

การใช้ประโยชน์จากเส้นใยแกลบและผักตบชวาขึ้นรูปแผ่นขัดสำหรับ ขัดแชฟไฟร์ด้วยเครื่อง CMP

Utilization of Rice Husk Fiber and Water Hyacinth Fiber Forming Polishing Pad for Sapphire Chemical Mechanical Polishing (CMP)

อุษมา บุญโสม (Usama Boonsom)* ดร.สิริวรรณ บริพัตรโกศล (Dr.Siriwan Boripatkosol)^{1**}
ดร.อโพนธ์ รัตนพันธ์ (Dr.Apaipan Rattanapan)** ดร.ณัฐพล บุญอึ้ง (Dr.Natthaphon Bun-athuek)**
ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง (Dr.Panthip Boonsong)***

(Received: October 13, 2021; Revised: December 14, 2021; Accepted: December 22, 2021)

บทคัดย่อ

สารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ผลิตจากธาตุที่เป็นผลึกของแข็ง ต้องทำการขัดผิวให้เรียบและเป็นระนาบเพื่อการพิมพ์วงจร โดยใช้เทคโนโลยีการขัดผิวแบบผสมผสานระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีและแรงทางกล เรียกว่า chemical mechanical polishing (CMP) ในกระบวนการนี้ต้องใช้แผ่นขัดจากเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งเป็นวัสดุสิ้นเปลือง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อขึ้นรูปแผ่นขัด โดยใช้เส้นใยธรรมชาติทดแทนเส้นใยสังเคราะห์ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัตถุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยใช้เส้นใยธรรมชาติจากแกลบและผักตบชวา ขนาด 30 เมช 40 เมช และ 60 เมช ผสมกับตัวประสานคือพอลิยูรีเทน ขึ้นรูปเป็นแผ่นขัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มม. นำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการขัดผิวแชฟไฟร์ด้วยเครื่อง CMP จากผลการศึกษาพบว่าเส้นใยทั้งสองสามารถขึ้นรูปและคงตัวอยู่ได้ดี แผ่นขัดเส้นใยแกลบมีอัตราการขัดผิวดีกว่าแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวาและแผ่นขัดเส้นใยแกลบขนาด 40 เมช มีอัตราการขัดสูงที่สุด

ABSTRACT

Most semiconductor are made from elements, which are crystalline solid structure that must be polished to be flat surface for printed circuits. Using combination of chemical oxidation and mechanical forces in the polishing process, called chemical mechanical polishing (CMP) which requires synthetic fiber polishing pads as consumables. This paper studies on forming polishing pads by using natural fibers instead of synthetic fibers to adding value to agricultural waste products. The natural fibers Used for forming a polishing pad are rice husk fibers and water hyacinth fibers of 30 mesh, 40 mesh, 60 mesh mixed with polyurethane binder to form polishing pad diameter 120 mm. the polishing pads were subjected to mechanical testing and the sapphire CMP testing. The results demonstrated that both fibers are moldable and stable. The rice husk fiber polishing pad has a better Material Removal Rate (MRR) Than the water hyacinth fiber polishing pad and the 40 mesh rice husk fiber polishing pad has the highest polishing rate.

คำสำคัญ: การขัดผิวแชฟไฟร์ แผ่นขัด วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

Keywords: Sapphire chemical mechanical polishing, Polishing pad, Agricultural waste

¹Corresponding author: siriwan.b@cit.kmutnb.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทนำ

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสภาวะในปัจจุบันมีแนวโน้มการดำรงชีวิตผ่านระบบออนไลน์เพิ่มมากขึ้น เช่น การทำงาน การศึกษา การซื้อขายสินค้า การทำธุรกรรมการเงินต่าง ๆ เป็นต้น ทำให้สามารถทำกิจกรรมดังกล่าวได้อย่างสะดวกสบายผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ดังนั้นความต้องการอุปกรณ์ไอทีและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงเพิ่มขึ้น ในประเทศไทยแบ่งตลาดอิเล็กทรอนิกส์เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตลาดภายนอกประเทศและตลาดภายในประเทศ โดยประเทศไทยเป็นฐานการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อันดับที่ 13 ของโลก [1] สินค้าหลักที่ส่งออกคือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และแผงวงจรรวมมีสัดส่วนของมูลค่าการส่งออกมากกว่า 70% ของสินค้า ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปมีองค์ประกอบพื้นฐานคือ สารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่ควบคุมและออกแบบการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในแผงวงจร เพื่อให้เกิดความต่างศักย์ของไฟฟ้าและเกิดการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น ได้แก่ พลังงานกล พลังงานความร้อน รวมทั้งเป็นสื่อกลางรับส่งคลื่นสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต สารกึ่งตัวนำจึงเป็นชิ้นส่วนสำคัญ สำหรับการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้สมบูรณ์และพร้อมใช้งาน

สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ผลิตจากธาตุซิลิคอน [2] โดยการนำธาตุซิลิคอนมาหลอมเป็นทรงกระบอกและนำมาตัดเป็นแผ่นบางเรียกว่า เวเฟอร์ จากนั้นนำมาขัดเพื่อให้ผิวเรียบและเป็นระนาบด้วยเทคโนโลยี Chemical Mechanical Polishing (CMP) [3-4] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการขัดแบบผสมผสานระหว่างปฏิกิริยาเคมีและแรงขัดเชิงกล โดยสารละลายทำปฏิกิริยากับผิวชิ้นงาน เพื่อให้ผิวชิ้นงานอ่อนนุ่ม ในสารละลายมีอนุภาคซิลิคอนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร สำหรับใช้ในการขัดถูเพียงเล็กน้อยให้ผิวเวเฟอร์หลุดออก โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายบนผิวชิ้นงานหลังการขัด เนื่องจากประสิทธิภาพในการขัดที่ดีและความซับซ้อนในกระบวนการ CMP ส่งผลให้นักวิจัยต่างให้ความสนใจศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการขัดผิวในกระบวนการ เช่น การศึกษาแรงดันขณะขัดผิวแผ่นเวเฟอร์ [5-6] พบว่าการกระจายแรงดันที่ไม่สม่ำเสมอและแรงสั่นสะเทือนของสารละลายอนุภาคซิลิกาขณะขัดส่งผลให้แผ่นเวเฟอร์ไม่เป็นระนาบ การศึกษาอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารละลายอนุภาคซิลิกา [7-10] พบว่าอัตราการไหลแปรผกผันกับอัตราการขัดผิวและความเข้มข้นของสารละลายอนุภาคซิลิกาแปรผันตรงกับอัตราการขัดผิว การศึกษาความหยาบของแผ่นขัด ซึ่งแผ่นขัดที่มีความหยาบไม่สม่ำเสมอ [11-13] ส่งผลให้เกิดความเสียหายที่ผิวชิ้นงานและอัตราการขัดผิวลดลง นอกจากนี้ยังมีการวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุจากธรรมชาติมาขึ้นรูปเป็นแผ่นขัด ทดแทนการใช้เส้นใยสังเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขัดผิวให้ดียิ่งขึ้น การเปลี่ยนวัสดุเพื่อขึ้นรูปแผ่นขัดเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจและเหมาะสมแก่การศึกษาค้นคว้า จากการที่ประเทศไทยมีประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเพาะปลูก จึงมีพืชท้องถิ่นและวัชพืชเหลือใช้ที่ไม่มีมูลค่าเป็นจำนวนมากเป็นผลพลอยได้จากภาคการเกษตร ปัจจุบันจึงมีการนำวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวสร้างเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรและยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาขึ้นรูปเป็นแผ่นขัด จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จากงานวิจัยของ Sansuwan และคณะ [14] ได้ทดลองขึ้นรูปแผ่นขัดโดยใช้ชานอ้อยผสมกับพอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) และ Sirisawat และคณะ [15] ได้ขึ้นรูปแผ่นขัดโดยใช้เยื่อไผ่ผสมกับพอลิยูรีเทน พบว่าทั้งเยื่อไผ่และชานอ้อยมีอัตราการขัดผิวที่ดีกว่าแผ่นขัดจากเส้นใยสังเคราะห์ โดยเมื่อนำแผ่นขัดเยื่อไผ่สองตัวมาล้างล้างขยาดสูง เพื่อตรวจสอบสภาพผิวพบว่าแผ่นขัดเยื่อไผ่มีเส้นใยจำนวนมาก ลักษณะเป็นเส้นยาวเกาะกลุ่มกันเป็นร่างแห [15] ส่วนชานอ้อยพบว่าเส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นยาวเกาะกลุ่มกันเป็นร่างแหเช่นเดียวกับเส้นใยเยื่อไผ่ แต่มีอนุภาคซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบของชานอ้อยเกาะบริเวณเส้นใย [14] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวจึงเกิดเป็นข้อสันนิษฐานได้ว่า พืชที่มีเส้นใยจำนวนมากและพืชที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขัดผิว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ เพื่อนำมาขึ้นรูปแผ่นขัดสำหรับใช้กับเครื่อง CMP โดยเลือกใช้เส้นใยกล้วยและผักตบชวาผสมกับพอลิยูรีเทนซึ่งเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตติง [16] ทำหน้าที่เป็นตัว

ประสานสำหรับขึ้นรูปแผ่นขัด เนื่องจากเส้นใยเกลบและเส้นใยผักตบชวาเป็นวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น ราคาไม่แพง โดยเกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวเป็นส่วนผสมของเปลือกเมล็ด กลีบเลี้ยง และข้าวเมสิดประมาณ 20-24% ของข้าวเปลือก องค์ประกอบของเกลบได้แก่ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสประมาณ 68% ลิกนิน 19.2-24.5% ถ้า 13.2-29.0% (ประกอบด้วยซิลิกา 86.9-97.3%) [17] ในถ้าเกลบที่ยังไม่ผ่านความร้อนจะมีองค์ประกอบ ซิลิกาประมาณ 77.97% มีโครงสร้างเป็นผลึกและจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานเมื่อได้รับความร้อน [18] ดังนั้นเส้นใยเกลบจึงมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับอนุภาคซิลิกาที่ผสมอยู่ในสารละลายที่ใช้ขณะขัดผิว สำหรับผักตบชวาเป็นวัชพืชที่มีลักษณะภายในเส้นใยเป็นรูปพรุนคล้ายฟองน้ำ จึงมีคุณสมบัติโดดเด่นในด้านการดูดซับความชื้นได้ดีและเป็นวัสดุดูดซับทางธรรมชาติ [19] องค์ประกอบทางเคมีของลำต้นผักตบชวาโดยน้ำหนักแห้งประกอบด้วย ลิกนิน 11.19% ไฮโดรเซลลูโลส 72.74% และแอลฟาเซลลูโลส 51.72% [20] ดังนั้นผักตบชวาจึงเป็นวัชพืชที่มีเส้นใยเซลลูโลสจำนวนมากและดูดซับได้ดีน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการพาสารละลายอนุภาคซิลิกาให้สัมผัสกับผิวสารกึ่งตัวนำได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ผักตบชวายังเป็นวัชพืชที่ไม่มีมูลค่าและต้องเสียงบประมาณจำนวนมากเพื่อกำจัดทิ้ง การนำผักตบชวามาขึ้นรูปเป็นแผ่นขัดจึงช่วยลดจำนวนและเพิ่มมูลค่า

วิธีการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

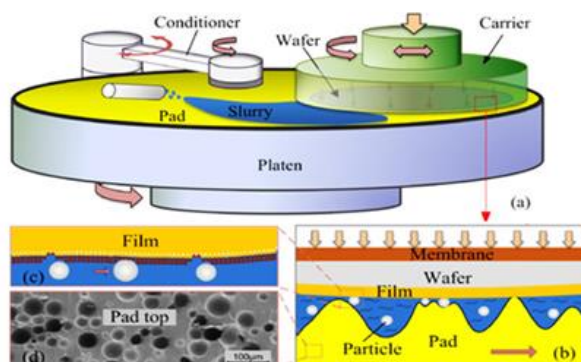
1.1 เครื่องขัด Chemical Mechanical Polishing(CMP) เป็นเทคโนโลยีการขัดผิวที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากเป็นกระบวนการขัดผิวที่มีประสิทธิภาพ สามารถขัดวัสดุพื้นผิวแข็งให้เรียบในระดับนาโนเมตร โดยปราศจากรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงานหลังการขัด ส่วนประกอบหลักเครื่อง CMP มี 4 ส่วน ได้แก่ 1) Polishing Platen เป็นแท่นรองรับแผ่นขัดและชิ้นงานที่ต้องการขัด 2) Pad หรือแผ่นขัดเป็นแผ่นลักษณะกลมวางอยู่ด้านบนแท่นหมุน (polishing platen) 3) Wafer Carrier เป็นอุปกรณ์สำหรับยึดชิ้นงานและกดชิ้นงานลงมาสัมผัสกับสารละลายบนแผ่นขัด 4) Slurry เป็นสารละลายเคมีที่ใช้ขณะขัดผิว ซึ่งมีอนุภาคของซิลิกาผสมอยู่ในสารละลาย แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบเครื่องขัด CMP

