

การพัฒนาพลาสติกสแตนต์จากขยะกระดาษและของเสียเคมีในห้องปฏิบัติการ: การประยุกต์ใช้หลัก 3Rs

ชุตติโชติ ปัทมดิลก^{1,*}, สุพจนา ลิทธิกุล¹, ศรัณย์รัศย์ เสนาสุธรรม¹,
ประจักษ์ บุญโสภณ², ธเนศ พรหมนิม² และ อรวิ บุญโยบล³

¹ภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพันธุศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

²ภาควิชาวิทยาการเภสัชกรรมและเภสัชอุตสาหกรรม คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

³ภาควิชาชีวเคมีและจุลชีววิทยา คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*อีเมลผู้ประพันธ์บทความ: chutichot.p@pharm.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การเรียนการสอนภาคปฏิบัติการและงานวิจัยด้านพิษวิทยาของนิสิต นักวิจัยและคณาจารย์ในภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพันธุศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งต้องใช้ตัวอย่างพิษมาสกัดและใช้ซิลิกาเจลในการแยกสารบริสุทธิ์จากพืช ก่อให้เกิดกากพืชและซิลิกาเจลใช้แล้วซึ่งเป็นของเสียเคมีในปริมาณมาก รวมถึงกระดาษรื้อทิ้งจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้น เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจึงมีแนวคิดในการนำมาแปรรูปและพัฒนาเป็นวัสดุวิทยาศาสตร์เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาพลาสติกสแตนต์ จำนวน 3 ชนิด จากขยะและของเสียเคมี สำหรับวางเครื่องแก้วกันกลม โดยใช้กระดาษ กากพืชและซิลิกาเจลใช้แล้ว เป็นส่วนประกอบหลักและใช้กาบแปงเปียกเป็นตัวประสานให้สามารถขึ้นรูปได้ แล้วอัดลงในแบบพิมพ์ที่สร้างขึ้น ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกสแตนต์ที่ได้ ได้แก่ การทนน้ำ การตก โดยพลาสติกสแตนต์จากกระดาษสามารถทนต่อแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดที่ 2.20 เมกะปาสกาล และทนต่อการกดทับได้มากที่สุด 25,650 นิวตัน ซึ่งมีความคงทน แข็งแรง สามารถใช้งานได้จริงในห้องปฏิบัติการ รองรับการใช้งานกับเครื่องแก้วที่มีลักษณะกันกลม ขนาด 25 - 2,000 มิลลิเมตร การพัฒนาพลาสติกสแตนต์ที่ใช้กาบแปงเปียกจากมันสำปะหลัง มีต้นทุนที่ถูกกว่าการใช้กาบลาเท็กซ์ พลาสติกสแตนต์ที่พัฒนาขึ้นมีต้นทุนต่อหน่วยตั้งแต่ 1.10 - 2.50 บาท ต่อชิ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกสแตนต์ที่มีจำหน่าย จะสามารถประหยัดงบประมาณในการจัดซื้อ 200 - 1,000 เท่าต่อชิ้น สนับสนุนแนวคิด 3Rs ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ ลดปริมาณขยะและของเสียเคมี และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย สอดคล้องกับแนวทางการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ในเชิงสร้างสรรค์ และการรีไซเคิลของเสีย เป็นการส่งเสริมการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การรีไซเคิล, ของเสียเคมี, ฐานรองเครื่องแก้วกันกลม, ห้องปฏิบัติการสีเขียว

Development of a Flask Stand from Waste Paper and Chemical Waste in the Laboratory: Application of the 3Rs.

Chutichot Pattamadilok^{1,*}, Supotchana Sitthigool¹, Sarunrus Senasuthum²,
Prajak Boonsopa², Thanath Prommin² and Orawee Bunyobon³

¹*Department of Pharmacognosy and Pharmaceutical Botany, Faculty of Pharmaceutical Sciences,
Chulalongkorn University, Pathum Wan, Bangkok 10330, Thailand*

²*Department of Pharmaceutics and Industrial Pharmacy, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn
University, Pathum Wan, Bangkok 10330, Thailand*

³*Department of Biochemistry and Microbiology, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University,
Pathum Wan, Bangkok 10330, Thailand*

*Corresponding author: chutichot.p@pharm.chula.ac.th

Abstract

Laboratory and phytochemical research conducted by students, researchers, and faculty members in the Department of Pharmacognosy and Pharmaceutical Botany, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University, requires plant samples for extraction and silica gel for isolation of pure compound. This results in large amount of marc, used silica gel as chemical waste, including used paper waiting to be destroyed. To reduce this waste, there is an idea to transform and develop these materials into scientific materials for laboratory use. This research aims to develop three types of flask stand from the waste for use with round-bottomed glassware. The main components are used paper, marc, and used silica gel. The binder made from tapioca starch, enabling the component mixture to be formed and pressed into molds. Physical properties of flask stand, including water resistance, drop test, and compression resistance, were studied. The paper-based flask stand can withstand an average compressive strength of up to 2.20 Mpa. and a maximum compressive strength of 25,650 N. These durable and robust flask stands are practical for laboratory use and are compatible with round-bottomed glassware ranging in size from 25 to 2,000 milliliters. The development of flask stands using cassava starch glue results in lower costs than latex glue. The developed flask stands have a unit cost of 1.10 - 2.50 baht per piece. Compared to commercially available flask stands, this represents a 200-1,000-fold cost saving per piece. This aligns with Chulalongkorn University's 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) concept, adding value to waste materials, reducing chemical waste and disposal costs. It promotes the creative utilization of waste materials and recycling, contributing to sustainable waste management.

Keywords: Recycling, Chemical Waste, Circular Economy, Green Laboratory, Waste Valorization

บทนำ

ภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพฤกษศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีการจัดการเรียนการสอนในระดับปริญญาบัณฑิตและบัณฑิตศึกษา และการวิจัย โดยในการปฏิบัติการของนิสิตและการวิจัยของนักวิจัยและคณาจารย์ในภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพฤกษศาสตร์ฯ โดยเฉพาะห้องปฏิบัติการเภสัชพฤกษศาสตร์ ซึ่งมีขอบข่ายครอบคลุมการสกัดแยกสารจากธรรมชาติ การพิสูจน์พืชสมุนไพรด้วยเทคนิคทางชีวโมเลกุล ตลอดจนการทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพของพืชสมุนไพร ซึ่งในการวิจัยดังกล่าวมีการใช้พืชเป็นตัวอย่างในการศึกษา นำมาสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ใช้ซิลิกาเจลในการแยกสารบริสุทธิ์จากพืชด้วยเทคนิคทางโครมาโทกราฟี มีการใช้วัสดุวิทยาศาสตร์ และสารเคมีจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดของเสียเคมีจากกากพืชที่เหลือจากการสกัด ซิลิกาเจลใช้แล้วจากกระบวนการแยกสารบริสุทธิ์จากพืช และของเสียเคมีจากตัวทำละลายอินทรีย์ปริมาณมากด้วยเช่นกัน

โดยภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพฤกษศาสตร์ฯ ใช้แนวปฏิบัติการจัดการของเสียเคมีตามแนวทางของศูนย์ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศปอส. จุฬา) กำหนดประเภทของเสียเคมีที่เกิดขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งออกเป็น 20 ประเภท (ศูนย์ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2568) ซึ่งพบว่าภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพฤกษศาสตร์ฯ มีปริมาณของเสียเคมีที่เกิดขึ้นมากที่สุด ได้แก่ ของเสียเคมีประเภท 10 (Oxygenate Waste) ซึ่งเป็นของเสียเคมีที่ประกอบด้วยสารเคมีที่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง เช่น เอทิลอะซิเตต อะซิโตน แอลกอฮอล์ รองลงมาเป็นของเสียเคมีประเภท 12 (Halogenate Waste) ซึ่งเป็นของเสียเคมีที่ประกอบด้วยสารเคมีที่มีฮาโลเจนอยู่ในโครงสร้าง เช่น ไคลอโรฟอร์มของเสียเคมีประเภท 11 (NPS Containing Waste) ซึ่งเป็นของเสียเคมีที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบของ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ เช่น อะซิโตนไนไตรล์ ไดมethylซัลไฟด์ และซิลิกาเจลที่ผ่านการใช้งานในการแยกสารบริสุทธิ์จากพืชด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี ถูกจัดเป็นของเสียเคมีประเภท 13.2 (Non-combustible Solid waste) ซึ่งเป็นของเสียที่เป็นของแข็งที่ไม่สามารถเผาได้ นอกจากนี้แล้ว ยังพบส่วนตัวอย่างพืชที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายแล้วเหลือเป็นกากพืชถูกจัดเป็นของเสียเคมีประเภท 13.1 (Combustible Solid Waste) ซึ่งเป็นของเสียที่เป็นของแข็งที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพฤกษศาสตร์ฯ ส่งกำจัดผ่าน ศปอส. จุฬา ซึ่งบริษัทกำจัดของเสียจะมารับและนำไปกำจัดต่อไป ในปี พ.ศ. 2568 ภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพฤกษศาสตร์ฯ มีของเสียเคมีทั้งหมด ปริมาณ 1,698.56 กิโลกรัม และมีค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัด จำนวน 47,225.48 บาท

การเรียนการสอนและงานวิจัยมีการใช้งานวัสดุวิทยาศาสตร์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์จำนวนมาก เครื่องมือที่มีลักษณะก้นกลม เช่น Round-bottom Flask ขนาดความจุต่างๆ, Evaporating Flask และ Solvent Receiving Flask ของเครื่องระเหยสุญญากาศ ซึ่งไม่สามารถวางบนพื้นราบ ต้องใช้พลาสติกสแตน (Flask Stand) เป็นอุปกรณ์ช่วยรองรับให้สามารถวางตั้งได้ เพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตาม พลาสติกสแตนที่มีจำหน่ายจากวัสดุชนิดต่าง ๆ เช่น พลาสติก ยาง เหล็ก หรือไม้คอร์ก ราคาจำหน่ายค่อนข้างสูง 500 - 2,500 บาทต่อชิ้น (บริษัท คลูลูล จำกัด, 2026), (บริษัท แล็บ วิลเล่ย์, 2026), (Exotique Mart lidia, 2026), (Hankerscientific, 2026), (NK Laboratory, 2023) กระบวนการผลิตด้วยวัสดุบางชนิดส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงต้องใช้เวลาในการกำจัดนานเมื่อหมดอายุการใช้งาน จึงเกิดแนวคิดใช้หลัก 3Rs ในการนำกระดาษที่ต้องทิ้งเป็นขยะ กากพืชและผงซิลิกาเจลใช้แล้วซึ่งเป็นของเสียเคมีจากห้องปฏิบัติการที่จะต้องส่งกำจัด มาแปรรูปเป็นวัสดุวิทยาศาสตร์ โดยประดิษฐ์เป็นพลาสติกสแตนสำหรับรองเครื่องแก้วก้นกลม ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้และนำของเสียจากห้องปฏิบัติการกลับมาใช้ซ้ำให้เกิดประโยชน์

การพัฒนาห้องปฏิบัติการให้มีความปลอดภัย มีความยั่งยืน มีการลดปริมาณการใช้ ลดค่าใช้จ่าย ตลอดจนการใช้งานอย่างคุ้มค่า ลดการใช้พลังงาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน เป็นหลักพื้นฐานในแนวคิดห้องปฏิบัติการสีเขียว (Green Laboratory) (สายรุ้ง ขาวสุภา, 2017) การส่งเสริมห้องปฏิบัติการ ให้มีความปลอดภัย มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ลดการใช้พลังงาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ต้องมีการพัฒนาระบบการจัดการห้องปฏิบัติการด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การจัดการสารเคมี การจัดการของเสียที่เป็นอันตราย การจัดการความปลอดภัย และการจัดการด้านพลังงาน (ปวีณา เครือนิล และคณะ, 2559)

การนำขยะหรือวัสดุเหลือใช้มาใช้ซ้ำให้เกิดประโยชน์โดยการรีไซเคิล ตัวอย่างเช่น ฤกษ์ โพธิเวส (2562) ได้ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษคราฟท์ โดยนำมากับเยื่อปอสาเพื่อผลิตเชือกสำหรับงานประดิษฐ์ กัลยา คงวุธ (2562) ได้ลดปริมาณขยะ โดยประดิษฐ์เป็นฐานรองเทียนเปเปอร์มาเช่จากกระดาษ ใช้ในการประดับและตกแต่งภายในอาคารสถานที่เพื่อความสวยงาม นอกจากนี้ พรพิมล อมรโชติ และคณะ (2545) ได้ศึกษาศักยภาพการใช้ประโยชน์เศษไม้ยางพาราเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมในการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดจากชีลื้อยไม้ยางพารา โดยใช้กาวยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ และ เฟืองฟ้า อุ่นอบ และคณะ (2549) มีการนำซิลิกาเจลใช้แล้วกลับมาใช้ซ้ำให้เกิดประโยชน์ โดยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สำหรับเป็นตัวดูดซับโลหะหนักในน้ำ เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียและลดปริมาณของโลหะหนัก

การศึกษาในครั้งนี้ เพื่อพัฒนาและต่อยอดงานจากงานนวัตกรรมฐานรองเครื่องแก้วกันกลม (Flask Stand) จากกระดาษข้อสอบ (ชุดข้อดี ปัทมดิลก และคณะ, 2568) โดยมีการปรับเปลี่ยนการประดิษฐ์พลาสติกสแตนจากกระดาษข้อสอบ เป็นการผลิตจากกระดาษที่เป็นขยะ เช่น เอกสารการเรียนการสอน เอกสารบทความวิชาการ และกระดาษอื่น ๆ ที่เลิกใช้แล้ว กากพีชที่ผ่านการสกัดแยกสารสำคัญจากธรรมชาติด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และซิลิกาเจลที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี ซึ่งกากพีชและซิลิกาเจลเป็นของเสียเคมีที่เกิดขึ้นจากห้องปฏิบัติการของภาควิชาฯ และเปลี่ยนจากการใช้ภาวลาเท็กซ์ เป็นการใช้อวบน้ำจากมันสำปะหลังแทนเพื่อลดต้นทุน ตลอดจนการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกสแตน สำหรับรองเครื่องแก้วกันกลมที่พัฒนาขึ้นใหม่ โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือ ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุวิทยาศาสตร์ ลดโลกร้อน ลดมลพิษ เป็นไปตามหลัก 3Rs ในการลดปริมาณขยะ (Reduce) การใช้ซ้ำให้คุ้มค่า (Reuse) และการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ตามนโยบายด้านบริหารจัดการขยะของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งกำหนดเป้าหมายลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นในมหาวิทยาลัย (นิธินันต์, 2565)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาอัตราส่วนของกระดาษ กากพีช ซิลิกาเจล และกากวบน้ำจากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการ ผลิตพลาสติกสแตน
2. เพื่อจัดทำพลาสติกสแตนจากกระดาษ กากพีชและซิลิกาเจลใช้แล้ว
3. เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกสแตนที่พัฒนาจากกระดาษ กากพีชและซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว
4. เพื่อศึกษาด้านทุนต่อหน่วยของพลาสติกสแตนที่พัฒนาจากกระดาษ กากพีชและซิลิกาเจลใช้แล้ว
5. เพื่อศึกษาปริมาณขยะและของเสียเคมีที่ใช้ในการผลิตเป็นของพลาสติกสแตนที่พัฒนาขึ้น

