

การวิเคราะห์ความเสียหายของใบตัดในเครื่องตัดเศษพลาสติก Failure Analysis of the Cutting Blades in the Plastic Scrap Cutting Machine

จรายพร แสนทวิสุข¹ ธน ทองกลม^{2*}

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี

E-mail: thonamtho@gmail.com *

Charuayporn Santhaweesuk¹ Thon Thongklom^{2*}

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,

Ubon Ratchathani

E-mail: thonamtho@gmail.com *

บทคัดย่อ

โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเศษพลาสติกประสบกับปัญหากระบวนการผลิตไม่ต่อเนื่อง และต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อนำใบตัดภายในเครื่องตัดเศษพลาสติกออกมาเจียรในลับคมตัดใหม่ทุกๆ 1-3 วัน หรือทำการเปลี่ยนใบตัดที่เกิดความเสียหาย ซึ่งการแก้ปัญหาโดยไม่ได้แก้ปัญหาดังนั้น อาจทำให้เกิดความเสียหายในแบบเดิมๆ ซ้ำมาอีก ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ศึกษาลักษณะความเสียหายของใบตัด เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับใบตัด การวิเคราะห์ความเสียหายที่ใช้ในการศึกษานี้ ประกอบด้วย การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคมตัด การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความแข็ง จากการวิเคราะห์พบว่า ใบตัดเศษพลาสติกจากทั้ง 3 แหล่งที่ใช้ในโรงงานนี้ล้วนผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอน ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติกมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก และใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถ มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.64 โดยน้ำหนัก ใบตัดจากทั้ง 3 แหล่งผ่านการชุบแข็งที่ไม่เหมาะสม โครงสร้างจุลภาคภายหลังการชุบแข็งจึงประกอบด้วยเฟอไรต์ และเพอร์ไรท์ ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีค่าความแข็งเฉลี่ย 158.1 HV ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติกมีค่าความแข็งเฉลี่ย 245.5 HV และใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถ มีค่าความแข็งเฉลี่ย 283.7 HV ลักษณะความเสียหายที่พบบนใบตัดจากทั้ง 3 แหล่ง ได้แก่ การสึกหรอแบบขัดถู ส่วนใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถ พบรอยที่เกิดจากการเสีรูปแบบถาวร และรอยแตกขนาดใหญ่ ดังนั้น การเลือกใช้วัสดุที่ทนต่อการสึกหรอ การอบชุบวัสดุเหล่านั้นอย่างเหมาะสม การทำความสะอาดพลาสติกก่อนเข้าสู่กระบวนการตัดรวมไปถึงการจับยึดใบตัดอย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยลดปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายบนใบตัดได้

คำหลัก การวิเคราะห์ความเสียหาย กรรมวิธีทางความร้อน ใบตัด

Abstract

The plastic scrap grinding plant encounters problems relating to damaged cutting blades in the plastic scrap cutting machine causing a production process discontinuity and a process shut down every 1-3 days. By replacing the new cutting blade or by grinding the used cutting blade, the failure problems might not be solved and might recur unless the root cause of the problem has been solved. Consequently, this study has studied the failure characteristic of the cutting blades to search for the root cause of the damage and to ascertain whether it was due to a materials related problem in order to efficiently solve

the problems. The failure analysis of the cutting blades was performed in terms of fracture surface analysis, chemical composition analysis, microstructural analyzing, and hardness testing. Based on the study results, it is found that all of cutting blades bought from three different suppliers are made from carbon steels. The cutting blades from local heat treatment supplier, the cutting blades from plastic scrap cutting machine supplier and the cutting blades made from used ploughs contain 0.04, 0.40 and 0.64 weight percent carbon, respectively. All cutting blades may have been improperly heat-treated since their microstructures after heat treatment consist of pearlite and ferrite. The cutting blades from local heat treatment supplier, the cutting blades from plastic scrap cutting machine supplier and the cutting blades made from used ploughs have average hardness values about 158.1 HV, 245.5 HV and 283.7 HV, respectively. The abrasive wear and plastic deformation were observed on the edge of cutting blades. The impact force cause large brittle fractures occurred on the edge of the cutting blades. Therefore, selected suitable cutting blade materials, used optimal heat treatment conditions and used efficient blade's fixture are means to improve the process in order to prevent problems from recurring.

Keywords: Failure Analysis, Heat Treatment, Cutting blade

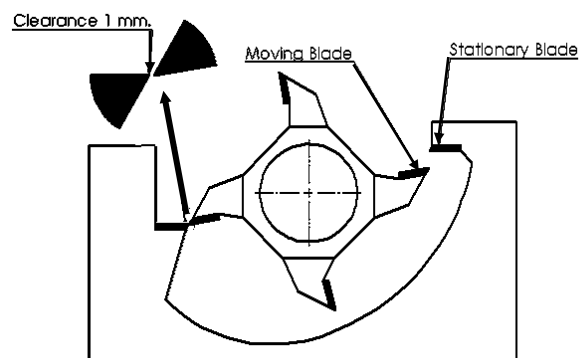
1. บทนำ

ในปัจจุบันธุรกิจรีไซเคิลขยะพลาสติกมีบทบาทสำคัญต่อการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศ ทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานและทรัพยากรที่ใช้ในการแปรรูปเริ่มตั้งแต่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลาสติกที่มาจากแหล่งแก๊สธรรมชาติและน้ำมันปิโตรเลียม ในการหมุนเวียนขยะพลาสติก เช่น ขวดน้ำ PP (Polypropylene) ขวดน้ำ PE (Polyethylene) และขวดน้ำ PET (Polyethylene terephthalate) กลับมาแปรรูปเป็นเม็ดพลาสติกเพื่อนำมาใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้ง จำเป็นต้องนำขยะพลาสติกเหล่านี้มาผ่านกระบวนการตัดย่อยให้เป็นเศษเล็กๆ โดยใช้เครื่องตัดเศษพลาสติก

