

ผลของอุณหภูมิรีดละเอียดและ อุณหภูมิมีวนต่อค่า Plastic Strain Ratio และ ค่า Strain-Hardening Exponent

พงศธร ตั้งฤกษ์วราสกุล และ ประสงค์ ศรีเจริญชัย*

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ประเทศไทย

E-mail : *fmpsc@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ศึกษาผลของอุณหภูมิรีดละเอียด และอุณหภูมิมีวนต่อค่า plastic strain ratio เฉลี่ย (R_m) และค่า strain-hardening exponent (n) ของเหล็กแผ่นรีดร้อนเกรด HR1 เหล็กแผ่นผ่านการรีดจริงในโรงงานโดยมีความหนา 3.2 มม. การรีดร้อนประกอบด้วยอุณหภูมิรีดละเอียดในช่วง $860-910^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิมีวนในช่วง $540-720^{\circ}\text{C}$ หา ค่า R_m และค่า n ด้วยชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงโดยบันทึกข้อมูลแรงดึงและการยืดตัวสำหรับคำนวณค่า R_m และค่า n ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิรีดละเอียด 860°C เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงขึ้นตามอุณหภูมิมีวนและค่า n ที่สูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิรีดละเอียดสูงขึ้นมากกว่า 860°C อุณหภูมิมีวนไม่มีผลต่อค่า R_m และค่า n แต่ขนาดเกรนเฟอร์ไรต์สูงขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิรีดละเอียดที่สูงขึ้น ในช่วงอุณหภูมิรีดละเอียด $860-910^{\circ}\text{C}$ และช่วงอุณหภูมิมีวน $540-720^{\circ}\text{C}$ เงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ให้ทั้งค่า R_m และค่า n สูงที่สุดคืออุณหภูมิรีดละเอียด 860°C และอุณหภูมิมีวน 680°C

คำสืบค้น

อุณหภูมิรีดละเอียด, อุณหภูมิมีวน, ค่า R_m , ค่า n

THE EFFECTS OF FINISHING TEMPERATURE AND COILING TEMPERATURE

on plastic strain ratio and strain-hardening exponent

Pongsatorn Tangreakwarasukul and
Prasonk Sricharoenchai*

Department of Metallurgical Engineering,
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Bangkok, Thailand
E-mail : fmtpsc@eng.chula.ac.th

ABSTRACT

Effect of finishing temperature and coiling temperature on the values of average plastic strain ratio (R_m) and strain-hardening exponent (n) of hot-rolled steel grade HR1 was studied. Steel sheets were rolled in actual strip mill with thickness of 3.2 mm. Hot-rolling contains finishing temperature in range of 860 to 910°C and coiling temperature in range of 540 to 720°C. R_m and n values were investigated by specimens for tensile testing with record of tension force and elongation data for calculating R_m and n values. The result showed that at the finishing temperature of 860°C, percent elongation increased with increasing coiling temperature and n value. However, when finishing temperature is more than 860°C, no effect of coiling temperature on R_m and n values was found but ferrite grain size increased a little with increasing coiling temperature. In finishing temperature range of 860 to 910°C and coiling temperature range of 540 to 720°C, the best condition which resulted in the maximum R_m and n values is the finishing temperature of 860°C and the coiling temperature of 680°C.