วิธีดำเนินการการวิจัย

1. วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1.1 วัสดุ กระดาษเก่าที่ต้องทิ้ง (เช่น กระดาษ A4 ใช้แล้ว เอกสารการเรียนการสอนที่ไม่ใช้แล้ว) กากพีช (ส่วนของลำต้น) เป็นตัวอย่างพีชที่ถูกบดเป็นผงและผ่านสกัดสารด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ แล้วนำมาผึ่งให้แห้ง ซิลิกาเจล (สำหรับ Column Chromatography) ที่ผ่านการใช้งานแล้ว แป้งมันสำปะหลัง สีเคลือบกันน้ำ วาสลิน แผ่นกระดาษอัด ปูนซีเมนต์ หายละเอียด ผ้าขาวบาง สก็อตเทป

1.2 อุปกรณ์ พลาสติกสแตน (เพื่อเป็นต้นแบบ) ถังน้ำ (สำหรับแช่กระดาษในการเตรียมเยื่อกระดาษ) แปรงทาสี ตะเกียบไม้ และตะแกรง

1.3 เครื่องมือ เครื่องย่อยกระดาษ เครื่องชั่ง เครื่องปั่น (blender) เครื่องผสม (mixer) เครื่องเจีย ตู้อบลมร้อน และเครื่อง Universal Testing Machine สำหรับทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เครื่องมือวัดความชื้น (HABOTEST HT73)

2. วิธีการ

2.1 การออกแบบและทำแม่พิมพ์ต้นแบบพลาสติกสแตน

1. ทำการศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะของพลาสติกสแตนแบบต่าง ๆ ที่มีใช้ภายในห้องปฏิบัติการ ในด้านการ ใช้งาน รูปทรงและขนาด

2. เลือกแบบพลาสติกสแตน ที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้เป็นต้นแบบ

3. ทำความสะอาดพลาสติกสแตนต้นแบบ ทาวาสลินให้ทั่ว เพื่อป้องกันการติดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ทำแม่พิมพ์ต้นแบบ

4. นำแผ่นกระดาษอัด ขนาด (กว้างxยาวxสูง) 20x20x6 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น มาทำเป็นคอกสี่เหลี่ยมกันแบบ

พิมพ์ โดยติดสก็อตเทปบริเวณรอยต่อทั้ง 4 มุม เพื่อป้องกันปูนซีเมนต์ไหลออก จากนั้นวางพลาสติกสแตนต้นแบบไว้ตรงกลางคอกสี่เหลี่ยมที่กั้นแบบพิมพ์

5. ผสมปูนซีเมนต์กับทรายละเอียดในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวมาหนัก 2 กิโลกรัมมาเติมน้ำปริมาตร 500 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน พักไว้ ประมาณ 5 นาที จากนั้นกวนผสมอีกครั้ง และเทลงบนพลาสติกสแตนต้นแบบที่อยู่ในคอกกันแบบพิมพ์ จนท่วมต้นแบบ ใช้ตะเกียบไม้เกลี่ยเพื่อให้แน่ใจว่าปูนซีเมนต์กระจายเต็มทั่วแบบ เคาะเพื่อไล่ฟองอากาศ และตั้งทิ้งไว้จนปูนซีเมนต์แข็งตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 วัน

6. แกะแผ่นกระดาษอัดกันคอกแบบพิมพ์ออก และค่อยๆ ดึงพลาสติกสแตนต้นแบบออกจากแบบพิมพ์ จะได้แบบพิมพ์ต้นแบบบล็อกปูนซีเมนต์ โดยแม่พิมพ์ต้นแบบพลาสติกสแตนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 13.2 เซนติเมตร และสูง 5.5 เซนติเมตร

2.2 การเตรียมเยื่อกระดาษ

1. นำกระดาษมาแยกคลิบดีดกระดาษและลวดเย็บกระดาษออก จากนั้นย่อยด้วยเครื่องย่อยกระดาษ
2. นำกระดาษที่ย่อยขนาดแล้วแช่น้ำ ในอัตราส่วนกระดาษ 1 กิโลกรัม : น้ำ 10 ลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษเปื่อยยุ่ย
3. กรองเยื่อกระดาษที่แช่น้ำผ่านผ้าขาวบาง แล้วใช้มือบีบน้ำออกจากเยื่อกระดาษที่เปื่อยยุ่ยให้พอหมาด เพื่อกำจัดสีหมึก พิมพ์ หมึกปากกา และสิ่งสกปรกให้ออกไปกับน้ำ จะได้เยื่อกระดาษที่อมน้ำ ซึ่งจะมีน้ำหนักระดาษเพิ่มขึ้นตามการอมน้ำ
4. นำเยื่อกระดาษที่กรองได้ใส่ลงในเครื่องปั่น เติมน้ำให้ท่วมเยื่อกระดาษ แล้วปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นความเร็วระดับปานกลาง เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทำการกรองด้วยผ้าขาวบาง บิดพอหมาด ๆ จะได้ก้อนเยื่อกระดาษที่อมน้ำ กระดาษแห้งน้ำหนัก 1 กิโลกรัม อมน้ำแล้วได้ก้อนเยื่อกระดาษ น้ำหนักรวม 3 กิโลกรัม โดยควบคุมปริมาณน้ำที่ผสมกับเยื่อกระดาษในอัตราส่วน 1:2 จะมีความหนืดเหมาะสมที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการต่อไป

2.3 การเตรียมกาวแป้งเปียก

โดยใช้แป้งมันสำปะหลัง น้ำหนัก 30 กรัม เติมน้ำ น้ำหนัก 500 กรัม คนผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปตั้งไฟบนเตาไฟฟ้าและคนตลอดเวลาจนแป้งจนสุก ใช้เวลาประมาณ 10 นาที จะได้กาวแป้งเปียกที่มีลักษณะใสและมีความหนืดข้น

2.4 การหาอัตราส่วนของกระดาษ กากพืช ซิลิกาเจล และกาวแป้งเปียกที่เหมาะสมสำหรับขึ้นแบบพลาสติกสแตน

โดยการหาอัตราส่วนระหว่างกระดาษและกาวแป้งเปียก กากพืชและกาวแป้งเปียก ซิลิกาเจลและกาวแป้งเปียก โดยใช้กระดาษ กากพืช ซิลิกาเจล น้ำหนักชนิดละ 50 กรัม และผสมกาวแป้งเปียกในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำหนด จากนั้นนำอัตราส่วนที่ผสมได้ ปั่นเป็นก้อนแล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง สังเกตลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้น แล้วเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม มาใช้สำหรับขึ้นแบบขึ้นงานพลาสติกสแตน

เมื่อได้อัตราส่วนระหว่างกระดาษและกาวแป้งเปียก กากพืชและกาวแป้งเปียก ซิลิกาเจลและกาวแป้งเปียกที่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้ว จึงเตรียมส่วนผสมดังกล่าวสำหรับขึ้นตอนต่อไป

2.5 การขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกสแตน

1. นำผ้าขาวบางมาปูทับบนแม่พิมพ์ต้นแบบที่เตรียมไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้เยื่อกระดาษ กากพืช และซิลิกาเจล ที่ผสมกาวแป้งเปียกแล้ว ไม่ติดแม่พิมพ์และสามารถดึงชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แบบได้ง่าย จากนั้นนำส่วนผสมระหว่างกระดาษและกาวแป้งเปียก หรือ กากพืชและกาวแป้งเปียก หรือ ซิลิกาเจลและกาวแป้งเปียก ที่เข้ากันดีแล้ว เทลงในแม่พิมพ์แล้วกดให้แน่นตามรูปทรงของแม่พิมพ์ เก็บส่วนเกินออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นค่อย ๆ ยกผ้าขาวบางขึ้นเพื่อแยกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

2. นำชิ้นงานมาเจาะรูตรงกลางไว้สำหรับระบายน้ำ แล้วตั้งผึ่งไว้ให้แห้ง ประมาณ 3-4 วัน กลับด้านชิ้นงานเพื่อให้แห้งเสมอกัน และตั้งทิ้งไว้อีกประมาณ 3-4 วัน

