

ผลของการบำบัดเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวหลังการอบชุบใต้อุณหภูมิวิกฤติต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อ 16 wt% Cr-2 wt% Mo ที่เติมวานาเดียม

**Effect of Cryogenic Treatment subject to Sub-critical Heat Treatment on Abrasive Wear Resistance of 16 %wt Cr - 2 %wt Mo Cast Iron with Vanadium**

พงษ์อนันต์ โสแก้ว,<sup>1</sup> สุดสาคร อินธิเดช,<sup>\*2</sup> เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป<sup>3</sup>  
Ponganan Sokawe,<sup>1</sup> Sudsakorn Inthidech,<sup>2</sup> Kiettisak Sriprateep<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการบำบัดเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวหลังการอบชุบใต้อุณหภูมิวิกฤติต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อโครเมียม 16 wt%Cr-2 wt%Mo ที่เติมวานาเดียม 0-3 wt% ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบและอบชิ้นงานทดสอบในสภาพหล่อที่อุณหภูมิ 500 550 และ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เย็นตัวในอากาศและไนโตรเจนเหลว ความแข็งในสภาพหล่อเพิ่มขึ้นช้าๆตามปริมาณวานาเดียม ในสภาพผ่านการทำการอบชุบใต้อุณหภูมิวิกฤติพบว่าความแข็งแสดงการเกิดความแข็งลำดับที่สองเนื่องการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์กลายเป็นมาร์เทนไซต์ ความแข็งในชิ้นงานผ่านการเย็นตัวในไนโตรเจนเหลวจะสูงกว่าเย็นตัวในอากาศในทุกชิ้นงาน ในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียแปรผันตรงกับระยะทางที่ขัดสีในทุกชิ้นงานทดสอบ อัตราการสึกหรอลดลงเมื่อความแข็งและปริมาณวานาเดียมเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการสึกหรอในชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวด้วยไนโตรเจนเหลวจะต่ำกว่าในการเย็นตัวในอากาศ ค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดได้รับในชิ้นงานที่เติม 3 wt% V อบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสและเย็นตัวในไนโตรเจนเหลว

**คำสำคัญ:** การอบชุบใต้อุณหภูมิวิกฤติ, การบำบัดเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว, เหล็กหล่อโครเมียมสูง, ความแข็ง, ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี, ผลของวานาเดียม

### Abstract

In this research, the effect of cryogenic treatment subject to sub-critical heat treatment on abrasive wear resistance of the 16 wt% Cr - 2 wt% Mo cast irons with 0-3 wt% V was clarified. The as-cast specimens were prepared and held at 500, 550 and 600 °C for 4 hours, and then cooled by air and liquid nitrogen. In the as-cast state, the hardness increased gradually with an increase in V content. In the subcritical heat treatment state, the hardness curves showed a secondary hardening due to the precipitation of secondary carbides and the transformation of austenite into martensite. The hardness of nitrogen cooled specimen was higher than that of air

---

<sup>1</sup>นิสิตปริญญาโท, <sup>2,3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150, <sup>1</sup>Graduate student, <sup>2,3</sup> Assistant Prof., Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand., <sup>\*2</sup> Corresponding author, Email: sudsakorn.i@msu.ac.th

cooled specimen. In abrasive wear test, the abrasive wear loss increased in proportion to the wear distance in all specimens. The wear rate ( $R_w$ ) decreased when the hardness and vanadium content increased. The smallest wear rate was obtained in the 3 wt% V specimen which treated at 550 °C and cooled by liquid nitrogen.