ชุดตัดของเครื่องตัดเศษพลาสติก จะประกอบด้วยใบตัดยึด (stationary cutting blade) และใบตัดวิ่ง (moving cutting blade) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในการย่อยเศษพลาสติกจะอาศัยหลักการควบคุมชุดตัดให้ตัดพลาสติกในลักษณะเฉือน โดยให้ใบตัดวิ่งเคลื่อนที่ผ่านใบตัดยึดเป็นรอบๆ โดยมีระยะห่างระหว่างคมตัด (Clearance) 1 มิลลิเมตร เมื่อใบตัดวิ่งเคลื่อนผ่านใบตัดยึด คมตัดทั้งคู่จะทำหน้าที่เฉือนพลาสติกให้ขาดออกจากกัน โดยชุดใบมีด 1 ชุด จะประกอบด้วยใบตัดยึดจำนวน 6 ใบตัด และใบตัดวิ่งจำนวน 9 ใบตัด

จากกรณีศึกษาใบตัดในเครื่องตัดเศษพลาสติกของโรงงานรีไซเคิลขยะพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัด

อุบลราชธานี พบว่า โรงงานแห่งนี้ได้เลือกใช้ใบตัดจาก 3 แหล่ง คือ ใบตัดจากโรงงานอบชุบทองถิ่น ใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถ และใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติก ซึ่งใบตัดจากแต่ละแหล่งผลิตจะมีอายุการใช้งานของคมตัดที่แตกต่างกัน โดยอายุการใช้งานเฉลี่ยของคมตัดมีอายุเพียง 1-3 วัน ทำให้ทางโรงงานต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อนำใบตัดภายในเครื่องตัดเศษพลาสติกออกมาเจียรในลับคมตัดใหม่บนชุดลับคมที่สามารถปรับองศาได้ ส่งผลให้กระบวนการผลิตไม่ต่อเนื่อง สิ้นเปลืองแรงงาน และวัสดุในการลับคม และมีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมาก ดังนั้น หากเราสามารถหาแนวทางในการแก้ไขปัญหา ปรับปรุง และช่วยลดความเสียหายของคมตัดที่จะเกิดต่อไปในอนาคต จะเป็นการช่วยเพิ่มผลผลิตของโรงงานเป็นอย่างมาก



รูปที่ 1 ภาพจำลองเครื่องตัดเศษพลาสติก

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ลักษณะความเสียหายของเครื่องมือไม่ได้ขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือเพียงอย่างเดียว แต่ควรพิจารณาถึงระบบการทำงานทั้งหมด เช่น แรงที่ใช้ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดตัด อุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะตัด รูปร่าง ขนาดของคมตัด และวัสดุที่ถูกตัด [1-2] ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องมือตัดจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพงานตัด [3] ซึ่งการศึกษาลักษณะความเสียหายของคมตัดของเครื่องมือสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายของคมตัดที่ผ่านการใช้งาน [4] Yang และคณะได้ศึกษาลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนใบตัดเส้นใยแก้ว พบว่า ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นมี 3 รูปแบบคือ การเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) การแตก (Crack) ที่มีสาเหตุมาจากการกระแทกของใบตัด และการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive) ที่เกิดจากเศษใยแก้ว [3] Lau และคณะศึกษาความเสียหายของใบตัดหญ้า พบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถูบนคมตัด คือ เศษทรายที่ติดอยู่บริเวณต้นหญ้า [2] สิริพร โรจนนันต์ และคณะศึกษาความเสียหายของคมตัดมีดแกะลายสำหรับเครื่องประดับทอง พบว่า วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือที่มีความแข็งแรงสูงก็มีโอกาสเสียหายในรูปแบบของการเสียรูปแบบถาวรได้ หากปลายคมตัดของเครื่องมือมีลักษณะบาง ทำให้พื้นที่ในการรับแรงมีน้อยหากมีการทางกลต่อเนื่องในทิศทางเดิมๆ ส่งผลให้เกิดความเค้นมีค่าสูงกว่าความเค้น ณ จุดครากของวัสดุเครื่องมือได้ [5]

การแก้ปัญหาของโรงงานโดยการเจียรในลับคมใบตัดหรือการเปลี่ยนใบตัดที่เกิดความเสียหายโดยไม่ได้แก้ปัญหาที่ต้นเหตุนั้น อาจทำให้เกิดความเสียหายในแบบเดิมๆ ขึ้นมาอีก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาการสูญเสียคมตัด และการเกิดความเสียหายบริเวณคมตัด เพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหายที่แท้จริงของเครื่องมือ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาลักษณะความเสียหายของเครื่องมือ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะ และประเภทของความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณคมตัดของใบตัด ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการแก้ปัญหาความเสียหายที่เกิดขึ้น รวมไปถึงการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในการทำใบตัด เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของใบตัดพลาสติกต่อไปในอนาคต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาลักษณะ และสมบัติของใบตัดที่โรงงานใช้ในปัจจุบันจากทั้ง 3 แหล่งผลิต ได้แก่ ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่น ใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถ และใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติก ส่วนที่สองเป็นการนำชิ้นส่วนใบตัดมาตรวจสอบและวิเคราะห์สภาพความเสียหายบนผิว

