ลิกนิน: โครงสร้าง คุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้เพื่อสิ่งแวดล้อม
Lignin: Structure Properties and Its Application for Environmental

ฐาปกรณ์ คำหอมกุล[1] และสุธาสินี ผากา[1]*
Thapakorn Kumhomkul[1] and Sutasinee Paka[1]*
[1]คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย
[1]School of Public Health, Eastern Asia University
*Corresponding author: sutasinee@eau.ac.th
Received: November 29, 2024
Revised: February 6, 2025
Accepted: February 11, 2025

บทคัดย่อ

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) ที่พบในผนังเซลล์พืช ลิกนินมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีกลุ่มฟังก์ชันที่หลากหลาย ซึ่งส่งให้คุณสมบัติของลิกนินมีความโดดเด่นและสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้หลายชนิด ลิกนินจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมและการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ลิกนินในการกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำและดิน ลิกนินได้รับการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์สำหรับดูดซับก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุของปัญหาโลกร้อน ลิกนินถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นวัสดุทางการแพทย์และวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น สารต้านเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา แคปซูลสำหรับบรรจุยา และพลาสติกชีวภาพ นอกจากนี้การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากลิกนินแสดงให้เห็นว่า การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลง สำหรับความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ลิกนินเป็นวัสดุทดแทน พบว่า มีแนวโน้มต้นทุนการผลิตจะสูงขึ้นมากกว่าการใช้วัสดุแบบเดิม เนื่องมาจากข้อจำกัดเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตและความเข้าใจในโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของลิกนิน อย่างไรก็ตามทั่วโลกจะให้ความสนใจลิกนินมากขึ้น แต่การใช้งานในปัจจุบันเน้นไปที่การผลิตพลังงานผ่านการเผาไหม้เป็นหลัก ดังนั้นความท้าทายหลักจึงอยู่ที่การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของลิกนินให้เหมาะสมและเพิ่มคุณภาพควบคู่ไปกับการพัฒนาวิธีการสกัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อรองรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม การพัฒนาการใช้ลิกนินในลักษณะดังกล่าวสามารถช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้อย่างมาก

คำสำคัญ: ลิกนิน พอลิเมอร์ชีวภาพ การบำบัดมลพิษ วัสดุชีวภาพ อนุภาคนาโนลิกนิน

Abstract

Lignin is a biopolymer found in plant cell walls and has a complex structure and a variety of functional groups, resulting in lignin's distinctive properties and ability to react with many chemicals. Therefore, lignin has been used as an alternative material to resolve environmental problems and natural resource shortages, for instance lignin can be used to remove pollutants contaminating water and soil. Lignin has been developed into activated carbon to absorb greenhouse gases that contribute to global warming. Lignin is used as a raw material for manufacturing medical materials and environmentally friendly materials, for example antibacterial and antifungal substrates, capsules for medicine packaging, and bioplastic. In addition, life cycle assessments of lignin-based products show that greenhouse gas emissions are reduced. Studies on the economic feasibility of using lignin as an alternative material indicate that the production costs tend to be higher than using traditional materials due to limitations in production technology and understanding the structure and the morphological characteristics of lignin. However, lignin has gained attention worldwide, with current uses focused mainly on energy production through combustion. The main challenges include optimizing the structural properties of lignin and increasing its quality, alongside developing environmentally friendly extraction methods for industrial applications. Such development of lignin utilization can significantly help conserve natural resources and reduce environmental impacts in the long term.

Keywords: lignin, biopolymer, pollution control, biomaterials, lignin nanoparticles

บทนำ

ปัจจุบันมนุษย์กำลังเผชิญกับปัญหาสิ่งแวดล้อมและการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติอย่างรุนแรงและแพร่กระจายไปเป็นวงกว้าง ซึ่งสาเหตุของปัญหาเกิดมาจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และจำนวนประชากร ทำให้ความต้องการใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลและทรัพยากรธรรมชาติสูงเกินกว่าความสามารถในการฟื้นฟู ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะ มลพิษทางสิ่งแวดล้อม ภาวะโลกร้อน และการเสื่อมโทรมของระบบนิเวศ (Khan et al., 2024; Liu et al., 2021) จึงเป็นภัยคุกคามต่อความยั่งยืนของสิ่งแวดล้อม ทรัพยากรธรรมชาติ และคุณภาพชีวิตของประชากร จึงมีความจำเป็นที่จะต้องค้นหาและพัฒนาทรัพยากรหมุนเวียนที่สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ สามารถย่อยสลายได้ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจ คือ ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างพืช โดยมีปริมาณอยู่ที่ร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลแห้งของชีวมวลลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass) (Chen et al., 2023) ลิกนินมีบทบาทสำคัญต่อพืชในด้านการสร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์และช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำ ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่พบมากเป็นอันดับสอง รองลงมาจากเซลลูโลส (Cellulose) ซึ่งลิกนินสามารถกำเนิดได้เองในพืชตามธรรมชาติ และเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม และเศษชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟาง ซังข้าวโพด และเศษไม้ การผลิตลิกนินจากอุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษอยู่ที่ 50 ถึง 70 ล้านตันต่อปี และมีการคาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2030 ปริมาณการผลิตลิกนินทั่วโลกจะสูงขึ้นถึง 225 ล้านตันต่อปี อย่างไรก็ตามลิกนินร้อยละ 5 ของปริมาณลิกนินทั้งหมดเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นที่ไม่ใช่การเผาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง (Agustiany et al., 2022;

Chen et al., 2023) จึงเป็นการใช้ทรัพยากรที่ไม่คุ้มค่า เนื่องจากลิกนินมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ คือ ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้หลายประเภท มีความเสถียรต่อความร้อนสูง ไม่ละลายน้ำ และต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ (Liu et al., 2021) โดยคุณสมบัติของลิกนินเกิดขึ้นมาจากโครงสร้างของลิกนินที่มีความซับซ้อนและมีกลุ่มฟังก์ชันที่หลากหลาย ลิกนินจึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น การพัฒนาเป็นวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ (bio composite) พลาสติกชีวภาพ (bioplastics) และบรรจุภัณฑ์ที่สามารถต้านอนุมูลอิสระ การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ในการพัฒนาเป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา การใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มยาเพื่อขนส่งไปยังเนื้อเยื่อเป้าหมาย และการใช้ในการตรวจจับสารทางชีวภาพรวมถึงการเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพที่ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล นอกจากนี้ลิกนินยังมีบทบาทสำคัญในเทคโนโลยีการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ และอากาศ เช่น การใช้อนุภาคนาโนลิกนินในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำและดิน การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลิกนินเป็นตัวดักจับก๊าซเรือนกระจก และการใช้ลิกนินเป็นตัวปรับปรุงและฟื้นฟูดินที่เสื่อมโทรม (Agustiany et al., 2022; Khan et al., 2024; Sajjadi, Ahmadpoor, Nasrollahzadeh, & Ghafuri, 2021; Solihat et al., 2020)

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการรวมรวบและนำเสนอภาพรวมเกี่ยวกับแหล่งกำเนิด โครงสร้าง ประเภท และคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของลิกนิน รวมถึงการนำลิกนินไปใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