KEYWORDS

finishing temperature, coiling temperature, R_m value, n value

I. บทนำ

ปกติมักจะหาค่า plastic strain ratio เฉลี่ย (R_m) ของเหล็กแผ่นรีดเย็นเพื่อให้รู้ความสามารถการขึ้นรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลากขึ้นรูปลึก (deep drawing) เหล็กแผ่นรีดเย็นจะต้องผ่านการรีดร้อนและม้วน จากนั้นนำมาตัดผิวให้สะอาดด้วยกรดแล้วรีดเย็นและอบอ่อน ในเหล็กแผ่นรีดเย็นได้มีการจัดชั้นคุณภาพโดยอาศัยเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่า R_m เป็นเกณฑ์ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้ CQ (Commercial Quality) มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเป็น 36.9-42.2% R_m มีค่าเป็น 1.00-1.41 DQ (Drawing Quality) มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเป็น 40.0-45.0% R_m มีค่าเป็น 1.23-1.51 DDQ (Deep Drawing Quality) มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเป็น 42.7-47.5% R_m มีค่าเป็น 1.42-1.84 และ EDDQ (Extra Deep Drawing Quality) มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเป็น 46.1-50.5% R_m มีค่าเป็น 1.73-2.12[1] ปัจจัยที่มีผลต่อค่า R_m อย่างชัดเจนคือ crystallographic texture จากการเรียงตัวของเกรนซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการอบอ่อนและขนาดเกรน การศึกษาของ Held[2] แสดงถึงผลของ texture ต่อค่า R_m โดย R_m แปรผันตามอัตราส่วนของความเข้มระหว่าง texture (111) ต่อ texture (001) ส่วน Karlyn[3] ได้ศึกษาเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดต่างๆ พบว่าเหล็กกล้าที่มีขนาดเกรนใหญ่กว่า (เช่น ASTM No. 7 ใน Al-killed steel) ให้ค่า R_m สูงกว่า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของอุณหภูมิมีม้วนหลังการรีดร้อน[4] ปริมาณการรีดเย็น[5] และอุณหภูมิอบอ่อน[5] ต่อค่า R_m ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำซึ่งกำจัดออกซิเจนด้วยอะลูมิเนียม (Al-killed steel)

งานวิจัยนี้สนใจหาความสัมพันธ์ของเหล็กแผ่นรีดร้อนกับค่า R_m และค่า strain-hardening exponent (n) ซึ่งค่า n เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถการขึ้นรูปของการขึ้นรูปแบบยืดตัว (stretch forming) และมีการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมด (total elongation) กับค่า n และพบว่าค่า n แปรผันตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมด[6]

II. วิธีการทดลอง

เหล็กแผ่นรีดร้อนเป็นเหล็กกล้าเกรด HR1 ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 เหล็กแผ่นผ่านการรีดร้อนให้มีความหนา 3.2 มม. โดยมีอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิมีม้วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 นำเหล็กแผ่นรีดร้อนมาตัดเป็นชิ้นงานขนาด 40×200 มม. ใน 3 ทิศทางคือทิศขนานกับแนวรีด ทิศตั้งฉากกับแนวรีดและทิศทำมุม 45 องศา กับแนวรีดและตัดชิ้นงานขนาด 10×10 มม. ต่อเหล็กแผ่นรีดร้อน 1 ม้วน สำหรับกัดชิ้นงานขนาด 40×200 มม. ให้เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z2201 No.5 แล้วนำไปดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine Shimadzu AG-100KNi M2 นำค่าความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงมาคำนวณหาค่า plastic strain ratio เฉลี่ย (R_m) ตามสมการ $r = \epsilon_w / \epsilon_t$, $R_m = (r_L + r_T + 2r_{45}) / 4$ โดย ϵ_w คือความเครียดในแนวความกว้าง ส่วน ϵ_t คือความเครียดในแนวความหนา r_L คือ r ตามแนวรีด r_T คือ r ตามแนวตั้งฉากกับแนวรีด r_{45} คือ r ทำมุม 45° กับแนวรีดและค่า strain-hardening exponent (n) ส่วนชิ้นงานที่มีขนาด 10×10 มม. ได้ตัดและขัด เพื่อดูโครงสร้างจุลภาคและหาขนาดเกรนของเฟอร์ไรต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโดยวัดขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ตามมาตรฐาน ASTM E112

ตารางที่ 1

ส่วนผสมทางเคมีของ
เหล็กแผ่นรีดร้อน
(% โดยน้ำหนัก)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	N
0.06	0.01	0.26	0.010	0.008	0.02	0.03	0.06	0.04	< 0.0012

