

Prototype Program for Automatic Grain Measurement Based on Image Processing

ต้นแบบโปรแกรมวัดขนาดเกรนของโลหะอัตโนมัติโดยวิธีการประมวลผลภาพ

Received	07 Oct 21
Reviewed	30 Dec 21
Revised	30 Dec 21
Accepted	30 Dec 21

Sudhibhum Yaowiwat¹ และ Pisanu Kumeechai^{2*}

สุทธิภูมิ เยาววิวัฒน์¹ และ พิศณุ คุ้มชัย^{2*}

Department of Mathematics, Royal Thai Naval Academy

กองวิชาคณิตศาสตร์ ฝ้ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

*Corresponding Author, Tel. +6680-5246539, E-mail: pisanu41984198@hotmail.com

*ผู้พิมพ์ประสานงาน โทรศัพท์. 080-5246539 อีเมล: pisanu41984198@hotmail.com

Abstract

The parts of the ship's structure and machinery are determined according to the conditions of use under different environmental conditions. Ship structures and machinery parts have a wide range of properties, such as mechanical properties. Properties relationship between stress and strain chemical properties and other properties which mechanical properties such as hardness (Hardness) and toughness (Strength) are important components of ship structures and machinery. In particular, the grain size of the metal structure greatly affects the mechanical properties of the metal. At present, structural analysis and testing can be performed manually to verify the properties, but it is time consuming and time consuming to verify. Thus, an idea was born to create a prototype automatic grain size measurement program for metals and alloys by means of digital image processing. To reduce the measurement error that has occurred due to the error of the meter, save time, save resources and increase the speed of inspection.

Keywords: Mechanical properties, Metal grain size measurement program, Digital image processing

บทคัดย่อ

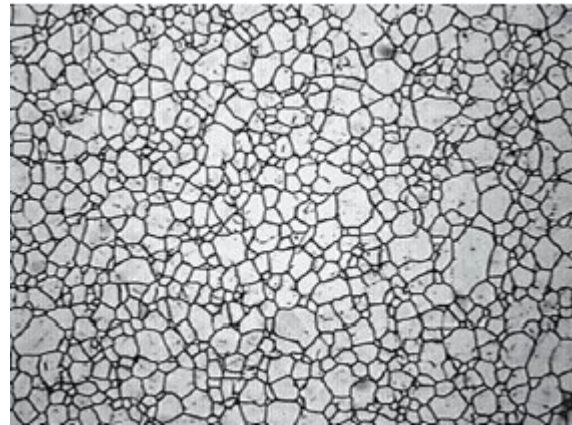
ชิ้นส่วนของโครงสร้างเรือและเครื่องจักรกลจะถูกกำหนดตามเงื่อนไขในการใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ชิ้นส่วนของโครงสร้างเรือและเครื่องจักรกลจะมีคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ที่หลากหลาย อาทิเช่น คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติอื่น ๆ ซึ่งสมบัติทางกลอันได้แก่ ความแข็ง (Hardness) และความแกร่ง (Strength) เป็นองค์ประกอบสำคัญของชิ้นส่วนของโครงสร้างเรือและเครื่องจักรกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดเกรนของโครงสร้างโลหะมีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะเป็นอย่างยิ่ง โดยในปัจจุบันการวิเคราะห์

และทดสอบโครงสร้างสามารถทำได้ด้วยคนในการตรวจสอบคุณสมบัติแต่ก็ใช้ระยะเวลานานและสิ้นเปลืองในการตรวจสอบ จึงเกิดแนวคิดในการสร้างต้นแบบโปรแกรมวัดขนาดเกรนของโลหะและโลหะผสมอัตโนมัติโดยวิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล เพื่อลดความผิดพลาดในการวัดที่เคยเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความผิดพลาดของผู้วัด ประหยัดเวลา ประหยัดทรัพยากรต่าง ๆ และเกิดความรวดเร็วในการตรวจสอบมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: คุณสมบัติทางกล โปรแกรมวัดขนาดเกรนของโลหะ การประมวลผลภาพดิจิทัล

1. บทนำ

ชิ้นส่วนของโครงสร้างเรือและเครื่องจักรกลจะถูกกำหนดตามเงื่อนไขในการใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การที่วิศวกรผู้ออกแบบจะทราบ และเข้าใจในคุณลักษณะของสมบัติของวัสดุ นั้น ๆ ได้เป็นอย่างดีนั้นต้องประกอบไปด้วยความเข้าใจการใช้มาตรฐานหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องมาพิจารณา ก็จะทำให้การเลือกใช้วัสดุนั้นให้ถูกต้องและมีความเหมาะสมกับงาน เมื่อนำชิ้นส่วนที่ได้ไปใช้งานก็จะไม่เกิดการแตกหักเสียหาย ชิ้นส่วนของโครงสร้างเรือและเครื่องจักรกลจะมีคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ที่หลากหลาย ได้แก่ คุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความแกร่ง (Strength) คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) ได้แก่ ความทนทานต่อการกัดกร่อน คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) ได้แก่ ความต้านทานทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ได้แก่ อุณหภูมิจุดหลอมเหลว คุณสมบัติอื่นๆ ได้แก่ ความสึกหรอ (Wear) และความหนาแน่น เป็นต้น ซึ่งความแข็งแรง (Strength) จะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของชิ้นส่วนนั้น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดเกรนของโครงสร้างโลหะมีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะเป็นอย่างยิ่ง การตรวจสอบขนาดเกรนจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถที่จะยืนยันคุณสมบัติ และกระบวนการผลิตของโลหะนั้นได้ ดังในรูปที่ (1) ได้แสดงภาพตัวอย่างเกรนของโลหะ