ขณะขัดผิวชิ้นงาน สารละลายอนุภาคซิลิกาหยดลงบนแผ่นขัด โดยอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน (Wafer Carrier) กดแผ่นเวเฟอร์ลงบนสารละลายและหมุนในทิศทางเดียวกันกับแผ่นขัด ซึ่งแผ่นขัดทำหน้าที่พาสารละลายอนุภาคซิลิกาสัมผัสกับผิวเวเฟอร์ เพื่อให้สารละลายทำปฏิกิริยากับผิวเวเฟอร์จนอ่อนนุ่ม ในขณะที่หมุนเกิดแผ่นฟิล์มบางๆ

แทรกระหว่างชั้นของสารละลายและแผ่นเวเฟอร์ [21] แผ่นฟิล์มจะเคลือบอนุภาคซิลิกาในสารละลาย ทำให้มีความ
ลื่นและสามารถลดความผิดเพี้ยนขัดชั้นงาน แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะแผ่นฟิล์มที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเวเฟอร์และแผ่นขัด

1.2 เส้นใยแก้ว นำแก้วสวดมาตากแห้ง 3 วัน และบดด้วยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (hammer mill) รุ่น HM-020C ขนาดห้องบด 20 x 15 ซม. ขนาดมอเตอร์ 3 แรงม้า, 380 โวลต์ เพื่อลดขนาดของแก้วโดยใช้กลไก
การเหวี่ยงกระแทกให้แก้วมีขนาดเล็กลง และตกผ่านตะแกรงเพื่อคัดขนาดให้ได้ 30 เมช, 40 เมช และ 60 เมช

1.3 เส้นใยฝัดบดขาว นำฝัดบดขาวมาทำความสะอาดและตัดใบออก เพื่อใช้เฉพาะส่วนของลำต้นตาก
แห้ง 3 วันจากนั้นอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน รุ่น TD-010T ขนาดมอเตอร์ 1/4 แรงม้า ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
1 ชั่วโมงและบดด้วยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) รุ่น HM-020C ขนาดห้องบด 20 x 15 ซม. ขนาด
มอเตอร์ 3 แรงม้า, 380 โวลต์ เพื่อลดขนาดของฝัดบดขาวและคัดขนาดให้ได้ 30 เมช, 40 เมช และ 60 เมช

2. การเตรียมวัตถุดิบและการขึ้นรูปแผ่นขัด

นำเส้นใยแก้วและฝัดบดขาวบดละเอียดที่เตรียมจากข้อ 1.2 และ 1.3 ขนาด 30 เมช , 40 เมช และ 60
เมช ขึ้นรูปแผ่นขัด โดยใช้พอลิยูรีเทนเป็นตัวประสานปริมาณ 27 กรัม สำหรับขึ้นรูปเส้นใยแก้วและพอลิยูรีเทน
35 กรัม สำหรับขึ้นรูปเส้นใยฝัดบดขาว เพื่อให้เส้นใยยึดเกาะและสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นขัดได้ จากนั้นนำแผ่นขัดที่
ได้มาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทดสอบอัตราการขัดด้วยเครื่อง CMP และเปรียบเทียบอัตราการขัดผิว
ระหว่างแผ่นขัดเส้นใยธรรมชาติและแผ่นขัดเส้นใยสังเคราะห์จากปริมาณน้ำหนักรีดลงของแชฟไฟร์ [14,15]
ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นขัดมีดังนี้

2.1 เตรียมแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปแผ่นขัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนา 120 มม. x 2 มม.
โดยแม่พิมพ์มี 2 ส่วน คือแม่พิมพ์ชั้นในสำหรับขึ้นรูปแผ่นขัดและแม่พิมพ์ชั้นนอกสำหรับล็อกแม่พิมพ์ชั้นใน เพื่อ
ป้องกันแม่พิมพ์ชั้นในเอียงไม่เป็นระนาบขณะขึ้นรูปเนื่องจากก่อนที่แผ่นขัดจะแข็งตัวเกิดการขยายตัวของพอลิยูรี
เทนดันฝาแม่พิมพ์ชั้นในจนล้นออกมาด้านนอก ส่งผลให้แม่พิมพ์ชั้นในเอียง ดังภาพที่ 3



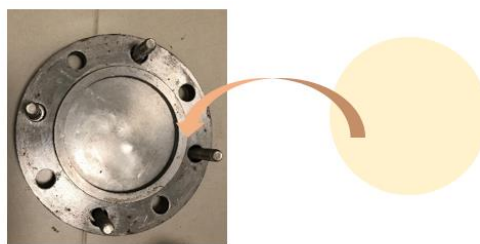
แม่พิมพ์ชั้นนอก



แม่พิมพ์ชั้นใน

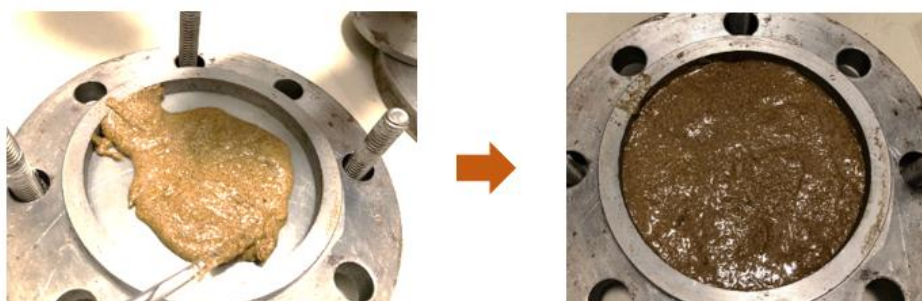
ภาพที่ 3 ส่วนประกอบแม่พิมพ์

2.2 ประกอบแม่พิมพ์ทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกันและรองแผ่นพลาสติกด้านล่างก่อนเทส่วนผสมลงในแม่พิมพ์ เพื่อให้สามารถถอดแผ่นขัดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผ่นพลาสติกสำหรับวางรองด้านใน