แหล่งกำเนิดของลิกนิน

แหล่งกำเนิดของลิกนินสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดจากกระบวนการอุตสาหกรรม ลิกนินที่มาจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ คือ ลิกนินที่อยู่ในชีวมวลของพืชและเศษชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร ลิกนินเป็นส่วนประกอบหลักลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic) ในผนังเซลล์ของพืช โดยส่วนใหญ่ลิกนินจับตัวอยู่กับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งปริมาณของลิกนินในพืชแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช ลักษณะเนื้อเยื่อ และระยะการพัฒนา เช่น ต้นสัก (*Tectona grandis*) ซึ่งเป็นไม้ยืนต้นพบว่า มีลิกนินอยู่ที่ร้อยละ 30 ถึง 45 ต้นกล้วย (*Musa acuminate*) จัดเป็นไม้ล้มลุกพบว่ามีลิกนินอยู่ที่ร้อยละ 10 ถึง 25 และต้นอ้อยยักษ์ (*Arundo donax*) จัดเป็นพืชจำพวกหญ้าพบว่า มีลิกนินร้อยละ 15 ถึง 20 นอกจากนี้ในปัจจุบันมีการนำเศษชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตลิกนินเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเศษชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางแกลบ และตอซัง มีปริมาณลิกโนเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 80 ซึ่งการนำเศษชีวมวลทางการเกษตรเหลือทิ้งมาใช้ผลิตลิกนินเป็นการใช้ของเสียให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับแหล่งกำเนิดลิกนินจากกระบวนการอุตสาหกรรม คือ ลิกนินที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม โดยแหล่งกำเนิดหลักของลิกนินในเชิงพาณิชย์ คือ อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ประเภทและลักษณะของลิกนินจะแตกต่างกันไปตามกระบวนการผลิต เช่น คราฟท์ลิกนิน (Kraft lignin) คือ ลิกนินที่เกิดจากการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ และลิกโนซัลโฟเนต คือ ลิกนินที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อด้วยซัลไฟต์ นอกจากนี้ยังมีลิกนินจากผลพลอยได้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเอทานอล และโรงงานผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งแหล่งกำเนิดลิกนินส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างและองค์ประกอบของลิกนิน (More et.al., 2021; Sharma & Kumar, 2020; Vasile & Baican, 2023)

โครงสร้างลิกนิน

ลิกนินมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{10}H_{12}O_4$ ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenylpropanoid) โครงสร้างของลิกนินเกิดจากการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะเอสเทอร์และพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนของมอนอเมอร์ ส่งผลให้ลิกนินมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและเสถียร มอนอเมอร์หลักของลิกนินมี 3 ชนิด ได้แก่ พี-ไฮดรอกซีฟีนิล (p-hydroxyphenyl) กัวอิอาซิล (Guaiacyl) และไซริงจิล (Syringyl) ซึ่งเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพโดยใช้ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) จากมอนอเมอร์เริ่มต้น 3 ชนิด ได้แก่ พารา-คูมาริล แอลกอฮอล์ (p-coumaryl alcohol) คอนิเฟอริล แอลกอฮอล์ (Coniferyl alcohol) และซินาพิล แอลกอฮอล์ (Sinapyl alcohol) อย่างไรก็ตามลิกนิน

ของพืชแต่ละประเภทมีสัดส่วนของมอนอเมอร์ทั้ง 3 ชนิดที่แตกต่างกัน ลิกนินของพืชในกลุ่มไม้เนื้ออ่อนองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นกัวอิอาซิล (ร้อยละ 95) และไม่พบว่ามีไซริงจิล ลิกนินของหญ้าพบมอนอเมอร์ได้ทั้ง 3 ประเภท แต่ส่วนใหญ่เป็นไซริงจิล นอกจากนี้โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยกลุ่มฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น เมทอกซิล ฟีนอกลิกไฮดรอกซิล อะลิฟาติกไฮดรอกซิล อีเธอร์ และกลุ่มคาร์บอนิล (Bertella & Luterbacher, 2020; Sharma & Kumar, 2020; Shi, Liu, Sun & Weng, 2023; Vasile & Baican, 2023) ด้วยความพิเศษของโครงสร้างลิกนินนี้จึงทำให้นักวิจัยสนใจและศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและองค์ประกอบของลิกนินในพืชแต่ละชนิด เช่น โครงสร้างลิกนินของต้นสนนอร์เวย์ (*Picea abies*) พบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกัวอิอาซิลและมีพี-ไฮดรอกซีฟีนิลอยู่เล็กน้อย โดยสัดส่วนของกัวอิอาซิลต่อพี-ไฮดรอกซีฟีนิลอยู่ที่ 86:14 และลิกนินของต้นยูคาลิปตัส (*Eucalyptus globulus*) พบว่า มอนอเมอร์ได้ทั้ง 3 ชนิด โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นไซริงจิล สำหรับโครงสร้างของลิกนินในซังข้าวโพดและฟางข้าวสาลีสามารถพบมอนอเมอร์ได้ทั้ง 3 ชนิด โดยมอนอเมอร์ที่มีสัดส่วนน้อยที่สุด คือ พี-ไฮดรอกซีฟีนิล ส่วนกัวอิอาซิลและไซริงจิลมีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน (Djajadi et al., 2018; Neiva et al., 2020) จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อโครงสร้างของลิกนิน คือ แหล่งกำเนิดของลิกนิน นอกจากนี้แหล่งกำเนิดของลิกนินยังส่งผลให้ประเภทของลิกนินที่เกิดขึ้นแตกต่างกันอีกด้วย

ประเภทของลิกนิน

การจำแนกลิกนินสามารถใช้เกณฑ์ในการจำแนกได้หลายแบบ เช่น การใช้แหล่งกำเนิดเป็นเกณฑ์จะแบ่งลิกนินออกเป็น 3 ประเภท คือ ลิกนินจากไม้เนื้อแข็ง ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน และลิกนินจากไม้ล้มลุกหรือหญ้า โดยในบทความนี้จะอธิบายประเภทลิกนินตามกระบวนการสกัดลิกนิน ซึ่งสามารถจำแนกลิกนินออกเป็น 2 ประเภท คือ ลิกนินที่สกัดด้วยกำมะถัน และลิกนินที่ไม่มีการสกัดด้วยกำมะถัน (Torres et al., 2020) มีรายละเอียด ดังนี้

ลิกนินที่สกัดด้วยกำมะถัน

ลิกนินในกลุ่มนี้มีใช้สารเคมีที่มีองค์ประกอบของกำมะถันในการสกัดลิกนินออกจากวัตถุดิบ โดยสารเคมีที่นิยมใช้ คือ โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate--Na_2SO_4) และกรดซัลฟิวรัส (Sulfurous acid--H_2SO_3) โดยสามารถจำแนกลิกนิน ออกเป็น 2 ประเภท คือ คราฟท์ลิกนิน และลิกโนซัลโฟเนต มีรายละเอียด ดังนี้

