

## อิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วดึงทดสอบที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของเหล็กกล้าผสม โครเมียมเทียบเกรด AISI 5120

### The Effect of Temperatures and Tensile Test Speeds on Mechanical Properties of Cromium Alloy Steel AISI 5120

วีระศักดิ์ ปัญญาราช<sup>1</sup> พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทรศัพท์ 0-2470-9185, โทรสาร 0-2470-9198, Email: weerasak1234@yahoo.com<sup>1</sup>, [Pongsak.tue@Kmutt.ac.th](mailto:Pongsak.tue@Kmutt.ac.th)<sup>2</sup>

Weerasak Punyarach<sup>1</sup> Pongsak Tuengsook<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Materials Technology, Faculty of Energy and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>2</sup> Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

91 Prachaoudtid Rd, Bangmod, Bangkok 10140

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วในการดึงที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของเหล็กกล้าผสมโครเมียมเทียบเกรด AISI 5120 โดยทำการศึกษาดังกล่าวด้วยวิธีการดึงกับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ความยาวพิกัด (Gage Length) 25 mm ในช่วงอุณหภูมิ 400 °C ถึง 900 °C ที่ความเร็วในการดึง 0.5, 5, 50 และ 500 mm/min ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วดึงชิ้นงานตัวอย่างให้สูงขึ้นจะทำให้ค่าอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (% Reduction of Area : % RA) ของชิ้นงานหลังการทดลองมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่า % RA สูงสุดเท่ากับ 90.66 % ที่อุณหภูมิ 700 °C ความเร็วดึงทดสอบ 500 mm/min แต่ในช่วงอุณหภูมิ 800 °C ถึง 900 °C กลับพบว่าค่า % RA จะลดต่ำลงอย่างมากเมื่อใช้ความเร็วดึงต่ำ (0.5 และ 5 mm/min) โดยจะมีค่า % RA ต่ำสุดเท่ากับ 21.29 % ที่อุณหภูมิ 900 °C และความเร็วดึงทดสอบที่ 0.5 mm/min ซึ่งลักษณะการลดลงของ % RA ในช่วงนี้ถูกเรียกว่า การสูญเสียความเหนียวในขณะร้อน (Loss of Hot Ductility) และลักษณะของผิวการแตกหักเป็นการแตกหักที่เกิดขึ้นตามขอบเกรน (Intergranular Fracture)

#### Abstract

This research was to investigate the effect of temperatures and tensile test speeds on mechanical properties of Chromium Alloy Steel grade 5120. Tensile specimens were machined 6

mm in diameter and 25 mm in gage length. Hot tensile test were done in temperature range 400-900 °C with constant speed test of 0.5, 5, 50 and 500 mm/min, respectively. This research was found that the % reduction of area (% RA) of specimens will increased with temperature which maximum 90.66% of %RA at temperature 700 °C and test speed was 500 mm/min. However, in temperature between 800-900 °C and low tensile test speeds, the %RA was invert. The minimum in %RA was 21.29% in temperature 900 °C with 0.5 mm/min in test speed. This phenomenon was called "Loss of Hot Ductility" and the fracture surface were intergranular fracture.

#### 1. บทนำ

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของโลหะโดยการดึงเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายและนิยมใช้กันมากเพราะสามารถให้ผลที่เป็นสมบัติทางกลพื้นฐานพอสมควรในการที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมต่อการใช้งานต่อไป แต่เมื่อมีตัวแปรของอุณหภูมิกับความเร็วในการดึงทดสอบเข้ามาเกี่ยวข้องก็จะทำให้พฤติกรรมทางกลของโลหะเปลี่ยนแปลงไปโดยเฉพาะที่ความเร็วดึงทดสอบต่ำ

โดยทั่วไปแล้วการวัดความเหนียวในขณะร้อน (Hot Ductility) ของเหล็กกล้าต่างๆ จะนิยมใช้การทดสอบโดยวิธีดึงในขณะร้อน