2.3 ผสมพอลิยูรีเทนต่อสารเร่งแข็งในอัตราส่วน 1:0.6 ของน้ำหนัก ตามคู่มือการผสมยางพอลิยูรีเทน RA-PU40AB เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปแผ่นขัดได้โดยที่แผ่นขัดไม่เกิดการแตกหัก ในขณะที่นำออกจากแม่พิมพ์และปริมาณของสารละลายเมื่อผสมกับเส้นใยไม่มากเกินไปกว่าปริมาตรที่แม่พิมพ์สามารถบรรจุได้ จากนั้นนำสารละลายพอลิยูรีเทนผสมกับเส้นใย โดยใช้อัตราส่วนตามตารางที่ 1 และกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันเทส่วนผสมทั้งหมดลงในแม่พิมพ์ เกลี่ยผิวหน้าให้เป็นระนาบ ดังภาพที่ 5 ปิดฝาแม่พิมพ์ชั้นในและปิดทับด้วยฝาแม่พิมพ์ชั้นนอกอีกครั้ง เพื่อป้องกันฝาปิดของแม่พิมพ์เอียง จากนั้นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง นำแผ่นขัดออกจากแม่พิมพ์ใช้กรรไกรตัดส่วนเกินที่เกิดจากการกดทับของแม่พิมพ์ ขัดผิวด้านหนึ่งด้วยกระดาษทราย เพราะทั้งสองด้านของแผ่นขัดจะมีพอลิยูรีเทนเคลือบอยู่ จึงต้องทำการขัดผิวพอลิยูรีเทนด้านหนึ่งออกก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ



ภาพที่ 5 ลักษณะสารละลายภายในแม่พิมพ์

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิยูรีเทนและเส้นใยเกลบและผักตบชวา

พอลิยูรีเทน (กรัม)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (เมช)	เส้นใย (กรัม)
27	เกลบ	30	15
		40	
		60	
35	ผักตบชวา	30	7
		40	
		60	

3. การทดสอบอัตราการขัดผิว

นำแผ่นเซฟไฟร์มาขัดด้วยแผ่นขัดที่ขึ้นรูปจากเส้นใยแก้วและฝักตบชวาวขนาด 30 เมช 40 เมช และ 60 เมช ด้วยเครื่อง CMP เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อ 1 ตัวอย่าง โดยแผ่นเซฟไฟร์ถูกยึดติดกับหัวจับและถูกกดลงให้สัมผัสกับสารละลายอนุภาคซิลิกา ซึ่งจะหยดลงบนแผ่นขัดตลอดการขัดผิว ขณะขัดหัวจับแผ่นเซฟไฟร์และแผ่นขัดหมุนในทิศทางเดียวกัน เพื่อพาสารละลายอนุภาคซิลิกาให้สัมผัสกับผิวเซฟไฟร์ทั่วบริเวณพื้นที่ขัดผิว ในการทดลองนี้ขัดเซฟไฟร์ด้วยแผ่นขัดอุตสาหกรรมและแผ่นขัดที่ขึ้นรูปด้วยพอลิยูรีเทนเพียงอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบอัตราการขัดผิวเซฟไฟร์ด้วยแผ่นขัดชนิดต่าง ๆ การทดสอบการขัดด้วยเครื่อง CMP แสดงดังภาพที่ 6 และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในกระบวนการขัดผิวเซฟไฟร์ด้วยการใช้สารเคมีร่วมกับแรงทางกล

ตัวแปรที่ใช้ในการขัดผิว	สภาวะที่ใช้ในการขัด
ชนิดของแผ่นขัด (Type of polishing pad)	1. พอลิยูรีเทนผสมเส้นใยแก้ว 2. พอลิยูรีเทนผสมเส้นใยฝักตบชวา 3. พอลิยูรีเทนเพียงอย่างเดียว 4. แผ่นขัดในอุตสาหกรรม (Suba600)
ประเภทของเวเฟอร์ (Wafer type)	เซฟไฟร์ ($\alpha\text{-Al}_2\text{-O}_3$)
ขนาดของเวเฟอร์ (Wafer size)	Ø25.4 มม. ความหนา = 1 มม.
แรงกดในการขัด (Down force pressure)	16.6 กิโลพาสคาล
เวลาในการขัด (Polishing time)	60 นาที
จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ	7 ชิ้น
ความเร็วของ Platen/Polishing Head (Platen and polishing head speed)	60/60 รอบต่อนาที
สารละลายที่ใช้ในการขัด (Slurry)	
1.ประเภทของสารละลาย (Slurry type)	5 wt% SiO_2 ขนาด 55 นาโนเมตร
2.อัตราการไหลของสารละลาย (Slurry flow rate)	60 มิลลิลิตรต่อนาที
3.ค่า pH ของสารละลาย (pH value)	11



ภาพที่ 6 การทดสอบหาอัตราการขัดผิว

จากนั้นหาอัตราการกัดผิว เนื่องจากเซฟไฟร์มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก การคำนวณหาอัตราการกัด Material removal rate (MRR) จึงคำนวณจากความต่างของความสูงที่ลดลงของเซฟไฟร์ ดังสมการที่ 1

$$MRR = \frac{\Delta h}{t} \quad \text{สมการที่ 1}$$

การหาความแตกต่างของความสูง สามารถคำนวณจากน้ำหนักที่ลดลง โดยชั่งน้ำหนักของแผ่นเซฟไฟร์ ก่อนและหลังกัด จากนั้นนำมาคำนวณด้วยสมการความหนาแน่น ดังสมการที่ 2

$$\rho = \frac{\Delta m}{V} \quad \text{สมการที่ 2}$$

ρ = ความหนาแน่นเซฟไฟร์มีค่าเท่ากับ 3.98 g/cm³

Δm = ความต่างของน้ำหนักเซฟไฟร์ก่อนและหลังการกัด

V = ปริมาตรของทรงกระบอก

ดังนั้นสมการคำนวณอัตราการกัดผิวเซฟไฟร์ในการทดลองนี้ คือ สมการที่ 3

$$MRR = \frac{\Delta m}{t \rho \pi r^2} \quad \text{สมการที่ 3}$$

4. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นขัด

4.1 การตรวจสอบลักษณะของเส้นใย ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยทั้งสองด้าน โดยทำการกัดผิวพอลิยูรีเทนด้านเดียว เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องกำลังขยายสูง Digital microscope รุ่น VHX-6000 ประเทศ ญี่ปุ่น กำลังขยาย 100 เท่าขนาดภาพ 1 มม. x 1 มม.