2.1 ศึกษาลักษณะ และสมบัติของใบตัดที่โรงงานใช้ในปัจจุบัน

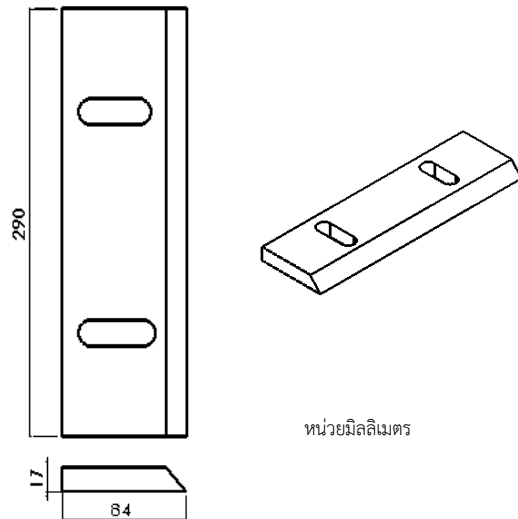
จากการศึกษาลักษณะของใบตัดที่โรงงานใช้ในปัจจุบัน พบว่า รูปร่างและขนาดของใบตัดสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีรูปร่างและขนาดที่ได้มาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งได้แก่ ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่น และใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติก และกลุ่มที่มีรูปร่างหน้าตัดโค้งและมีความดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งได้แก่ ใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถ จากการสอบถามผู้ประกอบการ พบว่า สาเหตุหลักที่ดัดแปลงใบผานไถมาขึ้นรูปเป็นใบตัด เพราะวัสดุมีราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย แต่การดัดแปลงใบผานไถมาขึ้นรูปเป็นใบตัดทำให้ใบตัดที่ได้มีหน้าตัดโค้ง ซึ่งจากการตรวจพินิจภาคสนาม โดยการถอดรื้อชิ้นส่วนออกจากกัน และพิจารณาสกรูที่ยึดใบตัด พบว่าสกรูที่ยึดใบตัดกลุ่มที่มีรูปร่าง และขนาดที่ได้มาตรฐาน อยู่ในสภาวะขันแน่นและใบตัดประกบสนิทกับตัวจับยึด (Fixture) ในขณะที่ สกรูที่ยึดใบตัดที่รูปร่างหน้าตัดโค้ง อยู่ในสภาวะคลายตัวและใบตัดประกบไม่แนบสนิทกับตัวจับยึด

ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติกเป็นใบตัดชนิดแรกที่ถูกใช้ในโรงงานผลิตเศษพลาสติกแห่งนี้ โดยผู้จำหน่ายอ้างว่าใบตัดชนิดนี้ทำจากวัสดุประเภทเหล็กกล้าเครื่องมือ แต่เพื่อเป็นการลดต้นทุนการสั่งซื้อใบตัด โรงงานแห่งนี้จึงเปลี่ยนมาใช้ใบตัดที่ทำมาจากวัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน โดยให้โรงงานอบชุบในท้องถิ่นเป็นผู้ดำเนินการขึ้นรูป และอบชุบใบตัดในขณะเดียวกันก็ทดลองใช้ใบตัดที่ดัดแปลงมาจากใบผานไถ ดังนั้น เพื่อเป็นการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำใบตัดรวมทั้งโครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อสมบัติทางกลและ

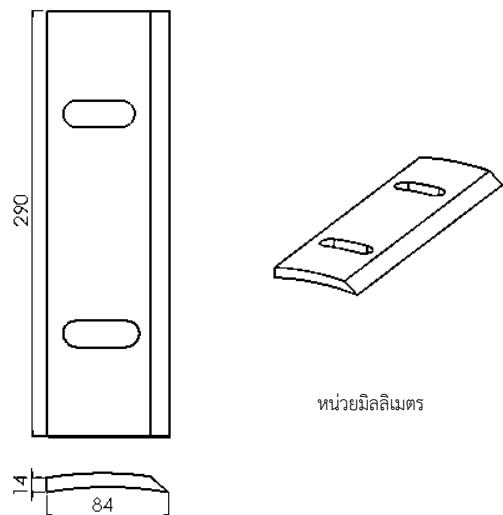
กรรมวิธีการผลิตที่ใช้ จึงได้ทำการตรวจพินิจทางโลหะวิทยา ดังนี้ ในขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ไบตัดจากทั้ง 3 แหล่งถูกนำมาตัดให้มีขนาดประมาณ 30 x 30 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร แล้วนำชิ้นงานมาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200 360 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ และขัดเงาด้วยผงขัดอะลูมินาขนาดอนุภาค 5 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ กรดที่ใช้กัดผิวงาน คือ สารละลายกรดไนตริก ร้อยละ 2 ในแอลกอฮอล์ จากนั้นถ่ายภาพชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่ผลิตโดยบริษัท Olympus รุ่น BX60M ถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM 6010 LV วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Dewinter Material Plus 4.1 และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Emission Spectrometer ที่ผลิตโดยบริษัท Fisons Instruments รุ่น ARL 3460 เพื่อตรวจสอบส่วนผสมของชิ้นงานว่าตรงตามที่ผู้จำหน่ายกล่าวอ้างหรือไม่ หลังจากนั้นทำการทดสอบความแข็งจากผิวอบชุบเข้าไปสู่ผิวด้านในของไบตัด โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ Vicker Microhardness ที่ผลิตโดยบริษัท Mitutoyo รุ่น MVK – H1 ใช้แรงกด 300 kgf กดค้างไว้ 15 วินาที เพื่อตรวจดูความสม่ำเสมอของความแข็งภายหลังอบชุบ หรือค่าความชุบแข็งลึกของไบตัดแต่ละแหล่ง

2.2 ศึกษาลักษณะของคมตัดของไบตัดที่เสียหาย

เมื่อนำไบตัดจากทั้ง 3 แหล่งมาติดตั้งในเครื่องตัดพลาสติก โดยในการเปลี่ยนไบตัดแต่ละครั้ง ไบตัดยึดและไบตัดวิ่ง จะใช้ไบตัดจากแหล่งผลิตเดียวกัน และทดสอบการทำงานในสภาวะจริง พบว่า ไบตัดจากโรงงานอบชุบในห้องฉีดยามีอายุการใช้งานของคมตัด 1 วัน ในขณะที่ไบตัดที่ผลิตจากไบผานไถ และไบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดพิเศษพลาสติกมีอายุการใช้งานของคมตัด 3 วัน เมื่อไบตัดแต่ละแหล่งหมดอายุการใช้งานจะถูกถอดออกจากเครื่องตัด และนำเฉพาะส่วนปลายของบริเวณคมตัดมาถ่ายภาพคมตัดด้วยกล้อง Digital Microscope เพื่อตรวจพินิจจุลภาค ถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของคมตัด ความเค้นที่กระทำ และการสึกหรอ



รูปที่ 2 รูปร่าง และขนาดของไบตัดจากโรงงาน
อบชุบในห้องฉีดยา และไบตัดจากโรงงาน
ผู้จำหน่ายเครื่องตัดพิเศษพลาสติก



รูปที่ 3 รูปร่าง และขนาดของไบตัดที่ผลิตจากไบ
ผานไถ

3. ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการศึกษาลักษณะ และสมบัติของไบตัดที่ โรงงานใช้ในปัจจุบัน