รูปที่ 1 เกรนของโลหะ

ที่มา ที่มา : <https://www.sciencedirect.com>

ขนาดเกรนของโลหะ และโลหะผสมสามารถบอกสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนั้นได้อย่างดี แต่เนื่องจากที่ผ่านมามีความยุ่งยากในการวัดขนาดเกรน ตั้งแต่ขั้นตอนการถ่ายภาพ ถ้าได้ภาพที่ไม่ชัดเจนต้องทำการถ่ายใหม่และทำซ้ำ ๆ จนกว่าจะได้ภาพที่มีความชัดเจนและสามารถใช้ในการวัดแบบมือได้ แต่วิธีการวัดแบบเก่ายังมีความสิ้นเปลืองทรัพยากรต่าง ๆ และใช้เวลามากกว่า นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่เกิดขึ้นจากความเที่ยงตรงของผู้ทำการวัดแต่ละคน ซึ่งอาจได้ผลการวัดที่คลาดเคลื่อนและต่างกันมาก ซึ่งในปัจจุบันจะมีวิธีการวัดเกรนลักษณะต่าง ๆ โดยใช้ภาพถ่ายตามหัวข้อ (1.1)

1.1 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การวัดขนาดเกรน (Grain Size Measurement)

1) การตรวจวัดจำนวนเกรนบนเส้นตรง จะเริ่มต้นโดยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่ทราบกำลังขยายจริง

ของภาพนั้น ๆ ขึ้นตอนต่อไปคือ การลากเส้นตรงอย่างสุ่ม 1 เส้นบนภาพนั้น และนับจำนวนเกรนที่เส้นตรงนี้ตัดผ่าน สามารถคำนวณค่าจำนวนเกรนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเส้นทดสอบ N_L ได้จาก

$$N_L = \frac{\text{จำนวนเกรนบนเส้นทดสอบ}}{\text{ความยาวจริงของเส้นทดสอบ}} \quad (1)$$

ความยาวจริงของเส้นทดสอบสามารถคำนวณได้จากความยาวของเส้นทดสอบที่ลากบนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคหารด้วยกำลังขยายจริงของภาพนั้น ๆ ด้วยสมมติฐานทางเรขาคณิตที่มีว่าเกรนทุกเกรนมีขนาดเท่ากัน และใกล้ทรงกลมมากที่สุด ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของเกรนได้จากสมการที่ (2)

$$D = \frac{3}{2N_L} \quad (2)$$

2) การนับจำนวนเกรนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยจะทำการกำหนดพื้นที่ที่จะทำการทดสอบบนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค จากนั้นจะนับจำนวนเกรนทั้งหมดที่อยู่ในพื้นที่ที่ทดสอบนี้และคำนวณหาเกรนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ N_A จากสมการที่ (3)

$$N_A = \frac{\text{จำนวนเกรนทั้งหมดบนพื้นที่ทดสอบ}}{\text{ขนาดจริงของพื้นที่ทดสอบ}} \quad (3)$$

ขนาดจริงของพื้นที่ที่ทดสอบจะเท่ากับผลคูณของความกว้างจริงและความยาวจริง ซึ่งระยะทั้งสองจะคำนวณจากระยะบนภาพถ่ายหารด้วยกำลังขยายจริงของภาพนั้น จากสมมติฐานทางเรขาคณิตเช่นเดียวกัน ขนาดเฉลี่ยของเกรนคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$D = \sqrt{\frac{6}{\pi N_A}} \quad (4)$$

3) การบอกขนาดเกรนโดยเลขขนาดเกรน (Grain-size number) หรือ G ตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุของอเมริกา (ASTM) เลขขนาดเกรนจะเป็นเลขจำนวนเต็มที่คำนวณจากสมการที่ (5)

$$G = -2.9542 + 3.3219 \log_{10} N_A \quad (5)$$

N_A คือ จำนวนเกรนต่อพื้นที่หนึ่งตารางมิลลิเมตร
 G คือ ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM

ระบบนี้เป็นระบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโลหะในกลุ่มเหล็กกล้าและถูกใช้ในงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดขนาดเกรนได้จากการเปรียบเทียบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะที่ต้องการตรวจวัดกับชุดภาพมาตรฐานที่เป็นภาพเกรนจำลองที่ขนาดเกรนต่าง ๆ กันได้อีกด้วย โดยในการวัดขนาดเกรนก็จะใช้มาตรฐาน ASTM ตามหัวข้อที่ (1.2)

1.2 มาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) [1]

มาตรฐาน ASTM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เกิดขึ้นมาจากสมาคม ASTM ที่จัดตั้งขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี ค.ศ.1989 เพื่อช่วยเหลือทางด้านอุตสาหกรรมของหน่วยงานของรัฐบาล โดยได้พัฒนามาตรฐานที่มีความเกี่ยวข้องกับ วัสดุ ผลิตภัณฑ์ และการบริการ

วิธีการในการวัดขนาดของเกรนของมาตรฐาน ASTM [2] สามารถวัดขนาดของเกรนได้หลายชนิด ครอบคลุมขอบเขตของเกรนแสดงอย่างชัดเจน ซึ่งจะรวมไปถึงโลหะและอโลหะซึ่งมีเกรนแบบสม่ำเสมอ ขึ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต้องผ่านการ ชัด การกัดกรวดเพื่อขจัดรอยขีด