1) คราฟท์ลิกนิน เป็นลิกนินที่ถูกผลิตมากที่สุด (คิดเป็นร้อยละ 85 ของลิกนินที่ถูกผลิตทั่วโลก) เมื่อเปรียบเทียบกับลิกนินประเภทอื่น ซึ่งคราฟท์ลิกนินเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ โดยกระบวนการคราฟท์จะใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมซัลเฟต ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันอากาศ ซึ่งส่งผลให้ลิกนินเกิดการละลายอยู่ในตัวทำละลายกลายเป็นของเหลวสีดำ สำหรับการแยกลิกนินออกจากสารละลายจะทำการตกตะกอนโดยการปรับค่า pH ด้วยกรดซัลฟิวริก (More et.al., 2021; Lisý et al., 2022; Torres et al., 2020)

2) ลิกโนซัลโฟเนต เป็นลิกนินที่เป็นผลพลอยได้มาจากกระบวนการผลิตเยื่อไม้ด้วยซัลไฟต์ ซึ่งเกิดการสลายพันธะโพลีแซ็กคาไรด์ โดยใช้สารละลายซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กรดซัลฟิวริก และสารที่ให้ไอออนประจุบวก (เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียม) กระบวนการสกัดลิกโนซัลโฟเนตออกจากสารละลายสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยแอลกอฮอล์ การแยกไอออน และการไดอะไลซีส ซึ่งข้อดีของลิกโนซัลโฟเนต คือ สามารถละลายน้ำได้และค่อนข้างเสถียร (Lisý et al., 2022)

ลิกนินที่ไม่ได้สกัดด้วยกำมะถัน

ลิกนินในกลุ่มนี้ไม่มีการใช้สารเคมีที่มีกำมะถันในการสกัด ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ โซดาลิกนินและลิกนินออร์แกโนโซล มีรายละเอียด ดังนี้

1) โซดาลิกนิน เป็นลิกนินที่แยกได้จากการทำเยื่อโซดา ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ทำเยื่อไม้ในยุคเริ่มแรก สำหรับในปัจจุบันนิยมนำมาใช้กับเศษชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย ฟาง และปอแก้ว กระบวนการผลิตเยื่อโซดาจะใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยา

กับชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีแรงดันที่อุณหภูมิ 150 ถึง 170 องศาเซลเซียส และอาจมีการใช้สารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งลิกนินที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง แต่ให้ผลผลิตน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการคราฟท์ (Karagoz et al., 2024; Lisý et al., 2022; Torres et al., 2020)

2) ลิกนินออร์แกโนโซล เป็นลิกนินที่ผลิตจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน ซึ่งลิกนินที่ได้จะมีคุณภาพสูงและสามารถละลายน้ำได้ แต่ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการผลิตวิธีอื่น โดยกระบวนการแยกชีวมวลจะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ผสมน้ำในถังปฏิกรณ์ควบคุมความดันอากาศและใช้อุณหภูมิสูง กระบวนการแยกลิกนินออกจากสารละลายจะใช้วิธีการกลั่นและการตกตะกอน (Karagoz et al., 2024; Lisý et al., 2022; Torres et al., 2020)

นอกจากประเภทลิกนินที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีลิกนินอีกหลายประเภทที่ถูกปรับปรุงและพัฒนาเพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบการใช้งาน รวมไปถึงการใช้ตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในการสกัดลิกนิน เช่น ของเหลวไอออนิก (Ionic liquid) และตัวทำละลายยูเทกติก (Eutectic solvent) (Torres et al., 2020) โดยตัวอย่างลิกนินประเภทอื่น ๆ มีดังนี้

1) ลิกนินไบโอรีไฟเนอรี (Biorefinery lignin) คือ ลิกนินที่แยกได้จากชีวมวลในกระบวนการผลิตของโรงงานกลั่นชีวมวล (More et.al., 2021)

2) ลิกนินไพโรไลซีส (Pyrolysis lignin) เป็นลิกนินที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซีสที่เปลี่ยนแปลงชีวมวลด้วยอุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศเฉื่อยในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ลิกนินจะละลายอยู่ในไบโอออยล์ ซึ่งสามารถแยกลิกนินได้โดยการนำไบโอออยล์ไปกวนผสมในน้ำที่เย็นจัด (Karagoz et al., 2024; Torres et al., 2020)

3) ลิกนินไฮโดรไลซิส (Hydrolysis lignin) เป็นลิกนินที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำตาลและเอทานอลด้วยชีวมวล (เช่น ข้าวโพด และอ้อย) จะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด ส่งผลให้ลิกนินจะตกตะกอนอยู่ในสารละลาย จุดเด่นของลิกนินไฮโดรไลซิส คือ มีความเสถียรทางความร้อนสูง (Karagoz et al., 2024; Torres et al., 2020)

4) ลิกนินของเหลวไอออนิก (Ionic liquid lignin) เป็นลิกนินที่ถูกสกัดด้วยของเหลวไอออนิก (เช่น 1-ethyl-3-methylimidazolium lysinate และ triethylammonium hydrogen sulfate) ออกจากสารชีวมวล ซึ่งข้อดีของการผลิตลิกนินด้วยวิธีนี้ คือ ใช้พลังงานต่ำ สามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Lu & Gu, 2022)

5) อนุภาคนาโนลิกนิน (Nanolignin) คือ ลิกนินที่ถูกสังเคราะห์ให้มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการทางกลและทางเคมี เช่น การตกตะกอนด้วยตัวทำละลาย และอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) อนุภาคนาโนลิกนินมีศักยภาพและถูกนำไปใช้ในหลายวัตถุประสงค์ เช่น ต้านอนุมูลอิสระ กันความร้อนและการกัดกร่อน และเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุ (Zhang, Terrasson & Guénin, 2021)

คุณสมบัติของลิกนิน

ลิกนินโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นของแข็งสีน้ำตาลถึงสีน้ำตาลเข้ม และสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่มีความเป็นด่าง (Pandian, Ramalingam, Sreeram & Rao, 2021) อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของลิกนินแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิด ประเภท และวิธีที่นำมาใช้ในการสกัดลิกนิน (Agustiany et al., 2022) ซึ่งสามารถจำแนกคุณสมบัติของลิกนินได้เป็น 3 ประเภท คือ ทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพ

1) น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) มีค่าอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 60,000 ดาลตัน อย่างไรก็ตามน้ำหนักโมเลกุลของลิกนินขึ้นอยู่กับประเภทของพืชและวิธีการสกัดของลิกนิน ลิกนินของไม้เนื้ออ่อนมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 20,000 ดาลตัน ในขณะที่ส่วนใหญ่ลิกนินของไม้เนื้อแข็งจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่า เช่น คราฟท์ลิกนิน (Kraft lignin) ของไม้เนื้ออ่อนพบว่ามีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 3,490 กรัมต่อโมล ในขณะที่คราฟท์ลิกนินของไม้เนื้อแข็งอยู่ที่ 1,000 กรัมต่อโมล (Casimiro, Costa, Vega-Aguilar & Rodrigues, 2022; Kai, Chow, & Loh, 2018 ; Sharma & Kumar, 2020)

2) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) มีค่าอยู่ในช่วง 1.35 ถึง 1.50 โดยใช้น้ำเป็นสารอ้างอิงที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สำหรับปัจจัยที่ส่งผลให้ความหนาแน่นสัมพันธ์ของลิกนินแตกต่างกัน ได้แก่ ชนิดของพืช วิธีการสกัดลิกนิน และสารละลายที่นำมาใช้เป็นสารอ้างอิง (Damayanti, Wulandari & Wu, 2020; Sharma & Kumar, 2020; Wang et al., 2020)

3) ความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption) ต่ำ เนื่องจากลิกนินมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic properties) โดยโครงสร้างส่วนใหญ่ของลิกนินประกอบด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic structure) ได้แก่ พอลิเมอร์อะโรมาติก (Hydrophobic Aromatic Polymer) และกลุ่มฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic functional groups) จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของลิกนินต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Polysaccharides) อย่างไรก็ตามลิกนินที่ถูกดัดแปลงโครงสร้างโดยการเติมกลุ่มฟังก์ชันชอบน้ำ (hydrophilic functional groups) เช่น กลุ่มเมทิลีนซัลโฟเนต (Methylene Sulphonate Groups) ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น (Kai et al., 2018; Lisý et al., 2022; Liu et al., 2021; Verdini et al., 2022)

4) ความทนทานต่อความร้อน (thermal resistance) สูง เนื่องจากลิกนินมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์อะโรมาติกและเชื่อมโยงกันด้วยพันธะเอสเทอร์และพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอน นอกจากนี้ประเภทของลิกนินยังส่งผลต่อความทนทานต่อความร้อน โดยลิกนินของไม้เนื้ออ่อนจะมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าลิกนินของไม้เนื้อแข็ง อุณหภูมิที่ทำให้ลิกนินเกิดการสลายตัวอยู่ในช่วง 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งลิกนินจะเริ่มสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 275 องศาเซลเซียส และกระบวนการสลายตัวหลักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สำหรับค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature--Tg) ของลิกนินจะแตกต่างกันไปตามประเภทของลิกนินและวิธีการเตรียมวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งค่า Tg ของลิกนินจะอยู่ในช่วง 91 ถึง 174 องศาเซลเซียส (ตาราง 1) นอกจากนี้ลิกนินสามารถเปลี่ยนสภาพเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 80 ถึง 200 องศาเซลเซียส สำหรับค่าที่เกี่ยวข้องกับความร้อนอื่น ๆ ได้แก่ ค่าความร้อน (heating value) ของลิกนินอยู่ในช่วง 15 ถึง 20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) อยู่ที่ 0.20 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ค่าการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity) อยู่ที่ 0.17 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที และความจุความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heat capacity) อยู่ที่ 1.16 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร-เคลวิน (Boquera et.al., 2021; Börcsök & Pásztory, 2020; Kai et al., 2018; Sharma & Kumar, 2020; Vasile & Baican, 2023)

5) ความสามารถในการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตหรือรังสียูวี (Ultraviolet absorption--UV) สูง เนื่องจากมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยวงแหวนอะโรมาติกและกลุ่มฟังก์ชันที่มีความสามารถในการดูดซับรังสียูวี เช่น กลุ่มเมทอกซี กลุ่มคาร์บอนิล และกลุ่มฟีนอลิก รวมไปถึงพันธะคู่คอนจูเกตในลิกนิน ลิกนินสามารถดูดซับรังสียูวีที่ช่วงความยาวคลื่น 250 ถึง 400 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาส่วนประกอบของโครงสร้างพบว่า แต่ละส่วนจะมีความสามารถในการดูดซับรังสียูวีที่แตกต่างกัน เช่น กัวอิอาซิลดูดซับรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 280 ถึง 282 นาโนเมตร ไซริงจิลดูดซับรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 270 ถึง 273 นาโนเมตร และวงแหวนอะโรมาติกดูดซับรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 200 ถึง 320 นาโนเมตร (Zhang & Naebe, 2021)

6) ความสามารถในการละลาย (solubility) การละลายน้ำของลิกนินตามธรรมชาติต่ำ แต่ละลายได้ดีในสารละลายที่มีสภาวะเป็นด่าง (alkali conditions) เนื่องจากเกิดการแตกตัวของกลุ่มฟีนอลิกไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิล อย่างไรก็ตามความสามารถในการละลายจะแตกต่างกันไปตามประเภทของลิกนินและวิธีการสกัด เช่น ลิกนินออร์แกโนโซล (Organosolv) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่มีขั้วสูง เช่น เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน ในขณะที่ลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulfonate) สามารถละลายได้ทั้งในสารละลายด่างเจือจาง น้ำ และสารละลายเกลือ (Kai et al., 2018; Sharma & Kumar, 2020; Wang et al., 2020)

ตาราง 1

ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของลิกนินแต่ละประเภท

ประเภทของลิกนิน	ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (องศาเซลเซียส)
Milled wood lignin (MWL)	113-139
Angiosperm (hardwood)	110-130
Gymnosperm (softwood)	138-160
Organosolv	91-97
Kraft	124-174

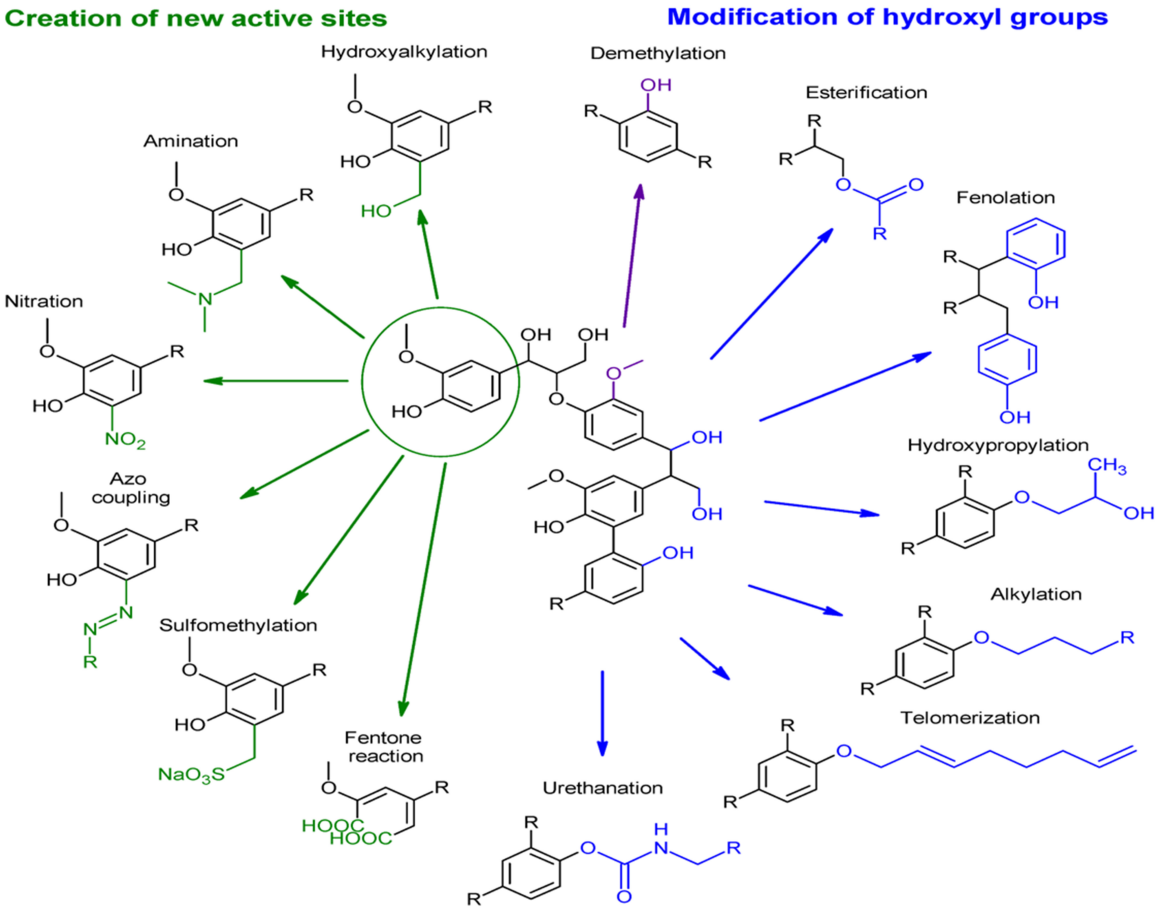
Note. From "Lignin and its properties. In Functional materials from lignin: methods and advances", by D. Kai, L. P. Chow and X. J. Loh, 2018, In J. X. Loh, D. Kai and Z. Li (Eds.), *Functional materials from lignin: methods and advances (Vol. 3)*, pp. 1-28. Copyright 2018 by World Scientific Publishing Europe Ltd.