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของไบตัดจากทั้ง 3 แหล่ง พบว่า องค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาคของไบตัดทั้ง 3 มีลักษณะเหมือนกัน คือประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ คือบริเวณเฟสสีขาว และเฟสที่มีลักษณะเป็นสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 4ก-4ค เมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายสูง

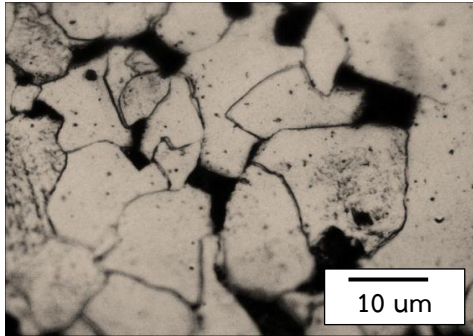
จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมด Backscatter Electron Image พบว่าเฟสสีดำที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง คือเฟสเฟิร์ลไลต์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแถบสลับระหว่างเฟอร์ไรท์และซีเมนไตต์แถบสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 4ง. และรูปที่ 4จ. ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของใบตัดทั้ง 3 มีปริมาณเฟสเฟิร์ลไลต์แตกต่างกัน ใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถมีปริมาณเฟิร์ลไลต์ในโครงสร้างจุลภาคสูงสุดคือร้อยละ 92.36 ต่อหน่วยพื้นที่ รองลงมาคือใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติกมีปริมาณเฟิร์ลไลต์ร้อยละ 85.64 ต่อหน่วยพื้นที่ และใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีปริมาณเฟิร์ลไลต์น้อยที่สุดคือร้อยละ 6.16 ต่อหน่วยพื้นที่ โครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรท์ และเฟิร์ลไลต์เป็นโครงสร้างที่ได้จากการเย็นตัวช้าๆ ภายหลังการอบ austenitize ของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ ปริมาณของพื้นที่เฟสเฟิร์ลไลต์สามารถบ่งบอก และเปรียบเทียบความมาก – น้อยของปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้า [6] เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างจุลภาคกับผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติกมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก และใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.64 โดยน้ำหนัก

จากลักษณะของโครงสร้างจุลภาค และส่วนผสมทางเคมีของใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดพลาสติก พบว่า ใบตัดไม่ได้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือตามที่กล่าวอ้าง เนื่องจากปริมาณธาตุผสมกลุ่มที่รวมตัวกับคาร์บอนเพื่อเกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ เช่น โครเมียม โมลิบดีนัม และทังสเตนมีปริมาณน้อย ไม่ถึงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็งจะประกอบด้วยอนุภาคคาร์ไบด์ของธาตุผสมบนเนื้อพื้นมาร์เทนไซต์ [7] แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของใบตัดแล้วไม่พบโครงสร้างดังกล่าว จึงสรุปได้ว่าใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดพลาสติกไม่ได้ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือ

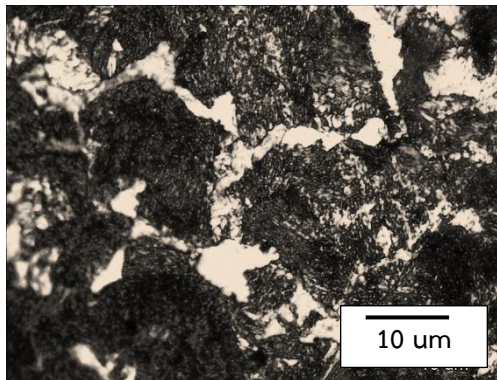
การจากสังเกตการอบชุบใบตัดที่โรงงานอบชุบในท้องถิ่น พบว่า ในขั้นตอนในการอบชุบ จะใช้เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของแก๊สออกซิเจนกับแก๊สอะเซทิก

ลีน เผาเหล็กจนร้อนและเปลี่ยนเป็นสีแดงส้ม แล้วทำให้เย็นตัวในน้ำมัน จากกระบวนการดังกล่าวหากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเหล็กถึงช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงออสเทนไนท์ โครงสร้างจุลภาคภายหลังการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ กับเบนไนท์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็ง และความแข็งแรงสูง [8] แต่กระบวนการอบชุบของโรงงานอบชุบในท้องถิ่นไม่ได้ควบคุม และตรวจสอบอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเหล็ก ทำให้อุณหภูมิที่เผาเหล็กต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงออสเทนไนท์ โครงสร้างภายหลังการเย็นตัวในน้ำมันจึงเป็นเฟิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรท์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำ ไม่ทนต่อการสึกหรอ ในการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน ตัวแปรที่มีความสำคัญนอกจากอุณหภูมิในการทำ austenitize และอัตราการเย็นตัวที่เหมาะสมแล้ว ปริมาณคาร์บอนก็เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความแข็งของชิ้นงานภายหลังการชุบแข็ง ในกรณีของใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นที่มีปริมาณคาร์บอนเพียงร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก หากนำมาชุบแข็ง ความแข็งภายหลังการชุบจะไม่สูงมากเนื่องจากใบตัดมีปริมาณคาร์บอนต่ำ การที่โครงสร้างออสเทนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ เหล็กกล้าคาร์บอนควรมีปริมาณคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก [7-8]