**Keywords:** Subcritical heat treatment, cryogenic treatment, high chromium cast iron, hardness, abrasive wear resistance, vanadium effect

## บทนำ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงมีสมบัติทนการสึกหรอสูง จึงใช้งานในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมเหมืองแร่และอุตสาหกรรมเหล็ก เป็นต้น เหล็กหล่อชนิดนี้มีการบอระหว่าง 2.0-3.0 wt% (จากนี้ไปแทนด้วย %) และมีโครเมียมในปริมาณ 12-30 % นอกจากนี้จะเติมธาตุผสมอื่นเช่น โมลิบดีนัม (Mo) และวานาเดียม (V)<sup>1-5</sup> โดยโมลิบดีนัมจะเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งและช่วยป้องกันเฟิร์ลไลต์ ในขณะที่วานาเดียมจะเกิดคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงมากและทำให้โครงสร้างของคาร์ไบด์มีความละเอียด<sup>3,6-9</sup>

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงประกอบด้วยเนื้อพื้นและยูเทคติกคาร์ไบด์ชนิด  $M_7C_3$  และ  $M_7C_6$  (M คือ Fe และ Cr) ในเหล็กหล่อโครเมียมสูงมีเติม Cr มากกว่า 15% จะพบเฉพาะคาร์ไบด์ชนิด  $M_7C_3$  มีลักษณะเป็นแท่งขนาดเล็กและมีความต่อเนื่องของโครงสร้างน้อย ทำให้มีความแข็งและความแกร่งสูงส่งผลให้ทนต่อการสึกหรอแบบขัดสีได้<sup>1-3</sup>

โครงสร้างของเนื้อพื้นในสภาพหล่อเป็นได้ทั้งเฟส ออสเทนไนต์ มาร์เทนไซต์หรือโครงสร้างเฟลโลออสเทนไนต์เป็นเฟสที่มีความเหนียวสูงและเพิ่มความต้านทานต่อการขัดสีได้โดยสามารถเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อได้รับการขัดสีหรือการกระทบ<sup>1,3</sup> แต่ถ้ามีมากเกินไปจะส่งผลเสียคือทำให้เหล็กหล่อมีความแข็งต่ำและส่งเสริมให้เกิดการแตกแบบหลุดร่วง (Spalling) เนื้อพื้นที่เป็นเฟลโลออสเทนไนต์มีความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ<sup>1</sup> โครงสร้างของเนื้อพื้นที่เหมาะสมกับงานด้านการขัดสีคือ มาร์เทนไซต์เป็นส่วนใหญ่และมีปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้ำเล็กน้อย ดังนั้นเหล็กหล่อปรับปรุงเนื้อพื้นโดยกรรมวิธีทางความร้อนภายใต้สภาวะที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน

กรรมวิธีทางความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความแข็งคือ การอบชุบใต้อุณหภูมิวิกฤติ (sub-critical heat treatment) โดยทำการอบเหล็กหล่อในสภาพหล่อที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิมุ่ดตอยด์ วิธีนี้เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งไม่เกิน 800 HV30<sup>1-3</sup> การบำบัดเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว (Cryogenic treatment) เป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเหล็กกล้าเครื่องมือ<sup>10</sup> นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่าการบำบัดเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวหลังการชุบแข็งสามารถเพิ่มความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสีสำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16%Cr-1%Mo-1%Cu<sup>11</sup> แม้ว่าที่ผ่านมามีการใช้วานาเดียมเพื่อเพิ่มความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสีในเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อ<sup>2,6,7</sup> แต่ยังไม่พบว่ามีการศึกษาผลของวานาเดียมต่อความแข็งในการอบชุบใต้อุณหภูมิวิกฤติและเย็นตัวโดยใช้ไนโตรเจนเหลว

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดำเนินการศึกษาผลของการบำบัดเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวหลังการอบชุบใต้อุณหภูมิวิกฤติต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16%Cr - 2%Mo ที่เติม 0-3%V ซึ่งเป็นส่วนผสมสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมืออบในอุตสาหกรรมเหมืองแร่และปูนซีเมนต์