3. นำชิ้นงานไปอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นในชิ้นงานจนแห้งสนิท

4. เก็บรายละเอียดชิ้นงานให้เรียบร้อย โดยใช้เครื่องเจียเจียรตามขอบให้เรียบ

5. ทาสีเคลือบกันน้ำ แล้วผึ่งไว้ให้แห้ง นาน 1 วัน จากนั้นกลับด้านแล้วทาสีเคลือบกันน้ำอีกด้านหนึ่งแล้วผึ่งไว้ให้แห้งอีก 1 วัน จะได้พลาสติกสแตน จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ พลาสติกสแตนจากกระดาษ พลาสติกสแตนจากกากพืช และพลาสติกสแตนจากซิลิกาเจลใช้แล้ว

2.6 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

2.6.1 การทนน้ำ

นำชิ้นงานพลาสติกสแตนที่พัฒนาขึ้นทั้ง 3 ชนิด มาทดสอบการกันน้ำ โดยนำชิ้นงานแช่ลงในน้ำให้ลึกจากผิวน้ำ 30 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที ทำการทดสอบกับพลาสติกสแตนทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 3 ครั้ง จากนั้นสังเกตชิ้นงาน และได้วัดค่าความชื้นของ พลาสติกสแตนทั้ง 3 ชนิด ก่อนและหลังการแช่น้ำ เพื่อทดสอบการรั่วซึมของพลาสติกสแตนที่ผลิตขึ้นด้วยการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์แบบดิจิตอล. (สิรินาฏ น้อยพิทักษ์ และคณะ., 2562) ด้วยเครื่องมือ HABOTEST HT73 เครื่องจะแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้น มีหน่วยเป็น % RH

2.6.2 การตก

การทดสอบการตก (Nobili., 2016) โดยจำลองสถานการณ์การตกในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การตกอิสระ การกระแทกแบบเอียง/แนวนอน และอื่นๆ ด้วยวิธี Drop test เพื่อทดสอบความยืดหยุ่นแข็งแรงของชิ้นงาน ทดสอบโดยปล่อยชิ้นงานพลาสติกสแตนลงมาจากความสูงที่กำหนด 1 เมตร โดยปล่อยให้ตกในแนวด้านข้าง ด้านหน้าและด้านหลัง โดยทำการทดสอบกับพลาสติกสแตนทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 3 ครั้ง และสังเกตผลของลักษณะของชิ้นงานที่ตกกระทบพื้น

2.6.3 การทนต่อแรงอัดและการทนต่อการกดทับ

การทดสอบแรงอัดและทนต่อการกดทับ (Rong et al., 2000) เพื่อประเมินคุณสมบัติความแข็งแรงของชิ้นงาน พลาสติกสแตนที่สร้างขึ้นจากวัสดุแต่ละชนิด ได้แก่ กระดาษ กากพืช และซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว ว่าสามารถทนต่อแรงอัดและทนต่อการกดทับได้แตกต่างกันอย่างไร โดยใช้เครื่องมือ Universal Testing Machine หลังจากวางชิ้นงานพลาสติกสแตนบนแท่นบีบอัดแล้วตั้งค่าตามวิธีทดสอบ โดยเพิ่มแรงกดครั้งละ 25 นิวตัน อัตรากด 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ชิ้นงานพลาสติกสแตนจะถูกกดด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเริ่มเกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยเครื่องมือจะคำนวณแรงกดต่อชิ้นงาน ที่มีการบ่อนข้อมูลขนาด และความสูงของชิ้นงาน โดยจะแสดงเป็นค่า Ultimate Force มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และค่า Ultimate Stress มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (MPa) โดยทำการทดสอบกับพลาสติกสแตนทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 3 ครั้ง

2.7 การศึกษาต้นทุนต่อหน่วยของพลาสติกสแตนที่พัฒนาขึ้น

การศึกษาราคาของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตพลาสติกสแตนทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ พลาสติกสแตนจากกระดาษ จากกากพืช และจากซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว มีต้นทุนในการซื้อวัสดุต่าง ๆ มาใช้ในการจัดทำ โดยคำนวณต้นทุนต่อหน่วย (ชิ้น) และเปรียบเทียบกับราคาพลาสติกสแตนที่มีจำหน่าย

2.8 การศึกษาปริมาณขยะและของเสียเคมีที่ใช้ในการผลิตเป็นของพลาสติกสแตนที่พัฒนาขึ้น

ศึกษาปริมาณการใช้ของขยะจากกระดาษ กากพืชและซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว ในการประดิษฐ์พลาสติกสแตนที่พัฒนาขึ้นแต่ละชนิด ว่ามีปริมาณการนำขยะและของเสียเคมีที่ต้องส่งกำจัดมาใช้ในการผลิตปริมาณเท่าไร และสามารถประหยัดงบประมาณในการส่งกำจัดของเสียเคมีได้เท่าไร

ผลการศึกษา

1. การหาอัตราส่วนของกระดาษ กากพืช ซิลิกาเจล และกาบแปงเปียกจากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลาสติกสแตน

ในการศึกษาอัตราส่วนระหว่างกระดาษและกาบแปงเปียก กากพืชและกาบแปงเปียก ซิลิกาเจลและกาบแปงเปียก ที่เหมาะสมสามารถขึ้นรูปได้ ทั้งไว้ให้แห้งและสังเกตลักษณะของชิ้นงานที่ได้ ผลดัง ตารางที่ 1 โดยพิจารณาการเลือกอัตราส่วนของวัสดุแต่ละชนิดจากการขึ้นรูป ผิวสัมผัส และความคงตัวของชิ้นงาน โดยเลือกใช้วัสดุทั้ง 3 ชนิด ๆ ละเท่า ๆ กันที่ 50 กรัม เป็นตัวแทนในการศึกษาอัตราส่วน และจะทำการเพิ่มปริมาณวัสดุและกาบแปงเปียกตามอัตราส่วนที่เหมาะสม ในการผลิตพลาสติกสแตน ต่อไป

ตารางที่ 1 อัตราส่วนระหว่างวัสดุและกาบแปงเปียก และลักษณะของชิ้นงานที่ได้

วัสดุ (50 กรัม)	กาบแปงเปียก (กรัม)	ลักษณะของชิ้นงาน
กระดาษ	10	สามารถขึ้นเป็นก้อนได้ เยื่อกระดาษไม่กระจายตัวเมื่อแห้ง ผิวชิ้นงานไม่เรียบ
	20	สามารถขึ้นเป็นก้อนได้ เยื่อกระดาษไม่กระจายตัวเมื่อแห้ง ผิวชิ้นงานไม่เรียบ
	30	สามารถขึ้นเป็นก้อนได้ และผิวชิ้นงานเรียบ
	40	สามารถขึ้นเป็นก้อนได้ และผิวชิ้นงานเรียบ
	50	สามารถขึ้นเป็นก้อนได้ แต่มีความฉะของกาบ
	50	สามารถขึ้นเป็นก้อนได้ แต่จะมีส่วนที่ไม่ยึดเกาะ พอแห้งแล้วจะมี บางส่วนหลุดออกมา

วัสดุ (50 กรัม)	กาวแป้งเปียก (กรัม)	ลักษณะของชิ้นงาน
กากพิช	75	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ แต่พอแห้งแล้วชิ้นงานมีรอยแตกแยก เนื้อประสานกันไม่สนิท
	100	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ และผิวชิ้นงานเรียบ
	125	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ แต่ผิวชิ้นงานไม่เรียบ
	150	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ แต่มีความฉะของกาว
ซิลิกาเจล	40	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ แต่จะมีส่วนที่ไม่ยึดเกาะ พอแห้งแล้วมีเศษผงซิลิกาเจลดรหะหลุด
	50	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ และผิวชิ้นงานเรียบ
	60	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ แต่พอแห้งแล้วมีการยุบตัวเล็กน้อย
	70	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ แต่พอแห้งแล้วมีการยุบตัวมาก
	80	สามารถปั้นเป็นก้อนได้ ยุบตัวไม่คงรูป