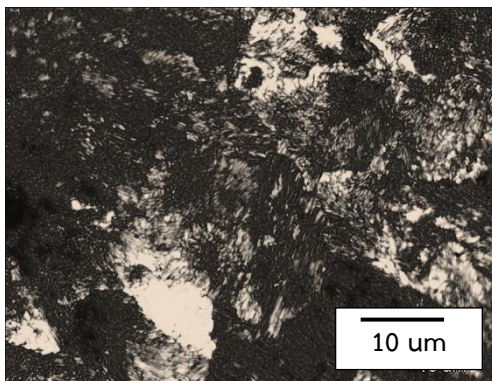
ผลทดสอบค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของใบตัดจากทั้ง 3 แหล่ง พบว่า ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีค่าความแข็งเฉลี่ย 158.1 HV ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติกมีค่าความแข็งเฉลี่ย 245.5 HV และใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถมีค่าความแข็งเฉลี่ย 283.7 HV รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งในบริเวณผิวอบชุบของใบตัดจากทั้ง 3 แหล่ง จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของใบตัดจากทั้ง 3 แหล่งมีค่าเกือบคงที่เมื่อระยะทางจากผิวอบชุบเพิ่มขึ้นจนถึงระยะห่างจากผิว 8 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณผิวอบชุบกับบริเวณใจกลางชิ้นงาน พบว่า ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่าบริเวณภายใน เนื่องจากการใช้เปลวไฟให้ความร้อน หากใช้เวลาในการเผาเหล็กสั้น ความร้อนจะอยู่ที่บริเวณผิว ไม่กระจายสู่ภายในชิ้นงาน ส่งผลให้ความแข็งที่ผิวภายหลังปล่อยให้เย็นตัวในน้ำมันมีค่าสูงกว่าบริเวณภายในชิ้นงาน



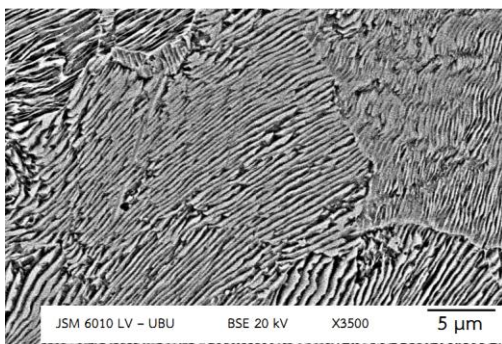
ก. ใบดีดจากโรงงานอบซบในทอองถึน



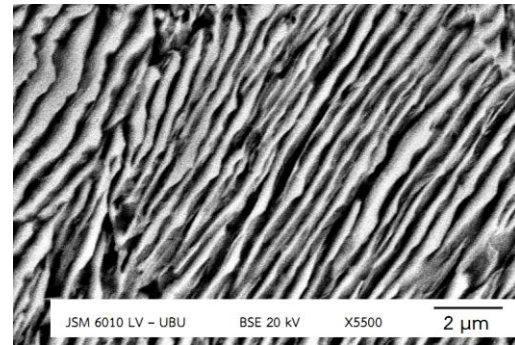
ข. ใบดีดจากโรงงานผู้จ้าหน้ายเครื่องดัดเศษพลสดก



ค. ใบดีดที่ผลดจากใบดีผนถไ



ง. ภาพถ้ายก้าล้งขยย 3500 เท้จากกล้งจูลทรศน์
อเล้กตรอนแบบสอ้งกราดนโหมด Backscatter Electron
Image

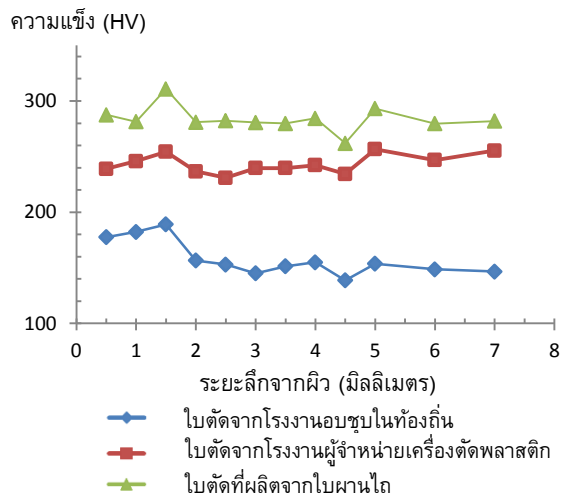


จ. ภาพถ้ายก้าล้งขยย 5500 เท้จากกล้งจูลทรศน์
อเล้กตรอนแบบสอ้งกราดนโหมด Backscatter Electron
Image บรเวณเฟสเพรล์ไลท์ ซึ่ประกอบด้วยแถบเฟอร์
ไรท์สึด้า และแถบซีเมนดัดส์ส้ขาว

รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของใบดีดพลสดก

ดาร์างที่ 1 ค้าเจล้ยส่วผสมทางเคม้ของใบดีดพลสดก
ท้ง 3 แห้ง

ส่วผสมทางเคม้ ประเภใบดีด	C	Mn	Si	Cr	Cu
ใบดีดจากโรงงานอบซบใน ทอองถึน	0.04	1.02	0.02	0.50	0.02
ใบดีดจากโรงงานผู้ จ้าหน้ายเครื่องดัดเศษ พลสดก	0.40	0.58	0.17	0.12	0.14
ใบดีดที่ผลดจากใบดีผนถไ	0.64	0.52	0.20	0.13	0.06
ส่วผสมทางเคม้ ประเภใบดีด	P	S	Ni	Mo	W
ใบดีดจากโรงงานอบซบใน ทอองถึน	0.03	-	0.04	0.01	0.02
ใบดีดจากโรงงานผู้ จ้าหน้ายเครื่องดัดเศษ พลสดก	-	-	0.07	0.02	-
ใบดีดที่ผลดจากใบดีผนถไ	-	-	0.21	-	-

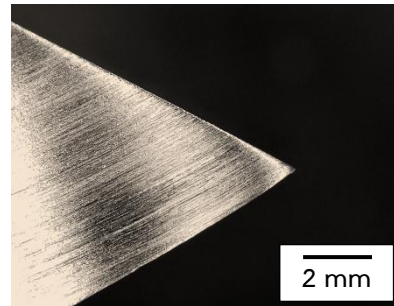


รูปที่ 5 การกระจายตัวของค่าความแข็งจากผิวอบชุบ

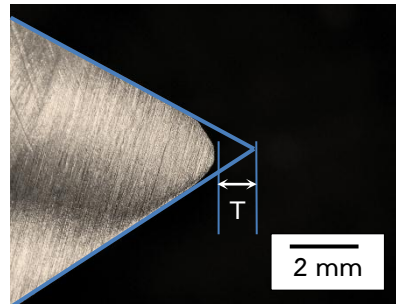
3.2 ผลการศึกษาลักษณะของคมตัดของใบตัดที่เสียหาย