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม
Science Technology and Innovation (STIJ)

ชวนจากกรรมวิธีการตัดปาดผิว โดยพื้นที่ผิวที่จะทำการวัดขนาดเกรนต้องมีขนาดที่ใหญ่พอขนาดไม่น้อยกว่า 160 ตารางมิลลิเมตร ใช้อย่างน้อย 5 ตัวอย่างขึ้นไป และการวัดต้องทำอย่างอิสระเพื่อให้ได้ผลที่ได้มาตรฐานที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเสนอวิธีการที่มุ่งเน้นการวิเคราะห์ภาพที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน ผ่านแนวคิดการประมวลผลภาพ เช่น การเชื่อมต่อ และการทำให้ภาพมีความชัดเจนมากขึ้น วิธีการนี้ได้ใช้มาตรฐาน ASTM E112-96 [3] และ E1382-97 [4] และเกี่ยวข้องกับขั้นตอนก่อนการประมวลผล การวัดขนาดเกรนตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM standard, American Standard of Testing Materials) มีวิธีในการวัดอยู่ 3 วิธี คือ 1. วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison method) 2. วิธีกำหนดพื้นที่ (Planimetric method หรือ Jeffries method) และ 3. วิธีการลากเส้นตัดผ่าน (Intercept method) การวิเคราะห์ขนาดเกรนในงานวิจัยได้เลือกใช้วิธีกำหนดพื้นที่ (Planimetric method) โดยมาตรฐาน ASTM E112-96 ได้แนะนำให้ใช้วิธีการกำหนดพื้นที่ (Planimetric method) และวิธีการลากเส้นตัดผ่าน (Intercept method) จะได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูงกว่า ในระดับ ± 0.25 ของหน่วยขนาดเกรน

ปัญหาต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถขจัดออกไปได้ด้วยการพัฒนาโปรแกรมที่สามารถแก้ไขจุดด้อยต่าง ๆ ได้โดยมุ่งเน้นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวัดขนาดเกรนตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม (ASTM E 1382) ช่วยประหยัดเวลาในการวัดขนาดเกรน ลดความผิดพลาดในการวัดที่เคยเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความผิดพลาดของผู้วัด ประหยัดทรัพยากรต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัด และทำให้กระบวนการวัดเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

1.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 หลักการพื้นฐานของการประมวลผลภาพ

ภาพ (image) คือ ตัวแทนใน 2 มิติ ของวัตถุ 3 มิติ หรือระนาบตัดผ่านวัตถุ 3 มิติ ที่แทนโลกของการ

มองเห็น เช่น ภาพศิลปะ ภาพวิว ดาราศาสตร์ ภาพจากยานอวกาศ ภาพภายในร่างกายมนุษย์ ภาพความร้อนของร่างกาย เป็นต้น

การประมวลผลภาพ (Image Processing) เป็นกระบวนการใด ๆ ที่กระทำต่อภาพทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เพื่อเป้าหมายอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น การปรับภาพให้ดูดีขึ้น คมชัดขึ้น การแก้ไขภาพที่ไม่ชัด การรู้จำภาพ การแก้ไขภาพในเชิงเรขาคณิต การแยกแยะบริเวณในภาพ เป็นต้น

รูปร่างของภาพ (Image Shape) วัตถุที่มีอยู่ตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นมีรูปร่างที่แตกต่างกันไป ทั้งที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตและไม่เป็นรูปทรงเรขาคณิต ในศาสตร์ของการประมวลผลภาพนั้น การกำหนดขอบเขตของภาพทุกภาพให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular image model) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากทำให้การอ่านภาพ การจัดเก็บข้อมูลภาพในหน่วยความจำ และมีการแสดงภาพออกทางอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นไปได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพการเก็บข้อมูลภาพลงหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์สามารถทำได้โดยการจอง หน่วยความจำของเครื่องไว้ในรูปของตัวแปรอาร์เรย์ (Array) โดยค่าในแต่ละช่องของอาร์เรย์แสดงถึงคุณสมบัติของจุดภาพ (Pixel) และตำแหน่งของช่องอาร์เรย์เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของจุดภาพ สมมติให้ Image เป็นตัวแปรแบบอาร์เรย์ขนาด $M \times N$ (M แถว และ N คอลัมน์) ที่ใช้เก็บภาพขนาด $M \times N$ จุด (M จุดในแนวนอน และ N จุดในแนวตั้ง) ค่าสี (หรือความสว่างในกรณีที่เป็นภาพ Grey level) ของจุดภาพใน แถวที่ 5 คอลัมน์ที่ 4 จะตรงกับค่าของ Image(5,4) จะเห็นว่าเราใช้ตำแหน่งของจุดภาพทั้งสองแกนเป็นตัวชี้ค่า ข้อมูลในอาร์เรย์จากการใช้หน่วยความจำ เพื่อการเก็บภาพในลักษณะที่กล่าวมา เมื่อที่ในการเก็บภาพสามารถคำนวณได้จาก $M \times N \times g$ เมื่อ g เป็นจำนวนเต็มที่แทนจำนวนบิตของข้อมูลในแต่ละจุดภาพ ตัวอย่างถ้า g มีค่าเท่ากับ 8 บิต เราจะสามารถเก็บความแตกต่างของระดับสีที่เป็นไปสูงสุด 256 ระดับ ค่า M และ N จะเป็นตัวบอกถึงความละเอียดของ