(Hot Tensile Test) [1-4,8] โดยนำข้อมูลที่ไดจากการดึงคือค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน (% Reduction of Area: % RA) ซึ่งจะเป็นค่าที่บอกถึงความเหนียว (Ductility) ของวัสดุมาทำการพลอตลงกราฟกับค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการดึงทดสอบก็จะสามารถบอกถึงความเหนียวในขณะร้อนของโลหะนั้นได้ [1-5]

Farideddin Hassani และ Steve Yue [1] ได้ทำการศึกษาความเหนียวในขณะร้อน (Hot Ductility) ของเหล็กกล้าที่ได้จากกรรมวิธีการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 600 – 900 °C จะเกิดการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อน (Loss of Hot Ductility) ขึ้นโดยผลในแง่ลบของการสูญเสียความเหนียวขณะร้อนในช่วงอุณหภูมินี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Strain Rate) ที่ต่ำ (ประมาณ  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$   $S^{-1}$ ), ปริมาณของธาตุผสม (Microalloying Elements) เช่น Niobium (Nb) และ Vanadium (V) รวมถึง Aluminium (Al) และ Nitrogen (N) นั่นคือถ้าลด Strain Rate หรือเพิ่มปริมาณของธาตุผสมดังกล่าวแล้วจะทำให้การสูญเสียความเหนียวขณะร้อนในช่วงอุณหภูมินี้เพิ่มมากขึ้นอีก [1,2,8]

1.1 ลักษณะกลไกการแตกหักที่เกิดขึ้นในช่วงของการสูญเสียความเหนียวขณะร้อนนี้มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะ [7]

(ดังรูปที่ 1) คือ

1.1.1 เกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณที่ไม่เกิดการตกผลึกใกล้กับขอบเกรนของออสเทนไนต์ (Austenite) (Precipitate Free Zone: PFZ)

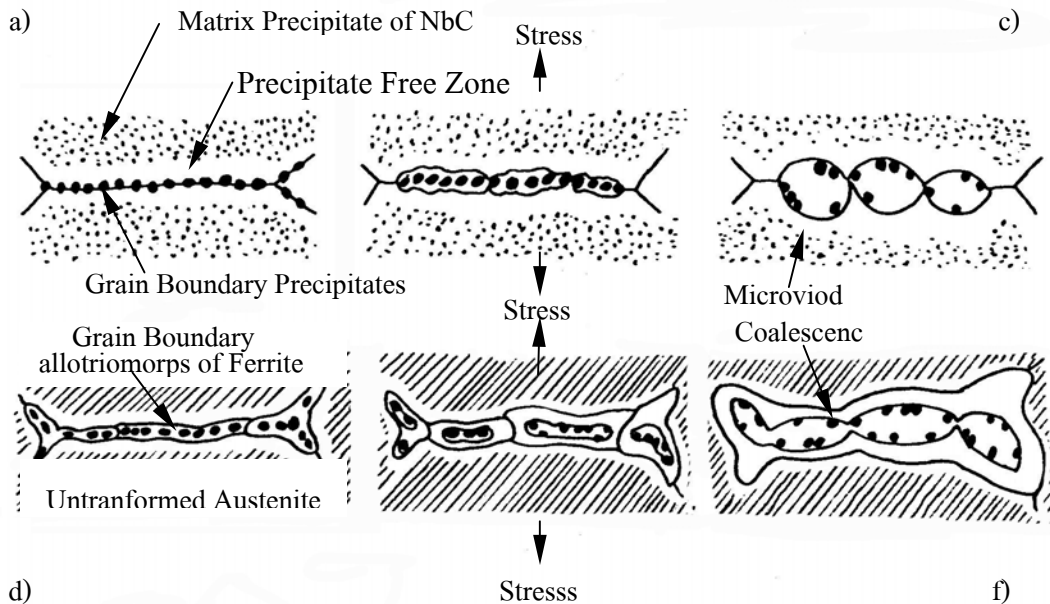
จะเกิดขึ้นในช่วงของเฟสออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิต่ำ (เหนือเส้น  $A_{c3}$  เล็กน้อย) และใช้ความเร็วในการดึงที่ต่ำร่วมด้วย โดยในขณะที่