## กระบวนการทดลอง

### การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการหล่อชิ้นงานทดสอบโดยใช้เตาเหนียวนาไฟฟ้าความถี่สูง หลอมวัสดุดิบที่อุณหภูมิ 1600 °C ทำการเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 1500-1600 °C ลงในแบบหล่อทราย กลุ่มที่ผิวหน้าของไรเซอร์ด้วยผงคายความร้อน

ทำการตัดชิ้นงานหล่อให้มีขนาด 50x50x7 มิลลิเมตร โดยส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานแสดงดัง Table 1

### การอบชุบได้อุณหภูมิวิกฤติ

ทำการอบชิ้นงานในสภาพหล่อที่อุณหภูมิ 500 550 และ 600 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เย็นตัวในอากาศ และไนโตรเจนเหลว

**Table 1** Chemical composition of test specimens.

Number	Alloy (wt%)					
	Cr	C	Mo	Mn	Si	V
No.1	15.90	3.04	2.01	0.50	0.52	0.08
No.2	16.28	3.07	2.00	0.54	0.61	1.03
No.3	16.41	3.03	1.95	0.52	0.57	1.97
No.4	15.66	3.05	2.05	0.46	0.58	2.81

### การวัดความแข็งและทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ทำการทดสอบความแข็ง โดยใช้เครื่องทดสอบ Vickers hardness tester ด้วยแรงกดทดสอบขนาด 297 N สำหรับการทดสอบความแข็งแบบ macro-hardness และใช้เครื่องทดสอบ micro-Vickers hardness tester ด้วยแรงกดทดสอบขนาด 0.98 N สำหรับการทดสอบความแข็งแบบ micro-hardness

ทำการขัดเตรียมผิวชิ้นงานโดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายและขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ทำการกัดผิวชิ้นงานด้วยน้ำยา Vilella ที่มีส่วนผสมของ 1 g Picric Acid, 5 cc HCl และ 95 cc Alcohol ทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อยืนยันผลการทดลอง

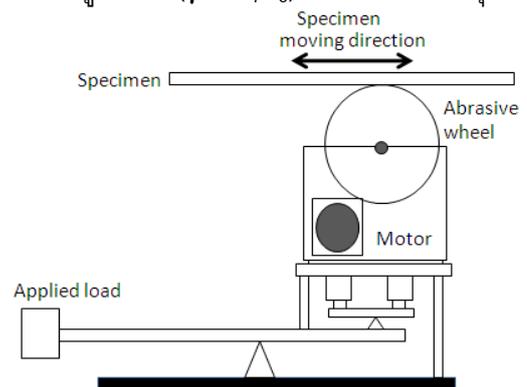
### การทดสอบการสึกหรอ

ทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีโดยใช้เครื่องทดสอบแบบ Suga abrasion test แสดงดัง Figure 1 โดยใช้น้ำหนักทดสอบ 0.6 กิโลกรัม วัสดุขัดสีเป็นกระดาษทราย (SiC) ขนาดเม็ดผงขัดเบอร์ 180 ทดสอบ 400 วินาที/รอบ ทำการทดสอบซ้ำที่รอยขัดสีเดิมจำนวน 8 รอบต่อชิ้นงาน รวมเป็นระยะทางการขัดสีรวม 192 เมตร ในแต่ละรอบการทดสอบจะวัดน้ำหนักที่สูญเสียด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูง (0.0001 กรัม)

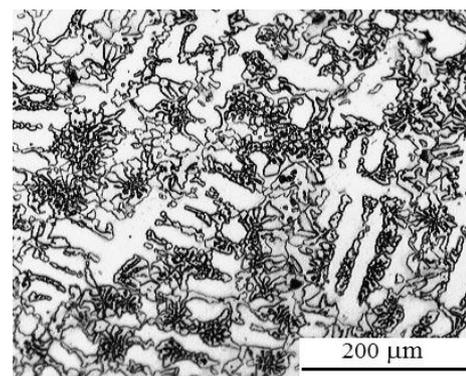
## ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