จากตารางที่ 1 พบว่า อัตราส่วนระหว่างเยื่อกระดาษและกาวแป้งเปียกที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน คือ 50 : 30 กรัม และ 50 : 40 กรัม ซึ่งจะได้ชิ้นงานที่สามารถปั้นเป็นก้อนได้และผิวชิ้นงานเรียบ แต่เพื่อลดการใช้กาวแป้งเปียกก็สามารถนำอัตราส่วนเยื่อกระดาษและกาวแป้งเปียก 50 : 30 กรัม ไปใช้ในการผสมเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน สำหรับผลิตพลาสติกสแตนต่อไป

อัตราส่วนระหว่างกากพิชและกาวแป้งเปียกที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน คือ 50 : 100 กรัม ซึ่งสามารถปั้นเป็นก้อนได้และผิวชิ้นงานเรียบ สามารถนำอัตราส่วนในการผสมนี้ไปใช้ในการผสมเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน สำหรับผลิตพลาสติกสแตนต่อไป

อัตราส่วนระหว่างซิลิกาเจลและกาวแป้งเปียกที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน คือ 50 : 50 กรัม ซึ่งสามารถปั้นเป็นก้อนได้และผิวชิ้นงานเรียบ สามารถนำอัตราส่วนในการผสมนี้ไปใช้ในการผสมเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน สำหรับผลิตพลาสติกสแตนต่อไป

2. การจัดทำพลาสติกสแตนจากกระดาษ กากพิชและซิลิกาเจลใช้แล้ว

การขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกสแตนจากกระดาษ กากพิชและซิลิกาเจล โดยการผสมกับกาวแป้งเปียก ตามอัตราส่วนข้างต้น ในการขึ้นรูปชิ้นงานจากกระดาษ ใช้เยื่อกระดาษและกาวแป้งเปียก น้ำหนัก 1 กิโลกรัม และ 600 กรัม ตามลำดับ ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม นานประมาณ 10 นาที แล้วเทใส่ถุงพลาสติกหรือภาชนะปิดเพื่อควบคุมความชื้น รอเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป การขึ้นรูปชิ้นงานจากกากพิช ใช้กากพิชและกาวแป้งเปียก น้ำหนัก 1 และ 2 กิโลกรัม ตามลำดับ ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสม นานประมาณ 10 นาที แล้วเทใส่ถุงพลาสติกหรือภาชนะปิดเพื่อควบคุมความชื้น รอเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป ส่วนการขึ้นรูปชิ้นงานจากซิลิกาเจล ใช้ซิลิกาเจลและกาวแป้งเปียก อย่างละ 1 กิโลกรัม ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสม นานประมาณ 10 นาที แล้วเทใส่ถุงพลาสติกหรือภาชนะปิดเพื่อควบคุมความชื้น รอเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

นำส่วนผสมข้างต้นกดใส่แม่พิมพ์ต้นแบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.2 เซนติเมตร และสูง 5.5 เซนติเมตร โดยกดให้แน่นจนได้ชิ้นงาน ดึงออกจากแบบแม่พิมพ์ ดังภาพที่ 1 นำมาเจาะรู แล้วทำให้แห้ง จากนั้นจึงเจียขอบเก็บรายละเอียดให้เรียบ แล้วทาสีเคลือบกันน้ำ ดังภาพที่ 2



ก.



ข.



ค.

ภาพที่ 1 ก. แม่พิมพ์ต้นแบบ ข. กดใส่แม่พิมพ์ และ ค. ชิ้นงานที่ออกจากแม่พิมพ์



ก.



ข.



ค.

ภาพที่ 2 ชิ้นงานพลาสติกสแตนจาก ก. กระดาษ ข. กากพีช และ ค. ซิลิกาเจลใช้แล้ว

เมื่อตรวจสอบลักษณะชิ้นงานพลาสติกสแตนที่ได้ พบว่า ชิ้นงานพลาสติกสแตนจากซิลิกาเจลมีความคงรูปมากที่สุด มีการยุบตัวเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับขนาดแม่พิมพ์ต้นแบบ รองลงมาเป็นชิ้นงานพลาสติกสแตนกากพีชและจากกระดาษตามลำดับ ดังตารางที่ 2 นอกจากนี้ โดยวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการทำพลาสติกสแตน ในปริมาณเท่ากันจะสามารถสร้างจำนวนชิ้นงานได้ต่างกัน โดยวัสดุ น้ำหนัก 1 กิโลกรัม จะได้พลาสติกสแตนจากกระดาษ กากพีช และซิลิกาเจล จำนวน 8, 6 และ 3 ชิ้น ตามลำดับ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ลักษณะของชิ้นงานพลาสติกสแตนที่ทำจากวัสดุต่างๆ เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ต้นแบบ

วัสดุ	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	ค่าเฉลี่ยความสูง (ซม.)
กระดาษ	12.2	4.2
กากพีช	12.8	4.6
ผงซิลิกาเจล	13.0	5.3
แม่พิมพ์ต้นแบบ	13.2	5.5

ตารางที่ 3 จำนวนชิ้นงานพลาสติกสแตนที่ทำจากวัสดุแต่ละชนิด

วัสดุ (1 กิโลกรัม)	จำนวน (ชิ้น)
กระดาษ (ก่อนเตรียมเป็นเยื่อกระดาษ)	8
กากพีช	6
ซิลิกาเจล	3

3. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกสแตนที่พัฒนาจากกระดาษ กากพีชและซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว

3.1 การทนต่อน้ำ

การใช้งานพลาสติกสแตนในห้องปฏิบัติการจะต้องมีการสัมผัสกับน้ำที่ติดมากับกันเครื่องแก้วซึ่งอาจส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งาน จึงต้องมีการทาสีเคลือบกันน้ำเพื่อยืดอายุการใช้งาน เมื่อทดสอบการกันน้ำของชิ้นงานพลาสติกสแตนทั้ง 3 ชนิด ทั้งที่มีกระดาษ กากพีช และซิลิกาเจลเป็นส่วนประกอบ เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ทาสีเคลือบกันน้ำและไม่ทาสีเคลือบกันน้ำ โดยแช่ชิ้นงานในน้ำลึก 30 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที พบว่า ชิ้นงานพลาสติกสแตนที่ไม่ได้ทาสีเคลือบกันน้ำมีลักษณะบวมเนื่องจากน้ำซึมเข้าไปในชิ้นงาน และสามารถหักชิ้นงานได้ ส่วนชิ้นงานที่ทาสีเคลือบกันน้ำยังคงอยู่ในสภาพปกติเหมือนก่อนการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าการทาสีเคลือบกันน้ำสามารถยืดอายุการใช้งานของพลาสติกสแตนจากการสัมผัสน้ำได้ และได้วัดค่าความชื้นของ พลาสติกสแตนทั้ง 3 ชนิด ก่อนและหลังการแช่น้ำเพื่อทดสอบการรั่วซึมของพลาสติกสแตนที่ผลิตขึ้น พบว่า ค่าเฉลี่ย % ความชื้นของพลาสติกสแตนที่ผลิตจากกระดาษ กากพีช และซิลิกาเจล ก่อนแช่น้ำอยู่ในช่วง 11.70 - 12.87 %RH และหลังแช่น้ำ 30 นาทีอยู่ในช่วง 12.00 - 13.50 %RH ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการวัดค่าความชื้นของชิ้นงานพลาสติกสแตน