ชิ้นงานได้รับแรงดึงจะทำให้เกิด Hardening ขึ้นภายในเกรนของชิ้นงานซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากการตกผลึก (Precipitation) ขนาดเล็กของ Carbides, Nitrides, และ/หรือ Carbonitrides [1-2, 4-5, 7-9] ขึ้นที่ภายในเกรนของเฟสออสเทนไนต์ ส่วนบริเวณ PFZ ซึ่งอยู่ตามขอบเกรนของเฟสออสเทนไนต์ซึ่งมีความอ่อนแอกว่าภายในเกรนเมื่อได้รับแรงดึงจึงทำให้เกิดความเครียดสะสม (Strain Concentration) ขึ้นภายใน PFZ ส่วนอนุภาค (Particles) ที่อยู่ตามขอบเกรนและมีความแข็งแรงมากกว่าจะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างทำให้บริเวณรอบๆ อนุภาคได้รับความเครียดสะสมมากยิ่งขึ้นทำให้เกิด Microvoid ขึ้นตรงระหว่างบริเวณผิวหน้าของอนุภาค (Particles) กับเนื้อพื้น (Matrix) ที่อยู่ตามขอบเกรนภายในบริเวณของ PFZ จากนั้น Microvoid จะขยายตัว (Coalescence) จนเชื่อมต่อกันกับ Microvoid ที่อยู่ใกล้ๆ จนในที่สุดทำให้เกิดการแตกหักแบบตามขอบเกรน (Intergranular Ductile Fracture) ดังรูปที่ 1 a-c

1.1.2 เกิดขึ้นเนื่องจากชั้นฟิล์มของเฟอร์ไรต์ในช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส ( $\alpha/\gamma$  Duplex Phase Region)

จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส (Phase Transformation Temperature) โดยจะมีลักษณะกลไกของการเกิดความเครียดสะสมที่คล้ายกันกับกรณีที่ 1.1.1 เพียงแต่จะแตกต่างกันตรงบริเวณที่เกิดความเครียดสะสมซึ่งจะเกิดขึ้นที่ภายในชั้นฟิล์มของเฟอร์ไรต์ที่อยู่ตามขอบเกรนเดิมของเฟสออสเทนไนต์ [5]

ในช่วงบริเวณการเปลี่ยนเฟสนี้จะมีชั้นฟิล์มเฟอร์ไรต์ขึ้นตามขอบเกรนของออสเทนไนต์ เมื่อชิ้นงานถูกแรงกระทำชั้นฟิล์มของเฟอร์ไรต์ซึ่งมีความอ่อนแอกว่าเกรนของออสเทนไนต์จะเกิดการ



รูปที่ 1 ลักษณะกลไกการแตกหักตามขอบเกรนในช่วงของการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อนของเหล็กกล้า a - c) เป็นการเกิดขึ้นภายในบริเวณ PFZ d - f) เป็นการเกิดขึ้นภายในบริเวณฟิล์มของเฟอร์ไรต์ในช่วงของการเปลี่ยนเฟส

เปลี่ยนรูปที่มากกว่า ทำให้เกิดมีความเครียดสะสมขึ้นที่ชั้นฟิล์มของเพอร์ไรท์ เกิด Microvoid ขึ้นตรงบริเวณผิวหน้าของอนุภาคกับเนื้อ

พื้นที่อยู่ตามขอบเกรนเดิมของออสเทนไนต์ซึ่งอยู่ภายในบริเวณชั้นฟิล์มของเพอร์ไรท์นี้ จากนั้น Microvoid จะขยายตัว (Coalescence) จนทำให้เกิดการแตกหักแบบตามขอบเกรน ดังรูปที่ 1 d-f

