

อิทธิพลของวานาเดียมต่อค่าความแข็งและค่าพลังงานแรงกระแทกในสภาพหล่อ ของเหล็กกล้าซิลิกอนแมงกานีส

Effect of Vanadium on Hardness and Impact Energy of As-Cast Silicon Manganese Steel

ธีรวุฒิ ศรีพันธุ์ชาติ (Teerawut Sripunchat)* ดร.สุชังคณา แดงกัณท์ (Dr.Sukangkana Talangkun)^{1**}

(Received: December 17, 2019; Revised: June 3, 2020; Accepted: June 6, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของวานาเดียม (V) ต่อค่าความแข็งและค่าพลังงานแรงกระแทกของเหล็กกล้าซิลิกอน แมงกานีส ส่วนผสมเริ่มต้นคาร์บอนร้อยละ 0.59 - 0.71 ซิลิกอนร้อยละ 1.71 - 1.86 และแมงกานีสร้อยละ 0.83 - 0.92 โดยน้ำหนัก ชิ้นงาน ทดสอบหล่อขึ้นรูปด้วยแบบทรายหล่อ มีส่วนผสมวานาเดียมในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.002 ถึง 0.296 โดยน้ำหนัก ทำการ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบความแข็งและพลังงานแรงกระแทกแบบชาร์ปี จากผลการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นปรากฏเฟสเพิร์ลไลต์เกือบทั้งหมด แม้ว่าจะมีส่วนผสมคาร์บอนต่ำกว่ายูคเทกทอยด์ (คาร์บอนร้อยละ 0.76 โดยน้ำหนัก) และมีปริมาณเฟสออสเทนไนต์ตกค้างเล็กน้อย ชิ้นงานมีขนาดเกรนเพิร์ลไลต์ลดลงเมื่อปริมาณวานาเดียม เพิ่มขึ้น ผลทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวานาเดียมเช่นกัน โดยมีค่าสูงสุดคือ 309 HB ได้รับในชิ้นงานที่เติมวานาเดียมในปริมาณร้อยละ 0.296 โดยน้ำหนัก ส่วนค่าพลังงานแรงกระแทกพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณวานาเดียมในปริมาณเล็กน้อย ค่าพลังงานแรงกระแทกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 11.92 จูลต่อตารางเซนติเมตร ได้จาก ชิ้นงานที่เติมวานาเดียมในปริมาณร้อยละ 0.08 และ 0.26 โดยน้ำหนัก

ABSTRACT

This research studied the effect of vanadium (V) on hardness and impact energy of the silicon manganese steel composition 0.59 - 0.71 wt% C, 1.71 - 1.86 wt% Si and 0.83 - 0.92 wt% Mn. Sample were cast by sand casting. The amount of vanadium was approximately of 0.002 to 0.296 wt% V. Microstructure, Brinell hardness and Charpy impact energy of the as cast specimens were investigated. The results showed that microstructure of all specimens exhibited mostly pearlite even though the steel was hypoeutectoid (carbon atom less than 0.76 wt%). A small amount of retained austenite was also found by X-rays. Pearlite grain size decreased with increase of amount of vanadium content. Hardness of the specimens also increased with increasing vanadium. The maximum hardness value of 309 HB was obtained from a specimen with 0.296% V. However, the impact energy was found not affected by the variation of small amount of vanadium. The highest value of impact energy was 11.92 J/cm² obtained from specimens contains 0.08 and 0.26% V.

คำสำคัญ: เหล็กกล้าซิลิกอน-แมงกานีส ความแข็ง พลังงานแรงกระแทก วานาเดียม

Keywords: Silicon manganese steel, Hardness, Impact energy, Vanadium

¹Corresponding author: sukangkana@kku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

เหล็กกล้าซิลิกอนแมงกานีสเป็นเหล็กกล้าในกลุ่ม SUP 7 ตามมาตรฐาน JIS G4801 [1] มีส่วนผสมทางเคมี C 0.56-0.64 wt%, Si 1.80-2.20 wt%, Mn 0.70-1.00 wt%, P < 0.035 wt% และ S < 0.035 wt% เหล็กชนิดนี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ทำสปริงสำหรับผลิตชิ้นส่วนที่รับน้ำหนัก อาทิ สปริงแบบแผ่นของรถยนต์ (laminated spring/leaf spring) สปริงขดของรถยนต์ (coiled spring) และทอร์ชั่นบาร์สปริง (torsion bar spring) [1] นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานใบมีดตัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งใบมีดงานเกษตร ตลอดจนใบมีดในเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ใช้กับงานเกษตร เช่น เครื่องตัดอ้อย เครื่องตัดหญ้า เครื่องมือเกี่ยวเกี่ยวพืชผลทางการเกษตร เนื่องจากเหล็กประเภทนี้มีความแข็งแรงสูง สามารถรับแรงกระแทกได้ดี และสามารถชุบแข็งได้ อีกทั้งยังมีราคาถูกจึงเป็นที่นิยมใช้ทั่วไป [2] อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบเมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นใบมีดตัดผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเพื่อการลดต้นทุน พบว่าใบมีดในงานเกษตรมักจะชุบแข็งเฉพาะที่บริเวณคมตัดเพื่อรักษาสมบัติด้านพลังงานแรงกระแทกทำให้อายุการใช้งานถูกจำกัดด้วยความลึกของชั้นผิวแข็ง เมื่อชั้นผิวแข็งหมดไปก็จะเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงควรหาแนวทางในการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอให้กับชั้นผิวแข็งของใบมีด [2]