จอภาพที่แสดงสำหรับคอมพิวเตอร์ทั่วไปในระบบ VGA (Video Graphic Array) จะมีขนาด 640 x 480, 800 x 600 และ 1024 x 768 จุด เป็นต้น การกำหนดความละเอียดจะขึ้นอยู่กับงานที่จะใช้ ในงานบางอย่างใช้ความละเอียดแค่ 30 x 50 จุด ก็เพียงพอแล้ว แต่ในงานบางชนิดใช้ความละเอียดถึง 1000 x 1000 จุด ก็ยังไม่เพียงพอ โดยปกติแล้วในการเก็บข้อมูลภาพโดยเครื่องมือต่าง ๆ จะเก็บตามมาตรฐานของโทรทัศน์ ซึ่งมีอัตราส่วน x ต่อ y เท่ากับ 4 : 3 สำหรับเครื่องมือเก็บข้อมูลภาพที่ไม่เป็นไปตามอัตราส่วน 4 : 3 เมื่อนำภาพนี้ไปแสดงในจอภาพมาตรฐานจะทำให้ภาพที่แสดงนั้นมีขนาดของจุดภาพไม่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเช่นในบางระบบอาจจะใช้ความละเอียดในการแสดงเท่ากับ 640 x 512 ซึ่งจะทำให้ขนาดของจุดภาพที่ได้มีขนาดของ ด้านกว้าง มีความยาวมากกว่าด้านสูง ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เป็นหัวข้อที่ต้องสนใจสำหรับการเขียนโปรแกรมทางด้านกราฟิกและการจัดการข้อมูลจำนวนสีสูงสุดที่เป็นไปได้ของแต่ละจุดภาพขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้ เมื่อมีการกำหนดให้ขนาดของบิตต่อจุด มากขึ้นจะทำให้จำนวนของสีมากขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่น

1 บิต = $2^1 = 2$ สี

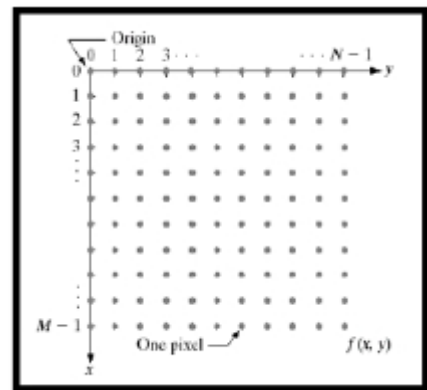
2 บิต = $2^2 = 4$ สี

4 บิต = $2^4 = 16$ สี

8 บิต = $2^8 = 256$ สี

16 บิต = $2^{16} = 65536$ สี

ในรูปที่ (2) จะแสดงตัวอย่างสำหรับระบบที่มีความละเอียดเท่ากับ 800 x 600 และมีขนาด 16 บิตต่อ Pixel จะสามารถแสดงสีได้ทั้งหมด 65536 ระดับและต้องใช้เนื้อที่ในการเก็บเท่ากับ 800 x 600 x 16 บิต



รูปที่ 2 แสดง Pixel ของภาพ

ที่มา : Rafael C. Gonzales & Richard Eugene Woods. Digital Image Processing, 2nd ed. Prentice Hall, 2002.

1.3.2 ภาษาโปรแกรม MATLAB

เป็นภาษาโปรแกรมเชิงวัตถุแบบพลวัต กล่าวคือเป็นภาษาโปรแกรมเชิงวัตถุที่ผู้เขียนไม่ต้องประกาศตัวแปรทั้งนี้เพราะคอมไพเลอร์ของ MATLAB จะเลือกชนิดของตัวแปรให้เองแบบอัตโนมัติ ทำให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรมมาก เมื่อเทียบกับภาษาแบบ Static อื่น ๆ เช่น C, C# หรือ Java เป็นต้น นอกจากนี้ภาษา MATLAB ยังมีไวยากรณ์ที่กระชับและง่ายต่อการเข้าใจเป็นอย่างยิ่ง เหนือสิ่งอื่นใด MATLAB มี Toolbox ทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ให้เลือกใช้มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Toolbox ทางด้านการประมวลผลภาพ ซึ่งได้แก่ Image Processing Toolbox ซึ่งมีฟังก์ชันทางด้านการประมวลผลภาพให้ใช้มากมาย ทำให้การพัฒนาโปรแกรมตรวจกระดาษคำตอบนี้ง่ายขึ้น

1.3.3 การวัดขนาดเกรนของโลหะและโลหะผสมโดยอัตโนมัติ

ปัจจุบันการวิเคราะห์ภาพที่ใช้ในงานโลหะและโลหะผสมได้กลายเป็นเครื่องมือที่สำคัญ ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์ภาพนี้ สามารถทำได้อย่างรวดเร็วและทำซ้ำ ๆ กันหลายครั้งได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะ การวิเคราะห์ภาพมีประโยชน์เพื่อให้ได้

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม
Science Technology and Innovation (STIJ)

ขอบเขตของเกรน ขนาดของเกรน และการกระจายขนาดเป็นต้น ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะ การกำหนดขนาดเม็ดจะเป็นงานที่สำคัญ ความมุ่งมั่นดังกล่าวได้รับการดำเนินการจากนักวิเคราะห์หลายท่านที่ได้มีการศึกษาการวัดขนาดเกรนของโลหะและโลหะผสมโดยอัตโนมัติด้วยวิธีต่าง ๆ มาอย่างต่อเนื่อง และวิธีการวิเคราะห์ภาพนี้เป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพและสามารถวิเคราะห์ได้เที่ยงตรงมากที่สุดวิธีหนึ่ง