วัสดุ	ค่าความชื้น (%RH)		ท่าสีเคลือบ	ไม่ท่าสีเคลือบ
	ก่อน	หลัง		
กระดาศ	12.2	13.2	ปกติ	มีลักษณะบวมน้ำ แต่ชิ้นงานยังมีความคงรูปทรงอยู่ได้เมื่อนำขึ้นจากน้ำ และสามารถบีบเนื้อกระดาศออกได้ แยกจากชิ้นงานได้
	11.6	13.5		
	12.4	13.8		
	12.87 ± 0.31	13.50 ± 0.30		
กากพีช	12.8	12.6	ปกติ	มีลักษณะบวมน้ำ มีเศษกากพีชหลุดลอยอยู่ในภาชนะที่ทดสอบ ชิ้นงานยังสามารถคงรูปอยู่ได้ และชิ้นงานแยกย่อยเมื่อนำขึ้นจากน้ำ
	12.6	12.1		
	13.2	13.3		
	12.07 ± 0.42	12.70 ± 0.60		
ซิลิกาเจล	11.7	11.9	ปกติ	มีลักษณะบวมน้ำ ไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ มีผงซิลิกาเจลหลุดกระจายตัวออกมาตกอยู่ก้นภาชนะที่ทดสอบ
	11.3	11.6		
	12.1	12.5		
	11.70 ± 0.40	12.00 ± 0.46		

3.2 การตก

เพื่อทดสอบความยืดหยุ่นของพลาสติกสแตนที่ผลิตขึ้น โดยปล่อยชิ้นงานพลาสติกสแตนที่ทำจากกระดาศ กากพีช และซิลิกาเจล ให้ตกลงมาอย่างอิสระจากความสูง 1 เมตร ในแนวการตกกระทบด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้าง แล้วตรวจสอบสภาพชิ้นงานพบว่า เมื่อทดสอบครบ 3 ครั้งแล้วชิ้นงานที่ผลิตจากกระดาศและกากพีชไม่มีการแตกหัก พบเพียงมีรอยเล็กน้อยในด้านที่ตกกระทบพื้น ส่วนชิ้นงานจากซิลิกาเจลมีรอยยุบตัวเล็กน้อยในด้านที่ตกกระทบพื้นในครั้งแรก เริ่มมีรอยร้าวเกิดขึ้นเมื่อทดสอบครั้งที่ 2 และจะแตกหักในการทดสอบครั้งที่ 3 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลักษณะชิ้นงานพลาสติกสแตนที่ผ่านการทดสอบการตก

วัสดุ	ลักษณะชิ้นงาน
กระดาศ	ไม่มีการแตกหัก มีรอยในด้านที่ตกกระทบพื้น
กากพีช	ไม่มีการแตกหัก มีรอยในด้านที่ตกกระทบพื้น
ซิลิกาเจล	มีรอยร้าวและมีการแตกหัก

3.3 การทนต่อแรงอัดและการทนต่อการกดทับ

การทนต่อแรงอัดและการทนต่อการกดทับเป็นการประเมินคุณสมบัติความแข็งแรง ของชิ้นงานที่สร้างขึ้นจากวัสดุแต่ละชนิดพบว่า พลาสติกสแตนจากกระดาศสามารถทนต่อแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดที่ 2.20 เมกะปาสกาล และสามารถทนต่อการกดทับเฉลี่ยมากที่สุด 25,650 นิวตัน รองลงมาเป็นพลาสติกสแตนจากซิลิกาเจล ส่วนพลาสติกสแตนจากกากพีช มีค่าเฉลี่ยแรงอัดและการกดทับน้อยที่สุด ดังตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 การทนต่อแรงอัดของชิ้นงานพลาสติกสแตน

วัสดุ	แรงอัดสูงสุด (เมกะปาสกาล)			
	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ชิ้นงานที่ 3	ค่าเฉลี่ย
กระดาศ	2.01	2.28	2.31	2.20 ± 0.17
กากพีช	0.45	0.44	0.41	0.43 ± 0.02
ผงซิลิกาเจล	0.46	0.56	0.61	0.54 ± 0.08

ตารางที่ 7 การทนต่อการกัดทับของชิ้นงานพลาสติกสแตน

วัสดุ	การกัดทับสูงสุด (นิวตัน)			ค่าเฉลี่ย
	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ชิ้นงานที่ 3	
กระดาษ	24,300	26,150	26,500	25,650.0 ± 1,182.16
กากพีช	5,260	5,560	5,730	5,516.7 ± 237.98
ผงซิลิกาเจล	7,220	7,790	7,420	7,476.7 ± 289.19



ภาพที่ 3 การใช้ฐานรองเครื่องแก้วกันกลมจากกระดาษ กากพีช และผงซิลิกาเจล ในห้องปฏิบัติการ

4. การศึกษาดันทุนต่อหน่วยของพลาสติกสแตนที่พัฒนาจากกระดาษ กากพีชและซิลิกาเจลใช้แล้ว

การพัฒนาพลาสติกสแตนนี้ ใช้กระดาษและกากพีชซึ่งเป็นขยะ และซิลิกาเจลใช้แล้วซึ่งเป็นของเสียเคมีจากห้องปฏิบัติการวัสดุอื่นๆ ส่วนใหญ่เป็นของเหลือใช้หรือของที่มีใช้อยู่แล้วในหน่วยงาน วัสดุที่ต้องจัดซื้อเพิ่ม ได้แก่ แบงมันสำปะหลังและสียเคลือบกันน้ำ เมื่อคิดต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตพลาสติกสแตนจากกระดาษ กากพีช และซิลิกาเจล พบว่า พลาสติกสแตนที่ผลิตจากกากพีชมีต้นทุนต่อหน่วยสูงที่สุดที่ 2.5 บาท ต่อชิ้น รองลงมาเป็นพลาสติกสแตนจากซิลิกาเจลมีต้นทุน 2.3 บาท และจากกระดาษ 1.1 บาทต่อชิ้น ตามลำดับ ดังตารางที่ 8 เมื่อเทียบกับการผลิตพลาสติกสแตนจากกระดาษข้อสอบที่ใช้กาวลาเท็กซ์ มีต้นทุนในการผลิตอยู่ที่ 5 บาทต่อชิ้น ซึ่งพบว่าการพัฒนาพลาสติกสแตนนี้ใช้กาวแปะเป็ยจากมันสำปะหลัง มีต้นทุนที่ถูกกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับราคาพลาสติกสแตนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ซึ่งทำจากยาง พลาสติก เหล็ก และไม้อัด มีราคา ตั้งแต่ 500 - 2,500 บาทต่อชิ้น ขึ้นอยู่กับขนาดและวัสดุที่ทำ หากนำพลาสติกสแตนที่พัฒนาขึ้นนี้มาใช้ทดแทนจะสามารถประหยัดงบประมาณในการจัดซื้อได้ 200 - 1,000 เท่าต่อชิ้น

ตารางที่ 8 ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย (บาท) ของพลาสติกสแตนที่พัฒนาขึ้น

วัสดุ	ต้นทุนต่อหน่วย (บาท)
กระดาษ	1.1
กากพีช	2.5
ซิลิกาเจล	2.3
กระดาษข้อสอบ+กาวลาเท็กซ์	5.0

5. การศึกษาปริมาณขยะและของเสียเคมีที่ใช้ในการผลิตเป็นของพลาสติกสแตนที่พัฒนาขึ้น

โดยสามารถผลิตชิ้นงานพลาสติกสแตนจากวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่าง ๆ ได้รวมทั้งสิ้น 54 ชิ้น แบ่งเป็น ชิ้นงานที่ผลิตจากเยื่อกระดาษจำนวน 24 ชิ้น จากกากพีชจำนวน 18 ชิ้น และจากซิลิกาเจลใช้แล้วจำนวน 12 ชิ้น ซึ่งกระบวนการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวสามารถช่วยลดปริมาณขยะและกากของเสียเคมีจากห้องปฏิบัติการได้รวมกันมากกว่า 10 กิโลกรัม รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 9 นอกจากนี้ การนำซิลิกาเจลที่เป็นของเสียเคมีกลับมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตชิ้นงาน ยังสามารถช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัดของเสียเคมีลงได้อีกอีกิโลกรัมละ 50 บาท