ในงานวิจัยของ Won Jong Nam และคณะ [3] โดยศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของธาตุผสม 3 ธาตุ คือ โมลิบดีนัม (Mo) ทังสเตน (W) วานาเดียม (V) และอุณหภูมิอบคืนตัวต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กสปริงซิลิกอนโครเมียม พบว่าการเติมธาตุวานาเดียมส่งผลให้เหล็กมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก ความต้านแรงดึงและความแข็งสูงสุดเมื่อเทียบกับธาตุผสมอื่น นอกจากนี้ ธาตุวานาเดียม (V) จัดว่าเป็นสารปรับเกรนละเอียด (grain refiner) ในเหล็กกล้าสามารถปรับสภาพเกรนให้มีความละเอียดมากขึ้นส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น Shizhong Wei และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาผลของธาตุผสมวานาเดียมและคาร์บอนในเหล็กโรบสูง (high speed steel) พบว่าการเพิ่มของวานาเดียมและคาร์บอน ทำให้ความต้านทานการสึกหรอ (wear resistance) และความแข็งของเหล็กกล้าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ วานาเดียมยังเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (hardenability) ของเหล็ก [5] ศุภชัย ประเสริฐสกุล [6] ได้รายงานว่าการเติม 0.2%V ลงในเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดชุบแข็งด้วยน้ำ (W2) จะช่วยให้เหล็กกล้าเครื่องมือมีเกรนละเอียดขึ้น สามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้นและสามารถชุบแข็งได้ดีขึ้น [5] จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าธาตุผสมที่เพิ่มความแข็งให้กับเหล็กที่มีประสิทธิภาพ คือธาตุวานาเดียม [7-12] โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้ มีผลของการเพิ่มวานาเดียมลงในเหล็กชนิดต่าง ๆ จะทำให้ความต้านทานการสึกหรอและความแข็งของวัสดุเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวานาเดียมเป็นธาตุที่เกิดพันธะกับคาร์บอนเกิดเป็นสารประกอบวานาเดียมคาร์ไบด์ได้ง่าย ดังนั้นหากมีปริมาณวานาเดียมมากเกินไป จะมักพบวานาเดียมคาร์ไบด์ชนิด VC ตกตะกอนตามขอบเกรน ส่งผลให้ความแกร่งของเหล็กลดลงได้ [6] ดังนั้นปริมาณของวานาเดียมที่ผสมในเหล็กกล้าจึงไม่ควรเกิน 0.3%V เนื่องจากวานาเดียมในปริมาณน้อยจะเพิ่มความแข็งแต่ยังคงรักษาสมบัติเชิงกลด้านพลังงานแรงกระแทก [5-6] ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลที่ต้องการสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเครื่องมือตัด (cutting tools)

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะพัฒนาวัสดุเหล็กกล้าที่เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับเครื่องมือตัด เช่น ใบมีด โดยการพัฒนาจากเหล็กกล้าแมงกานีสด้วยการเติมวานาเดียม ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักเพื่ออธิบายปรากฏการณ์และอิทธิพลของธาตุผสมวานาเดียมต่อความแข็ง พลังงานแรงกระแทก และโครงสร้างจุลภาคในสภาวะหล่อขึ้นรูป (as cast) ด้วยแบบหล่อทราย เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาวิธีการชุบแข็ง และอบคืนตัวเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลตามต้องการและที่เหมาะสมต่อไป

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบเหล็กจะทำการหล่อขึ้นรูปมีส่วนผสมทดสอบจำนวน 6 ส่วนผสม มีธาตุวานาเดียมในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.002 ถึง 0.296 โดยน้ำหนัก (wt%) เริ่มจากเตรียมวัตถุดิบซึ่งจะประกอบไปด้วย เหล็กดิบ เหล็กกล้า และเหล็กผสม (Ferro-alloys) ทำการหลอมวัตถุดิบเข้าด้วยกันด้วยเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า หลอมเหล็กน้ำหนัก 100 กิโลกรัมต่อเบ้าหลอม ทำการหลอมน้ำโลหะและป้อนน้ำโลหะให้ได้ส่วนผสมทางเคมีตามที่กำหนด จากนั้นเทน้ำโลหะลงในแบบอุณหภูมิ 1,650 องศาเซลเซียสให้เย็นตัวในแบบหล่อทราย (sand molding) ที่มีรูปทรงเป็นรูปตัววาย (Y Block) ดังภาพที่ 1 ชิ้นงานหล่อมีขนาด 55×175×150 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM A 536 – 84 [13] ส่วนผสมทางเคมีวัดด้วยวิธีสเปกโตรเมตริกของชิ้นงานทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 แต่ละส่วนผสมทางเคมีจะทำการเท 5 ชิ้นงาน

2. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและผิวรอยแตก

ชิ้นทดสอบเหล็กซิลิกอนแมงกานีส ในสภาวะหล่อ (as cast) ที่มีปริมาณวานาเดียม 0.002, 0.13 และ 0.296 wt% V โครงสร้างจุลภาคขนาด 15×25×25 มิลลิเมตร ตัดมาจากบริเวณกลางชิ้นงานหล่อ จากนั้นทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายและขัดละเอียดโดยใช้ผงอลูมินาขนาด 0.5 ไมครอน บนผ้าสักหลาด ทำการกัดผิวชิ้นงานด้วยน้ำยาไนตอล (ส่วนผสม : กรดไนตริก 2% แอลกอฮอล์ 98%) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเกรนด้วยวิธีการใช้เส้น (Intercept method) ส่วนผิวรอยแตกจะทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

3. การวัดปริมาณเฟสออสเทนไนต์ตกค้าง

ชิ้นทดสอบเหล็กซิลิกอนแมงกานีส ในสภาวะหล่อ (as cast) ที่มีปริมาณวานาเดียม 0.002, 0.13 และ 0.296 wt% V หลังจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะนำมาวัดปริมาณเฟสออสเทนไนต์ตกค้างด้วยวิธีรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง X-ray แบบพกพา (Portable X-ray Residual Stress Analyzer)

4. การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธี การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

ชิ้นทดสอบเหล็กซิลิกอนแมงกานีส ในสภาวะหล่อ (as cast) ที่มีปริมาณวานาเดียม 0.002, 0.13 และ 0.296 wt% V จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเฟสวานาเดียมคาร์ไบด์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