4.2 การทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำของเส้นใย นำเส้นใยของแกลบและผักตบชวาทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ 30 เมช 40 เมช และ 60 เมช ก่อนขึ้นรูปแผ่นขัดแช่ในน้ำอัตราส่วน 1:10 ของน้ำหนัก 24 ชั่วโมง จากนั้นตรวจสอบปริมาณการดูดซับน้ำของเส้นใย จากระดับน้ำที่หายไป [19]

4.3 การทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำแผ่นขัด นำแผ่นขัดที่ขึ้นรูปจากเส้นใยแกลบและเส้นใยผักตบชวาทั้ง 3 ขนาด มาชั่งน้ำหนักก่อนแช่น้ำ จากนั้นนำไปแช่น้ำและจับเวลา 30 นาที โดยนำมาชั่งน้ำหนักทุก 5 นาที เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น [19]

4.4 การทดสอบความหนาแน่น ตัดแผ่นขัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1X1X0.2 ซม.³ [22] นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นด้วยเครื่อง ELECTRONIC DENSIMETER รุ่น MDS-300 ความละเอียด 0.001กรัม/ซม.³. คำนวณความหนาแน่นและแสดงค่าบนหน้าจอเครื่อง ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เครื่องวัดค่าความหนาแน่นของแผ่นขัด

4.5 การทดสอบความแข็ง การทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง SHORE HARDNESS TESTER ยี่ห้อ DESIK GERMANY รุ่น shore A มาตรฐาน DIN 53505, ISO 7619/2, ISO 868, ASTM 2240 เป็นเครื่องทดสอบ

ความแข็งของวัสดุอ่อนเช่น วัสดุประเภทยาง หนังเทียม เป็นต้น มีมาตรวัดระดับความแข็งที่ 0-90 shore A ซึ่งในการทดสอบได้กำหนดจุดวัดความแข็งบนแผ่นขัดด้านที่มีพอลิยูรีเทนเคลือบผิวและด้านที่ไม่มีพอลิยูรีเทนเคลือบผิว 10 จุดต่อหนึ่งด้าน โดยกระจายจุดวัดทั่วทั้งชิ้นงานจากนั้นใช้เครื่องวัดกดลงบนผิวแผ่นขัดตามจุดที่กำหนด [23]

4.6 การทดสอบความต้านทานการขัดถู การทดสอบความต้านทานการขัดถูด้วยเครื่อง DIN Abrasion Tester รุ่น AT150 ประเทศจีน โดยขึ้นรูปตัวอย่างเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. ความสูง 16 มม. เพื่อให้ชิ้นงานสามารถติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์เครื่องขัดถูได้ โดยใช้อัตราส่วนผสมเดียวกับแผ่นขัดจำนวน 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งขนาดเส้นใย จากนั้นนำชิ้นงานซึ่งนำหนักก่อนขัดและติดตั้งไว้ที่หัวจับของเครื่องขัดถู ปรับระดับชิ้นงานให้สัมผัสกับลูกกลิ้งซึ่งมีลักษณะผิวหยาบขรุขระ ใส่จำนวนรอบที่ต้องการขัด จากนั้นกดปุ่มให้ลูกกลิ้งหมุนขณะหมุนนั้นชิ้นงานสัมผัสกับผิวหยาบของลูกกลิ้ง ส่งผลให้เกิดการขัดถูและชิ้นงานหลุดร่อนบางส่วน เมื่อครบจำนวนรอบขัด นำชิ้นงานส่วนที่เหลือมาชั่งน้ำหนักหลังขัด เพื่อหาความต้านทานการขัดถู จากความต่างของน้ำหนักก่อนและหลังขัด [24] ลักษณะการขัดถูแสดงดัง ภาพที่ 8

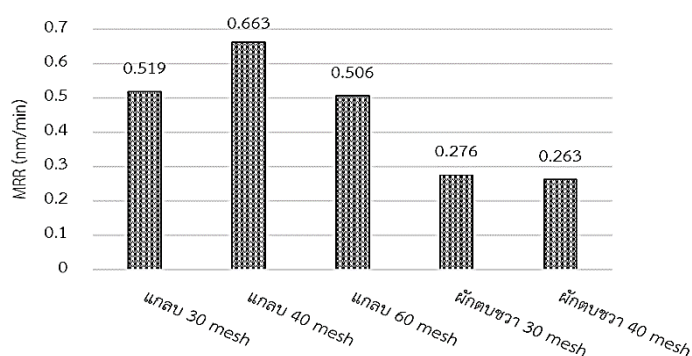


ภาพที่ 8 การทดสอบความต้านทานการขัดถู

ผลการวิจัย

1. ผลการทดสอบอัตราการขัด

ผลการทดสอบอัตราการขัดพบว่าแผ่นขัดจากเส้นใยแกลบสามารถขัดผิวแซฟไฟร์ได้ดีกว่า แผ่นขัดจากเส้นใยผักตบชวา โดยแผ่นขัดจากเส้นใยแกลบขนาด 40 เมช สามารถขัดผิวแซฟไฟร์ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นขัดเส้นใยแกลบขนาด 30 เมช และ 60 เมช ซึ่งได้อัตราการขัดที่ใกล้เคียงกัน สำหรับแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวาขนาด 30 เมช และ 40 เมช มีอัตราการขัดผิวน้อยกว่าเส้นใยแกลบ โดยแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวาขนาด 60 เมช ไม่สามารถขัดผิวแซฟไฟร์ได้ เนื่องจากแผ่นขัดดูดซับสารละลายอนุภาคซิลิกา ส่งผลให้แผ่นขัดขยายตัวขึ้นเล็กน้อยทำให้ไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่นขัดและแผ่นเวเฟอร์ เพราะแผ่นขัดขยายตัวขึ้นไปชนกับแผ่นเวเฟอร์ส่งผลให้การหมุนผิดขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถหมุนแผ่นขัดได้ ผลการทดสอบอัตราการขัดผิวแซฟไฟร์ แสดงดังภาพที่ 9

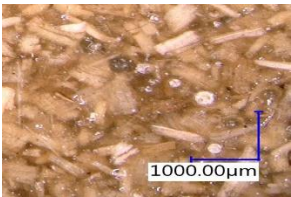
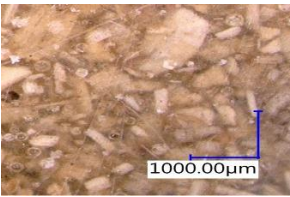
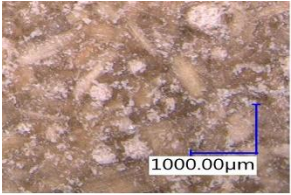
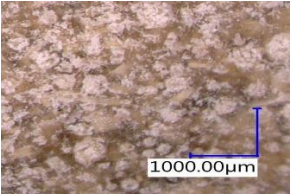
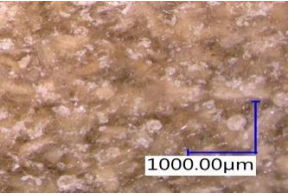


