



การปรับปรุงผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกของการผลิตใบตีปุ๋ยอินทรีย์

Surface Improvement on Low Carbon Steel with Gas-carbonitriding Hardening Process as an Alternative Material used in Producing Blade for Organic Fertilizer Grinder

ชาญยุทธ ตระกุลสรณคมน์^{1*}

Chanyut Trakunsaranakom^{1*}

(Received: December 28, 2020; Revised: February 16, 2021; Accepted: March 31, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 เพื่อเป็นวัสดุผลิตใบตีปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งได้ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของใบตีปุ๋ยอินทรีย์ และได้ทำการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง สำหรับการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอของผิวใบตีปุ๋ยอินทรีย์ โดยใช้ใบตีปุ๋ยอินทรีย์จำนวน 21 ชิ้น คือ 1) ใบตีที่ไม่ผ่านกรรมวิธีการชุบแข็ง จำนวน 7 ชิ้น 2) ใบตีที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง ที่ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10% อุณหภูมิในการชุบแข็ง 860 องศาเซลเซียส จำนวน 7 ชิ้น และ 3) 880 องศาเซลเซียส จำนวน 7 ชิ้น ซึ่งใช้เครื่องทดสอบความแข็งชนิดวิกเกอร์ (Micro Vicker hardness test, HMV) เพื่อวัดค่าความแข็งลึกของชิ้นงานทดสอบ โดยทำการวัดความแข็งทุก ๆ ระยะ 0.1 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 12 จุด ชิ้นทดสอบมีค่าความแข็งผิวสูงสุดที่ระยะ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งค่าความแข็งที่วัดได้ 720 HV และ 730 HV ตามลำดับ ซึ่งใบตีปุ๋ยอินทรีย์แต่ละชิ้นต้องผ่านการตีปุ๋ยอินทรีย์ประมาณ 5 ดัน เพื่อทดสอบการสึกหรอของใบตีปุ๋ยอินทรีย์ ผลการวิจัยพบว่าใบตีปุ๋ยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านกรรมวิธีการชุบแข็งจะมีการสึกหรอ 5 มิลลิเมตร ใบตีปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง ที่ใช้เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10 %, อุณหภูมิในการชุบแข็ง 860 องศาเซลเซียส และ 880 องศาเซลเซียส มีการสึกหรอ 1.3 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ

คำสำคัญ: เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ปุ๋ยอินทรีย์ การชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง

¹วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีนครราชสีมา, มหาวิทยาลัยนครราชสีมาชนครินทร์

¹Narathiwat College of Agriculture and Technology, Princess of Naradhiwas University

*Corresponding Author: chanyut.kmutnb@gmail.com



Abstract

The research objective was to study the method of applying gas-carbonitriding hardening process to improve the mechanical properties of AISI 1020 low carbon steel for using as a production material for producing blade for organic fertilizer grinder. The mechanical properties of agricultural equipment were examined, and the equipment was applied with a gas-carbon nitriding hardening method to increase wear resistance of the impact blades. The testing process was done with 21 pieces of blade as follows: (1) 7 pieces of non-hardened blades, (2) 7 pieces of gas-carbonitriding harden blades, 2 hours with carbon potential (CP) at 1.10% temperature at 860°C, and (3) 7 pieces of gas-carbonitriding harden blades, 2 hours with carbon potential at 1.10%, temperature at 880°C. The Micro Vicker hardness test (HMV) was applied to measure the hardness of the specimen. The hardness was measured every 0.1 mm for 12 points. The testing pieces with the highest surface hardness at 0.1 mm, using the hardening 2 hours, CP at 1.10%, temperature at 860°C and 880°C, had the hardness measure at 720 HV and 730 HV, respectively. Each blade must pass approximately 5 tons of organic fertilizer to test its wear resistance on the impact. The results of the research revealed that forging impact blades that had not been hardened had a wear 5 mm, and the impact blades that had been hardened by gas carbonitriding using hardening 2 hours, temperatures at 860°C and 880°C, had a wear of 1.3 mm and 0.5 mm, respectively.

Keywords: Low carbon steel, Organic fertilizer, Gas-carbonitriding hardening

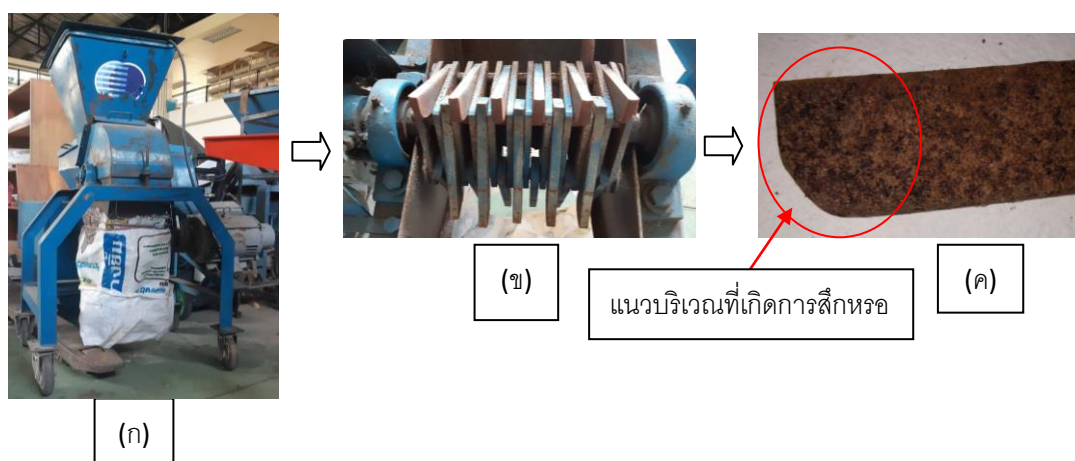
บทนำ

ตามที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้มีโครงการหนึ่งอำเภอหนึ่งโรงปุ๋ย ให้กับกลุ่มเกษตรกรทุกภูมิภาคของประเทศไทย ซึ่งได้มีการสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์การผลิตปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูงตามสูตรของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) เพื่อให้กลุ่มเกษตรกรสามารถผลิตปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูงใช้เองได้ อาทิเช่น การผลิตปุ๋ยอินทรีย์สำหรับข้าว อ้อย มันสำปะหลัง และยางพารา เป็นต้น และเพื่อให้กลุ่มเกษตรกรสามารถลดต้นทุนการผลิตในด้านเกษตรกรรม สำหรับการผลิตปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูงมีขั้นตอนหลัก คือ การหมัก การตีให้เป็นผง การอัดเม็ด การตากแห้ง และการผสมปุ๋ยอินทรีย์กับปุ๋ยเคมี ในขั้นตอนการตีปุ๋ยอินทรีย์ให้เป็นผง พบว่าใบตีปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้กับเครื่องตีป่นมีการสึกหรออย่างรุนแรง ซึ่งเป็นการสึกหรอแบบขัดสี และการสึกหรอแบบกัดกร่อน (Ian & Philip, 2017) ซึ่งเกิดจากการที่ผิวโลหะขัดสีกับวัตถุแข็งและสารเคมีที่ผสมอยู่