5. การตรวจสอบความแข็งและความต้านแรงกระแทก

ความแข็งของชิ้นทดสอบทั้ง 6 ส่วนผสม ทดสอบโดยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล ค่าความแข็งจะแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยของการวัด 3 จุด ชิ้นทดสอบพลังงานแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy) ทั้ง 6 ส่วนผสม เตรียมตามมาตรฐาน DIN EN 10045-1(1991-04) [14] โดยการตัดชิ้นงานให้ได้ขนาด 10×10×55 มิลลิเมตรและบากร่องตัวยู ดังแสดงในภาพที่ 2 ค่าพลังงานกระแทกจะแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยของการทดสอบ 4 ชิ้นทดสอบ

ผลการวิจัย

1. โครงสร้างจุลภาค

ในสภาวะหล่อขึ้นรูป โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าซิลิกอนแมงกานีส ที่ผสมวานาเดียมร้อยละ 0.002, 0.13 และ 0.296 wt% V แสดงดังภาพที่ 3 พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้งหมดเป็นเพิร์ลไลต์ (pearlite) ซึ่งมักพบในเหล็กกล้า ยูเทกทอยด์ทั่วไป แต่จะไม่พบโปรยูเทกทอยด์เฟอร์ไรต์ (proeutectoid Ferrite, α) ที่ตำแหน่ง A เนื่องจาก

ปริมาณคาร์บอน (C) ของวัสดุมีค่า 0.67 wt % ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนที่ใกล้เคียงกับจุดยูเทกทอยด์ที่ 0.76 wt % [15] โดยจะพบโครงสร้างเป็นแถบเส้นสีขาวเฟสซีเมนไทต์ (Fe_3C) สลับกับแถบสีดำเฟสเฟอร์ไรต์ (α -Ferrite) สลับกันอยู่ในเกรนซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสเพิร์ลไลต์ แต่เนื่องจากปริมาณของวานาเดียมที่ผสมลงไปมีปริมาณน้อยจึงไม่ปรากฏเฟสสารประกอบวานาเดียมคาร์ไบด์ และเมื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเกรนจะแสดงข้อมูลด้วยกราฟดังภาพที่ 4 ซึ่งจะพบว่าเมื่อเหล็กกล้าซิลิกอนแมงกานีสมีปริมาณวานาเดียมเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของเกรนมีแนวโน้มละเอียดเพิ่มมากขึ้นหรือมีขนาดของเกรนเล็กลง ตามสมการ $Y = -3.7212x + 41.632$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9249$ ซึ่งเหล็กกล้าซิลิกอนแมงกานีสที่มีปริมาณ วานาเดียม 0.296 %V มีความละเอียดของเกรนมากกว่าปริมาณวานาเดียม 0.002 %V ถึง 19.95%

2. ออสเทนไนต์ตกค้าง

ผลของเฟสออสเทนไนต์ตกค้างจะแสดงข้อมูลด้วยกราฟดังภาพที่ 5 ซึ่งจะพบว่าเหล็กกล้าซิลิกอน แมงกานีส ในสภาวะหล่อ (as cast) ที่มีปริมาณวานาเดียมเพิ่มมากขึ้นที่ 0.002, 0.13 และ 0.296 %V จะมีปริมาณเฟสออสเทนไนต์ตกค้าง (retained austenite) ไม่แตกต่างกันมากนักแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณ V ซึ่งมีค่าสูงสุดคือ 0.75 %

3. โครงสร้างผลึก

เมื่อทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าซิลิกอนแมงกานีสผสมวานาเดียม 0.002-0.296 wt%V ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 6 พบว่าโครงสร้างผลึกของ เฟอร์ไรต์ (α -Ferrite) [16] ตามวัสดุอ้างอิง JCPDS (file number: 34-0396) มีตำแหน่งมุม 2θ ของพีคที่ 44.5895° , 64.980° และ 82.297° เป็นพีคที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก (110), (200) และ (211) ตามลำดับ โดยเฟอร์ไรต์ที่พบจะเป็นยูเทกทอยด์เฟอร์ไรต์ ชิ้นทดสอบที่มีปริมาณวานาเดียม 0.13 และ 0.296 %V จะพบโครงสร้างผลึกเฟอร์ไรต์เช่นเดียวกันและยังปรากฏโครงสร้างผลึกของวานาเดียมคาร์ไบด์ (VC) ตามวัสดุอ้างอิง ICSD code 619057, 43259 และ 619052 [17] มีตำแหน่งมุม 2θ ของพีคที่ 37° , 43° , 63° , 75° และ 80° เป็นพีคที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก (111), (200), (220), (311) และ (222) ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าจากการเพิ่มธาตุวานาเดียมลงในเหล็กกล้าซิลิกอนแมงกานีสนี้ วานาเดียมที่ผสมเติมลงไปนั้นจะเข้าไปรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ (VC) แต่อย่างไรก็ตาม ขนาดของเฟสวานาเดียมคาร์ไบด์มีขนาดเล็กมากจึงไม่สามารถตรวจพบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

4. พลังงานแรงกระแทก

ผลของวานาเดียมต่อพลังงานการกระแทกแสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งพบว่าพลังงานการกระแทกใกล้เคียงกันแม้ว่าปริมาณ V เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแต่ละส่วนผสมมีพลังงานแรงกระแทกใกล้เคียงกัน เนื่องจากเหล็กในสภาวะหล่อจะมีความเปราะซึ่งปริมาณ V ในช่วงทดสอบยังไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานการกระแทก ส่วนในความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของกระบวนการหล่อโลหะและปริมาณธาตุผสมอื่น ๆ ในเหล็กกล้าด้วย เมื่อนำชิ้นทดสอบมาพิจารณาการแตกหักของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังภาพที่ 8 ที่ปริมาณวานาเดียม 0.002 - 0.296 %V นั้น ที่ตำแหน่ง A จะพบลักษณะการแตกแบบฉีกขาด แตกเป็นแผ่นและเป็นชั้น ๆ ของโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้นของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (α -Ferrite) และชั้นของโครงสร้างซีเมนไทต์ (Fe_3C) ในระนาบแนวขนานกันของโครงสร้างทั้งสอง และที่ตำแหน่ง B จะพบการแตกหักในอีกระนาบ เป็นแบบผ่าเกรนในแนวตั้งที่ทำให้เห็นชั้นของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (α -Ferrite) และชั้นของโครงสร้างซีเมนไทต์ (Fe_3C) ซ้อนติดกันอยู่ ซึ่งโดยภาพรวมของลักษณะการแตกหักโครงสร้างทั้ง 3 ชิ้นทดสอบมีลักษณะโครงสร้างเพิร์ลไลต์ ที่ใกล้เคียงกัน เป็นการแตกหักเปราะ (Brittle fracture) ชนิดการแตกหักแบบผ่าเกรน (Cleavage facets)