ภาพที่ 9 ผลการทดสอบอัตราการขัดผิวแซฟไฟร์

2. ผลการทดสอบทางกายภาพ

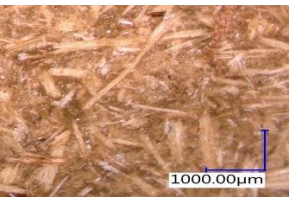
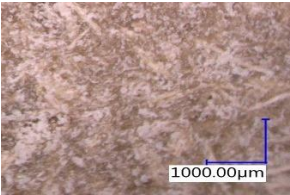
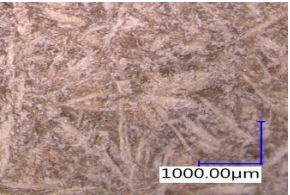
2.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใย เมื่อนำแผ่นขัดจากเส้นใยเกลบและเส้นใยผักตบชวา ส่องด้วยกล้องกำลังขยายสูง 100 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะของเส้นใยทั้งสองด้านได้แก่ ด้านที่ไม่มีพอลิยูรีเทนเคลือบผิว และด้านที่มี พอลิยูรีเทนเคลือบผิวตามตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ลักษณะแผ่นขัดจากเส้นใยเกลบก่อนและหลังการขัดผิว

เส้นใยเกลบ	30 เมช	40 เมช	60 เมช
เคลือบผิว พอลิยูรีเทน			
ไม่เคลือบ ผิวพอลิยูรีเทน			

จากตารางที่ 3 พบว่าเส้นใยเกลบมีลักษณะเป็นปล้องสั้นทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของเส้นใยมีความใกล้เคียงกัน ด้านที่มีพอลิยูรีเทนเคลือบผิวมีฟองอากาศแทรกอยู่ระหว่างรอยต่อของเส้นใย ด้านที่ขัดผิวพอลิยูรีเทนพบว่าฟองอากาศถูกขัดและกลายเป็นโพรง ภายในโพรงมีเศษพอลิยูรีเทนมีลักษณะเป็นขุยผง

ตารางที่ 4 ลักษณะแผ่นขัดจากเส้นใยผักตบชวา ก่อนและหลังการขัดผิวแผ่นขัด

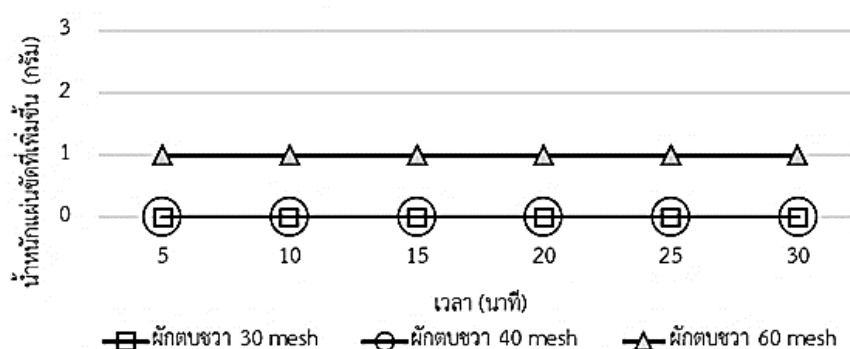
เส้นใย ผักตบชวา	30 เมช	40 เมช	60 เมช
เคลือบผิว พอลิยูรีเทน			
ไม่เคลือบ ผิวพอลิยูรีเทน			

จากตารางที่ 4 พบว่าลักษณะเส้นใยผักตบชวาเป็นเส้นยาวลอยอยู่ในสารละลายพอลิยูรีเทน ด้านที่มีพอลิยูรีเทนเคลือบไม่มีโพรงอากาศและด้านที่ขัดผิวพอลิยูรีเทนพบเศษพอลิยูรีเทนเป็นขุยผงติดกระจายอยู่บนพื้นที่ผิวหน้าตัด

2.2 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำของเส้นใยเส้นใยเกลบและเส้นใยผักตบชวา พบว่าเส้นใยเกลบไม่ดูดซับน้ำ เนื่องจากระดับน้ำที่ใส่ลงในภาชนะ ก่อนแช่เส้นใยเกลบและหลังแช่ระดับน้ำคงที่ สำหรับเส้นใยผักตบชวามีการดูดซับน้ำ เพราะเส้นใยผักตบชวาเป็นวัสดุดูดซับตามธรรมชาติลักษณะภายในเส้นใยผักตบชวาเป็นโพรงคล้าย

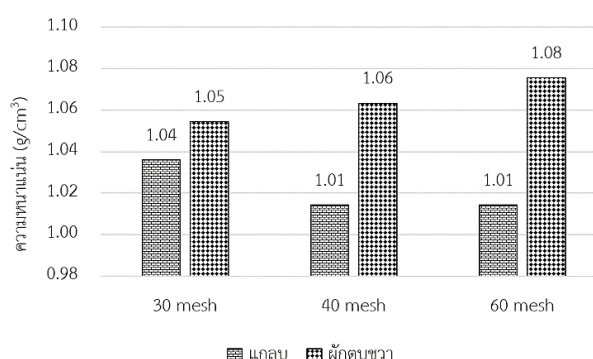
พองน้ำและเป็นวัชพืชที่มีเส้นใยจำนวนมากเป็นองค์ประกอบส่วนสำคัญ [19] น้ำที่ใสในภาชนะจึงถูกเส้นใยดูดซับจนไม่เหลือน้ำในภาชนะ ดังนั้นเพื่อสามารถขึ้นรูปแผ่นขัดได้จึงต้องใช้ปริมาณสารละลายพอลิยูรีเทนในการขึ้นรูปแผ่นขัดของเส้นใยผักตบชวามากกว่าเส้นใยกล้วย

2.3 ผลการทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำของแผ่นขัดเส้นใยกล้วยและเส้นใยผักตบชวา นำแผ่นตัดแบ่งบางส่วนจำนวน 10 กรัม แช่น้ำ 30 นาที และนำแผ่นขัดขึ้นมาชั่งน้ำหนักทุก 5 นาที พบว่าแผ่นขัดเส้นใยกล้วยไม่ดูดซับน้ำและแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวามีขนาด 60 เมช มีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น 1 กรัม หลังจากแช่น้ำผ่านไป 5 นาที และไม่ดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอีก จากการดูดซับน้ำของแผ่นขัดผักตบชวา 60 เมช สอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราการขัดผิวแซฟไฟร์ เพราะแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวามีขนาด 60 เมช ดูดซับสารละลายอนุภาคซิลิกาขณะขัดผิวด้วยเครื่อง CMP ปริมาณการดูดซับน้ำของแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวา แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ปริมาณการดูดซับน้ำของแผ่นขัดผักตบชวา