เมื่อใบตัดจากทั้ง 3 แหล่ง หมดอายุการใช้งานโดยไม่สามารถตัดเศษพลาสติกให้มีขนาดเล็กลงได้ จะถูกนำมาตรวจพินิจลักษณะของคมตัดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการใช้งาน โดยตัดเฉพาะบริเวณปลายคมตัด และถ่ายภาพคมตัดที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการใช้งาน และวัดระยะการสูญเสียคมตัด (T) รูปที่ 6ก-6ง แสดงลักษณะของคมตัดที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และลักษณะของคมตัดหลังการใช้งานของใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่น ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดพลาสติกและใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบถ่วงคมตัดก่อน และหลังใช้งาน พบว่า ใบตัดจากทั้ง 3 แหล่งเกิดการสูญเสียคมตัด ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีระยะ T 0.63 มิลลิเมตร ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดพลาสติกมีระยะ T 0.33 มิลลิเมตร และใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถมีระยะ T 0.93 มิลลิเมตร จากผลการศึกษา ระยะการสูญเสียคมตัดพบว่าใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถมีมุมคมตัดเริ่มต้นแคบกว่าใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่น และใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดพลาสติก ทำให้ใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถมีความสามารถในการรับแรงน้อยกว่า จึงมีระยะการสูญเสียคมตัดสูงกว่า

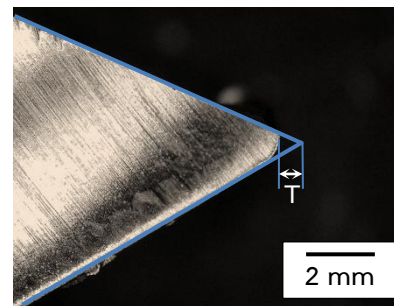
เมื่อพิจารณาพื้นผิวบริเวณด้านหลังของคมตัดจากทั้ง 3 แหล่งภายหลังการใช้งาน พบว่า ใบตัดจากทั้ง 3 แหล่งมีรอยสึกหรอที่เกิดจากการขีดข่วนบริเวณคมตัด ดังแสดงในรูปที่ 7 ทิศทางของรอยที่พบส่วนใหญ่อยู่ในทิศ



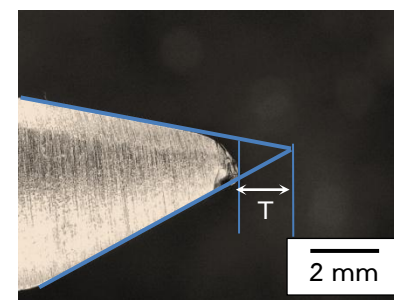
ก. คมตัดก่อนใช้งาน



ข. คมตัดของใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นหลังใช้งาน

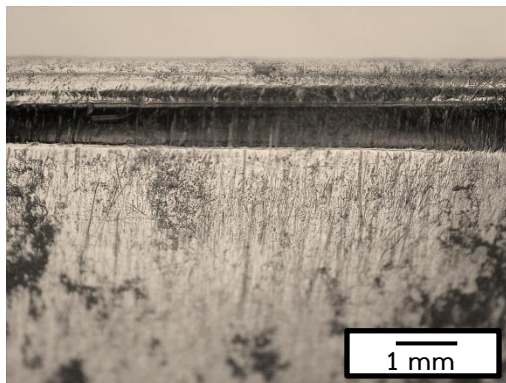


ค. คมตัดของใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดพลาสติกหลังใช้งาน



ง. คมตัดของใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถหลังใช้งาน
รูปที่ 6 ปลายคมตัดของใบตัดก่อนและหลังการใช้งาน

ทางขนานกับการเคลื่อนที่ของใบตัด ขนาดของร่องที่เกิดจากการขีดข่วนแตกต่างกันขึ้นกับขนาดของอนุภาคขัดถู (Abrasive Particles) จากการตรวจสอบสภาวะการทำงาน พบว่าขวดพลาสติกไม่ได้ถูกทำความสะอาดก่อนนำมาตัดย่อยในเครื่องตัดพลาสติก แต่ถูกทำความสะอาดขณะขวดพลาสติกถูกตัดย่อยด้วยการเติมสารละลายของน้ำผสมผงซักฟอกอุตสาหกรรม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเป็นการทำความสะอาดเศษพลาสติก และพบว่า ขวดพลาสติกที่นำมารีไซเคิลมีเศษดินและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วย เมื่อเติมสารละลายของน้ำขณะย่อยเศษพลาสติก ทำให้น้ำกับดินผสมกันกลายเป็นสเลอรี (slurry) ดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อใบมีดเคลื่อนที่ สเลอรีจะไหลผ่านใบตัด อนุภาคของดินจะขีดข่วนในทิศทางขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของใบตัด[9]



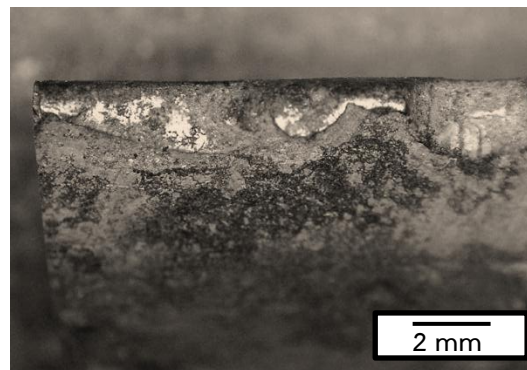
รูปที่ 7 ภาพถ่ายด้านหลังคมตัดของใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นหลังใช้งาน



รูปที่ 8 สเลอรีของน้ำ และดินจากขวดพลาสติกที่อยู่ในเครื่องตัดเศษพลาสติก

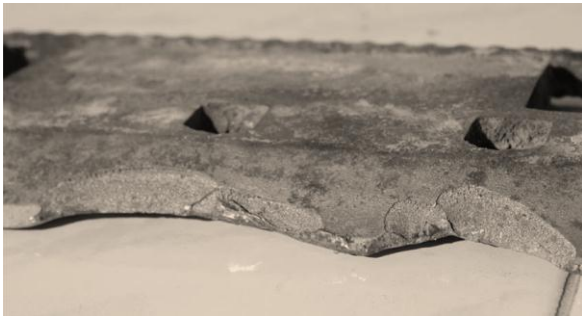
ใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถหลังการใช้งาน จะพบรอยมวนขนาด 1-2 มิลลิเมตร ตลอดแนวคมตัดดังแสดงในรูปที่ 9 รอยมวนที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุที่ทำให้ใบตัดไม่สามารถตัด