1.3.4 วิธีการกำหนดพื้นที่ (Planimetric method)

จะทำโดยการสร้างพื้นที่วงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส บนภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคให้มีพื้นที่ 5,000 ตารางมิลลิเมตร อย่างไรก็ตามภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคนั้น จะต้องมีความหนาแน่นเกรนไม่น้อยกว่า 50 เกรน และมีจำนวนเกรนไม่เกิน 100 เกรน แล้วสามารถหาจำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตร N_A ได้จากสมการที่ (6)

$$N_A = f \left(N_{inside} + \frac{N_{intercept}}{2} \right) \quad (6)$$

เมื่อ N_A คือ จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่า

f คือ Jeffries' multiplier

N_{inside} คือ จำนวนเกรนที่อยู่ภายในพื้นที่

$N_{intercept}$ คือ จำนวนเกรนที่ถูกตัดผ่าน

ค่า f (Jeffries' multiplier) คือ ค่ากำลังขยายต่าง ๆ ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า f (Jeffries' multiplier) ที่ค่ากำลังขยายต่าง ๆ

กำลังขยาย	Jeffries' multiplier	กำลังขยาย	Jeffries' multiplier
1	0.0002	150	4.5
10	0.02	200	8.0
25	0.125	300	18.0
50	0.5	500	50.0
75	1.125	750	112.5
100	2.0	1000	200.0

จากนั้นจะนำค่า N_A มาหาขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM ได้จากสมการที่ (7)

$$G = -2.9542 + 3.3219 \log_{10} N_A \quad (7)$$

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของขนาดเกรนที่ใช้ในงานวิจัยในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดเกรน Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size	$\overline{N_A}$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{e}$ Mean Intercept		$\overline{N_L}$
No.G	No./in ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm^2	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.0	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม
Science Technology and Innovation (STIJ)

3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0896	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.14	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.94	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.00063	63.0	0.00079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0074	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

1.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Dutta [6] ได้นำเสนอการแยกแยะลักษณะของภาพโดยอัตโนมัติบนพื้นฐานของการวิเคราะห์พื้นผิวเพื่อตรวจจับการเกิดรอยร้าวในเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304LN stainless steel) ในการวิเคราะห์นี้ได้มีการใช้ตัวบ่งชี้จำนวนแปดพื้นผิว เพื่อหาลักษณะโดยอัตโนมัติของภาพที่เกิดจากการแตกหักของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304LN austenitic) ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแบบต่าง ๆ และเทคนิคนี้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจวัดสมบัติเชิงกลโดยอัตโนมัติจากพื้นผิวที่แตกหัก ในการแตกหักของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304LN austenitic)

Peregrina-Barreto [7] ได้มุ่งเน้นการวิจัยไปที่วิธีการใหม่ของเขาที่ช่วยให้สามารถกำหนดขนาดของเกรนและขอบเขตของเกรน ด้วยการกำหนดขนาดเม็ดสีโดยอัตโนมัติผ่านเทคนิคการประมวลผลภาพที่มีประสิทธิภาพโดยการทำตามขั้นตอนก่อนการประมวลผล และวิธีนับจำนวนที่เหมาะสมของวิธี Planimetric สามารถทราบได้ว่ามีจำนวนเท่าไรอยู่ในพื้นที่ทดสอบโดยไม่คำนึงถึงการกระจายตัวของเกรน และผลลัพธ์วิธีการนี้จะได้อัตราที่ยอมรับได้ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในขนาดของเกรนที่เชื่อถือได้และมีความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องต่ำมาก

W. Benesova [8] ได้นำเสนอองานวิจัยนี้ในการหาขนาดเกรนโดยเฉลี่ยและหาคุณสมบัติเพิ่มเติมในภาพขนาดเล็กของ super-alloy (InconelTm 718) โดยวิธีการ

ประมวลผลภาพ ที่มีการปรับปรุงภาพ Gray Scale ก่อน แล้วแยกเอาส่วนที่ไม่ใช่เกรนออกไป ซึ่งจะทำให้ความเป็นเนื้อเดียวกันภายในเกรนจะเพิ่มขึ้นโดยไม่สูญเสียข้อมูลเกี่ยวกับขอบเขตเกรน

Diógenes et al. [9] นำเสนอวิธีการแบ่งส่วนภาพเกรนออกเป็น ส่วน ๆ ประกอบกับการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างการตรวจสอบด้วยภาพ และการวิเคราะห์ภาพ ในการวัดขนาดเกรนสำหรับซินเตอร์แมกนีเซียมและตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอน

García et al. [10] ศึกษาปรากฏการณ์การตกผลึกซ้ำ และการเจริญเติบโตของเกรนในรอยต่อเชื่อมเหล็กกล้าที่มี Ti-containing Twinning Induced Plasticity (TWIP-Ti) เป็นรอยต่อที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สอัตโนมัติ (GTAW) ที่อุณหภูมิความร้อนที่แตกต่างกัน มีลักษณะเฉพาะของการกระจายขนาดเกรน และของอนุภาค โดยใช้การวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์ภาพ โดยใช้ MATLAB

Jao et al. [11] ได้เสนอแนะการจำแนกลักษณะเฉพาะของวัสดุอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การแยกองค์ประกอบด้วย Support Vector Machine, Bayesian และ Optimum-Path Forest based classifiers การใช้ เปรียบเทียบตัวแยกประเภทกับวิธีการดั้งเดิมของ Otsu ประเมินผลการทดลองอย่างละเอียดด้วยวิธีการทางภาพและทางสถิติเพื่อยืนยันความพร้อมของโซลูชันคอมพิวเตอร์เพื่อให้ทราบลักษณะดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพ

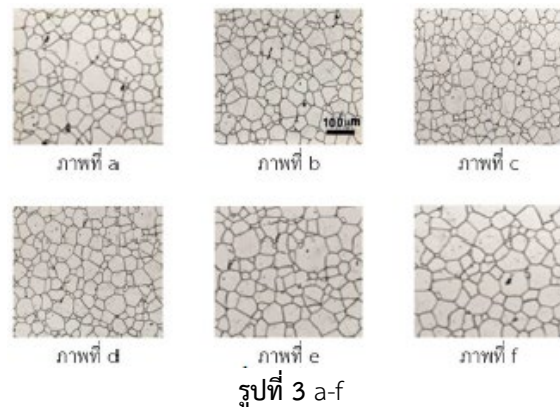
2.วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1.ขั้นตอนการทำงาน

โปรแกรมการทำงานนี้ได้พัฒนาเพื่อใช้บนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยจะมีขั้นตอนตั้งแต่กระบวนการแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้ายดังนี้

2.1.1. การรับภาพเกรนเข้ามาวิเคราะห์

ผู้วิจัยจะนำภาพเกรนที่ต้องการวิเคราะห์มาหนึ่งภาพ จากนั้น Crop ให้เป็นภาพย่อย ๆ จำนวน n ภาพ โดยที่ n มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 5 ตามที่แสดงในรูปที่ (3) จาก a – f



2.1.2. กระบวนการประมวลผลภาพ

1) เก็บภาพต้นฉบับ แสดงเอาไว้ในตัวแปรชื่อ `original_image` ดังแสดงไว้ในสมการที่ (8)

$$\text{original_image} = \text{imread}(\text{filename}); \quad (8)$$

2) หาส่วนพื้นหลังของภาพ ใช้ฟังก์ชันแมทแล็บชื่อ `imopen` โดยให้ตัวแปรที่เก็บส่วน ที่เป็นพื้นหลังของภาพ ดังแสดงไว้ในสมการที่ (9)

$$\text{background} = \text{imopen}(\text{original_image}, \text{strel}('disk', 35)); \quad (9)$$

3) หาส่วนที่เป็นวัตถุ หรือก็คือส่วนที่เป็นเกรน ด้วยการลบภาพพื้นหลัง แสดงไว้ในสมการที่ (10)

$$\text{object_image} = \text{original_image} - \text{background}; \quad (10)$$

4) แปลงให้ภาพกลายเป็นภาพขาวดำ ภาพส่วนที่เป็นวัตถุหรือเกรนมาแล้ว ในขั้นตอนนี้ภาพยังเป็นลักษณะของภาพสี RGB ดังนั้นจะต้องแปลงให้ภาพกลายเป็นภาพ

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม
Science Technology and Innovation (STIJ)

ขาวดำก่อนจึงจะสามารถนับจำนวนเกรนได้ จะใช้คำสั่งของ
แมตแล็บเพื่อแปลงจากภาพสีเป็นภาพระดับสีเทาแสดง
ในสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ

$$level = graythresh(object_image); \quad (11)$$

$$object_image \\ = im2bw(object_image, level); \quad (12)$$

5) นับจำนวนเกรนที่ปรากฏ โดยตัวแปร
object_image คือตัวแปร object_image ที่ได้จากข้อที่
(4) เป็นไปตามสมการที่ (13)

$$N = bwconncomp(object_image, 4); \quad (13)$$

โดยที่ตัวแปร N จะเก็บค่าจำนวนเกรนไว้

6) หาค่าความหนาแน่นของเกรน โดยจะหาได้
จากสมการที่ (14)

$$\text{ความหนาแน่นของจำนวนเกรน} = \frac{3.2 \times N}{\text{พื้นที่ของภาพที่ crop}} \quad (14)$$

โดยที่ตัวแปร N คือ ตัวแปรที่ได้จากข้อ (5)

ค่า 3.2 เป็นค่าชดเชยความคลาดเคลื่อนจากการ
นับ กล่าวคือโปรแกรมจะนับจำนวนเกรนได้ประมาณหนึ่ง
ในสามของจำนวนเกรนทั้งหมดเท่านั้น

7) ทำขั้นตอน (1) ถึง (6) กับภาพที่ crop ไว้ทั้ง 6
ภาพ แล้วนำค่าความหนาแน่นของเกรนที่ได้จากทั้ง 6 ภาพ
มาหาค่าความหนาแน่นเฉลี่ย

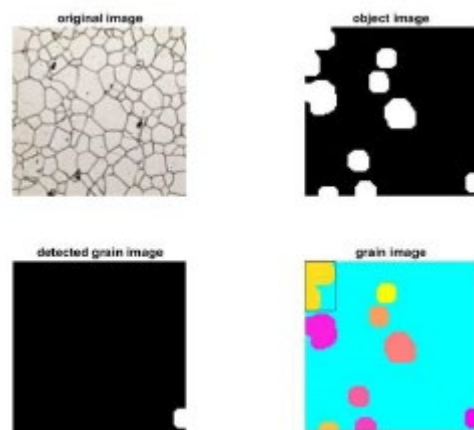
8) ขั้นตอนสุดท้ายคำนวณหาค่าขนาดเกรนด้วย
แมตแล็บสมการที่ (15)

$$G = (3.321928 * \log_{10}(average_density)) \\ - 2954 \quad (15)$$

โดย average_density คือ ค่าความหนาแน่น
เฉลี่ยที่ได้จากข้อ (7)