5. ความแข็ง

อิทธิพลของวานาเดียมต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบแสดงดังภาพที่ 9 จะพบว่าเมื่อเหล็กกล้าซิลิกอน แมงกานีสมีปริมาณวานาเดียมเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็ง (HB) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ตามสมการ $Y = 13.655x + 231.61$ โดยมีค่า $R^2 = 0.91$ แมงกานีสที่มีปริมาณวานาเดียม 0.296 wt % ให้ค่าความแข็งมากกว่าปริมาณวานาเดียม 0.002 wt % ถึง 32 %

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลจากการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า ธาตุวานาเดียมเป็นสารละลายของแข็งแบบแทนที่ (Substitutional Solid Solution) [6] ซึ่งอะตอมของธาตุ V จะเข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุเหล็กตำแหน่งเดิมของอะตอมธาตุเหล็ก เนื่องจากมีขนาดรัศมีอะตอม V มีขนาด 1.3161 แองสตรอม [15] ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงอะตอมของเหล็ก (Fe) ที่มีขนาด 1.24 แองสตรอม ไม่เกิน 14% ในโครงสร้างผลึกของเหล็ก และวานาเดียมบางส่วนจะเข้าไปรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ (VC) ดังแสดงหลักฐานการตรวจพบจาก XRD อย่างไรก็ดีตาม ขนาดของเฟสวานาเดียมคาร์ไบด์ในชิ้นงานที่มีปริมาณวานาเดียมต่ำจะมีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อยจึงไม่สามารถตรวจพบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ในงานวิจัยของ Pengfei Wang และคณะ [18] ได้ตรวจพบวานาเดียมคาร์ไบด์ขนาดเล็กเมื่อเติมวานาเดียมลงไปเหล็กในปริมาณต่ำ ที่ 0.12-0.23wt%V. จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านอิเล็กตรอน (TEM) จะพบอนุภาควานาเดียมคาร์ไบด์ในโปรยเทคตอยด์เฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ของโครงสร้างเพิร์ลไลต์ ซึ่งจะมีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลมโดยมีขนาดแตกต่างกันตามปริมาณการจับตัวกันโดยมีขนาดเฉลี่ย 48.9 และ 40.7 nm และมีการกระจายทั่วทั้งโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ

การเกิด VC นี้จะเกิดขึ้นในขั้นตอนการหลอมละลายของโลหะ และมีเสถียรภาพตั้งแต่อุณหภูมิ 1,527°C [19] ในสภาวะเริ่มเย็นตัว VC ที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะจะกระจายตัวและมีขนาดเล็กนี้ จะทำหน้าที่เสมือนนิวเคลียสของเกรน ซึ่งทำให้ปริมาณนิวเคลียสมียาวนานมากขึ้น ทำให้จำนวนเกรนมีปริมาณมากส่งผลให้ขนาดเกรนเล็กลง จากขนาดเกรนที่เล็กลงจะบ่งบอกถึงปริมาณขอบเกรน (grain boundary) มากขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ในเนื้อโลหะมีบริเวณที่อะตอมจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมากขึ้น จะสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ดี เป็นผลทำให้โลหะมีความแข็งแรงสูงขึ้น

เมื่อเพิ่มปริมาณวานาเดียมเป็น 0.296 wt % ให้ค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานปริมาณวานาเดียม 0.002 wt % ถึง 32 % ซึ่งความแข็งของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลเนื่องมาจากกลไกการเพิ่มขึ้นด้วยสารละลายของแข็งของอะตอมวานาเดียมในเฟสเฟอร์ไรต์ และเฟสวานาเดียมคาร์ไบด์ซึ่งมีความแข็งแรงสูง ซึ่งการวัดความแข็งของโลหะเป็นการวัดความสามารถในการต่อต้านการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) เนื่องจาก VC มีขนาดเล็กจะสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันและการเสียรูป ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก

ถึงแม้ว่าเกรนที่มีขนาดเล็กจะละเอียดและสม่ำเสมอจะทำให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกดีขึ้นด้วย [5] จากการทดสอบแรงกระแทก พบว่าเหล็กซิลิกอนแมงกานีสในสภาวะหล่อขึ้นรูปทุกส่วนผสมมีค่าพลังงานแรงกระแทกใกล้เคียงกัน ชิ้นทดสอบทุกส่วนผสมทดสอบซึ่งปริมาณวานาเดียมในช่วงที่ทดสอบยังไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานการกระแทก อาจเป็นผลมาจากหลายสาเหตุ อาทิ ปริมาณของเฟสออสเทนไนต์ตกค้าง และปริมาณธาตุผสมอื่น ที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยในเหล็กหล่อด้วย นอกจากนี้ ยังพบว่าผิวรอยแตกค่อนข้างเรียบและเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์ได้ว่าเหล็กซิลิกอนแมงกานีสในสภาวะหล่อเกิดการแตกแบบเปราะ ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งการแตกจะเป็นการผสมของการแตกแบบผ่าเกรนและตามขอบเกรน ใน

งานวิจัยของ Bohumir Strnadel และ Vratilav Mares [20] จะพบผิวรอยแตกที่ค่อนข้างเรียบซึ่งเป็นการแตกแบบผ่ากรนและตามขอบกรน ในเหล็ก Ni-Cr เช่นกัน