เศษพลาสติกให้ขาดเป็นชิ้นที่มีขนาดเล็กได้ ใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถมีหน้าตัดโค้ง ทำให้ไม่สามารถยึดกับฟิกเจอร์ได้สนิท ใบตัดเกิดการสั่นสะเทือน และเลื่อนตำแหน่งการติดตั้งใบตัดได้กำหนดให้ระยะห่างระหว่างคมตัด (Clearance) ของใบตัดวิ่ง และใบตัดยึดมีระยะ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ใกล้กันมาก ด้วยปัจจัยเหล่านี้จึงทำให้ใบตัดวิ่งเลื่อนไปกระทบกับใบตัดยึด บริเวณปลายคมตัดของใบตัดถูกกลับให้มีความคมตึงแสดงในรูป 6ก. ปลายคมตัดจึงมีลักษณะบาง ไม่ทนต่อการรับแรงที่เกิดจากการกระทบกัน ซึ่งแรงดังกล่าวส่งผลให้เกิดความเค้นที่สูงกว่าความเค้น ณ จุดครากของวัสดุทำใบตัด เกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) บริเวณปลายคมตัด คมตัดที่มีลักษณะบางถูกบีบให้เสียรูปไปในทิศทางที่ขนานกับการเคลื่อนที่ของใบตัด เมื่อมีแรงกระทำอย่างต่อเนื่องในทิศทางเดิมปลายคมตัดจะถูกพับลงไป [2, 10]

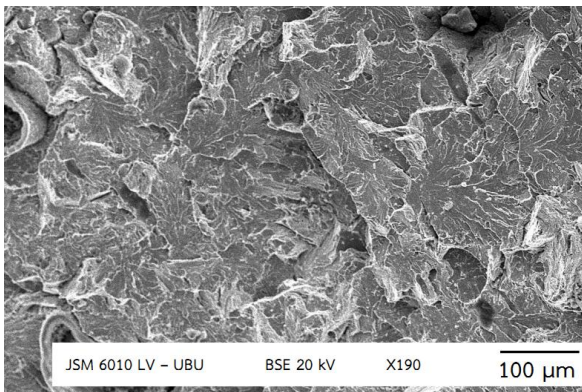


รูปที่ 9 ภาพถ่ายปลายคมตัดที่เกิดการเสียรูปแบบถาวรของใบตัดที่ผลิตจากใบผานไถ

ปัญหาที่เกิดจากการกระทบกันของใบตัดนอกจากการเกิดการเสียรูปแบบถาวรแล้ว หากใบตัดมีการกระทบกันเป็นระยะถี่ จะเกิดรอยแตกขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 10 ก. เมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายสูงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 10 ข. พบว่ารอยแตกที่พบเป็นลักษณะแตกเปราะแบบผ่านเกรน (Transgranular Fracture)



ก. รอยแตกขนาดใหญ่ที่คมตัด



ข. ภาพถ่ายผิวแตกที่กำลังขยาย 190 เท่าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมด Backscatter Electron Image แสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ

รูปที่ 10 ใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถที่เกิดการแตกหัก

จากผลการศึกษสามารถแบ่งประเภทของความเสียหายออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การสึกหรอแบบขูดถูที่เกิดขึ้นกับใบตัดจากทั้ง 3 แหล่ง การเสียรูปแบบถาวรและการแตกหักดังที่ปรากฏบนใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถ สาเหตุของความเสียหายสามารถจำแนกออกเป็นสาเหตุจากวัสดุที่ไม่เหมาะสม รูปร่างเครื่องมือไม่เหมาะสม และสภาวะแวดล้อมในการทำงานไม่เหมาะสม ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติก และใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่สามารถชุบแข็งเพื่อให้ได้โครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการสึกหรอที่ดี หากมีการควบคุมอุณหภูมิในการอบชุบ เพื่อให้การอบชุบเป็นไปตามเงื่อนไขของการชุบแข็ง ใบตัดจะมีความทนต่อการสึกหรอที่เกิดจากอนุภาคของเศษดินขณะใช้งาน ส่งผลให้อายุการใช้งานของใบตัดยาวนานยิ่งขึ้น นอกจากนั้นการออกแบบกรรมวิธีการอบชุบ และสารชุบที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความแกร่ง

(Toughness) ให้กับใบตัด ส่งผลให้ใบตัดสามารถรับภาระกรรมแบบพลวัต (Dynamic) ที่กระทำจากภายนอกได้ดียิ่งขึ้น จากผลการวิจัยเพื่อออกแบบกรรมวิธีการอบชุบสำหรับใบตัดในเบื้องต้น พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Double tempering มีค่าความแข็งแรงสูงและสามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้อยู่ระหว่างดำเนินการโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าความเหมาะสมของตัวแปรในการอบชุบเพื่อให้ได้ใบตัดที่มีอายุการใช้งานยาวนานที่สุด

นอกจากการควบคุมกระบวนการอบชุบใบตัดที่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนให้มีความแข็งแรง และทนต่อการสึกหรอแล้ว หากเปลี่ยนวัสดุใบตัดจากเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานได้นานมากขึ้น เนื่องจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นมีส่วนผสมของโครเมียมในปริมาณสูง ประมาณร้อยละ 5 - 13 โดยน้ำหนัก โครเมียมจะจับตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีเสถียรภาพ ช่วยให้เหล็กกล้าเครื่องมือมีสมบัติทนต่อการสึกหรอ [7, 8, 11] แต่ราคาของเหล็กกล้าเครื่องมือในท้องตลาดสูงมาก ผู้ประกอบการจึงต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่าหากเปลี่ยนมาใช้เหล็กกล้าเครื่องมือ

ความเสียหายของใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถเกิดจากความไม่เหมาะสมของรูปร่างเครื่องมือ ทั้งในส่วนคมตัด และรูปร่างใบตัด จากรูปที่ 6 จะพบว่าใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถมีระยะการสูญเสียคมตัดกว้าง ทั้งนี้มีสาเหตุหนึ่งมาจากคมตัดเริ่มต้นของใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถมีมุมองศาแคบกว่าใบตัดมาตรฐาน ขนาดมุมคมตัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือ [12-13] คมตัดที่มีมุมขนาดเล็กมีพื้นที่ในการรับแรงน้อย หากเกิดการกระแทกจึงมีโอกาสเกิดการเสียรูปแบบถาวร ในส่วนของรูปร่างของใบตัดก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเสียหาย ถึงแม้ว่าวัสดุที่ใช้ทำผานไถจะเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.64 โดยน้ำหนัก และมีความแข็งแรงสูงกว่าใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่น กับใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดพลาสติก แต่ใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถมีหน้าตัดโค้ง ไม่สามารถจับยึดได้แนบสนิท ใบตัดจึงเกิดการกระแทกจนเกิดความเสียหาย ในทางปฏิบัติจริง เมื่อใบตัดสูญเสียคมตัดไม่สามารถตัดพลาสติกให้มีขนาดเล็กได้ ผู้ปฏิบัติงานจะถอดใบตัด

ออกมาล้มคมใหม่ แต่ใบตัดที่แตกหักไม่สามารถนำมาล้มคมเพื่อใช้ใหม่ได้ เป็นเหตุให้เสียต้นทุน ใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้งาน หากจำเป็นต้องใช้งานควรออกแบบอุปกรณ์จับยึดใบตัดให้สามารถยึดใบตัดแนบสนิทกับชุดจับยึด

ความเสียหายที่เกิดจากการสึกหรอแบบขัดถูที่เกิดใบตัดจากทั้ง 3 แหล่ง มีสาเหตุหลักจากดิน และสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ที่ปนมากับขวดพลาสติก การทำความสะอาดขวดพลาสติกก่อนเข้าเครื่องตัดเป็นกระบวนการลดปัจจัยที่ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถูได้ ซึ่งในปัจจุบันทางผู้ประกอบการกำลังศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มสถานีทำความสะอาดขวดพลาสติกก่อนนำขวนเข้าสู่กระบวนการตัด

5. สรุป

ใบตัดเศษพลาสติกจากทั้ง 3 แหล่ง ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอน ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติกมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก และใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.64 โดยน้ำหนัก ใบตัดจากทั้ง 3 แหล่งผ่านการชุบแข็งที่ไม่เหมาะสม โครงสร้างจุลภาคภายหลังการชุบแข็งจึงประกอบด้วยเฟอไรต์และเพอร์ไรท์ ใบตัดจากโรงงานอบชุบในท้องถิ่นมีค่าความแข็งเฉลี่ย 158.1 HV ใบตัดจากโรงงานผู้จำหน่ายเครื่องตัดเศษพลาสติกมีค่าความแข็งเฉลี่ย 245.5 HV และใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถมีค่าความแข็งเฉลี่ย 283.7 HV ลักษณะความเสียหายที่พบบนใบตัดจากทั้ง 3 แหล่ง ได้แก่ การสึกหรอแบบขัดถู ส่วนใบตัดที่ผลิตจากไบผานไถพบรอยที่เกิดจากการเสียรูปแบบถาวร และรอยแตกขนาดใหญ่ ดังนั้น การเลือกใช้วัสดุที่ทนต่อการสึกหรอ การอบชุบวัสดุเหล่านี้อย่างเหมาะสม การทำความสะอาดขวดพลาสติกก่อนเข้าสู่กระบวนการตัด รวมไปถึงการจับยึดใบตัดอย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยลดปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายบนใบตัดได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ใน

การวิจัย และขอขอบคุณ โครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bhakat, A.K., Mishra, A.K., Mishra, N.S. and Jha S. 2004. Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade Steel. *Wear*. 257: 338 – 346.
- [2] Lau, K.H., Mei, D., Yeung, C.F. and Man, H.C. 1999. Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade. *Journal of Materials Processing Technology*. 102: 203 – 207.
- [3] Yang, C.L., Sheu, S.H. and Yu, K.T. 2009. The reliability analysis of a thin – edge blade wear in the glass fiber cutting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 209: 1789 – 1795.
- [4] Verhoven, J.D., Pendray, A.H. and Clark, H.F. 2008. Wear tests of steel knife blades. *Wear*. 265: 1093 – 1099.
- [5] สิริพร โรจนนันต์, สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ และธนทองกลม. 2553. การศึกษาลักษณะความเสียหายของมีดแกะลายบนเครื่องประดับทองคำขาว 18 กระรัต. การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหการ 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย, 13 – 15 ตุลาคม 2553
- [6] Avner, S.H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*, McGraw – Hill, Singapore.
- [7] Totten, G.E. 2007. *Steel Heat Treatment : Metallurgy and Technologies*, Taylor & Francis, Newyork. USA.
- [8] มนัส สติรจินดา. 2537. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- [9] Wulpi, D.J. 1988. *Understanding How Components Fail*. American Society for Metals, Ohio, USA.

- [10] ปณิตดา นรินทล้าพงศ์, Pearce, J.T.H., วารุณี เปรมานนท์, ชาวสวน กาญจน์มัย, Sheppard, G.J., ผกามาศ แซ่หว่อง, ดวงดาวอาจงค์, สุรพล ราษฎร์-นุ้ย และสิทธิชัย วิโรจน์ปัทม์ภ. 2547. การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม. สำนักพิมพ์ส.ส.ท. กรุงเทพฯ.
- [11] Wilson, R. 1975. Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels. McGraw-Hill, UK.
- [12] Gilchrist, M.D., Keenen, S., Curtis, M., Cassidy, M., Byrne, G. and Destrade, M. 2008. Measuring knife stab penetration into skin simulant using a novel biaxial tension device. Forensic Science International. 177: 52 – 65.
- [13] Fulemova, J. and Janda, Z. 2013. Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry. Procedia Engineering. 69: 565 – 573.