

ศักยภาพของข้าวฟ่างสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ กระดาษ และพลังงานชีวภาพ Potential of Sorghum for Pulp, Paper and Bioenergy Industries

อรวรรณ พาณิชยเจริญ*
Orrawan Panichjareen*

ศูนย์นวัตกรรมและผลิตภัณฑ์ บริษัท เอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน) จังหวัดราชบุรี 70110

Innovation and Development Center, SCG Packaging Public Company Limited, Ratchaburi 70110, Thailand

Received: 08-06-2026, Revised: 25-06-2026, Accepted: 25-06-2026, Published: 22-09-2026

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของข้าวฟ่าง (*Sorghum* spp.) ในฐานะวัตถุดิบเส้นใยทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ กระดาษ และพลังงานชีวภาพ โดยทบทวนองค์ประกอบทางเคมี สัณฐานวิทยาของเส้นใย เทคโนโลยีการผลิตเยื่อ และสมบัติเยื่อและกระดาษ ข้าวฟ่างมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลสร้อยละ 38–45 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25–35 และลิกนินร้อยละ 15–20 รวมถึงมีปริมาณซิลิกาต่ำ ซึ่งลดปัญหาการเกิดตะกรันในระบบผลิตเยื่อ กระบวนการโซดา-แอนทราควิโนนให้ประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการโซดาและคราฟต์ โดยให้ผลผลิตเยื่อร้อยละ 45–58 และสามารถใช้สารด่างในระดับต่ำกว่า ส่งผลให้ลดการใช้สารเคมี ต้นทุนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนอกจากนี้ เยื่อที่ได้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ ความแปรปรวนของวัตถุดิบ ความไม่สม่ำเสมอตามฤดูกาล และปัญหาด้านโลจิสติกส์ในการจัดเก็บและขนส่งวัตถุดิบสมัยใหม่ ในระบบผลิตเยื่อ กระบวนการโซดา-แอนทราควิโนน (soda-AQ process) ให้ประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการโซดา (soda process) และคราฟต์ (kraft process) โดยให้ผลผลิตเยื่อ (pulp yield) ร้อยละ 45–58 และใช้สารด่างที่มีค่า active alkali ต่ำกว่า ส่งผลให้ลดการใช้สารเคมี ต้นทุน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : ข้าวฟ่าง, เยื่อกระดาษ, พลังงานชีวภาพ, โรงกลั่นชีวภาพ, เศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน

Abstract

This review article aims to evaluate the potential of sorghum (*Sorghum* spp.) as an alternative lignocellulosic feedstock for the pulp and paper and bioenergy industries. The study systematically reviews its chemical composition, fiber morphology, pulping technologies, and pulp and paper properties. Sorghum biomass contains 38–45% cellulose, 25–35% hemicellulose, and 15–20% lignin, along with relatively low silica content, which helps reduce scaling problems in pulping systems. Among the pulping methods evaluated, the soda-anthraquinone (soda-AQ) process shows superior performance compared to conventional soda and kraft processes. It provides a higher pulp yield of 45–58% and operates at lower active alkali demand, resulting in reduced chemical consumption, lower production cost, and improved environmental performance. The resulting pulp is suitable for printing and writing paper as well as packaging paper applications. However, key limitations include raw material variability, seasonal biomass availability, and logistical challenges related to harvesting, storage, and transportation. Future research should focus on optimizing the soda-

AQ process, improving sorghum fiber quality through breeding, and developing efficient biomass supply chain systems to support industrial-scale and sustainable utilization.

Keywords: Sorghum, Pulp and paper, Bioenergy, Biorefinery, Circular bioeconomy

1. บทนำ

ประเทศไทยให้ความสำคัญกับข้าวฟ่างในเชิงยุทธศาสตร์ โดยหน่วยงานภาครัฐด้านการเกษตรได้สนับสนุนการวิจัยและพัฒนาพันธุ์ รวมถึงเทคโนโลยีการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อส่งเสริมให้ข้าวฟ่างเป็นพืชเศรษฐกิจและวัตถุดิบชีวมวลทางเลือกสำหรับภาคอุตสาหกรรม (วิภาวรรณ และคณะ, 2561) การลงทุนด้านวิจัยดังกล่าวสะท้อนแนวทางการใช้ประโยชน์ชีวมวลอย่างครบวงจร ซึ่งมุ่งสร้างมูลค่าเพิ่มและความยั่งยืนทางเศรษฐกิจในระยะยาว ในขณะเดียวกัน อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษทั่วโลกกำลังเผชิญกับความท้าทายจากความต้องการวัตถุดิบเส้นใยที่เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ทรัพยากรไม้จากป่าปลูกมีข้อจำกัดด้านพื้นที่เพาะปลูก ระยะเวลาในการเติบโต และประเด็นด้านความยั่งยืน ส่งผลให้เกิดความสนใจในการใช้วัตถุดิบ ลิกโนเซลลูโลสจากพืชที่ไม่ใช่ไม้ (non-wood fibers) มากขึ้น (Li et al., 2023) อย่างไรก็ตาม วัตถุดิบ non-wood หลายชนิด เช่น ฟางข้าวและเศษวัสดุทางการเกษตร มักมีปริมาณเถ้าและซิลิกาสูง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการเกิดตะกรัน (scaling) ในระบบกู้คืนสารเคมี เพิ่มต้นทุนการผลิต และลดประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเยื่อ (Khaleghian et al., 2017; Li et al., 2023) ภายใต้บริบทดังกล่าว ข้าวฟ่างจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะวัตถุดิบชีวมวลทางเลือก เนื่องจากมีศักยภาพในการให้ผลผลิตชีวมวลสูง เจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายอุตสาหกรรม ทั้งการผลิตเยื่อกระดาษ เชื้อเพลิงชีวภาพ และพลังงานหมุนเวียน (Ameen et al., 2024; Yu, 2024) อย่างไรก็ตาม หลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดข้าวฟ่าง เศษเหลือทางการเกษตร เช่น ลำต้นและใบ มักถูกกำจัดด้วยการเผาในที่โล่ง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ก๊าซเรือนกระจก และมลพิษทางอากาศ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ สุขภาพของประชาชน และสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Scarlat et al., 2010; Moreira et al., 2025)

การนำชีวมวลข้าวฟ่างมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ พลังงานชีวภาพ และระบบโรงกลั่นชีวภาพแบบบูรณาการ (Integrated Biorefinery) จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ลดการเผาในที่โล่ง และสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน (Circular Bioeconomy) อย่างยั่งยืน (Cherubini, 2010; Li et al., 2018; Ameen et al., 2024; Scarlat et al., 2010; Yu, 2024) กรอบแนวคิดของการใช้ประโยชน์ชีวมวลข้าวฟ่างในอุตสาหกรรมดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 1 แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี การผลิตเยื่อ และการใช้ประโยชน์ด้านพลังงานของข้าวฟ่างในเชิงแยกส่วน แต่การทบทวนองค์ความรู้แบบบูรณาการที่เชื่อมโยงศักยภาพด้านเยื่อกระดาษ พลังงานชีวภาพ และแนวคิดโรงกลั่นชีวภาพ เพื่อประเมินศักยภาพเชิงอุตสาหกรรมร่วมกับผลกระทบด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมอย่างครอบคลุม ยังมิได้อยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะในบริบทของประเทศเขตร้อนและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Cherubini, 2010; Li et al., 2018; Ameen et al., 2024)

ดังนั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพเชิงบูรณาการของข้าวฟ่าง โดยมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากชากลำต้นและใบหลังการเก็บเกี่ยวเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อ กระดาษ และพลังงานชีวภาพ พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อจำกัด ช่องว่างงานวิจัย และแนวโน้มการพัฒนาเพื่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน



ภาพที่ 1 แนวคิดของการใช้ประโยชน์ชีวมวลข้าวฟ่างในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ พลังงานชีวภาพ และระบบเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน

ที่มา: สร้างโดยผู้เขียนด้วย ChatGPT AI โดยอ้างอิงแนวคิดจาก Scarlat et al. (2010), Ameen et al. (2024) และ Yu (2024)

2. การศึกษาและทบทวนวรรณกรรม

บทความปริทัศน์นี้จัดโครงสร้างการทบทวนวรรณกรรมออกเป็น 5 หัวข้อที่เชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่ศักยภาพของข้าวฟ่างในฐานะวัตถุดิบชีวมวล องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเส้นใย เทคโนโลยีการผลิตเยื่อคุณสมบัติของเยื่อและกระดาษ ตลอดจนแนวคิดโรงกลั่นชีวมวลเพื่อการใช้ประโยชน์อย่างครบวงจร

2.1 ข้าวฟ่างในฐานะวัตถุดิบชีวมวลลิกโนเซลลูโลส

ข้าวฟ่างถูกจัดเป็นพืชพลังงานศักยภาพสูง (high potential energy crop) เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตชีวมวลต่อพื้นที่สูง และสามารถปลูกได้ในพื้นที่ดินเสื่อมโทรมหรือพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมต่อพืชอาหารหลัก ส่งผลให้ไม่เกิดการแข่งขันโดยตรงกับทรัพยากรอาหาร (food vs. fuel competition) โดยเฉพาะข้าวฟ่างหวานซึ่งมีปริมาณน้ำตาลในลำต้นสูง และข้าวฟ่างพลังงานที่ให้มวลชีวภาพลำต้นและใบจำนวนมาก ทำให้เหมาะต่อการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมชีวภาพและพลังงานหมุนเวียน (Ameen et al., 2024) จากมุมมองด้านองค์ประกอบทางเคมี ข้าวฟ่างประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยทั่วไปลำต้นข้าวฟ่างมีปริมาณเซลลูโลสประมาณร้อยละ 30–45 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20–30 และลิกนินร้อยละ 15–25 ซึ่งทำให้สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกแทนไม้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษได้ (Li et al., 2018) อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบดังกล่าวอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามพันธุ์พืช สภาพแวดล้อม และระยะเวลาเก็บเกี่ยว

ในด้านโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา เส้นใยข้าวฟ่างมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นถึงปานกลางเมื่อเทียบกับไม้เนื้อแข็ง แต่มีผนังเซลล์ค่อนข้างบาง ส่งผลให้สามารถย่อยสลายและแยกเส้นใยได้ง่ายในกระบวนการทางเคมี

และกิ่งเคมี โดยเฉพาะกระบวนการ CTMP (Chemi-Thermomechanical Pulping) ซึ่งใช้สารเคมีร่วมกับความร้อนและแรงกลในการแยกเส้นใย คุณสมบัตินี้เป็นข้อได้เปรียบต่อการผลิตเยื่อที่ต้องการสมดุลระหว่างความแข็งแรงของเส้นใยและการใช้พลังงานในระดับปานกลาง (Li et al., 2023)