### สภาพหล่อ

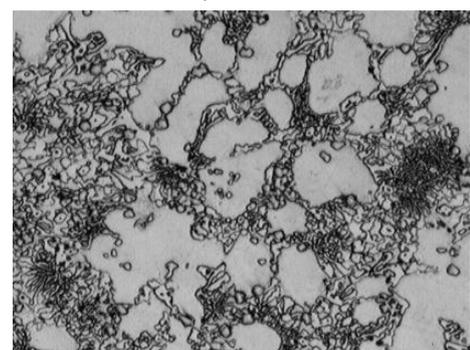
โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของชิ้นงานที่ไม่เติมและเติม 3% V แสดงเป็นตัวอย่างดัง Figure 2 โดยประกอบไปด้วยเดนไดรซ์ของออสเทนไนต์และกลุ่มของโครงสร้างยูเทคติก ( $\gamma + M_7C_3$ ) โครงสร้างพื้นในทุ



**Figure 1** Schematic drawing of Suga abrasion wear tester.



a) V-free

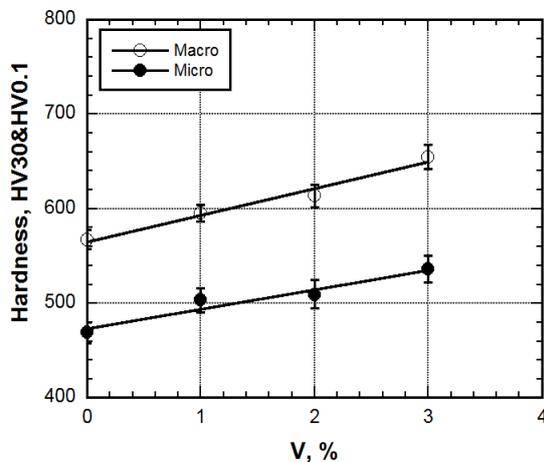


## b) 3% V

**Figure 2** Microphotographs of as-cast hypoeutectic 16% Cr-2% Mo cast irons without and with 3%V.

ชิ้นงานประกอบด้วยออสเทนไนต์เหลือค้ำเป็นส่วนมาก และมาร์เทนไซต์ในปริมาณเล็กน้อย โดยพบคาร์ไบด์ประเภท MC ในชิ้นงานที่เติม 3% V

ผลของวานาเดียมต่อค่าความแข็งในสภาพหล่อ แสดงดัง Figure 3 ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวานาเดียม เนื่องจากวานาเดียมเป็นธาตุที่สามารถเกิดคาร์ไบด์ได้ง่ายและคาร์ไบด์ของวานาเดียมมีความแข็งสูงมากกว่าโครเมียมคาร์ไบด์ คาร์ไบด์ที่เกิดเป็นประเภท VC และนอกจากนี้วานาเดียมยังช่วยให้ออสเทนไนต์เปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ได้มากขึ้น เนื่องจากวานาเดียมเป็นธาตุที่ลดเสถียรภาพของออสเทนไนต์

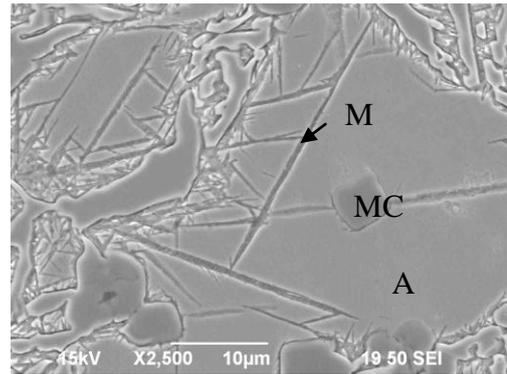


**Figure 3** Effect of vanadium on hardness in as-cast state.

### การอบชุบได้อุณหภูมิวิกฤติ

ในขั้นตอนการอบชุบได้อุณหภูมิวิกฤตินั้นจะทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพหล่อ โดยออสเทนไนต์ในสภาพหล่อเกิดการเปลี่ยนเฟสเพราะขาดเสถียรภาพเนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองในระหว่างการอบ