ในปุ๋ยอินทรีย์ หลังจากได้ตรวจสอบปริมาณธาตุคาร์บอนของไบโอดีป๋ยอินทรีย์ดังกล่าวด้วยเครื่องสเปกโตรสโคป (Purwaningrum, 2018) พบว่าเป็นเหล็กกล้า AISI 1020 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนต่ำ (Zhou, 2017) และพบว่าไบโอดีป๋ยอินทรีย์ไม่ผ่านการชุบแข็งทำให้ไบโอดีป๋ยอินทรีย์มีการสึกหรออย่างรุนแรง มีผลทำให้ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้ไม่แตกเป็นผงละเอียดมีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ๆ ขนาด 5 – 60 มิลลิเมตร เมื่อนำไปอัดเม็ดจึงทำให้ลูกกลิ้งในแม่พิมพ์เกิดการติดขัด และต้องหยุดเครื่องอัดเม็ดเพื่อแก้ไขการติดขัดของผงปุ๋ยอินทรีย์กับชุดอัดเม็ดดังกล่าว จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้กระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูงมีประสิทธิภาพลดลงเป็นอย่างมาก

เครื่องดีป๋ยอินทรีย์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้สร้างขึ้นมีไบตึขนาดความยาว 114 มิลลิเมตร กว้าง 32 มิลลิเมตรหนา 8 มิลลิเมตร และเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.80 มิลลิเมตร โดยประกอบกับแกนหลักจำนวน 28 ใบ ฐานเครื่องติดล้อสามารถเคลื่อนได้สะดวกสำหรับการปรับปรุงผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกของการผลิตไบโอดีป๋ยอินทรีย์เป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติมุ่งเน้นศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงผิวไบโอดีป๋ยอินทรีย์ ซึ่งได้แสดงเครื่องดีป๋ยอินทรีย์ ชุดไบโอดีป๋ยอินทรีย์ และไบโอดีป๋ยอินทรีย์ที่เกิดการสึกหรอ ดังในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างเครื่องดีป๋ยอินทรีย์ (ก) ส่วนประกอบของชุดไบโอดีป๋ยอินทรีย์ (ข) และการสึกหรอของไบโอดีป๋ยอินทรีย์ (ค)

ชุดไบโอดีป๋ยอินทรีย์ถูกยึดกับแกนหลักและจัดวางเรียงกันจำนวน 4 ชุด ๆ ละ 7 ใบ ซึ่งในขณะที่ทำการดีป๋ยอินทรีย์แกนหลักจะหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และปุ๋ยอินทรีย์จะถูกดีดลงผ่านตะแกรงเหล็กไหลด้านล่าง หลังจากทำการดีป๋ยอินทรีย์เสร็จแล้วจะได้ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีลักษณะผง จากนั้นทำ



การอัดเม็ดปุ๋ยอินทรีย์ให้เป็นลักษณะรูปทรงกระบอก ซึ่งปุ๋ยอินทรีย์จะมีลักษณะเป็นก้อนแข็งมีความชื้นประมาณ 10% การสึกหรอของไบต์ปุ๋ยอินทรีย์จะเกิดการสึกหรอช่วงด้านปลายของไบต์ดังภาพ 1(ค) เทียบกับไบต์ปุ๋ยอินทรีย์ที่ยังไม่ผ่านการตีปุ๋ยอินทรีย์ดังภาพที่ 2 ซึ่งมีขนาดตามที่ได้กล่าวรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า เจาะรูด้านปลายสำหรับยึดกับเพลาลูกของเครื่องตีปุ๋ยอินทรีย์ และเกิดเป็นสนิมรอบ ๆ ไบต์

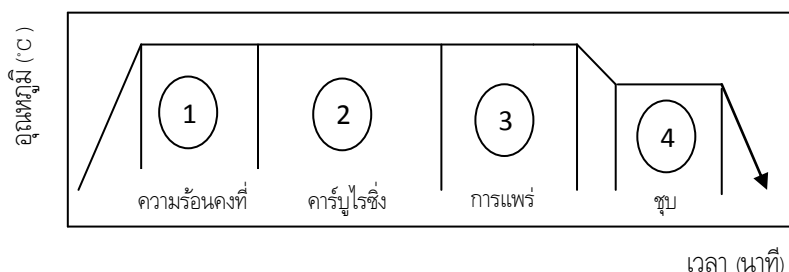


ภาพที่ 2 ไบต์ปุ๋ยอินทรีย์ที่ยังไม่ผ่านการตีปุ๋ยอินทรีย์

งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 สำหรับผลิตไบต์ปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งเน้นในการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ และเพิ่มความแข็งแรงผิวของไบต์ปุ๋ยอินทรีย์ให้มีการสึกหรอลดลง สามารถรักษาสภาพความละเอียดของปุ๋ยอินทรีย์ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ และสามารถยืดอายุการใช้งานของไบต์ปุ๋ยอินทรีย์ตลอดจนยังสามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ได้อีกด้วย โดยได้ใช้ระยะเวลาในการทดลองไบต์ปุ๋ยอินทรีย์ 6 เดือน สำหรับกรรมวิธีการชุบแข็งมีหลายกรรมวิธี อาทิเช่น กรรมวิธีเปลวไฟ กรรมวิธีของแข็ง กรรมวิธีของเหลว และกรรมวิธีการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้เลือกการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนไตรดิ่ง นับว่าเป็นกรรมวิธีการชุบแข็งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ดีในขณะทำการชุบแข็ง (Kumar, 2016; Carvajala, 2017) และที่สำคัญมีค่าใช้จ่ายถูกกว่ากรรมวิธีการชุบแข็งแบบอื่น การชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนไตรดิ่งเป็นกรรมวิธีการดูดซึมธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนพร้อม ๆ กัน ซึ่งมีวิธีคล้ายกับแก๊สคาร์บูไรซิ่ง คือได้ธาตุคาร์บอนมาจากแก๊สไฮโดรคาร์บอน หรือไฮโดรเจนพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งในการทำแก๊สคาร์บูไรซิ่งและไนโตรเจนจากแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ชนิดของเหล็กก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การดูดซึมของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนไม่เท่ากันอุณหภูมิที่ทำแก๊สคาร์บอนไนไตรดิ่ง อยู่ระหว่าง 700 – 900 องศาเซลเซียส ถ้าทำการแก๊สคาร์บอนไนไตรดิ่งที่อุณหภูมิต่ำจะมีไนโตรเจนที่ผิวสูง ถ้าทำการแก๊สคาร์บอนไนไตรดิ่งที่อุณหภูมิสูงจะมีไนโตรเจนที่ผิวต่ำ ซึ่งแสดงกระบวนการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนไตรดิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยเริ่มต้นโดยการให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส และ 880 องศาเซลเซียส (จุดที่ 1) แล้วทำการคาร์บูไรซิ่ง