อย่างไรก็ตาม การนำข้าวฟ่างมาใช้ในการระดับอุตสาหกรรมยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ความหนาแน่นของชีวมวลที่ค่อนข้างต่ำ ปริมาณเถ้าและซิลิกาที่อาจส่งผลต่อกระบวนการผลิต รวมถึงความแปรปรวนของคุณสมบัติวัตถุดิบหลังการเก็บเกี่ยว ดังนั้นการจัดการวัตถุดิบตั้งแต่ขั้นตอนการเก็บเกี่ยว การลดขนาด และการควบคุมความชื้น จึงมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเยื่อ โดยสรุป ข้าวฟ่างเป็นวัตถุดิบชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่มีศักยภาพสูง ทั้งในด้านความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาอุตสาหกรรมชีวภาพสมัยใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียนที่กำลังได้รับความสำคัญในระดับสากล (Ameen et al., 2024; Li et al., 2018)

2.2 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเส้นใยของข้าวฟ่าง

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวฟ่างมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมในกระบวนการผลิตเยื่อ โดยเฉพาะสัดส่วนของลิกนินซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อความยาก-ง่ายในการแยกเส้นใย หากลิกนินมีปริมาณสูงจะทำให้ต้องใช้สารเคมีหรือพลังงานในการปรุ้งเยื่อเพิ่มขึ้น ในขณะที่เอมิเซลลูโลสมีบทบาทช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใย ส่งผลต่อความแข็งแรงของกระดาษที่ได้ อย่างไรก็ตาม การมีเอมิเซลลูโลสในปริมาณสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้นในผลิตภัณฑ์กระดาษ (Ameen et al., 2024)

ในด้านเถ้า (Ash content) และซิลิกา พบว่าข้าวฟ่างมีปริมาณต่ำกว่าฟางข้าว (Khaleghian et al., 2017) แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีผลต่อกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะปัญหาการสึกกร่อนของอุปกรณ์ และการเกิดคราบสะสมในระบบผลิตเยื่อ ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตและต้นทุนการบำรุงรักษา ดังนั้นการคัดเลือกวัตถุดิบและการควบคุมคุณภาพชีวมวลจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม (Li et al., 2023) ในส่วนของสมบัติเส้น พบว่า เส้นใยข้าวฟ่างมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นถึงปานกลาง โดยมีความยาวเส้นใยเฉลี่ยต่ำกว่าไม้เนื้อแข็ง แต่มีความยืดหยุ่นค่อนข้างดี เนื่องจากผนังเซลล์มีความบางกว่าวัตถุดิบประเภทไม้ ส่งผลให้สามารถเกิดการยุบตัวและการเชื่อมประสานระหว่างเส้นใยได้ดีในแผ่นกระดาษ คุณสมบัตินี้มีผลเชิงบวกต่อความหนาแน่นและความเรียบของแผ่นกระดาษ (Christman, 2019) อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงเชิงกลของเยื่อที่ได้จากข้าวฟ่างอาจมีข้อจำกัดเมื่อเทียบกับเยื่อจากไม้ เนื่องจากความยาวเส้นใยที่สั้นกว่า ซึ่งมีผลต่อสมบัติแรงดึง (tensile strength) และแรงฉีกขาด (tear resistance) ของกระดาษ ดังนั้นในเชิงอุตสาหกรรมจึงมักมีการนำข้าวฟ่างไปผสมกับเยื่อจากไม้หรือวัตถุดิบชนิดอื่น เพื่อปรับสมดุลของสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ (Wistara & Fatriasari, 2023) นอกจากนี้ ความแตกต่างของสมบัติเส้นใยยังขึ้นอยู่กับส่วนของพืชที่นำมาใช้ เช่น ลำต้นตอนล่างมักมีความหนาแน่นและปริมาณลิกนินสูงกว่าส่วนต้นบน ในขณะที่ส่วนใบมีเส้นใยสั้นกว่าและมีองค์ประกอบของเอมิเซลลูโลสสูงกว่า ทำให้สมบัติของเยื่อที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การแยกส่วนวัตถุดิบก่อนกระบวนการผลิตจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยควบคุมคุณภาพของเยื่อได้ (Li et al., 2023)

โดยสรุป องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเส้นใยของข้าวฟ่างมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด และเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดศักยภาพในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมพลังงานชีวภาพ การเข้าใจความแปรปรวนขององค์ประกอบเหล่านี้จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปข้าวฟ่างให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในระดับอุตสาหกรรม

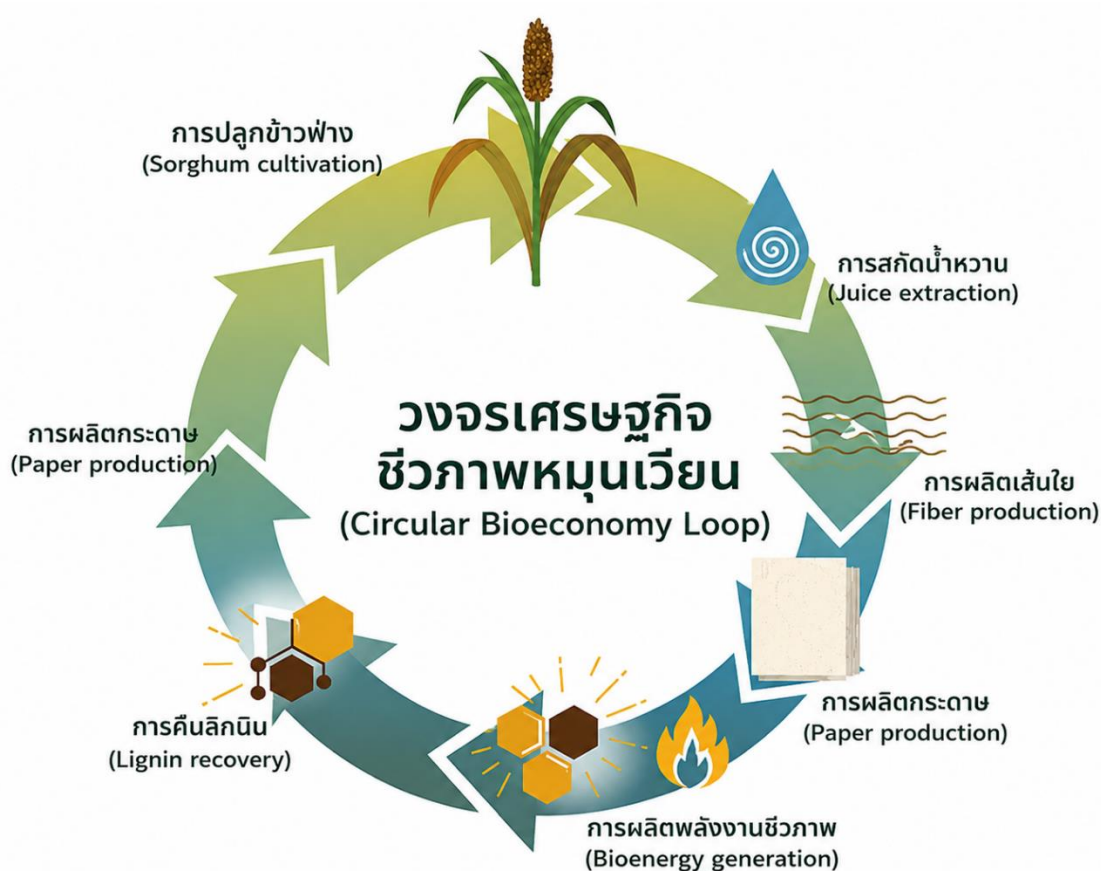
2.3 เทคโนโลยีการผลิตเยื่อจากข้าวฟ่าง

การผลิตเยื่อจากข้าวฟ่างจัดอยู่ในกลุ่มกระบวนการผลิตเยื่อจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสชนิดที่ไม่ใช่ไม้ (Non-wood lignocellulosic biomass) ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการทางเคมีเป็นหลัก ได้แก่ กระบวนการโซดา (Soda pulping) กระบวนการโซดา-แอนทราควิโนน (Soda-Anthraquinone pulping) และกระบวนการคราฟท์ (Kraft pulping) เนื่องจากสามารถช่วยในการกำจัดลิกนินและแยกเส้นใยออกจากโครงสร้างพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Khristova & Gabir, 1990; Jahan et al., 2021) ในบรรดากระบวนการดังกล่าว กระบวนการโซดา-แอนทราควิโนนได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับวัตถุดิบทางการเกษตร เนื่องจากการเติมแอนทราควิโนน (AQ) ในระบบการต้มเยื่อสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox catalyst) ช่วยเพิ่มอัตราการสลายตัวของลิกนินและลดการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต ส่งผลให้ได้ผลผลิตเยื่อสูงขึ้นและมีคุณสมบัติเส้นใยที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการโซดาแบบดั้งเดิม (Khristova & Gabir, 1990) สำหรับกระบวนการคราฟท์ ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีหลักในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ได้มีการนำมาศึกษาเกี่ยวกับข้าวฟ่างและวัตถุดิบชนิด non-wood อื่น ๆ โดย Fatriasari et al. (2015) รายงานว่าการผลิตเยื่อคราฟท์จากขานข้าวฟ่างหวานสามารถให้ผลผลิตเยื่อและสมบัติเชิงกลของกระดาษในระดับที่เหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการต้มเยื่อ เช่น ความเข้มข้นของด่าง อุณหภูมิ และระยะเวลาในการต้ม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อระดับการกำจัดลิกนินและการคงอยู่ของคาร์โบไฮเดรตในเยื่อ โดยทั่วไป กระบวนการผลิตเยื่อจากวัตถุดิบ non-wood รวมถึงข้าวฟ่าง จะมีพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ ได้แก่ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (chemical charge) อุณหภูมิการต้ม ระยะเวลาการปรุงเยื่อ (cooking time) และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารละลาย (liquor-to-solid ratio) ปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อการสลายตัวของลิกนิน การรักษาโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต และคุณภาพสุดท้ายของเยื่อที่ได้ (Li et al., 2023) นอกจากนี้ ความแตกต่างของกระบวนการยังส่งผลต่อสมมูลระหว่างผลผลิตเยื่อ (pulp yield) และความแข็งแรงของเส้นใย โดยกระบวนการที่ใช้สภาวะรุนแรงมากขึ้นอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน แต่ในขณะเดียวกันก็อาจทำให้เกิดการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตและลดคุณสมบัติเชิงกลของเยื่อ ดังนั้นการเลือกสภาวะการผลิตที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อจากข้าวฟ่างให้มีความสมดุลทั้งด้านผลผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยสรุป เทคโนโลยีการผลิตเยื่อจากข้าวฟ่างสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการเคมีหลักในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การปรับเงื่อนไขกระบวนการให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของวัตถุดิบยังคงเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของเยื่อในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งได้แสดงการวิเคราะห์และอภิปรายผลในหัวข้อ 3