การเปลี่ยนเฟสสำหรับชิ้นงานที่เติม 3%V ผ่านการเย็นตัวในไนโตรเจนเหลวแสดงเป็นตัวอย่างดัง Figure 4 จากภาพประกอบพบว่าเนื้อพื้นประกอบด้วยมาเทนไซต์มากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาพหล่อ ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันได้ว่าออสเทนไนต์เปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ได้มากขึ้นเมื่อทำการเย็นตัวในไนโตรเจนเหลว



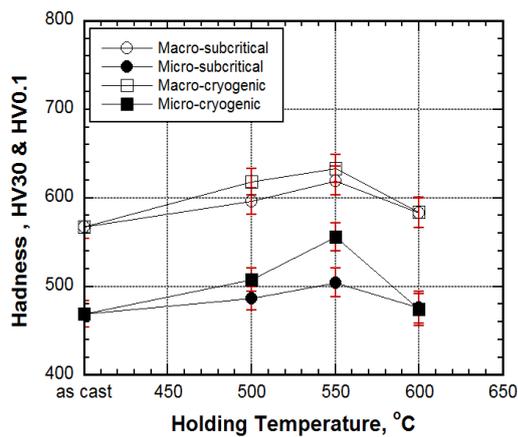
**Figure 4** Phase transformation during sub-critical heat treatment at 550 °C in specimen with 3%V. (A: austenite, M: martensite, MC: V-rich carbide)

ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและอุณหภูมิในการอบชุบได้อุณหภูมิวิกฤติ แสดงดัง Figure 5 พบว่ากราฟความแข็งแสดงการเกิดความแข็งลำดับที่สอง (Secondary hardening) เหมือนกับในเหล็กกล้าเครื่องมือ เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ โดยค่าความแข็งในชิ้นงานที่เย็นตัวในไนโตรเจนเหลวจะสูงกว่าที่เย็นตัวในอากาศในทุกชิ้นงาน ค่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 550 °C เนื่องจากออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนลดลงเพราะส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการฟอร์ม MC คาร์ไบด์ลำดับที่สอง การเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์จึงง่ายขึ้นและที่สำคัญคือการเย็นตัวในไนโตรเจนเหลวจะทำให้ชิ้นงานเย็นตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ้นสุดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ (Ms) ซึ่งทำให้มาร์เทนไซต์เกิดขึ้นมากกว่าเย็นตัวในอากาศ

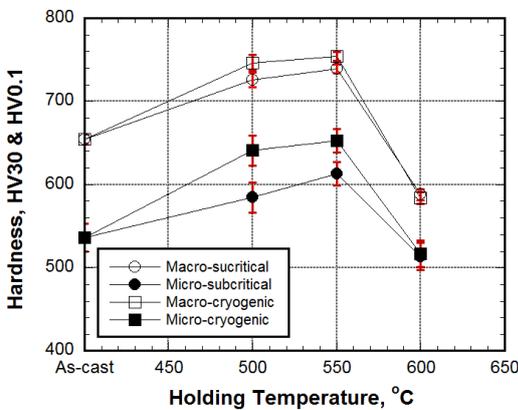
### พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสี

ตัวอย่างผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีของชิ้นงานเติม 3% V ที่เย็นตัวในอากาศและที่เย็นตัวโดยใช้

ไนโตรเจนเหลวแสดงดัง Figure 6 จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียกับระยะทางการขัดสีเป็นแบบเส้นตรง คือ ปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียแปรผันตรงกับระยะทางขัดสี ในชิ้นงานที่มีการเย็นตัวเหมือนกันพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 °C ซึ่งมีเนื้อพื้นเป็นมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์เหลือค้างมีน้ำหนักที่สูญเสียน้อยที่สุด ส่วนชิ้นงานที่มีการ