จากการทดลองสรุปได้ว่า อิทธิพลของวานาเดียมในเหล็กกล้าซิลิกอน แมงกานีส ที่ 0.002 - 0.296wt%V. ค่าความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวานาเดียม ส่วนค่าพลังงานแรงกระแทกไม่แตกต่างกันมากนักซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งนั้นจะส่งผลดีต่อการเพิ่มอายุการใช้งานให้กับใบมีดตัดงานเกษตร อีกทั้งค่าพลังงานแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกันยังส่งผลดีต่อใบมีดคือคาดว่าเมื่อนำวัสดุนี้ไปสร้างใบมีดจริงเพื่อทำการทดสอบจะสามารถรับแรงกระแทกจากการใช้งานได้ดีไม่ต่างจากเดิม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบจาก มหาวิทยาลัยขอนแก่น

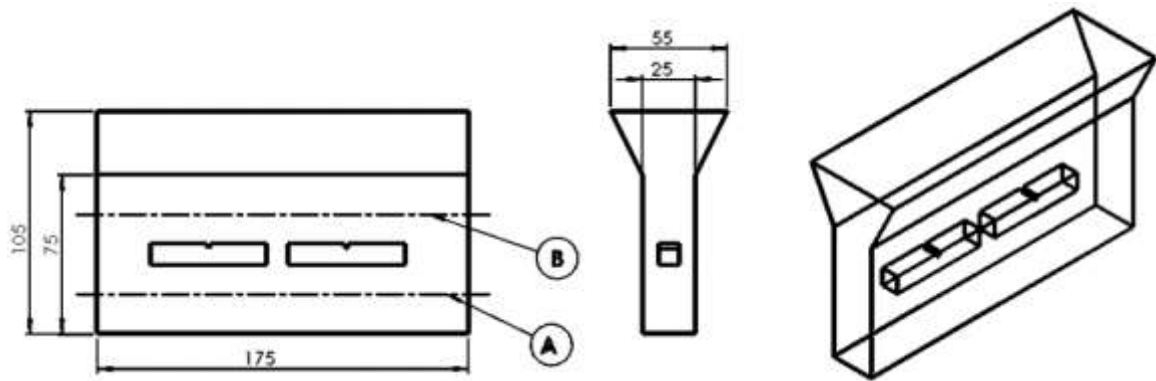
เอกสารอ้างอิง

1. Japanese Standards Association. JIS Handbook 2018 Ferrous Materials & Metallurgy I. Japan: Japanese Standards Association; 2018.
2. Thanom L. Development of Sugarcane Cutting Blade for Hardness Comparison, Industrial Engineering Network Conference, 2012,17-19 October 2012, Page 1666-1670.
3. Won Jong Nam, Chong Soo Lee, Deok Young Ban. Effects of alloy additions and tempering temperature on the sag resistance of Si-Cr spring steels. Materials Science and Engineering. 2000; A289: 8-17.
4. Shizhong Wei, Jinhua Zhu, liujie Xu. Effects of vanadium and carbon on microstructures and abrasive wear resistance of high speed steel. Tribology International. 2006; 39 : 641-648.
5. Supachai P. Physical metallurgy for engineers Vol 2. [n.p.]; 2009.
6. Supachai P. Physical metallurgy for engineers Vol4. [n.p.]; 2003.
7. Solano-Alvarez W., Fernandez Gonzalez L., Bhadeshia H.K.D.H. The effect of vanadium alloying on the wear resistance of pearlitic rails. Wear. 2019: 436-437.
8. Zhang Q, Zhao Y, Yuan G, Yang W. The effect of vanadium on microstructure and mechanical properties of Fe-based high-strength alloys. Results in Physics. 2019; 15: In press.
9. Ganwarich P. Effect of vanadium and niobium alloying elements on the microstructure and mechanical properties of a drop forging microalloyed HSLA steel. Songklanakarin J. Sci. Technol. 2016; 38(4): 357-363.
10. Todic A, Cikara D, Todic T, Pejovic B, Camagic I, Vukojevic V. The Influence of the Vanadium Content on the Toughness and Hardness of Wear resistant High-alloyed Cr-Mo Steel. FME Transactions. 2017; 45(1): 130-134.
11. Carlos Garcia-Mateo, Lucia Morales-Rivas, Francisca G. Caballero, David Milbourn, Thomas Sourmail. Vanadium Effect on a Medium Carbon Forging Steel. Metals. 2016; 6(130): 1-12.
12. Wang P, Li Z, Lin G, Zhou S, Yang C, Yong Q. Influence of Vanadium on the Microstructure and Mechanical Properties of Medium-Carbon Steels for Wheels. Metals. 2018; 8(978): 1-14.