2.4 คุณสมบัติของเยื่อและกระดาษจากข้าวฟ่าง

คุณสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากข้าวฟ่างมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับชนิดของวัตถุดิบ กระบวนการผลิตเยื่อ และสภาวะการปรุงเยื่อ โดยคุณภาพของกระดาษโดยทั่วไปจะถูกประเมินผ่านตัวชี้วัดเชิงกลที่สำคัญ ได้แก่ ค่าดัชนีแรงดึง (tensile index) ค่าดัชนีแรงฉีก (tear index) และค่าดัชนีแรงดันทะลุ (burst index) ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการรับแรงและความแข็งแรงของโครงสร้างแผ่นกระดาษจากการศึกษาที่ผ่านมา Fatriasari et al. (2015) รายงานว่าเยื่อคราฟท์ที่ผลิตจากขานข้าวฟ่างหวานแสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของสมบัติเชิงกลของกระดาษ โดยค่าดัชนีแรงดึงและแรงฉีกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามสภาวะการผลิตเยื่อและระดับการฟอกเยื่อ (pulping and bleaching conditions) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการควบคุมกระบวนการผลิตมีบทบาทสำคัญต่อการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย ในขณะเดียวกัน การศึกษาของ Khristova และ Gabir (1990) พบว่าเงื่อนไขของการต้มเยื่อ เช่น อุณหภูมิ

เวลา และความเข้มข้นของสารเคมี มีผลโดยตรงต่อทั้งผลผลิตเยื่อและสมบัติเชิงกายภาพของกระดาษ โดยสภาวะการต้มที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน ขณะเดียวกันยังช่วยรักษาโครงสร้างของเส้นใย ส่งผลให้ได้กระดาษที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นอกจากนี้ วรรณกรรมยังแสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลของกระดาษจากวัตถุดิบ non-wood lignocellulosic biomass มีความแตกต่างกันอย่างมากตามองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย เช่น ความยาวเส้นใย ความหนาผนังเซลล์ และสัดส่วนของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดพันธะระหว่างเส้นใย (fiber bonding) ภายในแผ่นกระดาษ (Li et al., 2023) โดยสรุป คุณสมบัติของเยื่อและกระดาษจากข้าวฟ่างขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและสภาวะกระบวนการผลิตเยื่อ การเข้าใจความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสำคัญต่อการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของกระดาษจากข้าวฟ่างให้เหมาะสมต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2 แนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน (Circular Bioeconomy Loop) สำหรับการใช้ประโยชน์ชีวมวลข้าวฟ่างในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ กระดาษ และพลังงานชีวภาพ

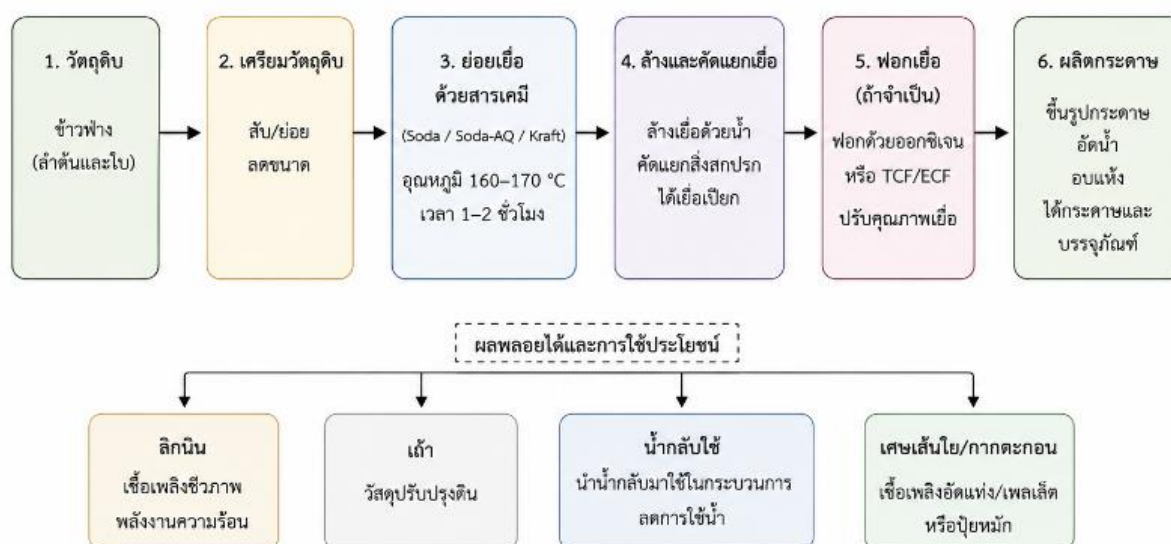
ที่มา: สร้างโดยผู้เขียนด้วย ChatGPT AI อ้างอิงจากงานวิจัยของ Cherubini (2020), Jahan et al. (2021), Li et al. (2018), Ameen et al. (2024) และ Yu (2024)

2.5 ศักยภาพด้านพลังงานชีวภาพและแนวคิดโรงกลั่นชีวภาพ

ชีวมวลจากข้าวฟ่างเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพ (bioenergy) เนื่องจากมีองค์ประกอบลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่สามารถแปรรูปได้ทั้งด้วยกระบวนการชีวเคมี (biochemical conversion) และกระบวนการเทอร์โมเคมี (thermochemical conversion) ส่งผลให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์พลังงานได้หลากหลายรูปแบบ ตั้งแต่เชื้อเพลิงเหลว เช่น เอทานอลและบิวทานอล ไปจนถึงเชื้อเพลิงแข็ง เช่น เชื้อเพลิงอัดเม็ด และพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรง (Naik et al., 2010; Syuryawati et al., 2020;

Daengbussadee et al., 2025) ข้าวฟ่างหวาน (sweet sorghum) มีความโดดเด่นด้านการผลิตเอทานอลชีวภาพ เนื่องจากลำต้นมีปริมาณน้ำตาลที่สามารถสกัดและนำเข้าสู่กระบวนการหมักได้โดยตรง หรือผ่านการปรับสภาพเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสูง (Ameen et al., 2024; Moreira et al., 2025) ขณะเดียวกัน เศษเหลือจากการสกัดน้ำตาล เช่น กากชาน ลำต้น และใบ ยังคงมีองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานชีวมวล เยื่อกระดาษ หรือผลิตภัณฑ์ชีวภาพอื่น ๆ ที่มีมูลค่าเพิ่ม (Ameen et al., 2024; Moreira et al., 2025) ศักยภาพดังกล่าวสนับสนุนการพัฒนาข้าวฟ่างภายใต้แนวคิดโรงกลั่นชีวภาพ (biorefinery concept) ซึ่งมุ่งใช้ประโยชน์ชีวมวลอย่างครบวงจรเพื่อผลิตทั้งเชื้อเพลิงชีวภาพ เยื่อกระดาษ และสารเคมีชีวภาพมูลค่าสูงภายในระบบเดียวกัน โดยแต่ละส่วนของพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม เช่น น้ำตาลจากลำต้นสำหรับการหมัก กากลิกโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเยื่อ และลิกนินสำหรับการผลิตพลังงานหรือสารประกอบฟีนอลิก แนวทางดังกล่าวช่วยเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ ลดปริมาณของเสีย และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรชีวมวลอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (Cherubini, 2010; Li et al., 2018; Jahan et al., 2021) สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน ดังแสดงในภาพที่ 2

โดยสรุป แนวคิดโรงกลั่นชีวภาพร่วมกับการใช้ข้าวฟ่างเป็นวัตถุดิบหลัก สามารถเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์ชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านพลังงาน วัสดุ และสารเคมีชีวภาพ อีกทั้งยังสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมสีเขียวและเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน (bio-circular economy) อย่างยั่งยืนในระยะยาว



ภาพที่ 3 กระบวนการผลิตเยื่อจากชีวมวลข้าวฟ่างสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

ที่มา: เรียบเรียงจากงานวิจัยของ Khristova and Gabor (1990), Fatriasari et al. (2015) และ Li et al. (2023)

การเลือกกระบวนการผลิตเยื่อที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อคุณภาพของเยื่อ ผลผลิตเยื่อ การใช้สารเคมี และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการโซดา-AQ และคราฟท์ได้รับความนิยมสำหรับการผลิตเยื่อจากวัตถุดิบ non-wood เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินและช่วยรักษาคุณภาพของเส้นใยได้ (Khristova & Gabor, 1990; Fatriasari et al., 2015) กระบวนการผลิตเยื่อจากชีวมวลข้าวฟ่างดังแสดงในภาพที่ 3-จากกระบวนการผลิตเยื่อดังกล่าว จะเห็นได้ว่าชีวมวลข้าวฟ่างสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในบริบทของการพัฒนาอุตสาหกรรมที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ การใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้ เช่น ลิกนิน เถ้า และน้ำกลับใช้ ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและสนับสนุนแนวคิด

เศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียนในมิติด้านสิ่งแวดล้อม การนำชีวมวลข้าวฟ่างมาใช้ประโยชน์ในลักษณะดังกล่าว ช่วยลดการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรในที่โล่ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การเปลี่ยนจากระบบ open burning สู่การใช้ประโยชน์เชิงอุตสาหกรรมจึงมีบทบาทสำคัญต่อการลดผลกระทบด้านคุณภาพอากาศและการพัฒนาที่ยั่งยืน (Scarlat et al., 2010; Moreira et al., 2025) แนวคิดโรงกลั่นชีวภาพ (biorefinery) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นกรอบการพัฒนาที่สามารถแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงาน เชื้อเพลิง และสารเคมีมูลค่าสูงภายในระบบเดียว (Cherubini, 2010; Naik et al., 2010) ดังแสดงในภาพที่ 4 จึงสะท้อนให้เห็นถึงการบูรณาการระหว่างภาคการเกษตร อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงและกระดาษ และอุตสาหกรรมพลังงานชีวภาพ ซึ่งนำไปสู่ระบบการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและยั่งยืนในระยะยาว ภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียนที่เชื่อมโยงการใช้ประโยชน์จากชีวมวลอย่างครบวงจรตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ

การใช้ประโยชน์ชีวมวลข้าวฟ่างแบบบูรณาการ สู่เชื้อกระดาษ พลังงานชีวภาพ และเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน



ภาพที่ 4 แผนภาพเชิงแนวคิดของการใช้ประโยชน์ชีวมวลข้าวฟ่างในอุตสาหกรรมพลังงานชีวภาพ เยื่อกระดาษ และระบบเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน

ที่มา: สร้างโดยผู้เขียนด้วย ChatGPT AI อ้างอิงจากงานวิจัยของ Ameen et al. (2024), Cherubini (2020), Yu (2024), Li et al. (2018), Scarlat et al. (2010) และ Moreira et al. (2025)

3. การวิเคราะห์และอภิปรายผล

จากการทบทวนและสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ ผลที่ได้จากบทความวิชาการนี้สามารถจัดระเบียบออกเป็น 4 ประเด็นหลัก ๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ศักยภาพและข้อจำกัดของข้าวฟ่างในฐานะวัตถุดิบชีวมวลลิกโนเซลลูโลส

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ข้าวฟ่างมีศักยภาพสูงในการเป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตชีวมวลสูง และสามารถเพาะปลูกได้ในพื้นที่แห้งแล้งเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ปลูกเชิงอุตสาหกรรม (Ameen et al., 2024; Yu, 2024) อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยยังมีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตเยื่อ โดยมีสัดส่วนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เอื้อต่อการเกิดโครงสร้างกระดาษ ขณะที่ปริมาณซิลิกาต่ำกว่าฟางข้าว ช่วยลดปัญหาการเกิดตะกอนในระบบกักเก็บสารเคมี (Khaleghian et al., 2017; Christman, 2019)

ในด้านกระบวนการผลิตเยื่อ ข้าวฟ่างสามารถนำมาใช้ได้ทั้งกระบวนการโซดา (Soda pulping), โซดา-แอนทราควิโนน (Soda-AQ pulping) และคราฟท์ (Kraft pulping) ซึ่งแต่ละกระบวนการมีความแตกต่างกันทั้งด้านเงื่อนไขการผลิต ผลผลิตเยื่อ และคุณภาพเส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยกระบวนการโซดาใช้สภาวะ active alkali ประมาณร้อยละ 12–18 ที่อุณหภูมิ 160–170 องศาเซลเซียส และเวลา 90–120 นาที ให้ผลผลิตเยื่อประมาณร้อยละ 45–55 ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตเยื่อจากวัสดุ non-wood ที่ต้องการกระบวนการไม่ซับซ้อน (Khristova & Gabir, 1990; Elzaki et al., 2020) ในขณะที่กระบวนการโซดา-แอนทราควิโนน หรือเรียกว่า โซดา-AQ แสดงประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เนื่องจากการเติมแอนทราควิโนนช่วยเพิ่ม selectivity ของปฏิกิริยา ทำให้การกำจัดลิกนินมีประสิทธิภาพมากขึ้นและช่วยลดการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต ส่งผลให้ได้ผลผลิตเยื่อสูงขึ้นในช่วงประมาณร้อยละ 48–58 พร้อมค่าคัปปา (kappa number) ต่ำลงเมื่อเทียบกับกระบวนการโซดาทั่วไป (Elzaki et al., 2020; Khristova & Gabir, 1990; Sixta, 2006)

ตารางที่ 5 สภาวะการผลิตเยื่อทั่วไปสำหรับเส้นใยเยื่อกระดาษ

กระบวนการผลิตเยื่อ	Active Alkali (ร้อยละ)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ผลผลิตเยื่อ (ร้อยละ)	Kappa number
Soda	12–18	160–170	90–120	45–55	15–25
Soda-AQ	10–14	150–165	60–90	48–58	15–25
Kraft	14–18	165–175	90–120	45–52	15–25

หมายเหตุ: AQ = Anthraquinone; ค่าที่แสดงเป็นช่วงจากรายงานงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเยื่อจากเส้นใย non-wood

ที่มา: อ้างอิงจากงานวิจัยของ Khristova and Gabir (1990), Elzaki et al. (2020), Fatriasari et al. (2015), Francis et al. (2017), Christman (2019) และ Sixta (2006)

สำหรับกระบวนการคราฟท์ แม้จะให้เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงและเหมาะสมต่อการผลิตกระดาษบรรจุภัณฑ์ แต่การใช้กับวัตถุดิบประเภท non-wood รวมถึงข้าวฟ่าง ยังต้องคำนึงถึงปริมาณเถ้า ซิลิกา และสารอนินทรีย์ที่อาจก่อให้เกิดปัญหาในระบบกักเก็บสารเคมีและเพิ่มต้นทุนการดำเนินงานของโรงงาน (Fatriasari et al., 2015; Christman, 2019; Jahan et al., 2021; Li et al., 2023) นอกจากนี้ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตเยื่อ ได้แก่ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการต้ม อุณหภูมิ เวลาในการต้ม และอัตราส่วนของเหลวต่อวัตถุดิบ ซึ่งมีผลต่อการกำจัดลิกนินและการคงเหลือของคาร์โบไฮเดรตในเยื่อ (Sixta, 2006) โดยสรุปตารางที่ 5 แสดงสภาวะการผลิตเยื่อกระดาษให้เห็นว่าแม้กระบวนการทั้งสามจะมีช่วงผลผลิตที่ใกล้เคียงกัน แต่กระบวนการโซดา-AQ ให้ความสมดุลที่ดีที่สุดในระหว่างผลผลิตเยื่อ คุณภาพเส้นใย และประสิทธิภาพการใช้สารเคมี ทำให้เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมในอนาคต โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาพร้อมกับแนวคิดการใช้ประโยชน์ชีวมวลแบบครบวงจรในระบบโรงกลั่นชีวภาพ อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของชีวมวลข้าวฟ่างอาจแตกต่างกันตามสายพันธุ์ พื้นที่ปลูก และอายุการเก็บเกี่ยว ส่งผลต่อคุณภาพของเยื่อและ

ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ดังนั้น การควบคุมคุณภาพวัตถุดิบและการเลือกสภาวะการผลิตที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ความแตกต่างของผลผลิตเยื่อและสมบัติกระดาษที่รายงานในงานวิจัยต่าง ๆ ไม่ได้เกิดจากชนิดกระบวนการผลิตเยื่อเพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากสายพันธุ์ข้าวฟ่าง สภาพภูมิอากาศและพื้นที่ปลูก อายุเก็บเกี่ยว ตลอดจนสภาวะการผลิตเยื่อ เช่น ปริมาณสารเคมี อุณหภูมิ และระยะเวลาในการต้มเยื่อ (Li et al., 2018; Ameen et al., 2024; Li et al., 2023; Abdallah et al., 2024) ส่งผลให้ค่าผลผลิตเยื่อ ปริมาณลิกนินคงเหลือ และสมบัติเชิงกลของกระดาษแตกต่างกันระหว่างงานวิจัย (ตารางที่ 6)

ผลการสังเคราะห์วรรณกรรมในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างของผลผลิตเยื่อ คุณภาพเยื่อ และสมบัติของกระดาษจากข้าวฟ่างไม่ได้เกิดจากชนิดของกระบวนการผลิตเพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างลักษณะวัตถุดิบและสภาวะกระบวนการผลิต โดยเฉพาะสายพันธุ์ พื้นที่ปลูก อายุการเก็บเกี่ยว และชนิดของเศษเหลือข้าวฟ่าง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า อันเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน ผลผลิตเยื่อ และสมบัติเชิงกลของกระดาษ ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อจากข้าวฟ่างในระดับอุตสาหกรรมควรให้ความสำคัญกับการควบคุมคุณภาพวัตถุดิบควบคู่กับการปรับสภาวะการผลิตให้เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของชีวมวลแต่ละแหล่งกำเนิด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระยะยาว

เมื่อเปรียบเทียบอายุการเก็บเกี่ยว พบว่าข้าวฟ่างที่เก็บเกี่ยวในช่วง 4–5 เดือนหลังปลูก มักให้สมมูลที่เหมาะสมระหว่างปริมาณเซลลูโลส ความสามารถในการกำจัดลิกนิน และคุณภาพของเส้นใย จึงเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษ ในขณะที่การเก็บเกี่ยวล่าช้าเกิน 6 เดือนหลังปลูก ส่งผลให้ลิกนินสะสมเพิ่มขึ้นและต้องใช้สภาวะการต้มที่รุนแรงขึ้นเพื่อให้ได้ค่า kappa number ในระดับเดียวกัน ส่งผลต่อการใช้สารเคมีและต้นทุนการผลิตเยื่อ

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติการผลิตเยื่อจากเศษเหลือข้าวฟ่าง

ปัจจัยเปรียบเทียบ	ลักษณะความแตกต่าง	ผลต่อองค์ประกอบทางเคมี	ผลต่อผลผลิตเยื่อและคุณภาพเยื่อ	เอกสารอ้างอิง
สายพันธุ์ข้าวฟ่าง	Sweet sorghum, forage sorghum และ biomass sorghum มีลักษณะทางพันธุกรรมแตกต่างกัน	ปริมาณเซลลูโลส เหมิเซลลูโลส และลิกนินแตกต่างกัน โดยเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 35–46 และลิกนินร้อยละ 14–25	สายพันธุ์ที่มีเซลลูโลสสูงและลิกนินต่ำให้ผลผลิตเยื่อสูงกว่า ใช้สารเคมีน้อยกว่า และให้สมบัติกระดาษดีกว่า	Ameen et al. (2024), Li et al. (2023)
พื้นที่ปลูกและสภาพภูมิอากาศ	พื้นที่แห้งแล้ง พื้นที่ชลประทาน และสภาพดินแตกต่างกัน	พื้นที่แห้งแล้งมักมีลิกนินและเถ้าสูงกว่า ขณะที่พื้นที่อุดมสมบูรณ์มีสัดส่วนเซลลูโลสสูงกว่า	ต้องใช้สารเคมีในการกำจัดลิกนินแตกต่างกัน ส่งผลต่อค่า kappa number และผลผลิตเยื่อ	Yu (2024), Li et al. (2023)