ชิ้นงาน	อุณหภูมิรีดละเอียด(°C)	อุณหภูมิรีดร้อน (°C)
A	870	540
B	860	570
C	860	610
D	860	680
E	890	680
F	910	720

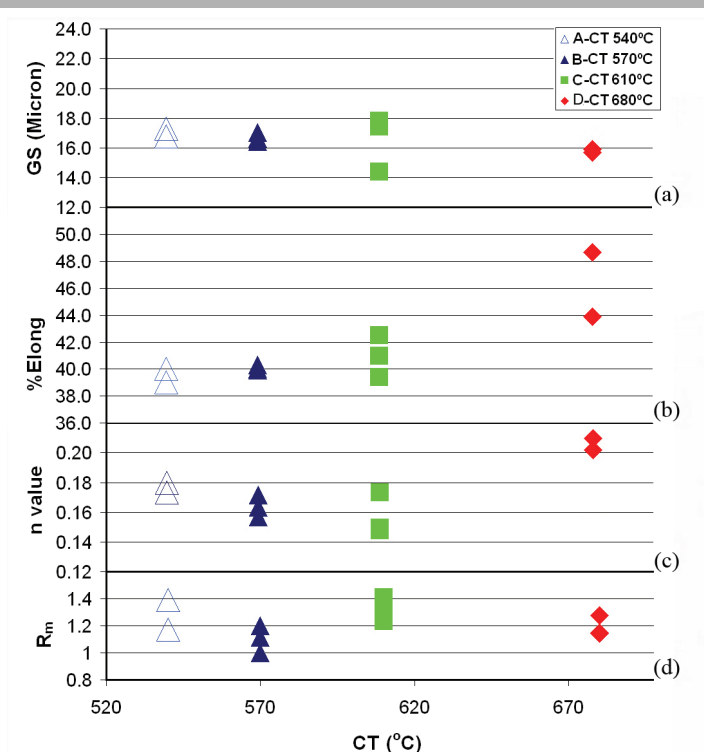
ตารางที่ 2

อุณหภูมิรีดละเอียดและ
อุณหภูมิรีดร้อนของ
ชิ้นงาน

III. ผลและการอภิปราย

กรณีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C

ชิ้นงานที่รีดละเอียดที่อุณหภูมิ 860°C แล้วรีดร้อนที่อุณหภูมิ 540–680°C อุณหภูมิรีดร้อนไม่มีผลต่อค่า R_m ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างกับ 1.0-1.4 ดังแสดงในรูปที่ 1(d) จากการศึกษาของ R.K.Ray และคณะซึ่งกล่าวว่าในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 870-1020°C (รีดในช่วงที่เป็นเฟสออสเทนไนต์) texture ที่ได้จะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นเฟอร์ไรต์คือ {001}<110> และ {110}<110> [7] และความเข้ม texture {001} ของชิ้นงานแต่ละชิ้นใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่า R_m แปรผกผันกับความเข้มของ texture {001} [2] ดังนั้นจึงคาดว่าค่า R_m ที่ได้จึงค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 1(a) และ 1(b) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิรีดร้อนที่สูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและขนาดเกรนเฟอร์ไรต์เล็กน้อย โดยมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ระหว่าง 38-49% และขนาดเกรนเฟอร์ไรต์อยู่ระหว่าง 14-18 ไมครอนซึ่งเทียบได้กับ ASTM No.9 ที่ 16 ไมครอน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า R_m และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวดังรูปที่ 2(a) พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวส่วนใหญ่จัดอยู่ในช่วงที่เป็นคุณภาพ CQ คือมีค่าอยู่ระหว่าง 38-42% แต่มีเพียง 2 ค่าที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าปกติเป็น 44% และ 49