G คือ ขนาดเกรนโดยประมาณ

กระบวนการประมวลผลภาพตามข้อ (1) ถึง (6)
ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าโปรแกรมวิเคราะห์ภาพนี้
สามารถตรวจจับและนับจำนวนเกรนได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 4 ตัวอย่างรูปภาพที่ได้จากกระบวนการ

3.ผลการทดลอง

ผลการวัดขนาดเกรนอัตโนมัติด้วยการใช้
โปรแกรมประมวลผลครั้งนี้ได้ทำการวัดตามมาตรฐานของ
ASTM ได้ค่าจำนวนเกรนเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (N_A) =
 4.457343×10^2 grains/mm² และได้ขนาดของเกรน
เฉลี่ย ($\bar{A}$) เท่ากับ 0.00224198 mm² และคำนวณหาค่า
ขนาดของเกรนได้ค่าเป็น 5.20 จากค่าเฉลี่ยขนาดเกรนของ
ภาพย่อยทั้ง 6 ภาพ ซึ่งสอดคล้องตาม ASTM E112-96 ซึ่ง
มีค่าใกล้เคียงกับค่าขนาดเกรน 6.0 ซึ่งมีจำนวนเกรนเฉลี่ย
ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (N_A) = 4.960000×10^2
grains/mm² และได้ขนาดของเกรนเฉลี่ย ($\bar{A}$) เท่ากับ
0.00202 mm²

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดโดย
โปรแกรมในครั้งนี้ ซึ่งวัดได้ขนาดของเกรนมีค่าเป็น 5.20
กับขนาดเกรนอ้างอิงจากภาพต้นแบบที่มีขนาดเป็น 6.7 ซึ่ง
ผลการวัดครั้งนี้มีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 22.38

จากขนาดอ้างอิงดังกล่าว อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของโปรแกรมเองซึ่งยังต้องถูกพัฒนาในขั้นต่อไป ให้มีความสามารถในการวิเคราะห์เส้นขอบเกรน และสามารถตรวจจับขนาดของเกรนที่มีความแตกต่างกันได้ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้โปรแกรมจะสามารถจับภาพของเกรนที่มีขนาดใหญ่ได้เป็นส่วนใหญ่ ขณะที่รูปร่างของเกรนขนาดเล็กกว่ายังไม่สามารถถูกตรวจจับได้ จึงทำให้จำนวนเกรนที่นับได้น้อยกว่าความเป็นจริง

4.อภิปรายผลและสรุปผลการศึกษา

4.1. สรุปผล

จากผลการทดลองการวัดขนาดเกรนในหัวข้อที่ (4) จะเห็นได้ว่าโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ สามารถตรวจจับเกรน นับจำนวนเกรน และนำผลที่ได้มาประมวลผล แสดงออกมาเป็นขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM ได้ ผลการวัดขนาดเกรนครั้งนี้ ได้ค่าจำนวนเกรนเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (N_A) เท่ากับ 4.457343×10^2 grains/mm² และได้ขนาดของเกรนเฉลี่ย ($\bar{A}$) เท่ากับ 0.00224198 mm² และคำนวณหาขนาดของเกรนได้ค่าเป็น 5.85 ซึ่งผลการวัดครั้งนี้ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 12.6 เมื่อเปรียบเทียบขนาดของเกรนที่วัดได้กับค่าอ้างอิง อย่างไรก็ตามการทดลองใช้โปรแกรมนี้นับภาพถ่ายของเกรนอื่น ๆ แล้ว โปรแกรมสามารถจับขนาดเกรนและตรวจนับจำนวนเกรนได้ดี จึงถือว่าได้ผลการทดลองในขั้นต้นนี้เป็นที่น่าพอใจ

จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าข้อจำกัดของโปรแกรมเองซึ่งยังต้องถูกพัฒนาในขั้นต่อไป ภาพถ่ายที่ชัดเจนจะสามารถถูกใช้ในการวัดโดยโปรแกรมได้แม่นยำมากขึ้น เพราะฉะนั้นขั้นตอนการเตรียมภาพถ่ายจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ และกระบวนการสุ่มตัดภาพย่อย (Crop) ควรต้องถูกพัฒนาให้สามารถสุ่มได้แบบอัตโนมัติ รวมทั้งเพิ่มจำนวนภาพย่อยให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจวัดขนาดเกรนมากยิ่งขึ้น

4.2. อภิปรายผล

โปรแกรมการวัดขนาดเกรนนี้ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้ได้ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ได้ทั้งและนอกในสถานที่ต่าง ๆ ได้ตลอดเวลาที่ต้องการ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นแล้วว่าการวัดขนาดเกรนของโปรแกรมนี้นี้ต้องอาศัยการประมวลผลภาพ (Image Processing) มาช่วยในการจัดการภาพ ที่จะทำให้ภาพต้นฉบับมีลักษณะเหมาะสมที่จะทำการวัดขนาดเกรนในขั้นตอนต่อไป