(จุดที่ 2) ต่อจากเป็นช่วงการแพร่แอมโมเนีย (จุดที่ 3) CP (Carbon Potential) ที่ 1.10 % แล้วทำการชุบในของเหลว (จุดที่ 4) ซึ่งกระบวนการตั้งแต่จุดที่ 1 ถึงจุดที่ 4 ใช้เวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 3 แสดงกระบวนการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสึกหรอของไบตียูอินทรีย์ที่ใช้ในเครื่องตีปั่นยูอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งและผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิง
2. เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าของการชุบแข็งไบตียูอินทรีย์ที่ใช้ในเครื่องตีปั่นยูอินทรีย์

วิธีการวิจัย

การปรับปรุงผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิง เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกของการผลิตไบตียูอินทรีย์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 มาตัดให้ได้ขนาดความยาว 114 มิลลิเมตร x ความกว้าง 32 มิลลิเมตร x ความหนา 8 มิลลิเมตร และเจาะรูช่วงปลายไบตียูอินทรีย์ผ่านศูนย์กลาง 12.80 มิลลิเมตร แล้วนำไปชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิง เพื่อเป็นชิ้นงานทดสอบตามขนาดที่ใช้จริงสำหรับไบตียูอินทรีย์ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) โดยจำแนกขั้นตอนการดำเนินการได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

1. นำไบตียูอินทรีย์ที่ใช้งานอยู่มาทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยใช้กรรมวิธีตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรสโคป (Purwaningrum, 2018) เพื่อหาจำนวนปริมาณของธาตุเคมีต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในไบตียูอินทรีย์
2. ศึกษากรรมวิธีการชุบแข็งที่เหมาะสมกับคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผลิตไบตียูอินทรีย์
3. นำไบตียูอินทรีย์ชุดที่ 1 และ 2 อย่างละจำนวน 7 ชิ้น ซึ่งได้ทำสัญลักษณ์เป็นหมายเลข 1 และ 2 พร้อมขึ้นทดสอบทำการชุบแข็งด้วยกรรมวิธีดังกล่าว โดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส และ 880 องศาเซลเซียส

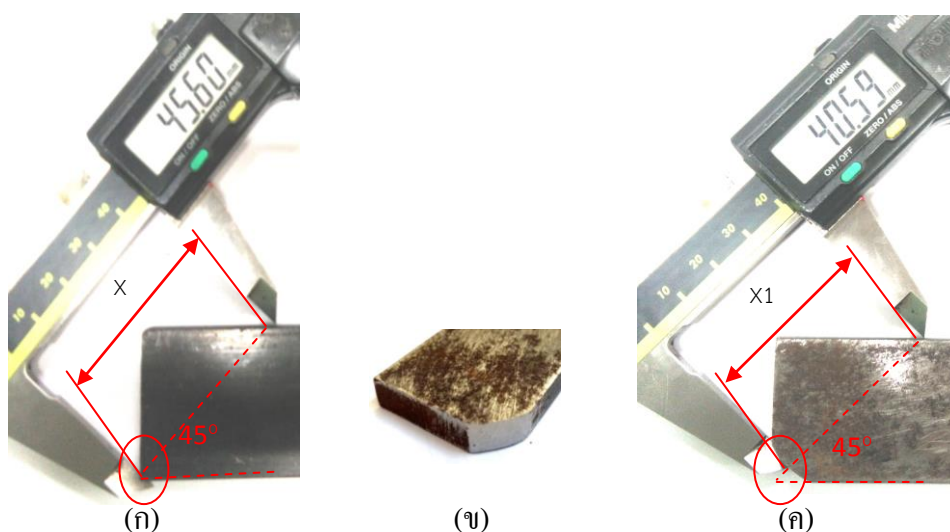


4. นำไบตีปูยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งและผ่านการชุบแข็งไปทดสอบการใช้งาน สำหรับแผนการทดลองปรับปรุงผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง มีดังนี้

1. จัดประกอบไบตีปูยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งจำนวน 7 ชิ้น และไบตีปูยอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10 %, ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส 7 ชิ้น และ 880 องศาเซลเซียส 7 ชิ้น เข้ากับแกนหลักของเครื่องตีป่นปูยอินทรีย์ โดยมีการจัดวางขึ้นทดสอบในรูปแบบสลับกัน

2. ทำการตีป่นปูยอินทรีย์ที่ได้จากการหมักในเบื้องต้น เพื่อหาค่าการสึกหรอของไบตีปูยอินทรีย์ ซึ่งมีการวัดค่าการสึกหรอทุก ๆ ปริมาณการผลิตที่จำนวน 1 ตัน

3. ทำการวัดการสึกหรอไบตีปูยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง และผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10 %, ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส 7 ชิ้น และ 880 องศาเซลเซียส 7 ซึ่งมีหลักการวัดการสึกหรอ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงตำแหน่งการวัดค่าการสึกหรอของไบตีปูยอินทรีย์

จากภาพที่ 4 ทำการวัดจุดที่เกิดการสึกหรอสูงสุด ซึ่งเป็นส่วนด้านปลายล่างของไบตีปูยอินทรีย์ โดยกำหนดจุดเป็นวงกลมสีแดง และทำมุมเอียงกับจุดดังกล่าวที่ทำมุม 45 องศา เนื่องจากจุดดังกล่าวมีแรงกระทำมากและเกิดการเสียดสีมากที่สุด ซึ่งไบตีปูยอินทรีย์จะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และวิธีการวัดค่าการสึกหรอของไบตีปูยอินทรีย์จะใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ที่มีค่าความละเอียดอยู่ที่ 0.01 มิลลิเมตร และจดบันทึกค่าการสึกหรอของไบตีปูยอินทรีย์ สาเหตุที่เลือกใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ประกอบการวัดค่าการสึกหรอของไบตีปูยอินทรีย์ เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ไม่ซับซ้อนสามารถทำการวัดได้