คุณสมบัติทางเคมี

1) ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา (chemical reactivity) ของลิกนินเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เนื่องจากลิกนินมีโครงสร้างทางเคมีที่มีกลุ่มฟังก์ชันที่หลากหลาย เช่น ฟีนอกลิกไฮดรอกซิล เมทอกซิล และคาร์บอนิล เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ปฏิกิริยาอัลคิเลชัน (Alkylation) และการสลายพันธะทางเคมี ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างลิกนินกับออกซิเจน (สารที่รับอิเล็กตรอน หรือตัวออกซิไดส์) โดยให้ผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น วานิลลิน (Vanillin) ไซริงกัลดีไฮด์ (Syringaldehyde) กรดวานิลลิก (Vanillic acid) และอะซีโตวานิลโลน (Acetovanillone) ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลในลิกนินกับกรดคาร์บอกซิลิก ผลผลิตหลักที่ได้ คือ เอสเทอร์ และปฏิกิริยาออกซิอัคคิเลชัน (Oxyalkylation) ซึ่งจะทำให้ลิกนินเชื่อมต่อกับโพลีเมอร์โพลีอีเธอร์ (Bertella & Luterbacher, 2020; Casimiro et al., 2022; Damayanti et al., 2020)

2) การย่อยสลายทางเคมี (chemical decomposition) ของโครงสร้างลิกนินต่ำ เนื่องจากลิกนินมีโครงสร้างที่มีความเสถียรสูง จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีฤทธิ์รุนแรงและอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมในการย่อยสลายโครงสร้างของพอลิเมอร์ เช่น การย่อยลิกนินที่เป็นของแข็งให้กลายเป็นของเหลว โดยใช้กระบวนการเคมีความร้อน (thermochemical process) ร่วมกับตัวทำละลายอินทรีย์ภายใต้อุณหภูมิสูงและการควบคุมความดันอากาศ การใช้สารที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเป็นด่างเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการย่อยสลายลิกนิน เช่น การใช้สารโซเดียมไฮดรอกเพื่อทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะอีเทอร์และการสร้างไฮดรอกไซด์ไอออนเพื่อย่อยสลายลิกนิน โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ สารประกอบฟีนอลิก นอกจากนี้ยังมีการใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารออกซิแดนซ์ในการย่อยสลายลิกนินเพื่อผลิตเป็นกรดวานิลลิก (Jeong, Kim, Lee & Goh, 2021; More, Elder, & Jiang, 2021; Ouyang, Tan, & Qiu, 2014)

3) การปรับแต่งโครงสร้างทางเคมี (chemical structure modification) ของลิกนินสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากโครงสร้างของลิกนิน ประกอบด้วยกลุ่มฟังก์ชันหลายประเภท ซึ่งการปรับแต่งโครงสร้างของลิกนินเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ส่งผลให้ลิกนินมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น การละลายน้ำเพิ่มขึ้น การต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และลดความสามารถในการติดไฟ ซึ่งกระบวนการปรับแต่งโครงสร้างทางเคมีของลิกนินมีหลายกระบวนการ (ภาพ 1) แต่กระบวนการหลักที่นิยมนำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน คือ การเพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงกลุ่มฟังก์ชันของลิกนิน เช่น การใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน การใช้ปฏิกิริยาอัลคิเลชัน และการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Agustiany et al., 2022; Boquera et.al., 2021; Sharma & Kumar, 2020, Verdini et al., 2022; Wang et al., 2020)



ภาพ 1 การปรับแต่งโครงสร้างทางเคมีของลิกนินและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

Note. From "About Hydrophobicity of lignin: A review of selected chemical methods for lignin valorisation in biopolymer production" by A. Lisý, A. Ház, R. Nadányi, M. Jablonský and I. Šurina, 2022, *Energies, 15*(17), 6213. Copyright: © 2022 by the authors, Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

คุณสมบัติทางชีวภาพ

1) การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) ของลิกนินต่ำ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงส่งผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายโครงสร้างได้ยาก ดังนั้นลิกนินจึงมีส่วนช่วยป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ทำลายคาร์โบไฮเดรตที่ผนังเซลล์ นอกจากนี้ยังทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรง และป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ อย่างไรก็ตามเชื้อราเป็นจุลินทรีย์ที่ถูกระบุว่า เกือบทุกชนิดสามารถย่อยสลายลิกนินได้ โดยเฉพาะเชื้อราเส้นใยขาวหรือราผุสีขาว (white rot fungi) ซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นเชื้อราที่มีความสามารถในการย่อยสลายลิกนินดีที่สุด เชื้อราและแบคทีเรียบางชนิดจะย่อยสลายลิกนินโดยใช้เอนไซม์ โดยเอนไซม์ที่สำคัญในการย่อยลิกนิน ได้แก่ แลคเคส (Laccase) ลิกนินเปอร์ออกซิเดส (Lignin peroxidase) และแมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (Manganese peroxidase) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีหลายชนิด เช่น วานินลิน ไซริงเกต (Syringate) และสารอินทรีย์จำพวกไขมัน (Damayanti et al., 2020; Sharma & Kumar, 2020; Vasile & Baican, 2023)

2) คุณสมบัติในการต้านทานจุลินทรีย์ (antimicrobial properties) สูง โดยเฉพาะในกลุ่มแบคทีเรีย เนื่องจากลิกนินมีพอลิเมอร์กลุ่มฟีนอล หรือเรียกว่าโพลีฟีนอลพอลิเมอร์ (Polyphenolic polymer) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถยับยั้งและทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบคทีเรียได้สรุปผลการศึกษาว่า สารประกอบโพลีฟีนอลเข้าไปทำให้เกิดความเสียหายแก่เซลล์แบคทีเรีย โดยลิกนินจะกระตุ้นให้แบคทีเรียสร้างและสะสมอนุมูลอิสระของ