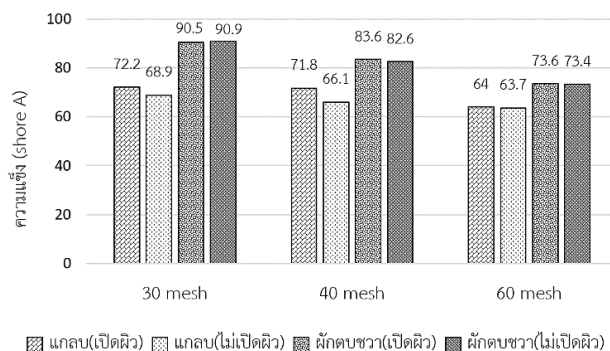
2.4 ผลการทดสอบความหนาแน่น พบว่าเส้นใยผักตบชวามีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยกล้วยและเส้นใยกล้วยขนาดเล็กมีความหนาแน่นลดลง แต่เส้นใยผักตบชวามีขนาดเล็กจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากภายในเส้นใยผักตบชวามีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ [19] จึงดูดซับสารละลายพอลิยูรีเทนส่งผลให้เส้นใยผักตบชวามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจากน้ำหนักของพอลิยูรีเทนที่เส้นใยดูดซับขณะขึ้นรูปแผ่นขัด แต่เส้นใยกล้วยไม่ดูดซับสารละลายพอลิยูรีเทนน้ำหนักของเส้นใยกล้วยจึงไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในปริมาตรที่เท่ากันแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวาอาจจะมีน้ำหนักมากกว่าแผ่นขัดจากเส้นใยกล้วย ผลการทดสอบความหนาแน่น แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นขัด

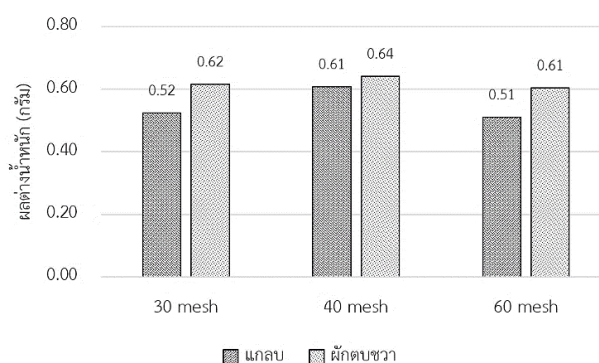
2.5 ผลการทดสอบความแข็ง แผ่นขัดเส้นใยกล้วยและแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวาทั้งสองด้าน ได้แก่ ด้านที่มีพอลิยูรีเทนเคลือบผิวและด้านที่ไม่มีพอลิยูรีเทนเคลือบผิว โดยเครื่องมือวัดความแข็งมีมาตรวัดตั้งแต่ 0-90

shore A [19] โดยค่าความแข็งเท่ากับ 0 shore A คือวัสดุที่มีความนิ่มยืดหยุ่นสูงเช่นเดียวกับขนมเยลลี่ [25] และที่ค่าความแข็ง 90 shore A คือวัสดุที่มีความแข็งไม่ยืดหยุ่นเช่นเดียวกับสนักรองเท้า [25] จากผลการทดสอบพบว่าแผ่นขัดเส้นใยผักตบชวามีค่าความแข็งในช่วง 70-90 shore A เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากไม่ยืดหยุ่น แผ่นขัดจากเส้นใยกล้วยมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 60-70 shore A เป็นวัสดุที่มีความแข็งปานกลางเช่นเดียวกับยางล้อรถ โดยขนาดของเส้นใยอาจไม่ส่งผลต่อความแข็ง เพราะจากผลการทดสอบความแข็งระหว่างด้านที่ไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวพอลิยูรีเทนมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นขัด

2.6 ผลการทดสอบความต้านทานการขีดถู ขณะขัดชิ้นงานตัวอย่างจากเส้นใยกล้วยโดยขัดพอลิยูรีเทนที่เคลือบผิวออกจนถึงชั้นของเส้นใย พบว่าเส้นใยกล้วยที่ถูกขัดด้วยลูกกลิ้งผิวหยาบมีลักษณะร่วน เป็นฝุ่นผงหลุดออกจากชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานตัวอย่างจากเส้นใยผักตบชวา ขณะขัดผิวพบว่าเส้นใยผักตบชวาหลุดออกมาพร้อมกับพอลิยูรีเทน ซึ่งในจำนวนรอบการขัดที่เท่ากัน ชิ้นงานตัวอย่างจากเส้นใยผักตบชวาหลุดออกมาในปริมาณที่มากกว่าชิ้นงานตัวอย่างจากเส้นใยกล้วย ดังนั้นแผ่นขัดจากเส้นใยผักตบชวาจึงมีลักษณะแข็งแต่ไม่เหนียวความต้านทานการขีดถูน้อยกว่าแผ่นขัดจากเส้นใยกล้วยซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าแต่มีความเหนียวมากกว่าความต้านทานการขีดถูจึงมากกว่า ผลการทดสอบการขีดถูแสดงดังภาพที่ 13

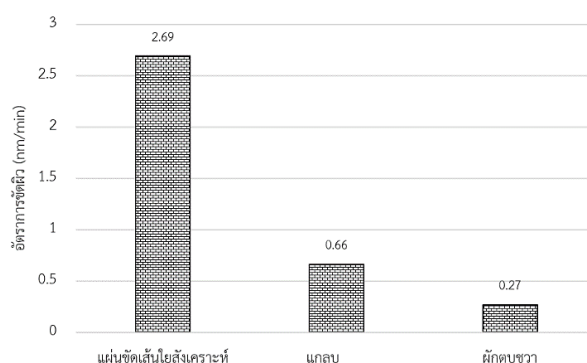


ภาพที่ 13 ผลการทดสอบความต้านทานการขีดถูของแผ่นขัด

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

แผ่นขัดจากเส้นใยกล้วยมีอัตราการขัดผิวแซฟไฟร์ดีกว่าแผ่นขัดจากเส้นใยผักตบชวา เนื่องจากลักษณะของเส้นใยกล้วยเป็นปล้องสั้นทรงเหลี่ยม เมื่อขึ้นรูปแผ่นขัดพื้นผิวของแผ่นขัดมีความหยาบขรุขระและไม่ดูดซับ