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ปัจจัยเปรียบเทียบ	ลักษณะความแตกต่าง	ผลต่อองค์ประกอบทางเคมี	ผลต่อผลผลิตเยื่อและคุณภาพเยื่อ	เอกสารอ้างอิง
สายพันธุ์ข้าวฟ่าง	Sweet sorghum, forage sorghum และ biomass sorghum มีลักษณะทางพันธุกรรมแตกต่างกัน	ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินแตกต่างกัน โดยเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 35–46 และลิกนินร้อยละ 14–25	สายพันธุ์ที่มีเซลลูโลสสูงและลิกนินต่ำให้ผลผลิตเยื่อสูงกว่า ใช้สารเคมีน้อยกว่า และให้สมบัติกระดาษดีกว่า	Ameen et al. (2024), Li et al. (2023)
พื้นที่ปลูกและสภาพภูมิอากาศ	พื้นที่แห้งแล้ง พื้นที่ชลประทาน และสภาพดินแตกต่างกัน	พื้นที่แห้งแล้งมักมีลิกนินและเถ้าสูงกว่า ขณะที่พื้นที่อุดมสมบูรณ์มีสัดส่วนเซลลูโลสสูงกว่า	ต้องใช้สารเคมีในการกำจัดลิกนินแตกต่างกัน ส่งผลต่อค่า kappa number และผลผลิตเยื่อ	Yu (2024), Li et al. (2023)
อายุการเก็บเกี่ยว	ระยะอ่อน (2–3 เดือนหลังปลูก), ระยะกลาง (4–5 เดือนหลังปลูก) และระยะแก่ (6–8 เดือน หลังปลูก)	อายุเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณลิกนินและความหนาแน่นเซลล์เพิ่มขึ้น ขณะที่สัดส่วนเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลง	ระยะเก็บเกี่ยวกลางมักให้สมดุลที่ดีที่สุด ระหว่างผลผลิตเยื่อ ความแข็งแรงของเส้นใย และประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน ระยะอ่อนให้การกำจัดลิกนินง่าย และผลผลิตเยื่อสูง แต่ความแข็งแรงของเส้นใยต่ำกว่า ระยะกลางให้สมดุลที่ดีที่สุดระหว่างผลผลิตเยื่อและสมบัติกระดาษ ส่วนระยะแก่ให้เส้นใยแข็งแรงกว่าแต่ต้องใช้สารเคมีและพลังงานในการผลิตเยื่อสูงขึ้น	Yu (2024), Abdallah et al. (2024), Li et al. (2023)
ชนิดของเศษเหลือข้าวฟ่าง	Bagasse หลังสกัด น้ำหวาน และ straw จากลำต้นหรือใบ	Bagasse มีเซลลูโลสสูงกว่าและเถ้าต่ำกว่า straw	Bagasse ให้ผลผลิตเยื่อและสมบัติกระดาษดีกว่า เหมาะกับการผลิตเยื่อเชิงอุตสาหกรรม	Fatriasari et al. (2015), Li et al. (2018)
ความเข้มข้นต่าง	โดยทั่วไปอยู่ในช่วงร้อยละ 10–18	ช่วยเพิ่มการกำจัดลิกนิน แต่ส่งผลต่อการสูญเสียเฮมิเซลลูโลส	ต่างส่งผลต่อค่า kappa number แต่ทำให้ผลผลิตเยื่อลดลง	Khristova & Gabir (1990), Elzaki et al. (2020)
อุณหภูมิการต้มเยื่อ	ประมาณ 150–175 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิสูงช่วยละลายลิกนินได้ดีขึ้น	อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เซลลูโลสเสื่อมสภาพและผลผลิตเยื่อลดลง	Sixta (2006), Elzaki et al. (2020)
ระยะเวลาการต้มเยื่อ	ประมาณ 60–120 นาที	การต้มที่นานขึ้นช่วยลดลิกนินคงเหลือ	ค่า kappa ลดลง แต่ผลผลิตเยื่ออาจลดลงจากการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต	Sixta (2006), Elzaki et al. (2020)
กระบวนการผลิตเยื่อ	Soda, Soda-AQ และ Kraft	AQ ช่วยรักษาคาร์โบไฮเดรตและเพิ่ม selectivity ในการกำจัดลิกนิน	Soda-AQ มักให้ผลผลิตเยื่อสูงกว่า Soda ขณะที่ Kraft ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า	Khristova & Gabir (1990), Fatriasari et al. (2015), Christman (2019)

ตารางที่ 7 อายุเก็บเกี่ยวข้าวฟ่างแต่ละสายพันธุ์

ชนิดข้าวฟ่าง	อายุเก็บเกี่ยว (วัน)	เอกสารอ้างอิง
ข้าวฟ่างหวาน (Sweet sorghum)	120	Diver and Rinehart (2025)
ข้าวฟ่างอาหารสัตว์ (Forage sorghum)	75–80	TNAU Agritech Portal (2023)
ข้าวฟ่างพลังงาน (Biomass sorghum)	123	Morales et al. (2026)

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบอายุเก็บเกี่ยวและผลผลิตชีวมวลของข้าวฟ่างแต่ละประเภทที่มีศักยภาพสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อ กระดาษ และพลังงานชีวภาพ

ประเภทข้าวฟ่าง	อายุเก็บเกี่ยว ¹	ผลผลิตชีวมวลสด (ตัน/เฮกตาร์ ²)	ผลผลิตชีวมวลสด (ตัน/ไร่)	ลักษณะเด่น	ศักยภาพ ³
Sweet sorghum	4–5 เดือน	55–150	8.8–24.0	มีน้ำตาลสูงในลำต้น เหมาะสำหรับผลิต เอทานอลและใช้ชานเส้นใยผลิตเยื่อ	สูง
Forage sorghum	4–6 เดือน	50–100	8.0–16.0	ให้ผลผลิตชีวมวลสูง เหมาะสำหรับ อาหารสัตว์และชีวมวลพลังงาน	ปานกลาง–สูง
Biomass sorghum (Energy sorghum)	5–8 เดือน	80–200	12.8–32.0	สะสมชีวมวลลิกโนเซลลูโลสสูง ต้นขนาดใหญ่	สูงมาก
Grain sorghum	3–4 เดือน	25–60	4.0–9.6	มุ่งเน้นผลผลิตเมล็ดมากกว่าชีวมวล	ปานกลาง

หมายเหตุ: ¹อายุเก็บเกี่ยวโดยทั่วไป (เดือนหลังปลูก), ²1 เฮกตาร์ = 6.25 ไร่, ³ศักยภาพสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

ที่มา: ข้อมูลสังเคราะห์จากงานวิจัย Regassa and Wortmann (2014), Hu et al. (2022), Yu (2024), Diver and Rinehart (2025), TNAU Agritech Portal (2023), Nascimento et al. (2026) และ Ameen et al. (2024)

จากการตารางที่ 7 และ 8 แสดงให้เห็นว่าข้าวฟ่างแต่ละสายพันธุ์มีอายุเก็บเกี่ยวและผลผลิตชีวมวลที่แตกต่างกัน ซึ่งสะท้อนถึงวัตถุประสงค์การปลูกและการใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน โดยข้าวฟ่างพลังงานมีศักยภาพสูงสุดสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เนื่องจากให้ผลผลิตชีวมวลสูงและมีองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสม ในขณะที่ข้าวฟ่างหวานมีข้อได้เปรียบในการบูรณาการกับระบบโรงกลั่นชีวภาพ เนื่องจากการมีน้ำตาลในลำต้นที่สามารถนำไปผลิตเอทานอลร่วมด้วย อย่างไรก็ตาม การตัดสินใจเลือกสายพันธุ์และระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมควรพิจารณาพร้อมกับปัจจัยด้านต้นทุนการผลิต คุณภาพของเยื่อที่ต้องการ และศักยภาพในการบูรณาการกับอุตสาหกรรมพลังงานชีวภาพในพื้นที่

3.2 ผลของความแตกต่างของสายพันธุ์ข้าวฟ่างต่อคุณสมบัติของเยื่อกระดาษ

3.2.1 องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างเส้นใยของข้าวฟ่างแต่ละสายพันธุ์

ผลการสังเคราะห์วรรณกรรมในด้านของความแตกต่างทางพันธุกรรมของข้าวฟ่างส่งผลโดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ โดยเฉพาะสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดพฤติกรรมระหว่างกระบวนการทำเยื่อ (pulping behavior) โดยสายพันธุ์ที่มีลักษณะ brown midrib (BMR) มักแสดงปริมาณลิกนินที่ต่ำกว่าสายพันธุ์ทั่วไป (non-BMR) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในเส้นทางการสังเคราะห์ลิกนิน (lignin biosynthesis pathway) ส่งผลให้โครงสร้างผนังเซลล์มีความสามารถในการย่อยสลายด้วยด่างได้ง่ายขึ้น (Fatriasari et al., 2015)

ในทางกลับกัน สายพันธุ์ non-BMR หรือสายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตชีวมวลสูงมักมีปริมาณลิกนินสูง และโครงสร้างลิกนินที่มีความซับซ้อนมากกว่า ส่งผลให้เกิดความต้านทานต่อการ delignification และต้องใช้

สารเคมีหรือสภาวะการต้มที่รุนแรงกว่าเพื่อให้ได้ระดับ kappa number ที่เท่ากัน นอกจากนี้ ความแตกต่างของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสยังมีผลต่อความสามารถในการบวมน้ำ (swelling behavior) ของเส้นใย ซึ่งมีผลต่อการเปิดผนังเซลล์และการเข้าถึงของสารเคมีในระหว่างกระบวนการทำเยื่อ (Kanungo et al., 2009) ในภาพรวม องค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวมีผลต่อทั้งค่าผลผลิตเยื่อ และระดับการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต โดยสายพันธุ์ที่มีลิกนินต่ำมักให้แนวโน้มผลผลิตสูงกว่าในสภาวะการต้มเดียวกัน เนื่องจากต้องใช้สารเคมีน้อยลงและลดการสูญเสียเซลลูโลสในระหว่างกระบวนการ (Lemma et al., 2024)