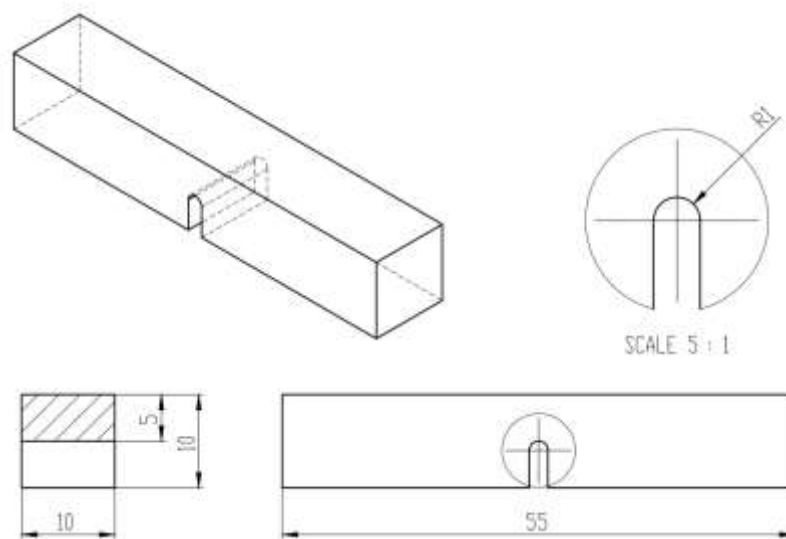
13. ASTM A 536 – 84. Standard Specification for Ductile Iron Castings. ASTM International 2019.
14. Bunlang S, Somnuk W. Tabllenbuch Metall. 7thed. Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 2011.
15. Supachai P. Physical metallurgy for engineers Vol 1. Ubon Ratchathani : Science and Engineering; 2004.
16. Omar D. To Investigation the Structure and Morphology of Iron Metallic by Difference Techniques. Journal of Nanotechnology & Advanced Materials 2015; (No. 2): 57-61
17. Rafael Magalhães Triani, Fábio Edson Mariani, Lucas Fuscaldi De Assis Gomes, Pedro Gabriel Bonella De Oliveira, George Edward Totten and Luiz Carlos Casteletti. Improvement of the Tribological Characteristics of AISI 8620, 8640 and 52100 Steels through Thermo - Reactive Treatments. Lubricants 2019; (7, 63): doi:10.3390/lubricants7080063.
18. Wang P, Li Z, Lin G, Zhou S, Yang C, Yong Q. Influence of Vanadium on the Microstructure and Mechanical Properties of Medium-Carbon Steels for Wheels. Metals 2018; 8(978): 1-14.
19. Stephen R. Shatynski. The Thermochemistry of Transition Metal Carbides: Oxidation of Metals 1979; (Vol 13, No. 2): 105-118.
20. Strnadel B, Mares V. Effect of micro-cracks in nonhomogeneous stress field on fracture instability in structural components. AIMS Materials Science 2016; 3(4): 1534-1543.

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

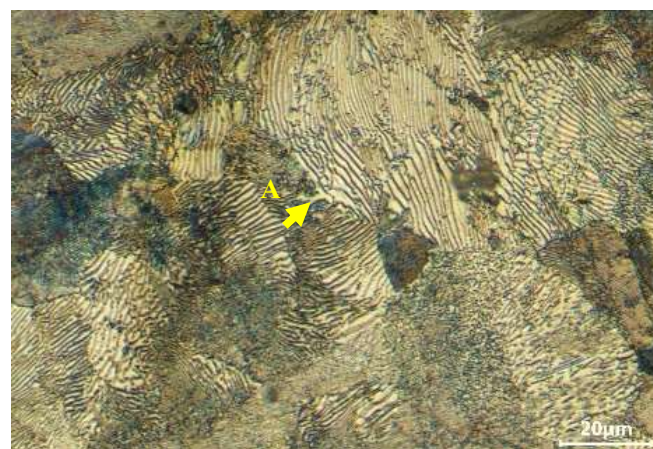
Specimen No.	Chemical composition wt%						
	C	Si	Mn	P	S	V	Fe
1.	0.67	1.759	0.923	< 0.009	< 0.006	0.002	96.45
2.	0.59	1.767	0.827	< 0.009	< 0.006	0.08	96.52
3.	0.66	1.708	0.903	< 0.009	< 0.006	0.13	96.45
4.	0.71	1.830	0.882	< 0.009	< 0.006	0.199	96.22
5.	0.67	1.860	0.836	< 0.009	< 0.006	0.26	96.20
6.	0.69	1.687	0.786	< 0.009	< 0.006	0.296	96.38



ภาพที่ 1 แบบรูปตัววาย (Y Block) ตามมาตรฐาน ASTM A 536 – 84[13]

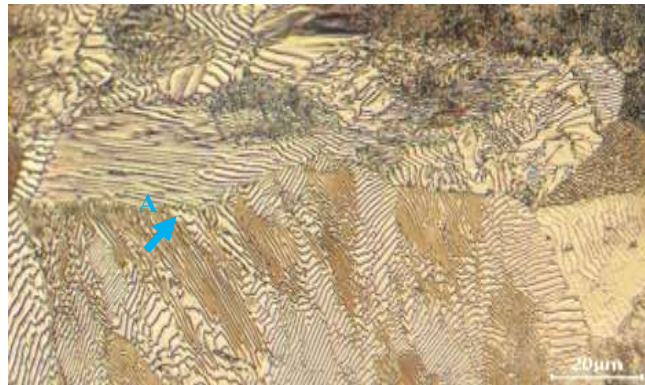


ภาพที่ 2 ชิ้นทดสอบตีกระแทกแบบชาร์ปี(Charpy) ขนาดปกติ U ตามมาตรฐาน DIN EN 10045-1(1991-04) [14]

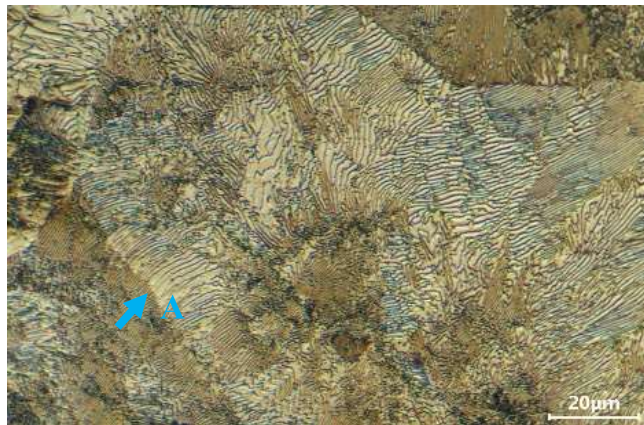


a). 0.002 wt % V

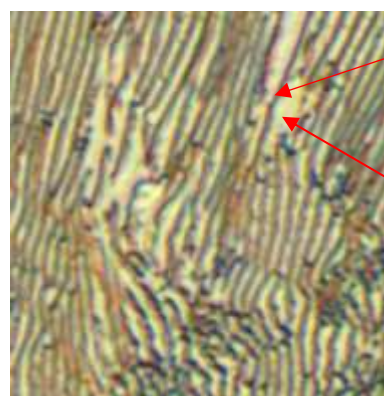
ภาพที่ 3 โครงสร้างจุลภาค ที่ปริมาณวานาเดียม a). 0.002 wt % , b). 0.13wt % และ c). 0.296 wt %



b). 0.13 wt % V



c). 0.296 wt



เฟอร์ไรต์ (Ferrite)