ในการใช้โปรแกรมวัดครั้งนี้ ได้ใช้ภาพเกรนที่ทราบขนาดแล้วโดยการทดลองของ George Vander Voort เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้กับขนาดอ้างอิงจากภาพต้นแบบ ในลำดับแรกของการประมวลผลภาพของโปรแกรมในครั้งนี้ จึงเป็นกระบวนการที่ได้กระทำต่อภาพทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เพื่อเป้าหมายในการปรับภาพให้ดีขึ้น คมชัดขึ้น และการแก้ไขภาพที่ไม่ชัดในขั้นต่อมาได้นำภาพที่ปรับปรุงแล้วมาตัด (Crop) ให้เป็นภาพย่อย ๆ จำนวน 6 ภาพ และในขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นขั้นตอนการวัดขนาดเกรน (Measurement) โดยโปรแกรมจะแยกวัดขนาดเกรนตามภาพย่อยแต่ละภาพ แล้วนำผลการวัดมาประมวลผลเพื่อหาค่า จำนวนเกรนที่นับได้ในแต่ละภาพย่อย i (N_i) และพื้นที่ของภาพย่อย i (A_i) ที่มีหน่วยเป็นตาราง Pixel และโปรแกรมจะแปลงหน่วยของ Pixel ให้เป็นหน่วยตารางไมโครเมตร จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาจำนวนเกรนโดยประมาณต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (N_i) จากการวัดจำนวนเกรนของภาพย่อยทั้ง 6 ภาพ จากผลการวัดของภาพทั้ง 6 ภาพย่อยดังกล่าว จะแสดงภาพต้นแบบที่ได้จากการตัดแบ่งส่วนมาจากภาพใหญ่ และแสดงภาพของเกรนและจำนวนเกรนที่ตรวจวัดได้โดยโปรแกรมโดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามเกรนทั้งหมดทุกเกรนที่ปรากฏของภาพย่อยแต่ละภาพ ไม่สามารถถูกตรวจนับได้โดยโปรแกรมนี้อย่างหมด อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของโปรแกรมเองซึ่งยังต้องถูกพัฒนาในขั้นต่อไป อาทิเช่น เส้นขอบเกรนที่เป็นรอยบกพร่องและไม่ต่อเนื่องทำให้โปรแกรมไม่สามารถ

ตรวจจับได้ว่าเป็นเส้นขอบเกรนนั้น ๆ หรือไม่ เป็นต้น ต่อมาเมื่อได้ขนาดและจำนวนเกรนของภาพย่อยครบแล้ว โปรแกรมจะคำนวณหาจำนวนเกรนเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (N_A) ของภาพย่อยทั้งหมด แล้วนำไปคำนวณขนาดเกรน (G) ตามมาตรฐาน ASTM ตามสูตร $G = -2.9542 + 3.3219 \log_{10} N_A$

5.องค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากงานวิจัย

สิ่งที่ได้จากงานวิจัยเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาการประมวลผลภาพดิจิทัลมาใช้ในการวัดขนาดเกรนของโลหะ ซึ่งผลที่ได้มีความถูกต้องและใช้เวลาน้อยกว่าการใช้คนในการวัด และยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายนับเป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำไปต่อยอดและพัฒนาเพื่อใช้งานได้จริงในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ น.อ.ดร.ภาสกร ดั่งเหมือน ที่ได้ให้คำแนะนำ และถ่ายทอดความรู้ความเข้าใจในทุกเรื่องจนงานวิจัยนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards. Vol. 00.01. Easton, MD : ASTM, 1996, p. iii-xii, 124, 1247.
- [2] ชัยยะ ปรานีตพลกรัง. “การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวัดขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM E 1382 โดยใช้กระบวนการทางภาพและการวิเคราะห์ภาพ”. Vol 1 (2545): วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2545. 9-16.
- [3] ASTM Standard E112-96, Standard test methods for determining average grain size, in: ASTM International, 2004.
- [4] ASTM Standard E1382-97, Standard test methods for determining average grain size using semiautomatic and automatic image analysis, in: ASTM International, 2010.
- [5] Rafael C. Gonzalez & Richard E. Woods, Digital Image Processing, New Jersey: Pearson Education, 2010.
- [6] S. Dutta, A. Das, K. Barat, H. Roy, Automatic characterization of fracture surfaces of AISI 304LN stainless steel using image texture analysis, Measurement 45 (5) (2012) 1140–1150.
- [7] H. Peregrina-Barreto, I.R. Terol-Villalobos, J.J. Rangel-Magdaleno, A.M. Herrera-Navarro, L.A. Morales-Hernández, F. Manríquez-Guerrero, Automatic grain size determination in microstructures using image processing, Measurement 46 (2013) 249–258.
- [8] W. Benesova, A. Rinnhofer, G. Jakob, Determine the Average Grain Size of Super-Alloy Micrographs, IEEE International Conference on Image Processing Oct. 2006 2749–2752.
- [9] Diógenes, Alysson N, Hoff, Eduardo A. and Fernandes, Celso P., “Grain size measurement by image analysis: An application in the ceramic and in the metallic industries,” 18th International Congress of Mechanical Engineering November 6-11, 2005, Ouro Preto, MG.
- [10] V.García-García, I.Mejía, F.Reyes-Calderón., “Quantitative metallographic characterization of welding microstructures in Ti-containing TWIP steel by means of image

- processing analysis,” ScienceDirect, Materials Characterization Volume 147, January 2019, Pages 1-10.
- [11] Jao P.Papa, Rodrigo Y.M.Nakamura, Victor Hugo C.de Albuquerque, Alexandre X.Falcão, and João Manuel R.S.Tavares., “Computer techniques towards the automatic characterization of graphite particles in metallographic images of industrial materials,” ScienceDirect, Expert Systems with Applications Volume 40, Issue 2, 1 February 2013, Pages 590-597.