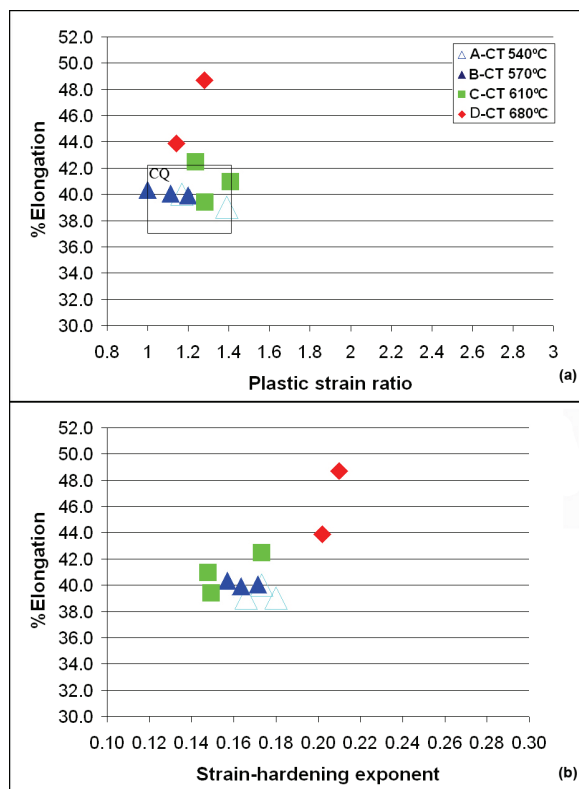
รูปที่ 1

ค่าสมบัติเชิงกลที่
อุณหภูมิรีดร้อนต่างๆ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า n กับ % การยืดตัว ค่า n มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ % การยืดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2(b) โดยค่า n มีค่าอยู่ระหว่าง 0.14-0.18 และค่า % การยืดตัวที่มีค่าสูง 2 ค่าคือ 44% และ 49% ที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C กับอุณหภูมิรีด 680°C ซึ่งก็เป็นเงื่อนไขให้ค่า n สูง 2 ค่าด้วยคือ 0.20 และ 0.21 ตามลำดับ % การยืดตัวและค่า n ที่สูงเป็นชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีด 680°C แสดงว่าแม้มีขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ไม่แตกต่างกันมากนัก อุณหภูมิรีดที่สูงให้ % การยืดตัวสูงกว่าและค่า n สูงกว่า เนื่องจากค่า n ที่สูงในเหล็กกล้ามีผลให้การกระจายของความเครียดสม่ำเสมอว่าเหล็กกล้าที่มีค่า n ที่ต่ำทำให้ไม่เกิดการสะสมของความเครียดที่ตำแหน่งใดในเนื้อเหล็กมากเป็นพิเศษ เป็นผลให้เกิดคอดของเนื้อเหล็กได้ยากกว่าและยืดตัวได้มากขึ้นจึงเป็นปัจจัยให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวจึงสูงขึ้น

รูปที่ 2

- (a) ความสัมพันธ์ของค่า R_m กับ % การยืดตัว
(b) ความสัมพันธ์ของค่า n กับ % การยืดตัว