ตารางที่ 9 แสดงปริมาณขยะและของเสียเคมีที่ใช้ในการผลิตเป็นของพลาสติกสแตนชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	จำนวน (ชิ้น)	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)
กระดาด	24	3
กากพืช	18	3
ซิลิกาเจล	12	4

อภิปรายผลการศึกษา

การผลิตพลาสติกสแตนจากกระดาด กากพืชและซิลิกาเจล โดยในขั้นตอนการหาอัตราส่วนของกระดาด: แป้งเปียก, กากพืช: แป้งเปียก และซิลิกาเจล: กาวแป้งเปียก ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลาสติกสแตนใช้อัตราส่วน 50:30, 50:100 และ 50:50 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวัสดุกากพืชและซิลิกาเจล มีอัตราส่วนการใช้กาวแป้งเปียกที่มากกว่าวัสดุจากกระดาด เนื่องจากผลิตพลาสติกสแตนจากกระดาดมีการใช้น้ำในการเตรียมเยื่อกระดาด ทำให้มีความชื้นมากในระดับหนึ่ง ทำให้ใช้ปริมาณกาวแป้งเปียกที่น้อยกว่าที่สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ต่างจากการผลิตจากกากพืชและผงซิลิกาเจล ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแห้งสนิท จึงต้องใช้ปริมาณกาวแป้งเปียกที่มากกว่าจึงจะสามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ นอกจากนี้แล้ว กากพืชมีโครงสร้างทางกายภาพที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กจึงสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พลาสติกสแตนจากกากพืชมีต้นทุนการผลิตต่อชิ้นสูงที่สุด และพลาสติกสแตนจากกระดาดจึงมีต้นทุนการผลิตต่อชิ้นน้อยที่สุด

พลาสติกสแตนที่ผลิตจากกระดาดสามารถทนต่อแรงอัดและการทนต่อการกดทับได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกสแตนจากกากพืชและซิลิกาเจล ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเยื่อกระดาดมีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง โดยเส้นใยเกิดการเรียงตัวและประสานกันอย่างหนาแน่น ส่งผลให้โครงสร้างสามารถกระจายแรงและต้านทานต่อการแตกหักหรือยุบตัวได้ดีเมื่อได้รับแรงกด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องการผลิตวัสดุก่อสร้างจากกระดาดใช้แล้วสองหน้าเพื่อลดการใช้วัสดุก่อสร้างของ สนั่น ตั้งสถิต และสมพงษ์ น้อยสระเมว (2561) ที่นำกระดาดเหลือใช้มาแช่น้ำเพื่อเตรียมเยื่อ แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกจนได้แผ่นกระดาดอัด ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงกดทับเฉลี่ยเท่ากับ 1.93 MPa ขณะที่พลาสติกสแตนที่ผลิตจากกระดาดในงานวิจัยนี้ มีการทนต่อการกดทับเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อย โดยอยู่ที่ 2.20 MPa เนื่องจากในกระบวนการผลิตมีการผสมกาวแป้งเปียกเพิ่มเติม จึงช่วยประสานเส้นใยและเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างของชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น

พลาสติกสแตนจากกากพืชมีค่าการกดทับเฉลี่ยเท่ากับ 0.43 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ เบญจรัตน์ หน่อชาย (2561) ที่พัฒนาไม้อัดจากตะเกียบใช้แล้ว ทำการต้มกับกรดธรรมชาติจากน้ำมะกรูด ทบและต้มตะเกียบให้เป็นเส้นใยผสมกาวแป้งเปียกแล้วอัดเป็นแผ่น ทำการทดสอบคุณสมบัติการกดทับ 8.00 MPa เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานมีการใช้เครื่องอัดลมร้อนส่งผลให้เนื้อชิ้นงานมีความหนาแน่นและแข็งแรงสูง แตกต่างจากพลาสติกสแตนจากกากพืชในงานวิจัยนี้ที่ขึ้นรูปโดยใช้แรงกดจากมือและปราศจากความร้อนช่วยในการอัดแน่น สอดคล้องกับการศึกษาของ กฤษฎาณ จำปาคำ (2568) ได้ทำการศึกษาเรื่องการพัฒนาแผ่นประกอบที่ผลิตจากเศษไม้เหลือทิ้งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และเศษพลาสติก PLA (polylactic acid) สำหรับประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรม โดยใช้เศษไม้ชนิดต่าง ๆ ที่เหลือทิ้งจากการแปรรูป พบว่า เมื่ออัดแผ่นไม้จากเศษไม้ผสมกับ PLA (60:40) ด้วยเครื่องอัดร้อน มีค่าแรงกดทับ เท่ากับ 9.35 MPa

พลาสติกสแตนที่ผลิตจากจากกระดาด กากพืชและซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 11.70 - 12.87 %RH จากการศึกษาของ กฤษฎาณ จำปาคำ, (2568) ได้รายงานค่าความชื้นของไม้แผ่นประกอบที่ผลิตจากไม้มะค่า เศษไม้อัด และไม้แดง อยู่ในช่วง 2.13 - 4.78 %RH ซึ่ง % ความชื้นน้อยกว่าค่าที่ได้จากพลาสติกสแตนที่ผลิตจากวัสดุทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตแผ่นประกอบใช้เครื่องอัดร้อน จึงมีความร้อนช่วยลดความชื้นจากวัสดุที่ผลิตได้

สรุปผลการศึกษา

การพัฒนาพลาสติกสแตนเป็นการนำกระดาดที่ต้องทิ้งเป็นขยะกลับมาใช้ซ้ำและเปลี่ยนรูป (Recycle) ให้เกิดประโยชน์ เพิ่มมูลค่า นอกจากนี้ กากพืชและซิลิกาเจลใช้แล้ว ยังเป็นของเสียจากห้องปฏิบัติการที่ต้องส่งกำจัด และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ โดยสามารถนำกลับมาเปลี่ยนรูปเป็นพลาสติกสแตนที่สามารถใช้ทดแทนวัสดุเดิมได้ โดยมีอัตราส่วนของกระดาด กากพืช ซิลิกาเจล และกาวแป้งเปียกจากมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกสแตน คือ 50:30, 50:100 และ 50:50 ตามลำดับ สามารถผลิตพลาสติกสแตนด้วยวัสดุกระดาด กากพืช ซิลิกาเจล ได้เป็นจำนวน 24, 18 และ 12 อันตามลำดับ รวมทั้งหมด 54 ชิ้น การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกสแตนที่พัฒนาจากกระดาด กากพืชและซิลิกาเจล ได้แก่ การทนต่อน้ำ การตก และการทนต่อแรงอัดและการทน

ต่อการกดทับ พบว่า พลาสติกสแตนจากกระดาษและกากพืชมีความคงทน แข็งแรงกว่าพลาสติกสแตนจากผลิตจากซิลิกาเจล ซึ่งพลาสติกสแตนที่ผลิตจากวัสดุทั้ง 3 ชนิด สามารถใช้งานได้จริงในห้องปฏิบัติการ ทดแทนอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่ต้องจัดซื้อในราคาสูง มีต้นทุนการผลิตต่อหน่วย (ชิ้น) 1.1 - 2.5 บาท สามารถประหยัดงบประมาณในการจัดซื้อพลาสติกสแตนลงได้ 200 - 1,000 เท่าต่อชิ้น การพัฒนาพลาสติกสแตนที่ใช้กาบแปงเปียกจากมันสำปะหลัง มีต้นทุนที่ถูกกว่าการใช้กาบลาเท็กซ์ และจากการนำการของเสียมาทำการรีไซเคิล ยังสามารถลดปริมาณขยะและของเสียเคมีที่ต้องส่งกำจัดมากกว่า 10 กิโลกรัม และยังลดค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัด ที่เกิดขึ้นลงได้อีก 50 บาทต่อของเสียเคมี 1 กิโลกรัม

ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี่ยังมีข้อจำกัดบางประการ (Study Limitations) ที่ควรนำไปพัฒนาต่อยอด ได้แก่ การไม่ได้ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมกาบแปงเปียกจากมันสำปะหลัง ซึ่งแปรผันตามระดับความเข้มข้นและความหนืดที่แตกต่างกันอันอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการยึดเกาะ นอกจากนี้ ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงผลกระทบของชนิดกากพืชแต่ละประเภท เช่น ใบ เปลือกต้น และเนื้อไม้ ซึ่งขึ้นส่วนแต่ละประเภทเมื่อผ่านกระบวนการบดละเอียดแล้ว จะได้ขนาดและลักษณะของเส้นใยที่แตกต่างกัน ความแตกต่างดังกล่าวอาจส่งผลต่อปริมาณการดูดซับเนื้อกาบแปงเปียกในขั้นตอนการผสมขึ้นรูป ตลอดจนอาจทำให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ผันแปรไป ดังนั้น ประเด็นดังกล่าวจึงเป็นหัวข้อสำคัญที่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อพัฒนาวัสดุให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

แนวทางการขยายผลโครงการวิจัยนี้ สามารถทำได้โดยการสร้างความร่วมมือห้องปฏิบัติการอื่น ๆ และหน่วยปฏิบัติการกลางของคณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผ่านการจัดกิจกรรมสาธิตกระบวนการผลิตและขยายกำลังการผลิตชิ้นงาน เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานภายในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ของคณะฯ ทั้งนี้ แนวทางดังกล่าวไม่เพียงแต่เป็นการนำกระดาษหรือเอกสารทำลายทิ้งกลับมาแปรสภาพเพื่อใช้ซ้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุดเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการนำกากของเสียเคมีบางประเภทจากห้องปฏิบัติการมารีไซเคิลเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตพลาสติกสแตน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณกากของเสียเคมีและลดภาระค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการทรัพยากรตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน และช่วยให้คณะฯ สามารถประหยัดงบประมาณในการจัดซื้อวัสดุวิทยาศาสตร์ได้อีกทางหนึ่ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ฝ่ายอาคารสถานที่ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับปูนซีเมนต์และทรายละเอียดสำหรับสร้างแม่พิมพ์บล็อกซีเมนต์ต้นแบบ และภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพฤกษศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนงบประมาณ

เอกสารอ้างอิง

- กฤษฎาณ จำปาคำ. (2568). *การพัฒนาแผ่นประกอบที่ผลิตจากเศษไม้เหลือทิ้งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- กฤษณะ โพธิเวส. (2562). *การพัฒนากระดาษรีไซเคิลเพื่อผลิตเชื้อเพลิงสำหรับงานประดิษฐ์* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- กัลยา คงวุธ. (2562). *Paper mache candle egg cartons* [รายงานปฏิบัติงานสหกิจศึกษา]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยสยาม.
- ชุตติโชติ ปัทมดิลก, สุพจนา สิทธิกุล, ศรัณย์รัชย์ เสนาสุธรรม, ประจักษ์ บุญโสภณ และ ธนศ พรหมนิม. (2568). *นวัตกรรมฐานรองเครื่องแก้วกันกลม (Flask Stand) จากกระดาษข้อสอบ* (น. 345-355). ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายบุคลากรสายสนับสนุน คณะเภสัชศาสตร์แห่งประเทศไทย (คสภท.) ครั้งที่ 18*. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- นิธิกานต์ ปภารักษ์. (2565). *จุฬาฯ กับนโยบายด้านการบริหารจัดการขยะและขยะอันตราย ขับเคลื่อนความยั่งยืนในจุฬาฯ*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สืบค้นจาก <https://www.chula.ac.th/news/95183>
- บริษัท คลูจูล จำกัด. (2026). *แท่นวางพลาสติกกันกลม*. สืบค้นจาก <https://shorturl.asia/1e2Jl>
- บริษัท แล็บ วาลเลย์. (2026). *ฐานตั้งขวดกันกลม*. สืบค้นจาก <https://www.labvalley.com/product/11000071530000582>
- บริษัท อินเทอร์เน็ตเซ็นแนล จำกัด. (2025). *การทดสอบการตกคืออะไรและช่วยรับประกันความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อย่างไร*. Qualitest. สืบค้นจาก <https://www.worldoftest.com/th/articles/what-is-the-drop-test#how-does-the-drop-test-work>

- เบญจรัตน์ หน่อชาย. (2561). *ความเป็นไปได้ทางด้านกายภาพในการพัฒนาไม้อัดจากตะเกียบไม้ไผ่ประเภทใช้แล้วทิ้ง* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ประกาศจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2566). *เรื่องนโยบายด้านการบริหารจัดการขยะ พ.ศ. 2566*. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารระบบกายภาพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปวีณา เครือนิล, อัครินทร์ ไพบุลย์พานิช, ลัดดาวลย์ เยียดยัด, ดวงกมล เชาวนศรีหมุด และ อนันตณัฐ กันต์ธัญญรัตน์. (2559). การสำรวจความเข้าใจของบุคลากรห้องปฏิบัติการเคมีภายในกรมวิทยาศาสตร์บริการต่อความเป็นสีเขียวอย่างยั่งยืน. *Bulletin of Applied Sciences*, 5(5), 71-78.
- พรพิมล อมรโชติ, วรธรรม อุ่นจิตติชัย, จรัส ชัยชนะ, ลัทพล เลิศลักษณ์ปรีชา และ คมสันต์ คล้ายมู. (2545). *การศึกษาศักยภาพการใช้ประโยชน์ของเศษไม้ยางพาราเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- เฟื่องฟ้า อุ่นอบ และ ยุติ เชียววัฒนา. (2549). *การเตรียมตัวดูดซับจากซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สำหรับกำจัดโลหะ* (รายงานวิจัย). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ศูนย์ความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2568). *การจำแนกของเสียสารเคมี 20 ประเภท*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สนั่น ตั้งสฤติ, และ สมพงษ์ น้อยสระแก้ว. (2561). *การผลิตวัสดุก่อสร้างจากกระดาษใช้แล้ว 2 หน้าเพื่อลดการใช้วัสดุก่อสร้าง* (รายงานการวิจัย). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สายรุ้ง ชาวสุภา. (2560). แนวคิดเคมีสีเขียวกับการจัดการเรียนการสอน. *Kasetsart Journal of Social Sciences*, 38(1), 518-528.
- สิรินาถ น้อยพิทักษ์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, อมรฤทธิ พุทธิพิพัฒน์ขจร และ อมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร. (2562). *การพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบปริมาณความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย* (รายงานวิจัย). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- Exotique Mart India. (2026). *Fun Chem Rubber Flask Stand*. Amazon. Retrieved from <https://www.amazon.in/FunChem-Rubber-Diameter-Durable-Support/dp/B0C6MB6KC1?th=1>
- Hankerscientific. (2026). *Flask stand*. <https://www.hankerscientific.co.in/product/flask-stand>
- NK Laboratory. (2023). *เป้าแก้ววิทยาศาสตร์ [รูปภาพ]*. Facebook. <https://www.facebook.com/photo?fbid=671861681613155&set=a.621566539976003>
- Nobili, M. A. (2016). Fundamental limitations to high-precision tests of the universality of free fall by dropping atoms. *Physical Review A*, 93(2), 023617.
- Rong, Z., James, G., Goodwin, K., Jothimurugesan, J., Spivey, J., & Santosh, K. G. (2000). Comparison of attrition test methods: ASTM Standard Fluidized Bed vs Jet Cup. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39(5), 1155-1158.