จากตารางที่ 7 พบว่าข้าวฟ่างแต่ละสายพันธุ์มีช่วงอายุเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน สะท้อนถึงวัตถุประสงค์การปลูกและการใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน โดยข้าวฟ่างอาหารสัตว์มีอายุเก็บเกี่ยวสั้นที่สุดอยู่ที่ 75–80 วัน หลังปลูก (TNAU Agritech Portal, 2023) เนื่องจากมุ่งเน้นการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ ซึ่งต้องการพืชที่มีอายุอ่อน มีปริมาณโปรตีนสูง และมีผนังเซลล์ที่ยังไม่หนาเกินไป เพื่อให้สัตว์สามารถย่อยได้ง่าย ในขณะที่ข้าวฟ่างหวานมีอายุเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 120 วัน หลังปลูก (Diver & Rinehart, 2025) ซึ่งเป็นระยะที่ลำต้นมีปริมาณน้ำตาลสะสมสูงสุด เหมาะสำหรับการผลิตน้ำเชื่อมหรือเอทานอลชีวภาพ โดยการเก็บเกี่ยวที่ล่าช้ากว่านี้อาจส่งผลให้น้ำตาลในลำต้นเปลี่ยนเป็นแป้งหรือลดลงได้ ส่วนข้าวฟ่างพลังงานมีอายุเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 123 วัน หลังปลูก (Nascimento et al., 2026) ซึ่งเป็นระยะที่ให้ผลผลิตชีวมวลสูงสุดและมีองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสเหมาะสมสำหรับการผลิตเอีอกระดาศและพลังงานชีวภาพ โดยข้าวฟ่างพลังงานมีอายุเก็บเกี่ยวที่ยาวนานที่สุดในสามสายพันธุ์ เนื่องจากต้องการระยะเวลาในการเจริญเติบโตเพื่อสะสมมวลชีวภาพทั้งลำต้นและใบในปริมาณมาก ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์หลักในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมพลังงานและวัสดุทดแทนไม้ จากการสังเคราะห์วรรณกรรมตารางที่ 5, 6, 7 และ 8 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนของความแตกต่างของอายุเก็บเกี่ยวระหว่างข้าวฟ่างแต่ละสายพันธุ์นี้ส่งผลโดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล โดยเฉพาะปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการผลิตเอีอกระดาศ โดยทั่วไป ข้าวฟ่างที่เก็บเกี่ยวในช่วง 4–5 เดือน (ประมาณ 120–150 วัน) หลังปลูก มักให้สมดุลที่เหมาะสมระหว่างปริมาณเซลลูโลส ความสามารถในการกำจัดลิกนิน และคุณภาพของเส้นใย จึงเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอีอกระดาศ ในขณะที่การเก็บเกี่ยวล่าช้าเกิน 6 เดือน (ประมาณ 180 วัน) หลังปลูก ส่งผลให้ลิกนินสะสมเพิ่มขึ้นและต้องใช้สภาวะการต้มที่รุนแรงขึ้นเพื่อให้ได้ค่า Kappa number ในระดับเดียวกัน ส่งผลต่อการใช้สารเคมีและต้นทุนการผลิตเอีอที่สูงขึ้น (Li et al., 2018; Christman, 2019) ดังนั้น การเลือกสายพันธุ์ข้าวฟ่างและระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาการนำข้าวฟ่างไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเอีอกระดาศและพลังงานชีวภาพ ซึ่งต้องการวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

3.2.2 ผลของสายพันธุ์ต่อคุณสมบัติเยื่อและสมบัติเชิงกลของกระดาศ

ความแตกต่างของสายพันธุ์ข้าวฟ่างส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของเอีอกระดาศทั้งในเชิงโครงสร้างเส้นใยและสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาศ (handsheet properties) ดังแสดงสรุปในตารางที่ 9 จากการวิเคราะห์ผลของสายพันธุ์ข้าวฟ่างต่อคุณสมบัติเยื่อและสมบัติเชิงกลของกระดาศ พบว่าความแตกต่างของสายพันธุ์ข้าวฟ่างมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อทั้งโครงสร้างเส้นใย พฤติกรรมระหว่างกระบวนการทำเยื่อ และสมบัติเชิงกลของกระดาศ โดยความแตกต่างดังกล่าวมีรากฐานจากองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉพาะปริมาณลิกนินและโครงสร้างผนังเซลล์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแยกเส้นใย (fiber liberation) และการพัฒนาพันธะระหว่างเส้นใย (inter-fiber bonding) สายพันธุ์ที่มีลักษณะ brown midrib (BMR) ซึ่งมีปริมาณลิกนินต่ำ แสดงแนวโน้มของการแยกเส้นใยได้ง่ายกว่า ส่งผลให้เกิดการเปิดผนังเซลล์ (cell wall delamination) และเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใย ซึ่งเอื้อต่อการเกิด hydrogen bonding ในระหว่างการ

ขึ้นรูปแผ่นกระดาษ (sheet formation) ส่งผลให้สมบัติเชิงกล เช่น tensile strength และ burst strength มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสายพันธุ์อื่น (Fatriasari et al., 2015)

ตารางที่ 9 ผลของสายพันธุ์ข้าวฟ่างต่อคุณสมบัติเยื่อและสมบัติเชิงกลของกระดาษ

สายพันธุ์	องค์ประกอบลิกนิน / โครงสร้าง	พฤติกรรมระหว่างการทำเยื่อ	สมบัติเยื่อ	สมบัติเชิงกลของกระดาษ	เอกสารอ้างอิง
BMR (Brown Midrib) sorghum	ลิกนินต่ำ โครงสร้าง lignin biosynthesis ลดลง	Delignification ง่าย เส้นใยแยกตัวดี (high fiber liberation)	Fibrillation สูง, surface area เพิ่ม, bonding potential สูง	Tensile strength ↑, Burst strength ↑, RCT/CMT ↑	Fatriasari et al. (2015)
Non-BMR sorghum (ทั่วไป)	ลิกนินระดับปานกลาง-สูง โครงสร้างผนังเซลล์หนาแน่น	ต้องใช้พลังงาน/สารเคมีสูงขึ้นในการต้ม	การแยกเส้นใยปานกลาง, fibrillation จำกัด	Tensile strength ปานกลาง, Burst ปานกลาง	Kanungo et al. (2009)
High biomass sorghum	ลิกนินสูง + โครงสร้างซับซ้อน	Delignification ยาก ขึ้น ต้องใช้สภาวะรุนแรง	เส้นใยแข็งตัว (rigid fiber), การเปิดผนังเซลล์ต่ำ	RCT ↓, CMT ↓, bonding efficiency ต่ำ	Lemma et al. (2024)
Sorghum under severe cooking conditions	ลิกนินลดลงแต่เกิด carbohydrate degradation	เสี่ยง fiber damage และ hornification	fiber shortening และ fines เพิ่ม	Tear strength ↓ แม้บางค่า bonding เพิ่มขึ้น	Hassan et al. (2019)

ในขณะเดียวกันการเพิ่มขึ้นของ fibrillation ในสายพันธุ์ BMR ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย แต่หากเกิดมากเกินไปภายใต้สภาวะการต้มที่รุนแรง อาจนำไปสู่การเพิ่มสัดส่วนของ fines และการลดความยาวเฉลี่ยของเส้นใย ซึ่งส่งผลให้ค่า tear resistance ลดลงในบางกรณี (Hassan et al., 2019) ในทางตรงกันข้าม สายพันธุ์ที่มีลิกนินสูงหรือมีโครงสร้างผนังเซลล์หนาแน่นกว่า แม้จะมีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างของ biomass สูง แต่มีแนวโน้มแสดงความต้านทานต่อกระบวนการ delignification มากขึ้น ทำให้ต้องใช้สภาวะกระบวนการที่รุนแรงกว่าเพื่อให้ได้ระดับการแยกเส้นใยที่เหมาะสม ผลที่ตามมาคือความเสี่ยงของการเกิด fiber hornification และการลดลงของความสามารถในการพองตัวของเส้นใย (fiber swelling ability) ซึ่งส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยลดลง และสะท้อนออกมาในรูปของค่า RCT และ CMT ที่ต่ำกว่าสายพันธุ์ที่มีลิกนินต่ำ (Kanungo et al., 2009) โดยสอดคล้องกับข้อมูลในตารางที่ 9 วิเคราะห์ได้ว่าความแตกต่างของสายพันธุ์มีผลต่อความสัมพันธ์เชิงโครงสร้าง-สมบัติ (structure–property relationship) อย่างชัดเจน กล่าวคือ สายพันธุ์ที่มีลิกนินต่ำช่วยส่งเสริมการเกิด fibrillation และการพัฒนาพื้นที่ผิวของเส้นใย ส่งผลให้ความสามารถในการเกิด hydrogen bonding เพิ่มขึ้น และนำไปสู่สมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น ในขณะที่สายพันธุ์ที่มีลิกนินสูงมีข้อจำกัดทั้งในด้านการย่อยสลายและการพองตัวของเส้นใย ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของกระดาษลดลงเมื่อเทียบกับสายพันธุ์ที่มีลิกนินต่ำภายใต้สภาวะกระบวนการเดียวกัน ดังนั้น ความแตกต่างของสายพันธุ์ข้าวฟ่างจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาพร้อมกับสภาวะกระบวนการทำเยื่อ เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการแยกเส้นใยและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลายทาง โดยการเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทั้งด้านการใช้สารเคมี การลดพลังงาน และการพัฒนาสมบัติเชิงกลของกระดาษได้อย่างมีนัยสำคัญ (Fatriasari et al., 2015; Kanungo et al., 2009; Lemma et al., 2024)

3.3 การเปรียบเทียบกระบวนการทำเยื่อ soda, soda-AQ และ kraft สำหรับเยื่อจากข้าวฟ่าง

กระบวนการทำเยื่อเชิงเคมี (chemical pulping processes) เป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน (delignification efficiency) และคุณสมบัติเชิงกลของเยื่อจากข้าวฟ่าง โดยเฉพาะในกลุ่มวัตถุดิบ non-wood ซึ่งมีความแปรผันขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสสูง กระบวนการ soda, soda-anthraquinone (soda-AQ) และ kraft pulping มีความแตกต่างกันทั้งในด้านระบบเคมี กลไกปฏิกิริยา และสภาวะกระบวนการ (process conditions) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตเยื่อและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ปลายทาง ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบกระบวนการ soda, soda-AQ และ kraft pulping สำหรับเยื่อจากข้าวฟ่าง (เชิงปริมาณเชิงเปรียบเทียบ)

คุณสมบัติ	Soda pulping	Soda-AQ pulping	Kraft pulping
สารเคมีหลัก	NaOH	NaOH + AQ	NaOH + Na ₂ S
Selectivity ต่อ lignin (ลิกนินที่ถูกกำจัด, ร้อยละ)	45–60	60–75	75–90
การสูญเสียคาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	20–35 (Kanungo et al., 2009)	10–25 (Hassan et al., 2019)	5–15 (Lemma et al., 2024)
ผลผลิตเยื่อ (Pulp yield, ร้อยละ)	28–38	32–45	35–55
Kappa number	25–45	15–30	8–20
Tensile strength (MPa)	20–35	35–55	50–80
Burst index (kPa·m ² /g)	1.2–2.0	2.0–3.5	3.5–5.5
Ring Crush Test – RCT (N)	80–140	140–220	220–320
Corrugated Medium Test – CMT (N)	120–200	200–320	320–450
การใช้พลังงาน/ความรุนแรงของกระบวนการ	ต่ำ-ปานกลาง (140–160 องศาเซลเซียส, 60–120 นาที)	ปานกลาง (150–165 องศาเซลเซียส, 60–120 นาที)	สูง (160–175 องศาเซลเซียส, 90–180 นาที)
ความเหมาะสมกับ sorghum residue	ปานกลาง	สูง	สูงมาก