(a) V-free

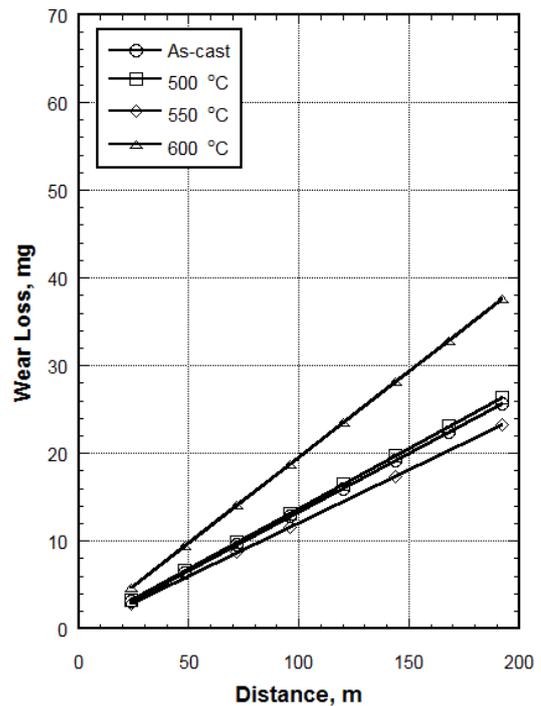


(b) 3%V

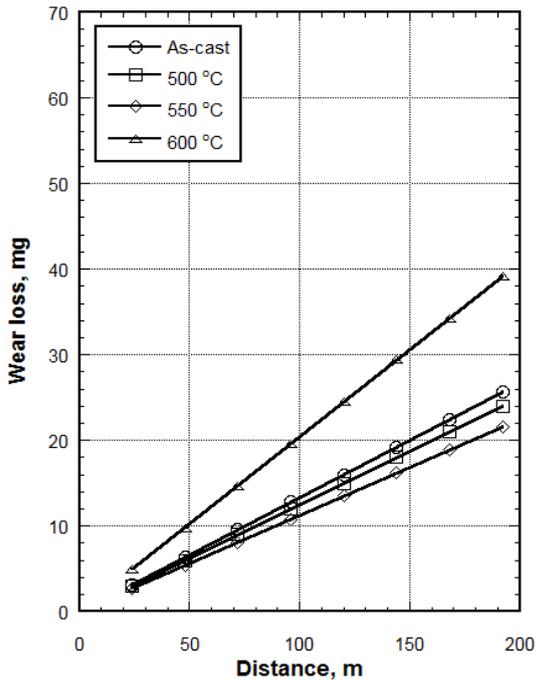
**Figure 5** Relationship between macro-hardness and micro-hardness of 16% Cr-2% Mo cast iron without and with 3% V.

สูญเสียน้ำหนักมากที่สุดคือชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 600 °C ซึ่งมีเนื้อพื้นเป็นเพิร์ลไลต์ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสภาวะการเย็นตัวพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นงานที่เย็นตัวโดยใช้ไนโตรเจนเหลวน้อยกว่าชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ขัดสีกับน้ำหนักที่สูญเสียเป็นแบบเส้นตรง ดังนั้นอัตราการสึกหรอแบบขัดสี ( $R_w$ , mg/m) จึงสามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟ ผลของความแข็งต่อค่า  $R_w$  ในทุกชิ้นงานทดสอบแสดงตัวอย่างดัง Figure 7 สำหรับการเย็นตัวในไนโตรเจนเหลว พบว่าค่า  $R_w$  ลดลงเมื่อความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยอื่นโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ Pin-on-disk<sup>3,11</sup>



a) Air cooling



b) Liquid nitrogen cooling

Figure 6 Relationship between wear loss and wear distance of 3%V specimen.