สะดวก ซึ่งผู้วิจัยทำการวัดค่าการสึกหรอของไบตึ๊ยอินทรีย์ทุก ๆ ปริมาณการผลิตที่จำนวน 1 ตัน โดยกำหนดระยะการวัดมีค่าเป็น X สำหรับไบตึ๊ยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการทดสอบดังภาพ (ก) และไบตึ๊ยอินทรีย์ที่ผ่านการทดสอบเกิดการสึกหรอมีค่าเป็น X1 ดังภาพ (ค) และตัวอย่างหน้าสัมผัสที่เกิดการสึกหรอ ดังภาพ (ข) ซึ่งมีสูตรหาค่าการสึกหรอของไบตึ๊ยอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็ง ดังสมการที่ (1)

$$W = X - X1 \dots \dots \dots (1)$$

โดย W = ค่าการสึกหรอ
 X = ระยะเดิม
 X1 = ระยะที่เปลี่ยนแปลง

ผลการวิจัย

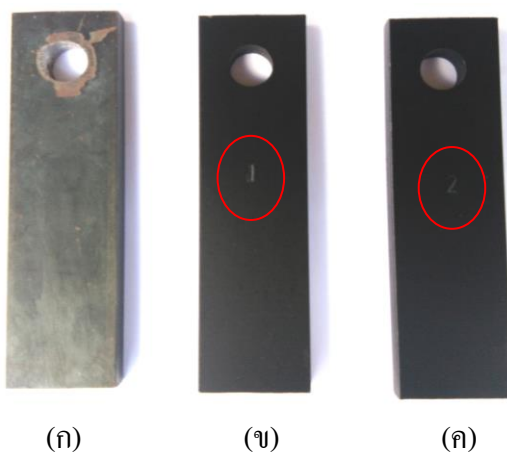
ผลจากการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผลิตไบตึ๊ยอินทรีย์ มีผลดังนี้

1. วัสดุผลิตไบตึ๊ยอินทรีย์เป็นเหล็กกล้า AISI 1020 ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.25% (Zhou, 2019) ซึ่งค่าทางเคมีที่ได้จากการตรวจสอบได้แสดงดังตารางที่ 1

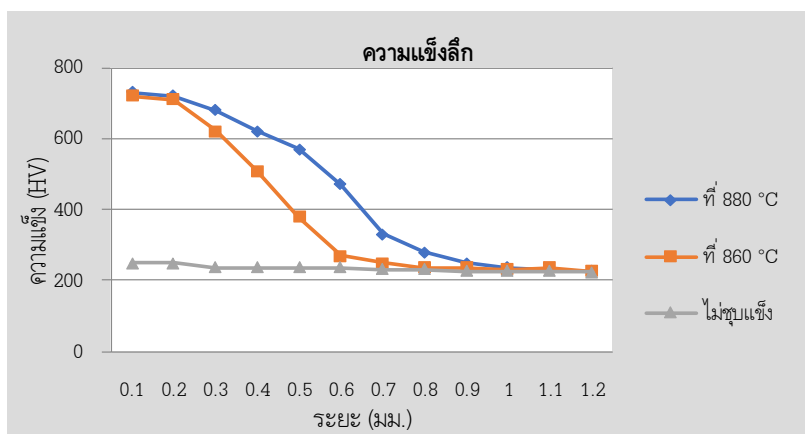
ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1020

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Al
0.2040	0.7756	0.2348	0.0195	0.0113	0.0011	0.0056	0.0152	0.0078

2. วัสดุผลิตไบตึ๊ยอินทรีย์สามารถปรับปรุงคุณภาพผิวแข็งได้ด้วยการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนไตรดิง (Gas Carbonitriding) (Tolouei-rad & Lichter, 2016; Markham, 2016; William, 2017; Rajan, & Sharma, 2019; Zheng, 2019) โดยนำชิ้นงานไปทำความสะอาดแล้วทำการชุบแข็ง ซึ่งไบตึ๊ยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งและผ่านการชุบแข็ง โดยไบตึ๊ยอินทรีย์ไม่ผ่านการชุบแข็ง (ภาพที่ 5 ก) และผ่านการชุบแข็งที่เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 5ข) และ 880 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 5ค) ซึ่งได้วัดค่าความแข็งลึกด้วยเครื่องวัดความแข็งที่มีชื่อว่า Micro Vicker hardness test (Zheng, 2019) ซึ่งมีผลของการวัดค่าความแข็งลึกของไบตึ๊ยอินทรีย์ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 แสดงใบตีป้อนอินทรีย์ไม่ผ่านการชุบแข็ง (ก) และผ่านการชุบแข็งที่เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส (ข) และ 880 องศาเซลเซียส (ค)



ภาพที่ 6 แสดงผลการวัดค่าความแข็งลึกใบตีป้อนอินทรีย์ไม่ผ่านการชุบแข็ง และผ่านการชุบแข็งกรรมวิธี แก๊สคาร์บอนไดรด์

จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าใบตีป้อนอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งมีค่าความแข็งลึกที่แตกต่างกับใบตีป้อนอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็ง โดยเฉพาะช่วงระยะวัดค่าความแข็งลึกที่ 0.1-0.6 มิลลิเมตร และค่าความแข็งลึกของใบตีป้อนอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็งที่เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งลึกน้อยกว่าการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และใบตีป้อนอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งจะมีค่าความแข็งลึกต่ำกว่าใบตีป้อนอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็ง โดยเฉพาะการวัดค่าความแข็งลึกที่ระยะ 0.1 มิลลิเมตรจะมีค่าความแข็งลึกที่ต่างกันถึง 5 เท่า หลังจากที่ได้นำใบตีป้อนอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง และผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรด์ ที่เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส ไปทดสอบ ซึ่งมีผลการสึกหรอของใบตีป้อนอินทรีย์ดังแสดงตารางที่ 2