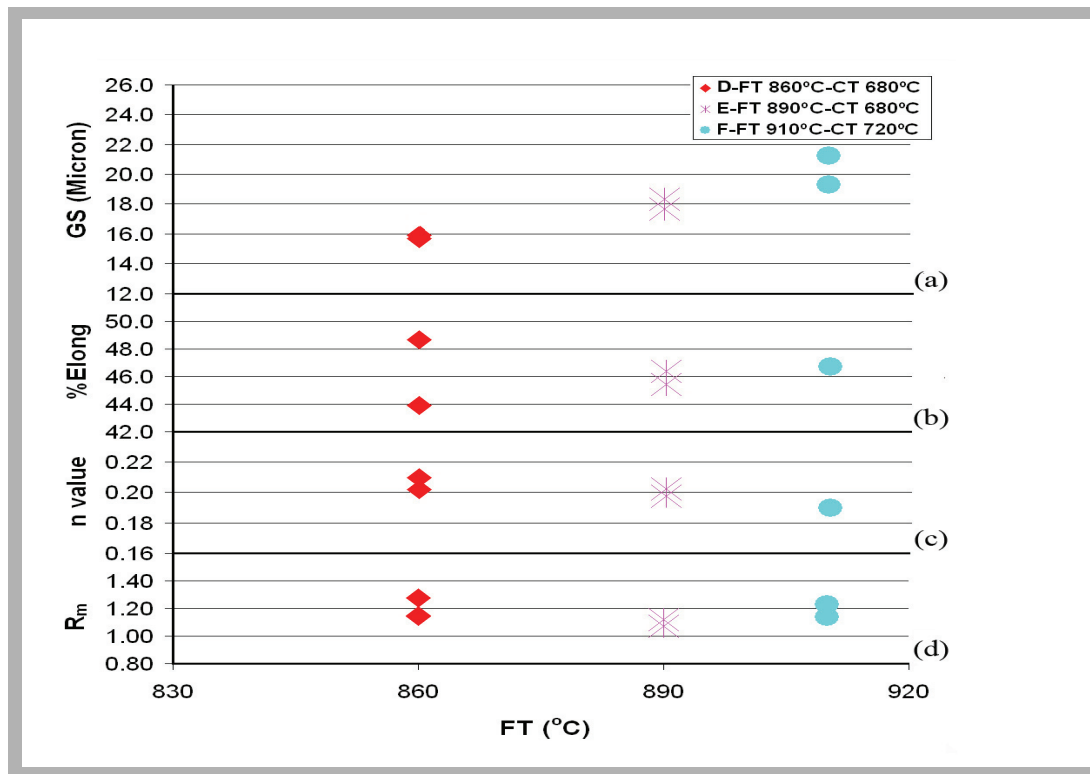


กรณีอุณหภูมิรีดละเอียดสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิรีดที่ 680°C โดยมีอุณหภูมิรีดละเอียดที่ 860°C กับ 890°C ค่า R_m ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.3 ส่วนกรณีอุณหภูมิรีดละเอียด 910°C และอุณหภูมิรีด 720°C ให้ค่า R_m เท่ากับ 1.2 ดังแสดงในรูปที่ 3(d) แสดงว่าอุณหภูมิรีดละเอียดที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า R_m ซึ่งคาดว่าเป็นผลของ texture เช่นเดียวกับการณีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C ส่วนค่า n สำหรับเงื่อนไขทั้ง 3 ข้างต้นก็มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.19-0.21 เปอร์เซนต์การยืดตัวสำหรับเงื่อนไขทั้ง 3 ข้างต้นก็มีค่าอยู่ระหว่าง 44-49% ส่วนขนาดเกรนเฟอร์ไรต์มีขนาดโตขึ้นเล็กน้อยจาก 16 ไมครอนเป็น 18 ไมครอนเมื่ออุณหภูมิรีดละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 860°C เป็น 890°C และโตขึ้นอีกเล็กน้อยเป็น 20 ไมครอนสำหรับกรณีอุณหภูมิรีดละเอียด 910°C และอุณหภูมิรีด 720°C ดังแสดงในรูปที่ 3(a) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิรีดละเอียดที่สูงขึ้นทำให้ขนาดเกรนเฟอร์ไรต์โตขึ้น