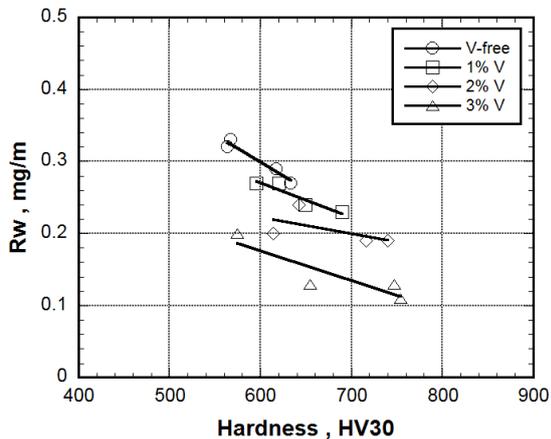


Figure 7 Effect of hardness on wear rate (Rw) of specimens cooled by liquid nitrogen.

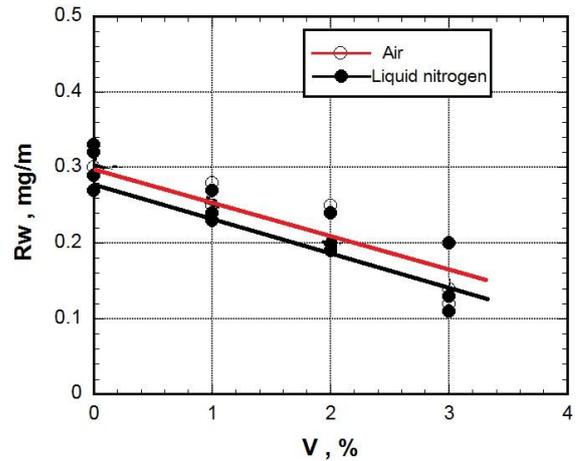


Figure 8 Effect of V content on wear rate (Rw).

เมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณวานเนเดียมต่อค่า  $R_w$  ดัง Figure 8 จะพบว่าค่า  $R_w$  ลดลงเมื่อปริมาณวานเนเดียมเพิ่มขึ้น โดยค่า  $R_w$  ของชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวโดยใช้ไนโตรเจนเหลวต่ำกว่าเย็นตัวในอากาศในทุกชิ้นงาน โดยค่า  $R_w$  ต่ำสุดเกิดขึ้นในแต่ชิ้นงานที่เติม 3%V ที่ผ่านการเย็นตัวโดยใช้ไนโตรเจนเหลว

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าการบำบัดเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวสามารถเพิ่มความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสีให้กับเหล็กหล่อ 16% Cr -2%Mo ที่เติมวานเนเดียมได้ ทั้งนี้เนื่องจากวานเนเดียมเป็นธาตุที่สามารถฟอร์มคาร์ไบด์ได้ง่าย ในขณะที่เดียวกันคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นมีความแข็งสูงกว่าโครเมียมคาร์ไบด์<sup>1</sup> นอกจากนี้วานเนเดียมยังช่วยให้เกิดมาร์เทนไซต์ได้ง่ายขึ้นเนื่องจากการเกิดคาร์ไบด์จะทำให้ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ลดลง ส่งผลให้เสถียรภาพของออสเทนไนต์ลดลงและเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ในระหว่างการเย็นตัวได้ง่ายขึ้น เมื่อผ่านการเย็นตัวด้วยไนโตรเจนเหลวพบว่าปริมาณมาร์เทนไซต์มากขึ้นกว่าการเย็นตัวในอากาศเพราะออสเทนไนต์มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเกิดมาร์เทนไซต์สมบูรณ์ (Mf) ในขณะที่เดียวกันคาร์ไบด์ลำดับที่สองจะเกิดการตกตะกอนมากขึ้นในระหว่างการเย็นตัวด้วยไนโตรเจนเหลว<sup>10</sup> และเป็นไปได้ว่าอาจมีวานเนเดียมคาร์ไบด์จะตกตะกอนออกมาด้วย<sup>10,11</sup> จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของเนื้อพื้นสูงขึ้นและทนต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความต้านทานการสึกหรอในชิ้นงานที่