ตารางที่ 2 แสดงค่าการสึกหรอของไบตียูอินทรีย์

กรรมวิธี	ลำดับไบตียูอินทรีย์	ปริมาณผลผลิต (ตัน)				
		1	2	3	4	5
ไม่ผ่านการชุบแข็ง	1	0.80	1.80	2.70	3.40	4.90
	2	0.90	1.90	2.80	3.60	5.00
	3	1.00	1.90	2.90	3.80	5.20
	4	0.90	1.90	2.80	3.60	5.10
	5	1.00	1.90	2.90	3.80	5.20
	6	0.90	1.90	2.70	3.40	5.00
	7	0.90	1.90	2.80	3.60	5.10
แก๊สคาร์บอนไนไตรดิง ที่อุณหภูมิ 860 °C	ค่าเฉลี่ยการสึกหรอ	0.90	1.80	2.80	3.60	5.00
	1	0.30	0.50	0.70	0.90	1.30
	2	0.30	0.50	0.70	0.90	1.20
	3	0.20	0.40	0.60	0.90	1.30
	4	0.30	0.40	0.60	0.90	1.20
	5	0.30	0.50	0.70	0.90	1.30
	6	0.20	0.40	0.60	0.90	1.30
แก๊สคาร์บอนไนไตรดิง ที่อุณหภูมิ 880 °C	7	0.30	0.50	0.70	0.90	1.20
	ค่าเฉลี่ยการสึกหรอ	0.27	0.45	0.65	0.90	1.25
	1	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
	2	0.12	0.22	0.32	0.42	0.52
	3	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
	4	0.12	0.23	0.33	0.43	0.53
	5	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
แก๊สคาร์บอนไนไตรดิง ที่อุณหภูมิ 880 °C	6	0.12	0.22	0.32	0.42	0.52
	7	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
	ค่าเฉลี่ยการสึกหรอ	0.10	0.21	0.31	0.41	0.51



จากตารางที่ 2 แสดงผลการวัดการสีกหรือของไบดีปุยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งและผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรดิ้ง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส และ 880 องศาเซลเซียส ซึ่งไบดีปุยอินทรีย์ได้ผ่านการดีปุยอินทรีย์ปริมาณผลผลิตจำนวน 5 ตัน ซึ่งได้หาค่าเฉลี่ยการสีกหรือ (avg) ของแต่ละช่วงปริมาณผลผลิตที่ 1-5 ตัน โดยจัดในรูปแบบ error bar ดังสมการที่ 2

$$= \text{AVERAGE}(X1:Xn) \quad (2)$$

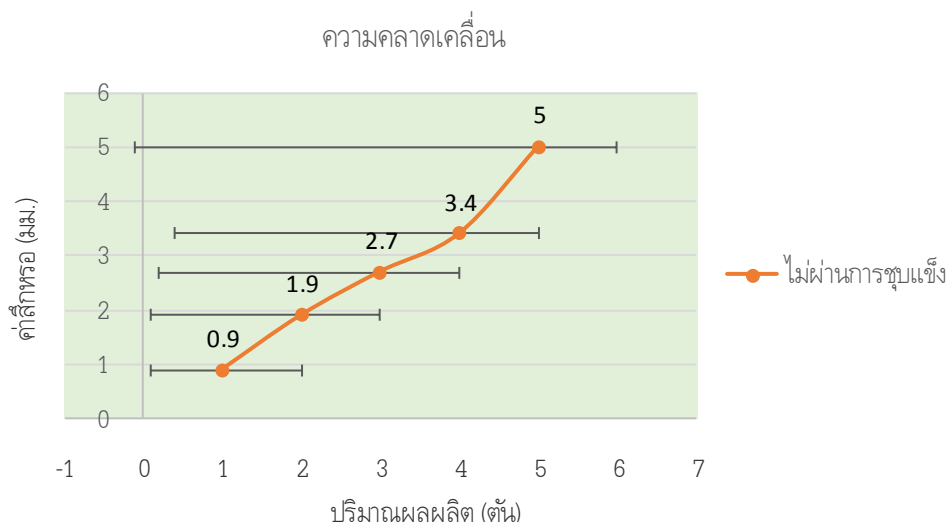
โดยกำหนดให้ AVERAGE = ค่าเฉลี่ยการสีกหรือ และ (X1:Xn) = ชั้นทดสอบทั้งหมด

จากสมการที่ (2) แสดงการหาค่าเฉลี่ยการสีกหรือของไบดีปุยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง และผ่านการชุบแข็ง นอกจากการหาค่าเฉลี่ยการสีกหรือแล้วต้องทำการหาค่าความคลาดเคลื่อน (SD) การสีกหรือของไบดีปุยอินทรีย์ โดยจัดในรูปแบบ error bar ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$= \text{STDEV}(X1:Xn) \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ STDEV = ค่าความคลาดเคลื่อน และ (X1:Xn) = ชั้นทดสอบทั้งหมด

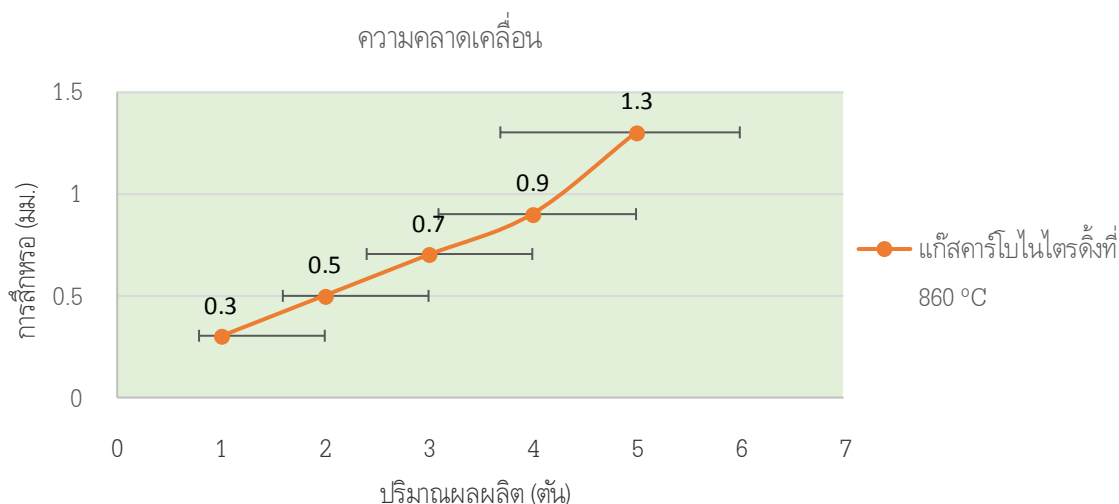
จากสมการที่ (3) แสดงการหาค่าความคลาดเคลื่อนการสีกหรือของไบดีปุยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง และผ่านการชุบแข็ง ซึ่งได้นำค่าเฉลี่ยการสีกหรือและค่าความคลาดเคลื่อนการสีกหรือของไบดีที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง โดยมีรายละเอียดการสีกหรือจัดในรูปแบบ error bar ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ error bar สำหรับไบดีปุยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง



จากภาพที่ 7 โดยแกน X แสดงปริมาณผลผลิตมีหน่วยเป็นตัน และแกน Y แสดงการสึกหรอของไบต์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสึกหรอของไบต์แตกต่างกัน โดยเฉพาะช่วงปริมาณผลผลิตที่จำนวน 4 ถึง 5 ตัน จะมีการแนวโน้มการสึกหรอมากกว่าปริมาณผลผลิตที่จำนวน 1 ถึง 3 ตัน เนื่องจากผิวสัมผัสของไบต์ที่ได้กระทำกับปุ๋ยอินทรีย์ทำให้มีความหนาลดลง จึงทำให้ค่าความต้านทานการสึกหรอมีค่าลดลง โดยมีค่าการสึกหรอปริมาณผลผลิตที่จำนวน 1, 2, 3, 4, และ 5 ตัน มีค่าการสึกหรอในรูปแบบ error bar มีค่าการสึกหรอดังนี้ 0.9, 1.9, 2.7, 3.4 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และแสดงค่าการสึกหรอของไบต์ที่ได้ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนไตรดิง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง, CP (Carbon Potential) ที่ 1.10 %, อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 8

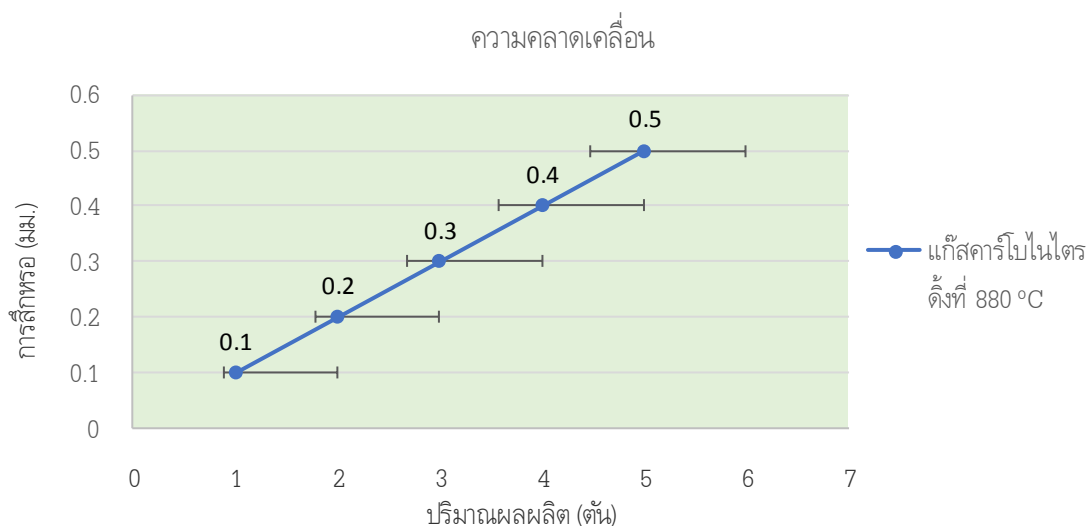


ภาพที่ 8 ค่าความคลาดเคลื่อน error bar สำหรับไบต์ปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนไตรดิง

จากภาพที่ 8 ค่าความคลาดเคลื่อน error bar สำหรับไบต์ปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนไตรดิงกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนไตรดิง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส โดยแกน X แสดงปริมาณผลผลิตมีหน่วยเป็นตัน และแกน Y แสดงการสึกหรอของไบต์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าจะมีการสึกหรอที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะช่วงปริมาณผลผลิตที่จำนวน 4 ถึง 5 ตัน จะมีการแนวโน้มการสึกหรอมากกว่าปริมาณผลผลิตที่จำนวน 1 ถึง 3 ตัน เนื่องจากผิวสัมผัสของไบต์ที่ได้กระทำกับปุ๋ยอินทรีย์ทำให้มีความหนาลดลง จึงทำให้ค่าความต้านทานการสึกหรอมีค่าลดลง โดยมีค่าการสึกหรอของไบต์ปริมาณการผลิตที่จำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 ตัน มีค่าการสึกหรอดังนี้ 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ และไบต์ที่ใช้เวลา



2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส ผลการสึกหรอ ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ error bar สำหรับไบตียูอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนโตรดิ่ง

จากภาพที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ error bar สำหรับไบตียูอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนโตรดิ่งใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส โดยแกน X แสดงปริมาณผลผลิตมีหน่วยเป็นตัน และแกน Y แสดงการสึกหรอของไบตียูมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าจะมีการสึกหรอที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่าการสึกหรอเป็นลักษณะสม่ำเสมอ เนื่องจากผิวสัมผัสของไบตียูที่ได้กระทำกับยูอินทรีย์ยังสามารถต้านทานการสึกหรอที่รุนแรงได้อยู่ โดยมีค่าการสึกหรอของไบตียูปริมาณการผลิตที่จำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 ตัน มีค่าการสึกหรอ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ

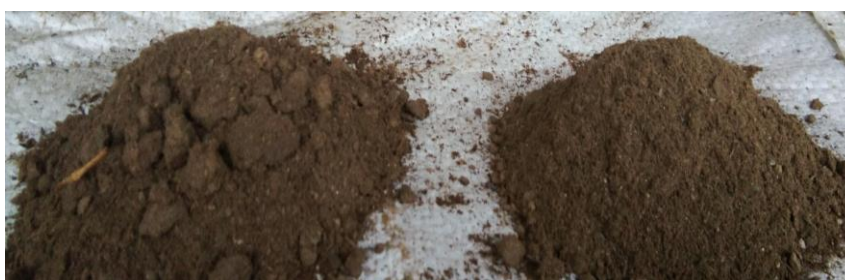
3. นำค่าการสึกหรอของไบตียูอินทรีย์มาเปรียบเทียบ จากการทดลองไบตียูอินทรีย์ตามปริมาณการผลิตจำนวน 5 ตัน ในแต่ละครั้ง ระหว่างไบตียูที่ไม่ผ่านการชุบแข็งกับไบตียูที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนโตรดิ่งที่ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส และ ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าการสึกหรอที่แตกต่างกัน โดยมีผลการทดสอบดังนี้