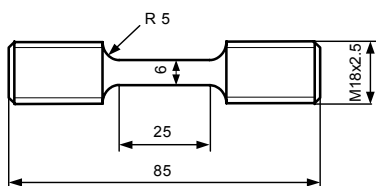
อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณของฟิล์มเพอร์ไรท์ (Volume Fraction of Ferrite) มีมากพอก็ทำให้ความเหนียวขณะร้อนดีขึ้น [1,7] เหตุผลเนื่องมาจากเพอร์ไรท์มีการคืนตัว (Recovery) ที่ดีกว่า มีขนาดเกรนที่เล็กกว่าและมีการเคลื่อนตัวของขอบเกรนที่น้อยกว่าออสเทนไนท์ [3] และพบว่าในช่วงบริเวณที่มีความเหนียวขณะร้อนต่ำสุด (Minimum Hot Ductility) จะมีปริมาณฟิล์มของเฟสเพอร์ไรท์เพียง 10 % [3]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาถึงผลของอุณหภูมิกับความเร็วที่ใช้ในการดึงทดสอบเหล็กกล้าผสมโครเมียมเทียบเกรด AISI 5120 ในช่วงอุณหภูมิ 400 – 900 °C เพื่อที่จะช่วยทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางกลและสาเหตุของการแตกหักในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการออกแบบและใช้งานต่อไป

## 2. การทดลอง

นำเหล็กกล้าผสมโครเมียมเทียบเกรด AISI 5120 ที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นชิ้นงานดึงทดสอบด้วยเครื่องกลึงแบบควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CNC Lath Machine) ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ความยาวพิคัด (Gage Length) 25 mm ปลายจับยึดชิ้นงานทำเป็นเกลียวขนาด M18x2.5 ดังรูปที่ 2 ใช้เครื่องดึงทดสอบยี่ห้อ Shimadzu รุ่น Autograph T10 ซึ่งเป็นแบบใช้สกรูขับเคลื่อนและเป็นแบบความเร็วในการดึงคงที่ (Constant Crosshead Speed) เตาให้ความร้อนเป็นแบบชดลดความต้านทานจำนวน 3 ชดลด และใช้ Thermocouple Type K เชื่อมแบบอาศัยความต้านทาน (Resistant Welding) ติดกับชิ้นงานทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวแปรการทดลองอยู่ 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิกับความเร็วที่ใช้ในการดึงทดสอบ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 °C และที่ทุกอุณหภูมิของการทดลองจะใช้ความเร็วในการดึงทดสอบแบบคงที่ที่ 0.5, 5, 50 และ 500 mm/min ตามลำดับ โดยเริ่มให้ความร้อนกับชิ้นงานจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิทดสอบ โดยมีอัตราการให้ความร้อนกับชิ้นงานเฉลี่ย 14 °C/min เมื่อความร้อนของชิ้นงานถึงอุณหภูมิทดสอบก็จะทำการอบแช่ (Holding Time) ใวนานอีก 7 นาทีเพื่อให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานก่อนที่จะดึง



รูปที่ 2 รูปร่างของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง (หน่วย : mm)

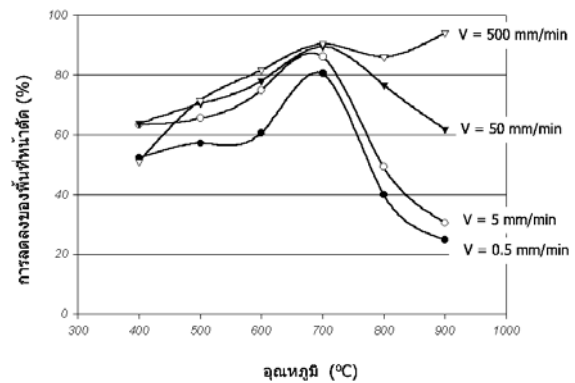
ทดสอบ หลังจากชิ้นงานถูกดึงขาดในเตาให้ความร้อนแล้วจะนำชิ้นงานส่วนล่างชุบน้ำ (Quenching) ทันทีเพื่อใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน ในขณะที่ชิ้นงานส่วนบนจะถูกปล่อยให้เย็นตัวในอากาศเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การแตกหักในลำดับต่อไป