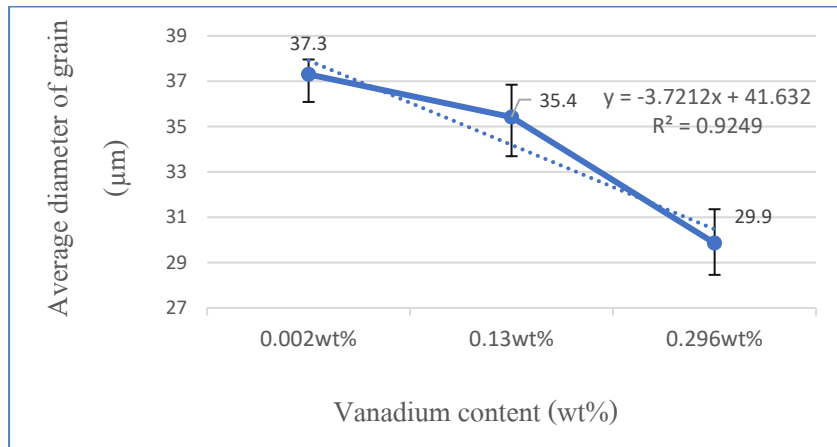
(α - Ferrite)

ซีเมนไทต์

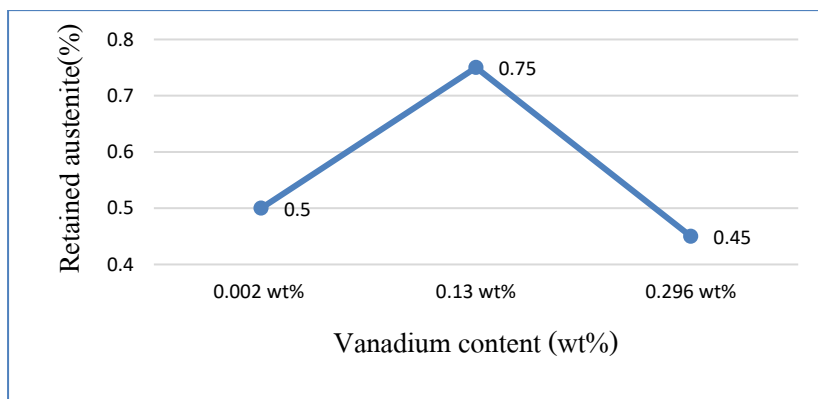
(Fe_3C)

Pearlite

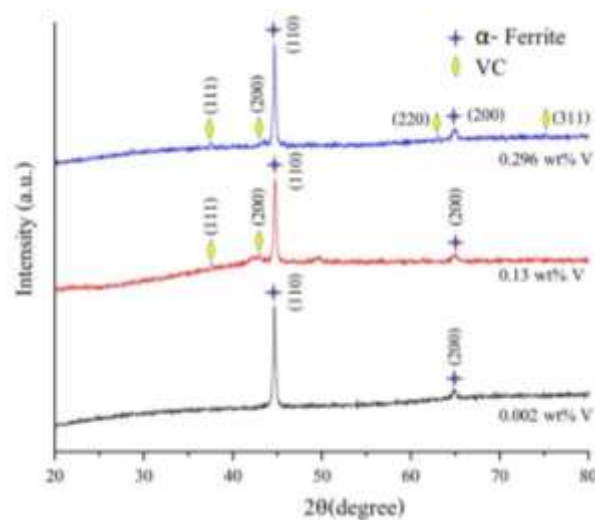
ภาพที่ 3 โครงสร้างจุลภาค ที่ปริมาณวานาเดียม a). 0.002 wt % , b). 0.13wt % และ c). 0.296 wt % (ต่อ)



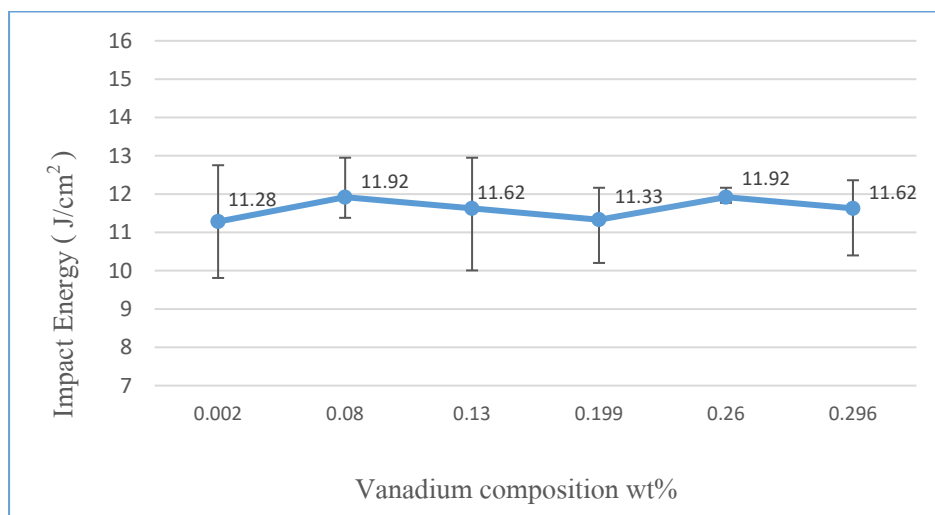
ภาพที่ 4 กราฟแสดงขนาดของเกรน เหล็กกล้าซิลิกอน แมงกานีส ในสภาวะหล่อ (as cast) ที่มีปริมาณวานาเดียม 0.002 , 0.13 และ 0.296 %V