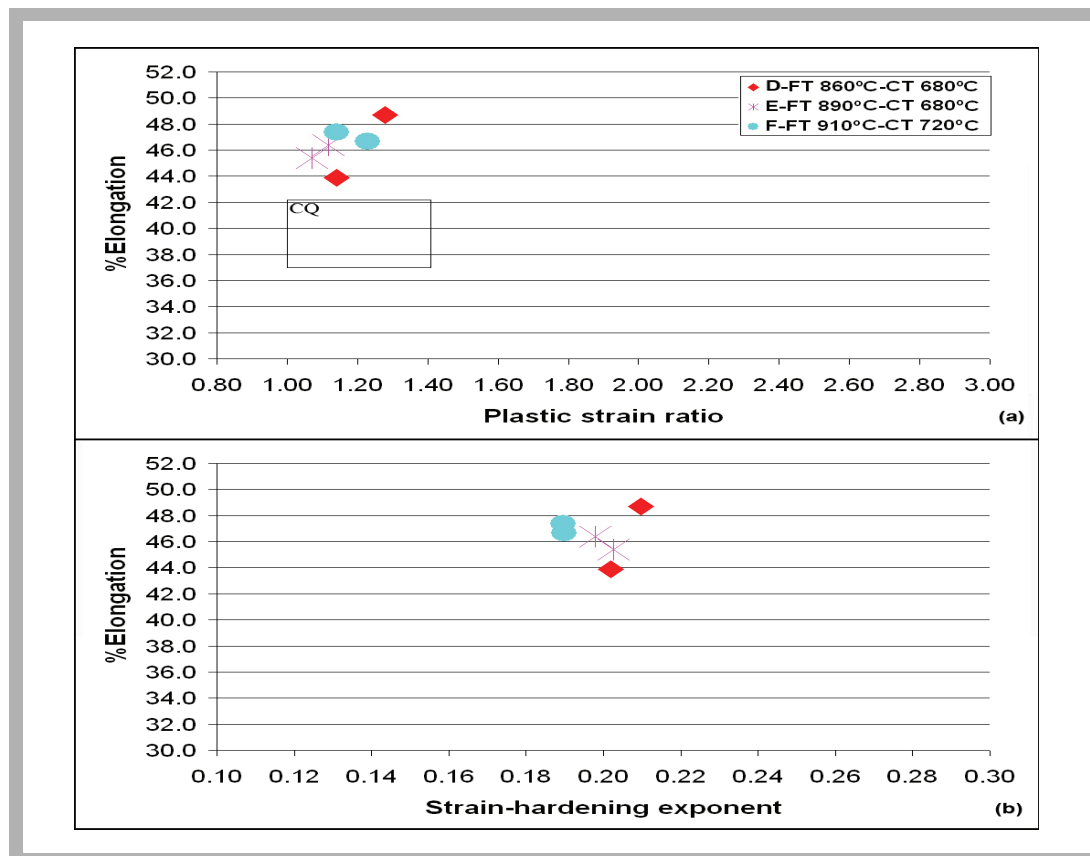
เมื่อพิจารณาค่า R_m กับ % การยืดตัวจะเห็นได้ว่าเกือบทั้งหมดมี % การยืดตัวสูงกว่าช่วงที่เป็นคุณภาพ CQ ส่วนค่า R_m ยังคงอยู่ในคุณภาพ CQ ดังแสดงในรูปที่ 4(a) เมื่อพิจารณาค่า n กับ % การยืดตัวจะเห็นได้ว่า

ค่า n มีค่าสูงขึ้นตาม % การยืดตัวที่สูงกว่าคุณภาพ CQ ดังแสดงในรูปที่ 4(b) โดยสรุปแล้วอุณหภูมิรีดละเอียดสูงมีโอกาสทำให้ขนาดเกรนโตซึ่งช่วยให้มีความเหนียวสูงขึ้นจากการมี % การยืดตัวสูงที่ส่งผลให้มีค่า n สูงขึ้นตามด้วย โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คืออุณหภูมิรีดละเอียด 860°C กับอุณหภูมิมีวน 680°C ที่ให้ทั้งค่า R_m และค่า n สูงที่สุด



รูปที่ 3

สมบัติเชิงกลและขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิรีดละเอียดต่างๆ



รูปที่ 4

(a) ความสัมพันธ์ของค่า R_m กับ % การยืดตัว
(b) ความสัมพันธ์ของค่า n กับ % การยืดตัว