เย็นตัวในไนโตรเจนเหลวดีกว่าการเย็นตัวในอากาศ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ลำดับที่สองในเนื้อพื้น

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ความแข็งในสภาพหล่อเพิ่มขึ้นตามปริมาณวานาเดียม

2. กราฟความแข็งในสภาพการอบชุบได้อุณหภูมิวิกฤติแสดงการเกิดความแข็งลำดับที่สอง เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสที่โครงสร้างเนื้อพื้นจากออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ในระหว่างการเย็นตัว โดยความแข็งในชิ้นงานที่เย็นตัวในไนโตรเจนเหลวจะสูงกว่าที่เย็นตัวในอากาศ

3. ในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีพบว่า น้ำหนักที่สูญเสียแปรผันตรงกับระยะทางที่ขัดสี โดยมีค่าแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขของการอบชุบและปริมาณวานาเดียม น้ำหนักที่สูญเสียมีค่าต่ำสุดในชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 550 °C และมากที่สุดชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 600 °C

4. อัตราการสึกหรอ (Rw) ลดลงเมื่อความแข็งและปริมาณ V เพิ่มขึ้น โดยอัตราการสึกหรอในชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวโดยใช้ไนโตรเจนเหลวต่ำกว่าชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ ค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดได้รับในชิ้นงานที่เติม 3% V ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 550 °C และเย็นตัวโดยใช้ไนโตรเจนเหลว

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2555 สัญญาเลขที่ MRG555E072) และบริษัท พนาพลัสจำกัดที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และคณะกรรมการศาสตรมหาวิทาลัยมหาสารคามสำหรับอุปกรณ์การวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- Laird G., Gundlach R. and Röhring K. Abrasion-Resistant Cast Irons Handbook, USA: American Foundry Society. 2000;(n.d.).
- Inthidech S., Sricharoenchai P. and Matsubara Y. Effect of Alloying Elements on Heat Treatment Behavior of Hypoeutectic High Chromium Cast Iron, Materials Transactions. 2006;47(1):72-81.
- Laird II G. Microstructure of Ni-hard I Ni-hard IV and High-Cr White cast irons, AFS Transactions. 1991;99:339-357
- Powell G.L.F. Morphology of Eutectic  $M_3C$  and  $M_7C_3$  in White Iron Castings, Metals Forum. 1980;3:37-46.
- Park J. L., Characteristic of As-cast and Subcritical Heat Treated High-Chromium-Molybdenum White Irons for Thick-Section Casting, AFS Trans. 1985;93:93 -102
- Wang J. et al., Influence of secondary carbides precipitation and transformation on hardening behavior of a 15 Cr-1 Mo-1.5V white iron, Materials Characterization. 2005;55:234-240.
- Arnoldo Bedolla-Jacudine. Microstructure of vanadium, niobium, and titanium-alloyed high-chromium white cast irons, Int. J. Cast Metals Res. 2001;13:343-361.
- Inthidech S., Sricharoenchai P., Sasaguri N. and Matsubara Y. Behavior of Hardness and Retained Austenite in Heat Treatment of High Chromium Cast iron for Abrasive Wear Resistance, AFS Trans. 2004;112:899 -910.
- Maratray F. and Poulalion A. Austenite Retention in High-Chromium White Iron, AFS Transactions. 1982;90:795-804.
- Simranpreet S. G., Jagdev S., Rupinder S. and Harpreet S., Metallurgical principles of cryogenically

treated tool steels—a review on the current state of science, *Int J Adv Manuf Technol.* 2011; 54: 59–82

11. Wanga J., Xionga J., Fan H., Yanga H. , Liub, H. and Shenb, B. Effects of high temperature and cryogenic treatment on the microstructure and abrasion resistance of a high chromium cast iron. *journal of materials processing technology.* 2 0 0 9; 2 0 9 : 3236–3240