สารละลายอนุภาค ซิลิกา จึงเป็นตัวพาสารละลายให้สัมผัสกับผิวชิ้นงานได้ดี แผ่นขัดจากเส้นใยผักตบชวามีลักษณะเส้นใยเป็นเส้นยาวบาง เมื่อขึ้นรูปแผ่นขัด พื้นผิวของแผ่นขัดมีความเรียบและดูดซับสารละลายอนุภาคซิลิกาไว้ในเส้นใย ส่งผลให้แผ่นขัดขยายตัว จนความสูงของแผ่นขัดชนกับผิวของแผ่นเซฟไฟร์และไม่สามารถหมุนได้ในที่สุด ส่งผลให้อัตราการขัดผิวไม่ดี ดังนั้นเส้นใยกลบจึงมีความเหมาะสมสำหรับขึ้นรูปเป็นแผ่นขัด ถึงแม้ว่าแผ่นขัดจากเส้นใยกลบจะมีอัตราการขัดผิวดีกว่าแผ่นขัดจากเส้นใยผักตบชวา แต่อัตราการขัดผิวยังน้อยกว่าแผ่นขัดจากเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากการทดลองนี้ได้ใช้กลบสด โดยไม่ผ่านการให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกอนุภาคซิลิกาเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน อนุภาคของ ซิลิกาจึงไม่เพิ่มจำนวนมากขึ้นซึ่งอาจจะส่งผลให้อัตราการขัดผิวไม่ดี อัตราการขัดผิวเซฟไฟร์ แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 อัตราการขัดผิวเซฟไฟร์ด้วยเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ

เอกสารอ้างอิง

1. Yongpisanphob W. Industrial business trends in the years 2021-2023. Krungsri Bank. 2564. Thai <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Hi-tech-Industries/ElectricalAppliances/IO/io-Electrical-Appliances-21>
2. Electrical and Electronics. Faculty of Electrical and Electronics. Vocational Training Institute, Central Region 3, Singburi Technical 1. 2564. Thai. <https://sanong2003.tripod.com/icm1-03.htm>
3. Jianxiu S, Xiqu C, Jiaxi D, Renke K. Material removal rate in chemical-mechanical polishing of wafers based on particle trajectories. Hunan University
4. Noh K, Lai JY, Saka N, Chun JH. Mechanics, Mechanisms and Modeling of the Chemical Mechanical Polishing Process. Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology. Department of Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology. 2001.
5. Xin YB. Modeling of Pad-Wafer Contact Pressure Distribution in Chemical-Mechanical Polishing. after Technology, MEMC Electronic Materials, Inc. St. Peters. MO 63376.
6. Fujita T, Watanabe J. Pressure Distribution Control on Surface Conformable Polishing in Chemical Mechanical Planarization. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 4 (11) P5008-P5015. 2015

7. Testa F, Coetsier C, Carretier E, Ennahali M, Laborie B, Moulin P. Recycling a slurry for reuse in chemical mechanical planarization of tungsten wafer: effect of chemical adjustments and comparison between static and dynamic experiments. Aix Marseille University, Laboratory of Mechanics, Modeling and Clean Processes (M2P2 - UMR-CNRS 7340).
8. Borucki L, Sampurno Y, Philipossian A. Pad-Wafer-Slurry Interface Information from Force Data. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 8 (5) P3133-P3144. 2019.
9. Bauck L, Donis R. Slurry Pump Affects on CMP. The 2nd PacRim International Conference on Planarization CMP and its Application Technology. November 17-19. 2005.
10. Li Z, Borucki L, Koshiyama I, Philipossian A. Effect of Slurry Flow Rate on Tribological, Thermal and Removal Rate Attributes of Copper CMP. Journal of The Electrochemical Society, 151. 482-487. 2004
11. Kima S, Sakaa N, Chun JH. The Effect of Pad-Asperity Curvature on Material Removal Rate in Chemical-Mechanical Polishing. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC. Procedia CIRP 14, 42-47. 2014
12. Jeong S, Jeong K, Choi J, Jeong H. Analysis of Correlation between Pad Temperature and Asperity Angle in Chemical Mechanical Planarization. Graduated School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 46703. 2021.
13. Son J, Lee H. Contact-Area-Changeable CMP Conditioning for Enhancing Pad Lifetime. Department of Mechanical System Engineering, Tongmyong University, Busan. 2021.
14. Chansatarnpornkul S, Kato Y, Bun-athuek N, Khajornrungruang P, Suzuki K. Study on Polishing Pads using Organic Bamboo Fiber for Sapphire CMP Japan, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Fukuoka 820-8502
15. Supachai S, Chansatarnpornkul S, Kato Y, Bun-athuek N, Khajornrungruang P, Suzuki K. Development of Organic Polishing Pad by using Ground Bagasse Mixing with Polyurethane Japan, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Fukuoka 820-85026
16. Wikipedia [Internet]. Polyurethane-PU [updated 2015 May 21; cited 2021 Nov 22]. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/Polyurethane>.
17. Khantirat W, To-on P. Analysis Factors of husk power production from Rice Husk crusher by Using Design of Experiment. Industrial Engineering Assistance Symposium [Internet]. 2013 Oct 16. [cited 2021 Oct 20]. [about 7 p.] Available from: <http://www.dms.eng.su.ac.th/filebox/FileData/POM032.pdf>
18. Panchana P, Samana R, Somna K. Effect of improve the quality and sequence of mixing rice husk ash (RHA) on compressive strength of geopolymer. Annual Concrete Conference 11 [Internet]. 2016 Feb 17. [cited 2021 Oct 20]. [about 6 p.]: MAT136-MAT142. Available from: <http://softendev.lpru.ac.th/~prostd58115/research-management/backend/uploads/1533650610.pdf>
19. Sariphan K. The adsorption of oil by agricultural waste and the briquette production from adsorbent. Journal of renewable energy for community (J-REC). [Internet]. 2019 Feb 17. [cited 2021 Oct 18]. [about 7 p.] Available from: <http://reca.or.th/wp-content/uploads/2021/02/J-.pdf>



20. Thancharoen K. Utilization of water hyacinth Produced Cellulase from Thermotorelant Bacteria. Prawarun agricul tural journal. [Internet]. 2014 Dec 02. [cited 2021 Oct 19]. [about 8 p.]: 159-166
Available from: https://paj.rmu.ac.th/jn/home/journal_file/37.pdf
21. ZHAO D, Xinchun LU. Chemical mechanical polishing: Theory and experiment. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University. ISSN 2223-7690, 306-326.
22. kalupae N. Sound Absorption of Natural Rubber Filled with Fibers from the Trunk of Betel Palm and Sugar Palm [Degree of master of science in applied physics]. Songkla. Songkla university; 2019
23. Itokin [Internet]. Durometer Shore A. [updated 2010 May 21; cited 2021 Nov 22]. Available from: <http://www.itokin2000.com>
24. Rubber Testing Machine [Internet]. Rubber testing. [updated 2019 Dec 15; cited 2021 Nov 15].
Available from: <http://www.rubbertestingmachine.com>
25. AB All Techno [Internet]. Mohs hardness picks [updated 2018 May 05; cited 2021 Nov 10]. Available from: <https://www.aballtechno.com/home>.