IV. บทสรุป

1. ที่อุณหภูมิรีดละเอียด 860°C เมื่ออุณหภูมิมีนอยู่ระหว่าง $540\text{-}610^{\circ}\text{C}$ ค่า R_m และ % การยืดตัวอยู่ในช่วงคุณภาพ CQ ที่อุณหภูมิมีน 680°C ค่า R_m ยังคงอยู่ในช่วงคุณภาพ CQ แต่ % การยืดตัวมีค่าสูงกว่าและเนื่องจากค่า n เพิ่มขึ้นตาม % การยืดตัวจึงทำให้อุณหภูมิมีนที่ 680°C ให้ค่า n สูงกว่าด้วย
2. กรณีอุณหภูมิรีดละเอียดสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิมีนสูง 680°C ปรากฏว่าอุณหภูมิรีดละเอียดที่สูงขึ้นในช่วง 860°C ถึง 910°C โดยไม่มีผลต่อค่า R_m กับค่า n มากนักรวมทั้ง % การยืดตัวด้วย แต่มีผลทำให้ขนาดเกรนเฟอร์ไรต์โตขึ้นเล็กน้อย แต่การที่ค่า % การยืดตัวสูงมากกว่าคุณภาพ CQ ทำให้มีค่า n สูงกว่าคุณภาพ CQ ด้วย
3. ในช่วงอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิมีนที่ทดลอง ค่าอุณหภูมิรีดละเอียดระหว่าง $860\text{-}910^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิมีนสูงระหว่าง $680\text{-}720^{\circ}\text{C}$ ให้ค่า n สูงโดยไม่ทำให้ค่า R_m สูงขึ้น และอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C กับอุณหภูมิมีน 680°C เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่สุดสำหรับค่า R_m และค่า n

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัทสหวิริยาสตีลอินดัสตรีจำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์เหล็กแผ่นรีดร้อนและร้านไทยดี โลหะภัณฑ์ที่อนุเคราะห์การตัดเหล็กแผ่นรีดร้อนเป็นรูปร่างสำหรับทดสอบ

บรรณานุกรม

- [1] R. Mendoza, J. Huante, M. Alanis, C. Gonzalez-Rivera, and J. Juarez-Islas, "Processing of ultra low carbon steels with mechanical properties adequate for automotive applications in the as-annealed condition," *Materials Science & Engineering A*, vol. 276, pp. 203-209, 2000.
- [2] J.F. Held, Proceedings of the Conference on Mechanical working and steel processing IV, The Metallurgical Society of AIME, New York, pp. 3- 38, 1965.
- [3] D.A. Karlyn, R.W. Vieth and J.L. Forand, reported by D.J. Blickwede., "Sheet Steel-Micrometallurgy by the Millions", *Transactions of the ASM*, vol. 61, pp. 653-659 , 1968.
- [4] R.L. Whiteley and D.E. Wise: "Relationship Among Texture, Hot Mill Practice & Deep Drawability of Sheet", Flat Rolled Products III, E.W. Earhart (ed.) New York, Interscience, pp. 47-63, 1962.
- [5] Ono, S.; Nozoe, O.; Shimomura, T.; Matsudo, K. "Effect of carbon on the mechanical properties of continuous annealed drawing quality steels". *Proceedings of Symposium on Metallurgy of Continuous Annealed Sheet Steel*; Bramfitt, B.L., Mangonon, P.L., Eds.; AIME: Dallas, 99–115, 1982
- [6] D.T. Llewellyn and R.C. Hudd, *Steels: Metallurgy & Applications*, Third edition, Butterworth-Heinemann, ,pp. 26, 1998.
- [7] R. Ray, J. Jonas, M. Butron-Guillen, and J. Savoie, "Transformation textures in steels," *ISIJ International*, vol. 34, pp. 927-942, 1994.