ที่น้อยกว่าซึ่งแสดงให้เห็นได้จากผลของการวัดความเข้มของ texture ของตัวอย่างที่ใช้สารหล่อลื่นในขณะรีดและไม่ใช้สารหล่อลื่นในขณะรีดร้อน แสดงผลออกมาดังรูปที่ 2.8 ถึง 2.11



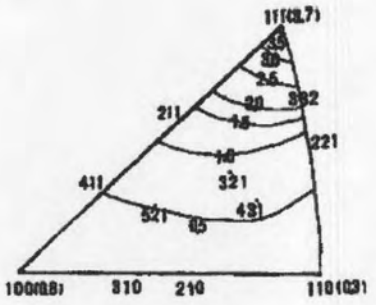
รูปที่ 2.8 ความเข้มของ texture ของตัวอย่างมีอุณหภูมิรีดละเอียด 800 องศาเซลเซียสและไม่ใช้สารหล่อลื่นในการรีดร้อน



รูปที่ 2.9 ความเข้มของ texture ของตัวอย่างมีอุณหภูมิรีดละเอียด 800 องศาเซลเซียสและใช้สารหล่อลื่นในการรีดร้อน



รูปที่ 2.10 ความเข้มของ texture ของตัวอย่างที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 750องศาเซลเซียสและใช้สารหล่อลื่นในการรีดร้อนก่อนการอบอ่อน



รูปที่2.11 ความเข้มของ texture ของตัวอย่างที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 750 องศาเซลเซียสและใช้สารหล่อลื่นในการรีดร้อนหลังการอบอ่อน