3.1 ผลการศึกษาไบโอดีที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง พบว่าไบโอดีมีการสึกหรอแบบขัดสีและกัดกร่อน (Ian & Philip 2017) สามารถทำการตีปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จำนวน 0.5 ตัน หลังจากนั้นไบโอดีอินทรีย์เกิดการสึกหรออย่างรุนแรง ซึ่งทำให้ปุ๋ยอินทรีย์เกิดการเปลี่ยนรูปจากผงเป็นก้อน ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องทำการสลับไบโอดีอินทรีย์อินทรีย์หรือเปลี่ยนไบโอดีอินทรีย์ใหม่ทันที เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์สำหรับการผลิตรอบใหม่ นับว่าเป็นการเสียเวลาในกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก

3.2 ผลการศึกษาไบโอดีที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส พบว่าไบโอดีอินทรีย์มีการสึกหรอแบบขัดสีและกัดกร่อน (Ian & Philip 2017) ซึ่งสามารถตีปุ๋ยอินทรีย์ที่ต้องการตามกำหนดเป็นปริมาณผลผลิตที่มีมากกว่าจำนวน 5 ตัน เนื่องจากยังสามารถรักษาคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ โดยมีค่าการสึกหรอของไบโอดีอินทรีย์ที่ปริมาณผลผลิตจำนวน 5 ตัน เป็น 1.3 มิลลิเมตร และค่าความแข็งสึกต่ำกว่า 230 HV ที่ระยะ 1.3 มิลลิเมตร

3.3 ผลการศึกษาไบโอดีที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิงใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส พบว่าไบโอดีมีการสึกหรอแบบขัดสีและกัดกร่อน (Ian & Philip 2017) ซึ่งสามารถทำการตีปุ๋ยอินทรีย์ที่ต้องการตามกำหนดเป็นปริมาณผลผลิตที่มีมากกว่าจำนวน 5 ตัน เนื่องจากยังสามารถรักษาคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ โดยมีค่าการสึกหรอของไบโอดีอินทรีย์ที่ปริมาณผลผลิตจำนวน 5 ตัน เป็น 0.5 มิลลิเมตร และค่าความแข็งสึกมีค่าต่ำกว่า 570 HV ที่ระยะ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีแนวโน้มจะสามารถตีปุ๋ยอินทรีย์ที่ต้องการตามกำหนดมากกว่า 20 ตัน ซึ่งลักษณะขนาดและรูปร่างของปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านการตีปริมาณการผลิตจำนวน 5 ตัน ได้แสดงในภาพที่ 10



(ก)

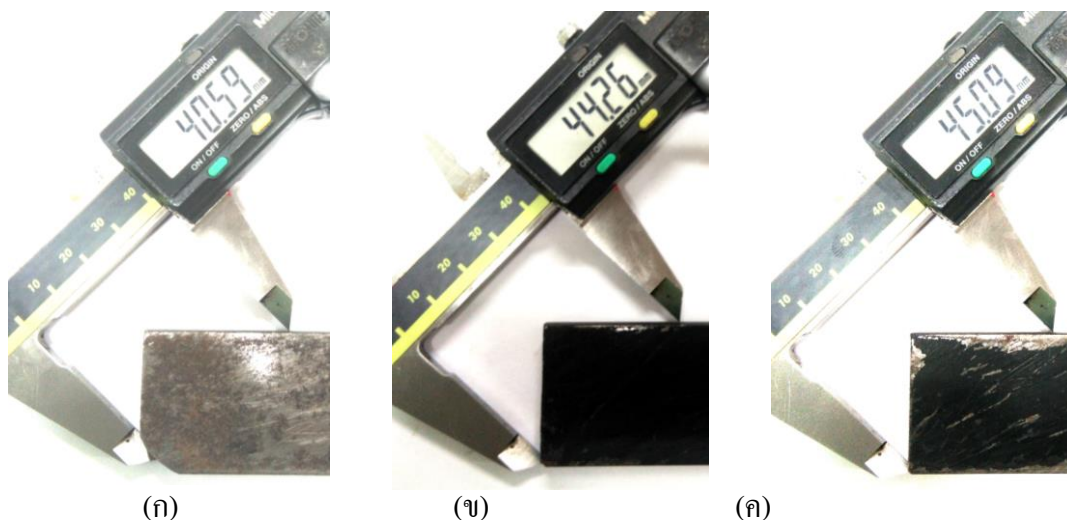
(ข)

ภาพที่ 10 ตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านการตีด้วยไบโอดีอินทรีย์

(ก) ผลของไบโอดีอินทรีย์ไม่ผ่านการชุบแข็ง (ข) ผลของไบโอดีที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิง



จากภาพที่ 10 ลักษณะและรูปร่างของปุ๋ยอินทรีย์ที่ดีต้องเป็นผง โดยมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ในขั้นตอนต่อไปคือกระบวนการอัดเม็ด ซึ่งภาพที่ 10(ก) เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านการตีด้วยใบดีไม่ผ่านการชุบแข็ง ซึ่งจะเห็นว่าปุ๋ยอินทรีย์จะมีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ๆ เนื่องจากใบดีเกิดการสึกหรอด้านสัมผัสกับปุ๋ยอินทรีย์ และภาพที่ 10(ข) ปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านการตีด้วยใบดีที่ผ่านกรรมวิธีการชุบแข็งจะเห็นว่าปุ๋ยอินทรีย์มีลักษณะเป็นผงและตัวอย่างการวัดค่าใบดีที่ไม่ผ่านการชุบแข็งก่อนการทดสอบและหลังจากทดสอบที่ปริมาณผลผลิตจำนวน 5 ตัน ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงผลการวัดค่าการสึกหรอของใบดีปุ๋ยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง (ก) และผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิ่ง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส (ข) และที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส (ค)

ค่าการสึกหรอของใบดีปุ๋ยอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง (ภาพที่ 11(ก)) และผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดรคิ่ง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 11(ข)) และที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 11(ค)) ซึ่งมีค่าที่วัดได้จำนวน 40.59 มิลลิเมตร, 44.26 มิลลิเมตร และ 45.09 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยคิดค่าการสึกหรอของใบดีมีค่าจำนวน 5.01 มิลลิเมตร 1.34 มิลลิเมตร และ 0.51 มิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ได้มีผลการคิดความคุ้มค่าของกระบวนการตีปุ๋ยอินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 3



ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบความคุ้มค่าของไบโอดีปียอินทรีย์