ออกซิเจน (Reactive oxygen species--ROS) ภายในเซลล์และส่งผลให้เซลล์เกิดความเสียหายในที่สุด และลิกนินที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะทำลายเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรียและทำให้เกิดภาวะเซลล์แตก นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ระบุว่า ลิกโนซัลโฟเนตมีฤทธิ์ในการยับยั้งการจำลองตัวเองและการถอดรหัสพันธุกรรมของเชื้อไวรัสเอชไอวี (Human Immunodeficiency Virus--HIV) สำหรับในเชื้อรามีการรายงานว่า ลิกนินจะส่งผลต่อการเจริญและการดำรงชีวิตของเชื้อราบางชนิด (Chen et al., 2023; Reyes, Ma & Romero, 2024)

3) ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant properties) ลิกนินมีความสามารถในการยับยั้งและลดการผลิตอนุมูลอิสระ รวมถึงทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดความเสถียร การต้านทานอนุมูลอิสระเกิดจากการกำจัดอนุมูลอิสระของกลุ่มฟีนอลิกไฮดรอกซิล กลุ่มออร์โธเมทอกซี (Ortho-methoxy groups) และกลุ่มไฮดรอกซิลอะลิฟาติก (Aliphatic hydroxyl groups) ที่อยู่ในโครงสร้างของลิกนิน ซึ่งกลไกจะเริ่มจากกลุ่มฟีนอลิกและอนุมูลอิสระจะสร้างอนุมูลฟีนอกซีและเกิดการแทนที่ด้วยกลุ่มออร์โธเมทอกซี ส่งผลให้อนุมูลฟีนอกซีเกิดความเสถียรและอนุมูลอิสระจะถูกกำจัด สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระของลิกนิน ได้แก่ ประเภทของลิกนิน กระบวนการสกัดลิกนิน น้ำหนักโมเลกุลของลิกนินและปริมาณของกลุ่มฟีนอลิกไฮดรอกซิลของลิกนิน (Li et al., 2023; Piccinino et.al., 2021; Qin, Liu, Gu, Sun & Wang, 2020; Xiao, Liu, Huang, Lou & Qiu, 2020)

การประยุกต์ใช้ลิกนินเพื่อสิ่งแวดล้อม

ลิกนินเป็นสารชีวโมเลกุลที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายวิธี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้ในการลดผลกระทบและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม บทความนี้จะกล่าวถึง 2 ประเด็น คือ การประยุกต์ใช้ลิกนินในการบำบัดมลพิษและการประยุกต์ใช้ลิกนินเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีรายละเอียด ดังนี้

การประยุกต์ใช้ลิกนินในการบำบัดมลพิษ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่นำลิกนินมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำและดิน เนื่องจากลิกนินมีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์หลายแบบ เช่น โครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน มีกลุ่มฟังก์ชันที่หลากหลาย มีความสามารถในการดูดซับสาร และสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้หลายประเภท ปัจจุบันนิยมนำลิกนินที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนมาใช้ในการกำจัดสารมลพิษ เนื่องจากมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูง มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารเคมี และมีแนวโน้มทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้เพิ่มมากขึ้น (Khan et al., 2024) รายละเอียดการประยุกต์ใช้มีดังต่อไปนี้

1) การกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำ โดยอาศัยคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำและกลุ่มฟังก์ชันเมทอกซิลและไฮดรอกซิลในโครงสร้างของอนุภาคนาโนลิกนิน (Sajjadi et.al., 2021) จากการศึกษาของ Lee, Larive, Valsaraj, & Bharti (2018) ที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้อนุภาคนาโนลิกนินผสมกับ 1-เพนทานอล (1-pentanol) ในอัตราส่วน 9 ต่อ 1 ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคนาโนลิกนินมีประสิทธิภาพสูงในการจำกัดการแพร่กระจายของน้ำมันด้วยการสะสมน้ำมันไว้ในอนุภาค โดยใช้คุณสมบัติไม่ชอบน้ำร่วมกับแรงแวนเดอร์วาลส์

2) การกำจัดสีย้อมออกจากน้ำ โดยอาศัยคุณสมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะและกลุ่มฟังก์ชันอะมีนของลิกนิน ซึ่งจากการศึกษาของ Meng et al., 2020 ได้พัฒนาตัวดูดซับจากลิกนินเพื่อใช้ในการกำจัดสีในน้ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ลิกนินมีความสามารถในการกำจัดสีไดเร็กต์บลู 1 (Direct Blue 1) ถึงร้อยละ 90 ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อนำตัวดูดซับไปฟื้นฟูและนำมาใช้กำจัดสีอีกครั้ง พบว่า ตัวดูดซับยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีอยู่ที่ร้อยละ 85

3) การกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ ลิกนินธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำต่ำ เนื่องจากลิกนินมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้น้อย อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยได้พัฒนาและดัดแปลงลิกนินโดยใช้การเพิ่มกลุ่มฟังก์ชัน การสร้างพันธะ และนำไปผสมกับวัสดุอื่น เพื่อเพิ่มความเสถียรและความสามารถในการ

กำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ (Hasan et al., 2023; Sajjadi et.al., 2021) อนุภาคนาโนลิกนินเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการดัดแปลงลิกนินเพื่อใช้สำหรับกำจัดโลหะหนักในน้ำ เนื่องจากกลุ่มไฮดรอกซิล และฟีนอลิกที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนลิกนินสามารถสร้างสารเชิงซ้อนและคีเลตกับไอออนโลหะหนักได้เป็นอย่างดีและมีความเสถียรสูง จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำลดลง (Khan et al., 2024) งานวิจัยของ Xiao et al. (2019) ได้พัฒนาอนุภาคนาโนลิกนินในรูปแบบ Lignin-Based Nano-Trap--LBNT เพื่อใช้กำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า LBNT มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนักหลายชนิด เช่น ปรอท แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดถึงร้อยละ 99 นอกจากนี้แล้วมีการนำเอาลิกนินไปผสมกับวัสดุชนิดอื่นซึ่งเรียกว่า วัสดุคอมโพสิต เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เช่น งานวิจัยของ Shi, Qiao, An, Tian & Zhou, 2020 ได้ผสมลิกนินเข้ากับโพลีเอทิลีนอิมีน (Polyethylenimine--PEI) ได้เป็น Lignin-based composite (Lignin-PEI) และนำ Lignin-PEI ไปใช้ในการกำจัดโครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเลนท์ (Hexavalent chromium--Cr (VI)) ที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า Lignin-PEI มีประสิทธิภาพสูง ในการกำจัดโครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเลนท์ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 80.8 อย่างไรก็ตาม Lignin-PEI มีข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้กำจัดโครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเลนท์ คือ ค่า pH ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด และความสามารถในการใช้ซ้ำ โดยพบว่า การใช้ซ้ำในครั้งที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดของ Lignin-PEI จะลดเหลือเพียงร้อยละ 42.9 เท่านั้น

4) การกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากลิกนินโดยเฉพาะประเภทอนุภาคนาโนลิกนินและไฮโดรเจลลิกนินที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ สามารถดูดซับสารเคมีได้หลายประเภท (Hasan et al., 2023; Khan et al., 2024) ซึ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ใช้ลิกนินในการกำจัดสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินเพิ่มมากขึ้น เช่น Li et al. (2024) ได้ทำการปรับปรุงอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Nano-Fe_3O_4) ด้วยการผสมกับไฮโดรเจลลิกนิน เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินนา ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินนาลดลงร้อยละ 16.7 – 25.4 ซึ่งไฮโดรเจลลิกนินที่ถูกผสมกับอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ทำให้ปริมาตรและพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เพิ่มขึ้น รวมถึงการเพิ่มขึ้นของกลุ่มฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี จึงส่งผลให้กระบวนการดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอน และกลไกการสร้างสารเชิงซ้อนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น งานวิจัย Liu, Cui, Tan, & Wang (2020) ที่ศึกษาโดยการผสมอนุภาคนาโนเฟอรัสซัลไฟด์กับไฮโดรเจลลิกนิน เพื่อใช้ในการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนเฟอรัสซัลไฟด์ ที่ผสมไฮโดรเจลลิกนินมี ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยดินที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมสูง อนุภาคนาโนเฟอรัสซัลไฟด์ที่ผสมไฮโดรเจลลิกนินสามารถลดปริมาณแคดเมียมทั้งหมดได้ร้อยละ 22.4 และดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมเล็กน้อย อนุภาคนาโนเฟอรัสซัลไฟด์ที่ผสมไฮโดรเจลลิกนินสามารถลดปริมาณแคดเมียมทั้งหมดลงได้ร้อยละ 49.6 อย่างไรก็ตามค่า pH ของลิกนินส่งผลต่อการดูดซับโลหะหนักในดินที่แตกต่างกัน โดยลิกนินที่เป็นด่างส่งผลให้อัตราการดูดซับแคดเมียมในดินลดลง (He, Dai, Liu, Tang & Xu, 2021) ดังนั้นการเลือกใช้ลิกนินในการกำจัดโลหะหนักในดินจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยเกี่ยวกับค่า pH ของลิกนินของลิกนินร่วมด้วย

5) การประยุกต์ใช้ลิกนินเพื่อฟื้นฟูความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยอาศัยลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนและกลุ่มฟังก์ชันที่หลากหลายของลิกนิน โดยเฉพาะอนุภาคนาโนลิกนิน ซึ่งความสามารถในการปรับปรุงโครงสร้างของดิน กักเก็บสารอาหารและความชื้น นอกจากนี้อนุภาคนาโนลิกนินยังทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอนและกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้เกิดการหมุนเวียนธาตุอาหารในดินและระบบนิเวศ (Khan et al., 2024) งานวิจัยของ Fu, Luo, Zhao, Yang & Wang (2024) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเค็มที่เป็นด่างโดยใช้ลิกนิน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ลิกนินมีช่วยในการปรับปรุงโครงสร้าง การอัดแน่น และความพรุนของดิน นอกจากนี้ลิกนินยังช่วยลดปริมาณเกลือทั้งหมดและค่า pH ของดินลง จึงสามารถสรุปได้ว่า ลิกนินมีส่วนช่วยฟื้นฟูสภาพให้กับดินเค็มที่เป็นด่าง งานวิจัยของ Enayathali et al, (2024) ที่ได้ศึกษาผลของพอลิเมอร์ลิกนินชีวภาพในการ

ปรับปรุงคุณภาพดิน สรุปผลการศึกษาว่า พอลิเมอร์ลิกนินชีวภาพเป็นสารปรับปรุงดินที่ส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติดีขึ้น เช่น การยึดเกาะกันของอนุภาคดินเหนียว และความสามารถในการขยายและหดตัวของดิน นอกจากนี้ยังมีการใช้ลิกนินเป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยที่ใส่ลงในดิน เพื่อทำให้การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยสู่ดินเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ (Hasan et al., 2023)

6) การประยุกต์ใช้ลิกนินเพื่อบำบัดมลพิษทางอากาศ โดยการนำลิกนินมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับสารมลพิษทางอากาศ เนื่องจากลิกนินมีอะตอมคาร์บอนสูง จึงมีคุณสมบัติเป็นสารตั้งต้นที่ดีในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ (Mergbi et al., 2023; Supanchaiyamat, Jetsrisuparb, Knijnenburg, Tsang & Hunt, 2019) นอกจากนี้ยังมีการนำเอาลิกนินไปเป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการดักจับหรือดูดซับก๊าซมลพิษ เช่น การเคลือบถ่านชีวภาพด้วยลิกนิน และการผลิตลิกนินไฟเบอร์ งานวิจัยของ Zhang et al. (2024) ที่ได้ทำการดัดแปลงถ่านชีวภาพไม้ไผ่โดยการชุบด้วยลิกนินร่วมกับการฉายรังสีไมโครเวฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ชุบด้วยลิกนินมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการชุบลิกนินส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรไมโครพอร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าหากชุบลิกนินมากเกินไปอาจทำให้รูพรุนของถ่านชีวภาพเกิดการอุดตันส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะ รูพรุน และไมโครพอร์ลดลง นอกจากนี้การทดสอบการนำถ่านชีวภาพที่ชุบด้วยลิกนินมาใช้ซ้ำจำนวน 10 รอบ พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ยังคงอยู่ในช่วงร้อยละ 89.79 ถึง 99.06 งานวิจัยของ Zhao et al. (2024) ที่ได้พัฒนาตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตร่วมกับตัวกระตุ้นสังกะสีคลอไรด์ ($ZnCl_2$) ผลการศึกษาพบว่าตัวดูดซับที่ผสมสังกะสีคลอไรด์มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับคาร์บอนไดออกซ์ เนื่องสังกะสีคลอไรด์ส่งผลให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงและมีกลุ่มฟังก์ชันที่มีซัลเฟอร์และออกซิเจนจำนวนมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสังกะสีคลอไรด์สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างตัวดูดซับที่ผลิตจากลิกนิน งานวิจัยของ Nikolic et al., 2020 ที่ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ออกจากกระแสอากาศโดยใช้คราฟต์ลิกนินที่ชุบด้วยทองแดง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ของคราฟต์ลิกนินค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นจากการชุบด้วยทองแดงก็ตาม