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti	Nb	V
0.18	1.20	0.017	0.023	0.33	0.93	0.073	0.003	0.003	0.06

## 3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

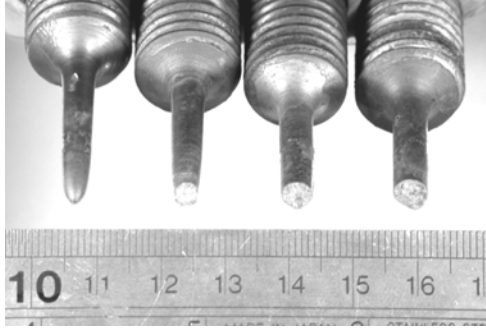
นำชิ้นงานทดสอบมาวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยใช้เครื่อง Emission Spectrometer ได้ข้อมูลดังตารางที่ 1 ทำการวัดขนาดเกรนของชิ้นงานก่อนให้ความร้อนด้วยวิธี Linear Intercept (ASTM 112 – 96) ได้ขนาดเกรน ASTM เบอร์ 10.5 โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ย 10 μm และเมื่อวัดหาอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน (% RA) ได้ค่าดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่า % RA ของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิและความเร็วในการดึงทดสอบต่างๆ

จากรูปที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบ % RA ของชิ้นงานดึงทดสอบที่ความเร็วต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 400 – 700 °C พบว่าค่า % RA จะสูงมากขึ้นตามระดับของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น นั่นคือเมื่อชิ้นงานทดลองได้รับความร้อนมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างได้มากขึ้น ทำให้ได้ค่า % RA สูงตามขึ้นไปด้วย โดยมีค่า % RA สูงสุดในช่วงอุณหภูมินี้เท่ากับ 90.66 % และค่า %RA นี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วดึงทดสอบที่มากขึ้น แต่เมื่อดึงทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 800 – 900 °C กลับพบว่าค่า % RA จะลดลงอย่างมากเมื่อใช้ความเร็วดึงทดสอบต่ำ (0.5 และ 5 mm/min) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 900 °C ความเร็วดึงทดสอบ 0.5 mm/min จะมีค่า % RA ต่ำสุดเท่ากับ 21.29 % (ดังรูปที่ 3) และมีโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากการชุบน้ำเป็นมาร์เทนไซต์ทั้งหมดและลักษณะของการแตกหักเป็นแบบตามขอบเกรน ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า การสูญเสียความเหนียวในขณะร้อน และสัญญาณได้ว่าจะเกิดจากความเครียดสะสมที่เกิดขึ้นภายในบริเวณที่ไม่มีการตกผลึก (PFZ) ในช่วงของเฟสออสเทนไนต์ที่ทำให้เกิดการแตกหักแบบนี้ขึ้น

ขณะที่ความเร็วดึงทดสอบ 500 และ 50 mm/min ในช่วงอุณหภูมิ 900 °C นี้กลับมีค่า % RA ที่สูงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า % RA ที่ความเร็วดึงทดสอบ 500 และ 50 mm/min เท่ากับ 94 % และ 61.97 % ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการใช้ความเร็วดึงที่สูงมากขึ้นทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้นในขณะดึง (Dynamic Recrystallization) ทำให้ความสามารถในการต้านทานต่อการเกิดรอยแตก (Cracking) มีสูงขึ้นจึงยึดตัวได้มากกว่าที่ความเร็วดึงต่ำ