รายละเอียด	ไบโอดีปียอินทรีย์ ไม่ผ่านการชุบแข็ง	ไบโอดีปียอินทรีย์ ผ่านการชุบแข็ง
ราคาไบโอดีปียอินทรีย์ต่อชุด (บาท)	6,000.00	6,500.00
ปริมาณผลผลิตที่ได้คุณภาพ (ตัน)	0.5	> 5
ใช้ไบโอดีปียอินทรีย์ผลผลิตที่ 5 ตัน (ชิ้น)	280	28
ราคาไบโอดีปียอินทรีย์ผลผลิตที่ 5 ตัน (บาท)	56,000.00	5,880.00
ลดต้นทุนไบโอดีปียอินทรีย์ผลผลิตที่ 5 ตัน (บาท)		50,120.00

อภิปรายผล

ผลที่ได้จากการปรับปรุงผิวเปลือกถั่วคาร์บอนดำโดยการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนโตรดิ่ง จะเห็นได้ว่าไบโอดีที่ได้ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนโตรดิ่ง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส สามารถไบโอดีอินทรีย์ให้เป็นผงได้ดีที่สุด และสามารถเพิ่มค่าความแข็งลิกที่ผิวไบโอดีอินทรีย์เปรียบเทียบกับไบโอดีอินทรีย์ไม่ผ่านการชุบแข็งเป็น 66% และเมื่อเปรียบเทียบกับไบโอดีที่ผ่านการชุบแข็งใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มค่าความแข็งลิกที่ผิวไบโอดีอินทรีย์เป็น 65% ซึ่งไบโอดีอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งจะไม่สามารถยึดอายุการใช้งานได้ นอกจากนี้ไบโอดีที่ได้ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไนโตรดิ่ง สามารถลดต้นทุนการผลิตไบโอดีอินทรีย์ อันเนื่องจากการไม่ต้องมีการเปลี่ยนไบโอดีบ่อย ๆ ในขณะที่ทำการไบโอดีอินทรีย์ ในปัจจุบันประเทศไทยยังมีโรงผลิตไบโอดีอินทรีย์อีกหลายแห่งที่ยังประสบปัญหาเกี่ยวกับการสึกหรอของไบโอดีอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่แล้วได้พบเห็นในกลุ่มเกษตรกรที่ไม่ได้มีการคัดแยกเศษขยะ เศษหินและทรายที่มาปนเปื้อนกับไบโอดีอินทรีย์ก่อนที่จะผ่านกระบวนการไบโอดีอินทรีย์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกษตรกรส่วนใหญ่ผลิตไบโอดีอินทรีย์ใช้เองโดยมิได้คำนึงถึงด้านการพาณิชย์ นอกจากนี้แล้ว ได้มีกลุ่มเกษตรกรที่ผลิตไบโอดีอินทรีย์เพื่อการพาณิชย์ที่สามารถสร้างรายได้ให้กับกลุ่มของตนเอง งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เสนอแนะต่อกลุ่มเกษตรกรที่ผลิตไบโอดีอินทรีย์โดยการใช้เครื่องจักรลักษณะที่เป็นไบโอดีอินทรีย์ ให้มีการคัดแยกจำพวกเศษโลหะ พลาสติก หิน ทราย ตลอดจนวัตถุอื่น ๆ ที่เป็นผลกระทบต่อบิโอดี โดยวิธีการคัดแยกให้ได้วัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีอินทรีย์ให้มีความบริสุทธิ์ที่สุดเท่าที่จะทำได้ อีกทั้งได้แนะนำวิธีการตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีก่อนที่ไบโอดีจะเกิดความเสียหาย ตลอดจนวิธีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลและไบโอดีให้มีความพร้อมต่อการใช้งานอย่างสม่ำเสมอ



สรุป

ผลการปรับปรุงผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไตรดิ่ง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบใบติปูอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งกับใบติปูอินทรีย์ที่ผ่านการชุบแข็ง พบว่าใบติปูที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไตรดิ่ง ใช้เวลาเวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มอายุการใช้งานได้ถึง 10 เท่าต่อการติปูอินทรีย์ที่จำนวน 5 ต้น และมีความแข็งลึกที่ผิวมากกว่าใบติปูอินทรีย์ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งถึง 730 HV คิดเป็น 66%

ข้อเสนอแนะ

1. กลุ่มเกษตรกรควรเลือกใช้ใบติปูที่ผ่านการชุบแข็งกรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไตรดิ่ง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง CP (Carbon Potential) ที่ 1.10%, ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส
2. กลุ่มเกษตรกรต้องมีการคัดแยกเศษวัสดุต่าง ๆ เพื่อให้วัสดุที่จะผลิตใบติปูอินทรีย์ให้มีความสะอาดเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับใบติปูและเครื่องจักรกล
3. กลุ่มเกษตรกรควรทำความสะอาดและบำรุงรักษาใบติปูและเครื่องจักรให้พร้อมใช้งานอย่างสม่ำเสมอ

รายการอ้างอิง (References)

- Carvajala, L. (2017). *Monitoring Heat Treatments in Steels by a Non-Destructive Ultrasonic Method*, Materials Research
- Ian, H. & Philip, S. (2017) *Tribology Friction and Wear of Engineering Materials*, Retrieved October 23, 2020 From <https://www.amazon.com/Tribology-Friction-Wear-Engineering-Materials-ebook/dp/B06ZZ1MLP4>
- Kumar, A. (2016) Heat Treatment Parameter Optimization Using Taguchi Technique. *International Journal of Scientific Research and Education*, 4(10).
- Markham, E. R. (2016). *Hardening and Tempering*, Retrieved October 24, 2020 From <https://www.amazon.com/Hardening-Tempering-R-Markham/dp/1473328764>
- Purwaningrum, Y. (2018) Heat Treatment, Mechanical Properties and Microstructure of T-Joint Steel Arc Welded. *Applied Mechanics and Materials Submitted*, 876, 36-40.



- Rajan, T. V. & Sharma, C. P. (2019). *Heat Treatment: Principles and Techniques*. Retrieved October 22, 2020 from <https://metallurgybookshub.blogspot.com/2019/04/heat-treatment-principles-and.html>
- Tolouei -rad, M. & Lichter, E. (2016) The Heat Treatment Analysis of E100 Case Hardening Steel. *Journal of Engineering Science and Technology*, 11(3), 407 – 415.
- William E. (2017). *Heat treatment Master Control Manual*, Retrieved October 24, 2020 From <https://doi.org/10.3139/9781569904862>
- Zheng, H. (2019). *Effect of Heat Treatment parameters on the microstructure of quenching - partitioning-tempering steel*, Retrieved October 23, 2020 From <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25787616.2018.1560168?src=recsys>
- Zhou, M. (2017) Bainitic Transformation and Properties of Low Carbon Carbide-Free Bainitic Steels with Cr Addition. Metals Properties of Medium Carbon Steel, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11(2), 143-152.