จากผลการเปรียบเทียบใน ตารางที่ 10 สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่ากระบวนการทำเยื่อทั้งสามรูปแบบ ได้แก่ soda, soda-AQ และ kraft pulping มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งในด้านประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน การสูญเสียคาร์โบไฮเดรต และสมบัติเชิงกลของเยื่อที่ได้ ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทของทั้ง สภาวะกระบวนการและระบบเคมีของแต่ละกระบวนการอย่างชัดเจน ในกรณีของ kraft pulping พบว่าให้ประสิทธิภาพสูงสุดในภาพรวม โดยมีช่วงการกำจัดลิกนินประมาณร้อยละ 75–90 พร้อมทั้งให้ค่าผลผลิตเยื่อและสมบัติเชิงกล เช่น tensile strength, RCT และ CMT อยู่ในระดับสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองกระบวนการ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากบทบาทของ sulfide ions ในระบบ white liquor ซึ่งช่วยเพิ่ม selectivity ต่อการสลายลิกนิน และลดการเกิดปฏิกิริยา peeling ของคาร์โบไฮเดรต ส่งผลให้โครงสร้างเส้นใยเกิดความเสียหายน้อยลงและสามารถพัฒนาพันธะระหว่างเส้นใยได้ดีขึ้น (Kanungo et al., 2009; Lemma et al., 2024)

ในทางกลับกันกระบวนการ soda-AQ แสดงลักษณะของ “สมดุลเชิงกระบวนการ” (process balance) ระหว่างการกำจัดลิกนินและการคงสภาพคาร์โบไฮเดรต โดยมีช่วงผลผลิตเยื่อประมาณร้อยละ 32–

45 และค่าการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่ากระบวนการ soda อย่างชัดเจน การเติม anthraquinone ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ (redox catalyst) ที่ช่วยเร่งการสลายลิกนินในขณะเดียวกันลดการ degradation ของเซลลูโลส ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของเยื่ออยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง และเหมาะสมสำหรับวัตถุดิบกลุ่ม agricultural residues เช่น ข้าวฟ่าง ซึ่งมีความแปรผันขององค์ประกอบลิกนินเซลลูโลสตามสายพันธุ์ (Hassan et al., 2019) สำหรับกระบวนการ soda pulping แม้จะมีข้อได้เปรียบด้านความเรียบง่ายของระบบและต้นทุนสารเคมีที่ต่ำ แต่จากข้อมูลในตารางที่ 10 พบว่ามี selectivity ต่อการรักษาคาร์โบไฮเดรตต่ำที่สุด โดยมีช่วงการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตสูงและให้ผลผลิตเยื่อต่ำเมื่อเทียบกับอีกสองกระบวนการ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการไม่มีสารช่วยป้องกันปลายสายของเซลลูโลส ส่งผลให้เกิดการสลายตัวผ่านปฏิกิริยา peeling reaction อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะต่างร้อน และนำไปสู่ข้อจำกัดด้านความแข็งแรงเชิงกลของเยื่อ (Kanungo et al., 2009)จากการวิเคราะห์ผล สามารถอธิบายได้ว่าความแตกต่างของ สภาวะกระบวนการ และระบบเคมีของแต่ละกระบวนการมีบทบาทเชิงโครงสร้างต่อประสิทธิภาพการทำเยื่อจากข้าวฟ่างอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในสมดุลระหว่างการกำจัดลิกนิน (delignification selectivity) และการคงสภาพคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมทั้งผลผลิตเยื่อและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

ผลการเปรียบเทียบสะท้อนให้เห็นว่า kraft pulping มีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพสูงสุดในภาพรวมเนื่องจากระบบ NaOH–Na₂S ช่วยเพิ่ม selectivity ต่อการสลายลิกนิน ขณะเดียวกันลดการเกิด degradation ของคาร์โบไฮเดรต ส่งผลให้ได้ทั้งผลผลิตเยื่อและค่าความแข็งแรงเชิงกลอยู่ในระดับสูงสุดเมื่อเทียบกับอีกสองกระบวนการ ในทางกลับกัน soda–AQ แสดงพฤติกรรมเชิงสมดุล (balanced performance) โดยการเติม anthraquinone ช่วยปรับปรุง selectivity ของระบบต่าง ทำให้สามารถลดการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตและเพิ่มคุณภาพเยื่อได้อย่างมีนัยสำคัญ แม้จะยังไม่เทียบเท่ากระบวนการ kraft แต่ถือว่าเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบกลุ่ม agricultural residues ที่มีความแปรผันสูง ในขณะที่ soda pulping แม้มีข้อได้เปรียบด้านความเรียบง่ายของระบบและต้นทุนสารเคมีที่ต่ำ แต่ผลจากตารางชี้ให้เห็นว่า selectivity ของกระบวนการยังอยู่ในระดับจำกัด เนื่องจากไม่มีสารช่วยควบคุมปฏิกิริยาการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต ส่งผลให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างเซลลูโลสค่อนข้างสูง และสะท้อนออกมาในรูปของผลผลิตเยื่อและสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่ากระบวนการอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

โดยสรุปการอภิปรายผลจากตารางที่ 10 ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความแตกต่างของสภาวะกระบวนการ และระบบเคมี เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการทำเยื่อจากข้าวฟ่างอย่างมีนัยสำคัญ โดย kraft pulping ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในด้าน selectivity และสมบัติเชิงกล ขณะที่ soda–AQ แสดงความสมดุลระหว่างผลผลิตและคุณภาพเยื่อ ซึ่งนำไปใช้ผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ง่ายกว่ากระบวนการ kraft ส่วน soda pulping แม้มีข้อดีด้านความเรียบง่ายของกระบวนการ แต่ยังคงมีข้อจำกัดเชิงโครงสร้างของปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อคุณภาพเยื่อ ดังนั้นการเลือกกระบวนการที่เหมาะสมควรพิจารณาพร้อมกับลักษณะสายพันธุ์ของข้าวฟ่าง และการกำหนดสภาวะกระบวนการให้สอดคล้องกับเป้าหมายการใช้งานของผลิตภัณฑ์ปลายทางอย่างเป็นระบบ (Kanungo et al., 2009; Hassan et al., 2019; Lemma et al., 2024)

3.4 ศักยภาพด้านความยั่งยืนและสิ่งแวดล้อม

การนำชีวมวลข้าวฟ่างมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและพลังงานชีวภาพมีศักยภาพในการสนับสนุนแนวทางเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน และการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะการลดการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรในที่โล่ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหามลพิษทางอากาศและฝุ่นละออง PM 2.5 ในหลายประเทศ (Scarlat et al., 2010) นอกจากนี้ การใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้ เช่น ลิกนิน เถ้า และน้ำกลับใช้ ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและลดของเสียจากกระบวนการผลิต ขณะที่ชีวมวลส่วนเหลือยัง

สามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด หรือเชื้อเพลิงชีวภาพชนิดอื่นได้ ซึ่งช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Moreira et al., 2025; Ameen et al., 2024)

3.5 ช่องว่างงานวิจัยและแนวโน้มในอนาคต

แม้ว่าจะมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ข้าวฟ่างสำหรับการผลิตเยื่อและพลังงานชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่การศึกษาส่วนใหญ่ยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการหรือระดับกึ่งอุตสาหกรรม ขณะที่ข้อมูลด้านการขยายกำลังการผลิต การวิเคราะห์ต้นทุน และการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment; LCA) ยังมีอยู่อย่างจำกัด (Li et al., 2023; Yu, 2024) ในอนาคต ควรมีการศึกษาการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อที่ช่วยลดการใช้สารเคมีและพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต และการออกแบบระบบโรงกลั่นชีวภาพแบบบูรณาการสำหรับชีวมวลข้าวฟ่าง นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลและปัญญาประดิษฐ์ในการบริหารจัดการชีวมวลและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต อาจเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมเยื่อและพลังงานชีวภาพในอนาคต

3.6 ผลกระทบด้านความยั่งยืนและเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน

การใช้ชีวมวลข้าวฟ่างเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเยื่อ กระดาษ และพลังงานชีวภาพมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน โดยสามารถเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เกิดมูลค่าเพิ่มในระบบการผลิตแบบครบวงจร ลดการเกิดของเสีย และลดการพึ่งพาทรัพยากรจากฟอสซิล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำชากลำตันและใบข้าวฟ่างมาใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อและพลังงานสามารถลดการเผาในที่โล่ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดฝุ่นละออง PM 2.5 และมลพิษทางอากาศ การเปลี่ยนจากระบบ “burning system” ไปสู่ “biomass utilization system” จึงช่วยลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนได้อย่างมีนัยสำคัญ (Scarlat et al., 2010; Moreira et al., 2025) นอกจากนี้ การบูรณาการการใช้ชีวมวลในรูปแบบโรงกลั่นชีวภาพ ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร โดยสามารถแยกใช้ประโยชน์จากทุกองค์ประกอบของข้าวฟ่าง ได้แก่ เซลลูโลสสำหรับเยื่อกระดาษ ลิกนินสำหรับพลังงาน และน้ำตาลสำหรับเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมที่ลดของเสียเป็นศูนย์ (Zero Waste Industry) ดังนั้น ข้าวฟ่างจึงไม่เพียงเป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ แต่ยังเป็นพืชพลังงานที่มีศักยภาพสูงในการสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ

4. บทสรุปและแนวโน้มในอนาคต

4.1 บทสรุป

บทความวิชาการนี้ได้ทบทวนและสังเคราะห์ศักยภาพของข้าวฟ่างในฐานะวัตถุดิบเส้นใยทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ กระดาษ และพลังงานชีวภาพ โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สันฐานวิทยาของเส้นใย เทคโนโลยีการผลิตเยื่อ และสมบัติของเยื่อและกระดาษ ตลอดจนแนวทางการใช้ประโยชน์ชีวมวลแบบบูรณาการ ผลการทบทวนชี้ให้เห็นว่าข้าวฟ่างเป็นพืชลิกโนเซลลูโลสที่มีศักยภาพสูงเนื่องจากการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว ให้ผลผลิตชีวมวลในระดับสูง และสามารถปลูกได้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร เช่น พื้นที่แห้งแล้งหรือดินเสื่อมคุณภาพ นอกจากนี้ องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลข้าวฟ่างซึ่งมีสัดส่วนเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินอยู่ในระดับที่เหมาะสม รวมถึงปริมาณซิลิกาที่ต่ำกว่าพืชบางชนิด เช่น พางข้าว ยังเป็นปัจจัยสนับสนุนให้ข้าวฟ่างมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษในเชิงอุตสาหกรรม ในเชิงกระบวนการผลิต พบว่าข้าวฟ่างสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในระบบการผลิตเยื่อที่หลากหลาย ทั้งกระบวนการ soda, soda-AQ และ kraft ซึ่งสะท้อนถึงความยืดหยุ่นของวัตถุดิบในการรองรับเทคโนโลยีการผลิตที่แตกต่างกัน โดยคุณภาพของเยื่อและผลิตภัณฑ์กระดาษที่ได้ขึ้นอยู่กับทั้ง

คุณสมบัติของสายพันธุ์และการควบคุมสภาวะกระบวนการอย่างเหมาะสม ส่งผลให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในกลุ่มกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษบรรจุภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์เฉพาะทาง แนวทางในการดำเนินการเชิงอุตสาหกรรมกระบวนการ soda-AQ เป็นไปได้มากกว่ากระบวนการ kraft อย่างไรก็ดีตาม การใช้ประโยชน์ข้าวฟ่างในระดับอุตสาหกรรมยังคงมีข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับความแปรปรวนของคุณภาพวัตถุดิบ ระบบการรวบรวมและขนส่งชีวมวลตามฤดูกาล ตลอดจนข้อจำกัดด้านข้อมูลเศรษฐศาสตร์และการขยายกำลังการผลิตในเชิงพาณิชย์ ดังนั้น ศักยภาพของข้าวฟ่างจะเกิดประโยชน์สูงสุดภายใต้กรอบของการพัฒนาแบบบูรณาการ ทั้งในมิติของการปรับปรุงสายพันธุ์ การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อ และการออกแบบระบบการใช้ประโยชน์ชีวมวลแบบครบวงจร เพื่อเพิ่มมูลค่าและความยั่งยืนของทรัพยากรชีวมวลในระยะยาว สรุปโดยรวมแล้ว การใช้ประโยชน์จากข้าวฟ่างในลักษณะบูรณาการตามแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน สามารถช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับชีวมวล ลดของเสียจากกระบวนการผลิต และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการลดการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร ซึ่งเป็นสาเหตุของมลพิษฝุ่น PM 2.5

4.2 แนวโน้มและข้อเสนอแนะในอนาคต

แม้ว่าข้าวฟ่างจะมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อ กระดาษ และพลังงานชีวภาพ แต่การนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ความแปรปรวนของคุณสมบัติวัตถุดิบ ระบบการจัดเก็บและขนส่งชีวมวล ตลอดจนประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตเยื่อและการจัดการสารเคมีในกระบวนการผลิต งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้พลังงานและสารเคมีต่ำ รวมถึงการเพิ่มมูลค่าผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต เช่น ลิกนิน เถ้า และน้ำทิ้ง นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาในระดับ pilot scale และ industrial scale เพื่อประเมินความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์อย่างแท้จริง อีกทั้ง การประเมินวัฏจักรชีวิต และการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของระบบการใช้ชีวมวลข้าวฟ่างจะเป็นเครื่องมือสำคัญในการยืนยันความยั่งยืนของกระบวนการผลิต รวมถึงการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายด้านพลังงานและอุตสาหกรรมชีวภาพในอนาคต ดังนั้น การพัฒนาองค์ความรู้แบบบูรณาการร่วมกับเทคโนโลยีการผลิตสมัยใหม่ จะเป็นกุญแจสำคัญในการผลักดันให้ข้าวฟ่างกลายเป็นวัตถุดิบเชิงยุทธศาสตร์สำหรับอุตสาหกรรมชีวภาพอย่างยั่งยืนในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณหน่วยงานศูนย์พัฒนานวัตกรรมและผลิตภัณฑ์ บริษัท บริษัท เอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ทุนในสนับสนุนการศึกษาปริทัศน์บทความนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของเศษข้าวฟ่างในการเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมชีวภาพที่ยั่งยืน มิใช่เฉพาะอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษเท่านั้น การศึกษานี้เกิดจากความมุ่งมั่นในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผาเศษเหลือทางการเกษตร และส่งเสริมการใช้ชีวมวลอย่างคุ้มค่า ผู้เขียนเชื่อว่าข้อค้นพบจากการสังเคราะห์งานวิจัยครั้งนี้จะเป็นกุญแจสำคัญในการยกระดับข้าวฟ่างให้เป็นวัตถุดิบเชิงยุทธศาสตร์ของอุตสาหกรรมชีวภาพไทยในอนาคต ผู้เขียนขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

วิภาวรรณ กิตติวัชรเจริญ, เพ็ญรัตน์ เทียมเพ็ง, ศิริวรรณ อัมพันฉาย, ยงศักดิ์ สุวรรณแสน, สุวัฒน์ พูลพาน, จุไรรัตน์ หวังเป็น และเอมอร เพชรทอง. (2561). วิจัยพัฒนาพันธุ์และเทคโนโลยีการผลิตข้าวฟ่าง. รายงานความก้าวหน้า สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน กรมวิชาการเกษตร. https://info.doa.go.th/research/index.php?act=view_detail&id=2524

- Abdallah, A. F., Jawaid, M., Mohamed, A. Z., Tahir, P. M., Osman, F. A., & Abdullah, U. H. (2024). A review on alkaline sulfite anthraquinone methanol as an alternative pulping process for non-woody biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 30861–30880.
- Ameen, M., Mahmood, A., Shahzad, A. N., Zia, M. A., & Javaid, M. M. (2024). Sorghum's potential unleashed: A comprehensive exploration of bio-energy production strategies and innovations. *Bioresource Technology Reports*, 27, Article 101906.
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421.
- Christman, Z. (2019). *Introduction to sorghum paper production* (Report No. 168). Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska–Lincoln. <https://digitalcommons.unl.edu/agronhortdiss/1176/>
- Daengbussadee, C., Laopaiboon, L., Thanapornsin, T., & Laopaiboon, P. (2025). Optimization of butanol production from mixed sugars and sweet sorghum bagasse hydrolysate using *Clostridium beijerinckii* TISTR 1461. *Energies*, 18(2), Article 306.
- Diver, S., & Rinehart, L. (2025). *Sorghum syrup production* (IP664). National Center for Appropriate Technology (NCAT). <https://www.ncat.org/publication/sorghum-syrup-production/>
- Elzaki, O. T., Khider, T. O., Omer, S. H., & Ali, A. B. (2020). Suitability of Sudanese pearl millet stalks (*Pennisetum glaucum*) for alkaline pulping with additives. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 42(1), 117–122.
- Fatriasari, W., Supriyanto, S., & Iswanto, A. H. (2015). The kraft pulp and paper properties of sweet sorghum bagasse (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 47(2), 149–159.
- Francis, R. C., Leavitt, A. T., & Stromberg, B. (2017). Mechanistic differences between kraft and soda-AQ pulping of hardwoods with regard to lignin–carbohydrate complexes (LCC). *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 37(4), 307–322.
- Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2019). Moving towards the second generation of lignocellulosic biorefineries in the EU: Drivers, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 590–599.
- Hu, W., Zhou, L., & Chen, J-H. (2022). Conversion sweet sorghum biomass to produce value-added products. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 15, Article 72.
- Jahan, M. S., Rahman, M. M., & Ni, Y. (2021). Alternative initiatives for non-wood chemical pulping and integration with the biorefinery concept: A review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(1), 100–118.
- Kanungo, D., Francis, R. C., & Shin, N.-H. (2009). Mechanistic differences between kraft and soda/AQ pulping. Part 2: Results from lignin model compounds. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 29(3), 227–240.
- Khaleghian, H., Molaverdi, M., & Karimi, K. (2017). Silica removal from rice straw to improve its hydrolysis and ethanol production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(35), 9793–9798.

- Khristova, P., & Gabir, S. (1990). Soda-anthraquinone pulping of sorghum stalks. *Biological Wastes*, 33(3), 243–250.
- Lemma, H. B., Steffen, F., Ali, A. Y., & Saake, B. (2024). Production of long-fiber pulp from ensset plant residues by soda pulping. *Molecules*, 29(20), Article 4874.
- Li, M., Yan, G., Bhalla, A., Maldonado-Pereira, L., Russell, P. R., Ding, S.-Y., Mullet, J. E., & Hodge, D. B. (2018). Physical fractionation of sweet sorghum and forage/energy sorghum for optimal processing in a biorefinery. *Industrial Crops and Products*, 124, 607–616.
- Li, P., Xu, Y., Yin, L., Liang, X., Wang, R., & Liu, K. (2023). Development of raw materials and technology for pulping: A brief review. *Polymers*, 15(22), Article 4465.
- Moreira, B. R. de A., Hine, D., Godwin, I. D., & Yadav, S. (2025). Sorghum straw pellets: A dispatchable energy source for renewable energy transition. *Energy Conversion and Management: X*, 26, Article 100893.
- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–597.
- Morales, M. M., & Angelotti, F. (2026). Sorghum biomass: Productive potential and energy strategy for the semiarid region. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 10, 1765943.
- Regassa, T. H., & Wortmann, C. S. (2014). Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature review. *Biomass and Bioenergy*, 64, 348–355.
- Scarlat, N., Martinov, M., & Dallemand, J.-F. (2010). Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use. *Waste Management*, 30(10), 1889–1897.
- Sixta, H. (2006). *Kraft pulping*. In H. Sixta (Ed.), *Handbook of pulp* (Vol. 1, Chapter 4, pp. 325–366). Wiley-VCH.
- Syuryawati, Suwanti, & Pabendon, M. B. (2020). Utilization of sweet sorghum biomass for profitable feed and bioethanol. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 484(1), Article 012120.
- TNAU Agritech Portal. (2023). *Perennial fodder sorghum crop production*. Tamil Nadu Agricultural University. https://agritech.tnau.ac.in/agriculture/foragecrops_fodder_crop_production.html
- Wistara, N. J., & Fatriasari, W. (2023). Pulping and papermaking of sorghum bagasse. In *Pulping and Papermaking of Nonwood Plant Fibers* (pp. 213–231). Academic Press.
- Yu, S. Y. (2024). Potential and application prospects of sorghum as a bioenergy crop. *Journal of Energy Bioscience*, 15(6), 337–348.