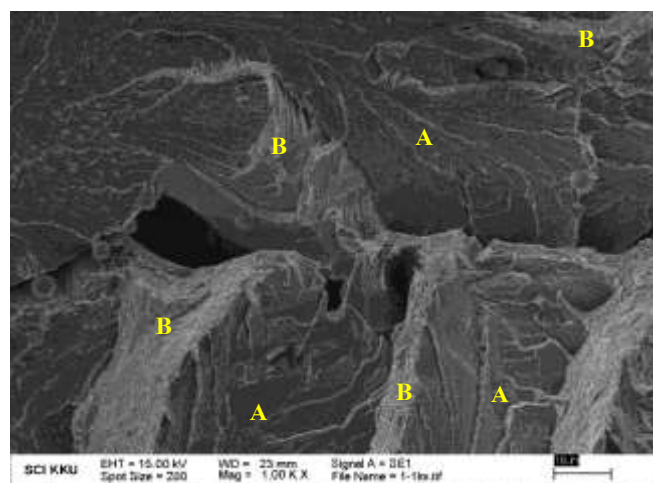
ภาพที่ 5 กราฟแสดงปริมาณเฟสออสเทนไนต์ตกค้าง (retained austenite) เหล็กกล้าซิลิกอน แมงกานีส ในสภาวะหล่อ (as cast) ที่มีปริมาณวานาเดียม 0.002 , 0.13 และ 0.296 %V



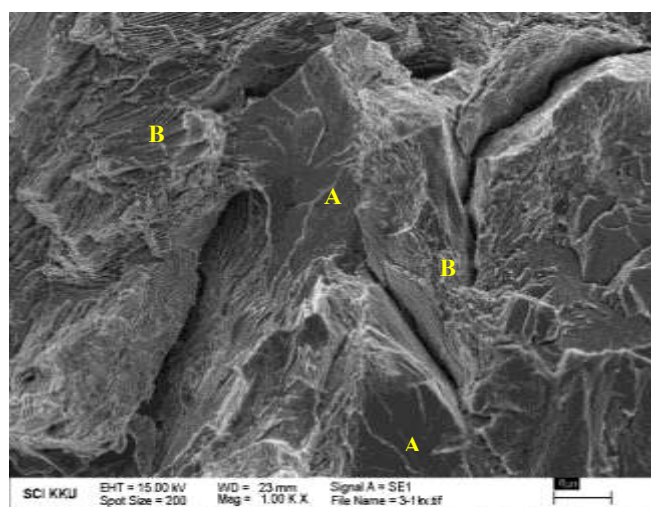
ภาพที่ 6 ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ชิ้นงานในสภาวะหล่อ (as cast) ที่มีปริมาณวานาเดียม 0.002, 0.13 และ 0.296 %V



ภาพที่ 7 อิทธิพลของปริมาณวานาเดียมต่อค่าพลังงานแรงกระแทก (J/cm²)

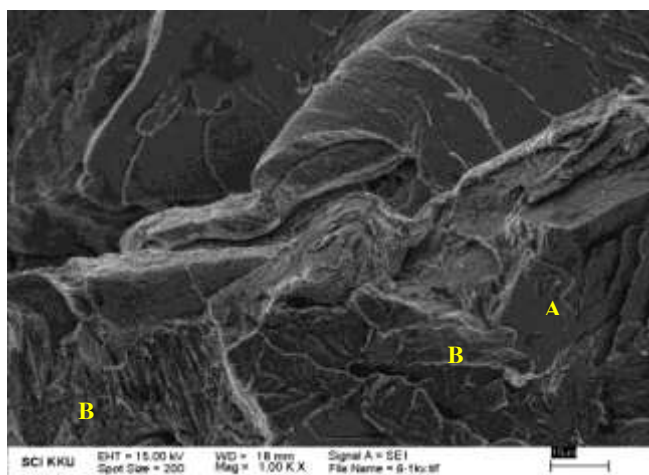


a). 0.002 wt %



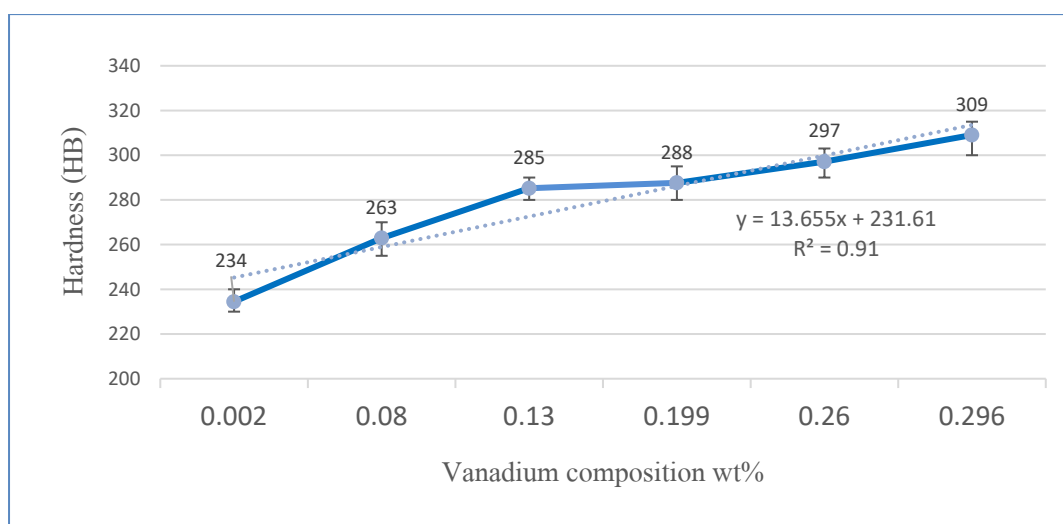
b). 0.13wt %

ภาพที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาค บริเวณรอยแตก จากการกระแทกแบบชาร์ปี ชิ้นงานในสถานะหล่อ (as cast) ที่ปริมาณวานาเดียม a). 0.002, b). 0.13 และ c). 0.296 %V



c). 0.296 wt %

ภาพที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาค บริเวณรอยแตก จากการกระแทกแบบชาร์ปี ชิ้นงานในสภาวะหล่อ (as cast) ที่ปริมาณวานาเดียม a). 0.002, b). 0.13 และ c). 0.296 %V (ต่อ)



ภาพที่ 9 กราฟแสดงผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell) ชิ้นงานหล่อ (as cast)