รูปที่ 3 ภาพหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบเปรียบเทียบความเร็วดึงทดสอบที่ 500, 50, 5 และ 0.5 mm/min (เรียงลำดับจากซ้ายมือไปขวามือ) ที่อุณหภูมิ 900 °C

อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หาสาเหตุการแตกหักยังมีไม่เพียงพอซึ่งยังต้องมีการใช้เทคนิคอื่นทำการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในงานวิจัยการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วดึงทดสอบที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของเหล็กกล้าผสมโครเมียมเทียบเกรด AISI 1520 สรุปได้ว่า

- 4.1 เมื่ออุณหภูมิการทดลองสูงมากขึ้นในช่วง 400 – 700 °C จะทำให้ได้ค่า % RA เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงอุณหภูมิ 800 – 900 °C กลับพบว่าค่า % RA จะลดต่ำลงอย่างมากเมื่อใช้ความเร็วดึงต่ำ ซึ่งการลดลงของค่า % RA ดังกล่าวนี้นี้ถูกเรียกว่าการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อน (Loss of Hot Ductility)
- 4.2 ความเร็วดึงทดสอบมีค่าสูงมากขึ้นจะทำให้ค่า %RA เพิ่มขึ้นตาม
- 4.3 ในช่วงการสูญเสียความเหนียวขณะร้อนจะเกิดลักษณะการแตกหักแบบตามขอบเกรน (Intergranular Fracture)
- 4.4 พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 800 – 900 °C ที่ได้จากการดึงที่ทุกความเร็วดึงทดสอบ จะเป็นมาร์เทนไซต์ 100% ทุกชิ้น
- 4.5 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หาสาเหตุการแตกหักยังมีไม่เพียงพอซึ่งจะต้องมีการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ขอขอบคุณ ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และขอขอบคุณ อาจารย์สุวิษ มาเทศน์ แผนกวิชาช่างกลโรงงาน คณะวิชาเทคโนโลยีการผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ ที่ช่วยอนุเคราะห์ผลิตชิ้นงานทดสอบ

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Farideddin Hassani and Steve Yue, "Detection of Low Hot Ductility Temperature Zones in Steels", 34<sup>th</sup> MWSP Conf. Proc. 1993, Vol. XXX, pp. 409-418
- [2] B. Mintz and S. Yue, "The Hot Tensile Test for Assessing The Likelihood of Transverse Cracking During Continuous Casting of Steel", 34<sup>th</sup> MWSP Conf. Proc., 1993, Vol. XXX, pp. 391-397
- [3] George E. Dieter, "Workability Testing Techniques: Hot Tensile Test", 1984, ASM, Ohio, pp. 73-93
- [4] B. Mintz and Z. Mohamed, "Influence of Manganese and Sulphur on Hot Ductility of Steels Heated Directly to Temperature" Mater. Sci. Technol., 1989, Vol. 5, , pp. 1212-1218
- [5] D. N. Crowther and B. Mintz, "Influence of Carbon on Hot Ductility of Steels", Mater. Sci. Technol., 1986, Vol. 2, p. 671-676
- [6] B. Mintz et al., "Grain Size Strengthening in Steel and Its Relationship to Grain Boundary Segregation of Carbon", Mater. Sci. Technol., 1992, Vol. 8, pp. 537-540
- [7] Y. Maehara et al., "Surface Cracking Mechanism of Continuously Cast Low Carbon Low Alloy Steel Stabs", Mater. Sci. Technol., 1990, Vol. 6, pp. 793-805
- [8] B. Mintz et al., "Hot Ductility of Directly Cast C-Mn-Nb-Al Steel", Mater. Sci. Technol., 1986, Vol. 2, pp. 589-594
- [9] E Hurtado-Delgado and R D Morales, "Hot Ductility and Fracture Mechanisms of a C-Mn-Nb-Al Steel", Mater. Sci. and Technol., 2001, Vol. 32B, pp. 919 – 927