การประยุกต์ใช้ลิกนินเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ลิกนินเป็นสารชีวมวลที่มีคุณสมบัติที่หลากหลาย เช่น ไม่มีพิษ ต้านเชื้อจุลินทรีย์ และป้องกันรังสียูวี ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ลิกนินจึงถูกใช้เป็นวัสดุชีวภาพโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) วัสดุชีวภาพทางการแพทย์ เนื่องจากลิกนินมีคุณสมบัติที่เข้ากันได้ดีทางชีวภาพ มีฤทธิ์ทางชีวภาพโดยเฉพาะการต้านทานอนุมูลอิสระและจุลินทรีย์ ทำให้มีการนำมาใช้เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา (Chen et al., 2023) และมีการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนลิกนินเป็นแคปซูลในการขนส่งยาไปที่บริเวณอวัยวะหรือเนื้อเยื่อเป้าหมายในการรักษา เนื่องจากอนุภาคนาโนลิกนินเป็นโครงสร้างแอมฟิฟิลิก (amphiphilic) มีความเสถียรสูง ความเป็นพิษต่ำ สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และความสามารถในการละลายขึ้นอยู่กับค่า pH จึงสามารถควบคุมการปลดปล่อยยาได้ดี (Moreno & Sipponen, 2020) นอกจากนี้มีการใช้ลิกนินมาเป็นส่วนผสม เพื่อใช้ในการตรวจจับทางชีวภาพ (Biosensor) เช่น การนำลิกนินมาผสมกับอนุภาคนาโนของเงิน เพื่อตรวจจับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการผสมลิกนินกับคาร์บอนนาโนทิวบ์และอนุภาคนาโนของแพลตตินัม เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับกูลโคส (Durmaz et al., 2023)

2) พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ซึ่งโครงสร้างของลิกนินมีกลุ่มฟังก์ชันหลายชนิด จึงสามารถนำมาปรับปรุงและดัดแปลงเป็นวัสดุอื่น ๆ โดยเฉพาะพลาสติกชีวภาพ (Solihat et al., 2020) ซึ่งในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยได้พัฒนาลิกนินให้เป็นวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ ที่มีมูลค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การผลิตพลาสติกชีวภาพโพลีไฮดรอกซีบิวไทเรต (Bioplastic Polyhydroxybutyrate--PHB) ที่มีมูลค่าสูง โดยมีการนำเอาเชื้อแบคทีเรีย Ralstonia eutropha H16 ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสารอะโรมาติก

ในโครงสร้างของลิกนินให้เป็น PHB มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (Zhao, Zhang, Wang, Shen & Wang, 2024) นอกจากลิกนินจะถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพแล้ว ลิกนินยังถูกใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งและความทนทานให้กับพลาสติกชีวภาพที่ถูกผลิตจากวัสดุอื่น เช่น งานวิจัยของ Tedeschi et al. (2020) ได้ทำการศึกษาผลของการเติมลิกนินไฮโดรไลซ์ต่อคุณสมบัติของพลาสติกชีวภาพ พบว่า ลิกนินไฮโดรไลซ์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกชีวภาพในด้านอุทกพลศาสตร์ การสกัดกั้นออกซิเจน การต้านอนุมูลอิสระ และต้านแบคทีเรีย ผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rizal et al. (2021) ซึ่งได้ประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนลิกนินเป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มพลาสติกชีวภาพ (biopolymer films) ที่ผลิตจากสาหร่ายขนาดใหญ่ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโนลิกนินสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพทางกายภาพ เชิงกล และการป้องกันน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ

3) การประยุกต์ใช้ลิกนินเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มาจากพืช ปริมาณคาร์บอนฟุตพรินต์ต่ำ และคุณสมบัติคล้ายกับเชื้อเพลิงฟอสซิล จึงสามารถนำมาใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน (Kocaturk, Salan, Ozcelik, Alma, & Candan, 2023) ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนลิกนินให้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก คือ การใช้ลิกนิน ด้วยการเผาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เช่น การเผาลิกนินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำในการผลิตความร้อนและไฟฟ้า และการใช้ลิกนินเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่อยู่ในรูปแบบของเหลวและก๊าซ ซึ่งสามารถวิธีการผลิตได้หลายวิธี เช่น ไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน ไฮโดรจีโนไลซิส และออกซิเดชัน (Kocaturk et al., 2023; Patel, Dhar, Babaei-Ghazvini, Dafchahi & Acharya, 2023)

จากภาพรวมที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าลิกนินมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และการใช้ลิกนินมีส่วนช่วยสนับสนุนให้เกิดความยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ (Wenger, Haas & Stern, 2020) อย่างไรก็ตามต้องมีการพิจารณาให้ครบทุกด้าน โดยเฉพาะในด้านเศรษฐศาสตร์และความคุ้มค่าของการใช้ลิกนิน ซึ่งในบทความนี้กล่าวถึงการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment--LCA) และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของลิกนิน ซึ่งปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิตในการใช้ลิกนินเพื่อทดแทนวัตถุดิบประเภทต่าง ๆ จำนวนมาก โดยเฉพาะการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ลิกนินผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อทดแทนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากปิโตรเคมี ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากลิกนินมีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากปิโตรเคมี โดยเชื้อเพลิงที่ผลิตจากลิกนินสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้สูงสุดถึงร้อยละ 90 และเมื่อนำลิกนินมาผลิตเป็นโฟมโพลียูรีเทนสามารถลดการเกิดโอโซนสูงสุดที่ร้อยละ 33 ลดการเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำจืดสูงสุดร้อยละ 43 และลดการใช้แร่ธาตุสูงสุดร้อยละ 36 นอกจากนี้ยังมีการนำลิกนินมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกรดอะดิปิก (Adipic acid หรือ Hexane dioic acid) แทนการใช้กรดอะดิปิกที่ผลิตจากปิโตรเคมี ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ร้อยละ 62 ถึง 78 (Chauhan et al., 2022; Moretti et al., 2021) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า การใช้ลิกนินแทนวัสดุประเภทอื่น อาจส่งผลดีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แต่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้น เช่น งานวิจัยของ Krzyzaniak et al. (2019) ซึ่งได้ประเมินวัฏจักรชีวิตของลิกนินที่นำมาใช้แทนปุ๋ยแร่ธาตุ ซึ่งผลการประเมินแสดงให้เห็นว่า ลิกนินช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ดีกว่า แต่มีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด ระบบนิเวศในดิน และมนุษย์สูงกว่าปุ๋ยแร่ธาตุ และถ้านำปุ๋ยแร่ธาตุมาใช้ร่วมกับลิกนินจะทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรุนแรงเพิ่มขึ้นอีกด้วย สำหรับประเด็นทางเศรษฐศาสตร์ในการนำลิกนินมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในเชิงพานิชย์ อาจเป็นไปได้ยากเนื่องจาก การเพิ่มมูลค่าและสร้างนวัตกรรมจากลิกนินเป็นแนวคิดใหม่ ต้นทุนการผลิตจึงอาจสูงกว่ากระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์แบบเดิม เช่น ฟีนอลที่ผลิตจากลิกนินมีต้นทุนการผลิตที่สูงจึงส่งผลให้ราคาขายสูงกว่าฟีนอลที่ผลิตจากปิโตรเคมีที่จำหน่ายในตลาดทั่วไป รวมไปถึงการใช้ลิกนินเป็นยารักษาโรคยังต้องแบกรับต้นทุนในการทดลองทางคลินิกที่มีค่าใช้จ่ายสูง เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือให้กับผลิตภัณฑ์และสอดคล้องกับข้อกำหนดเกี่ยวกับยาของแต่ละประเทศ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น คือ เทคโนโลยีในการผลิตผลิตภัณฑ์จากลิกนินยังไม่เหมาะสม และไม่เข้าใจ

เกี่ยวกับโครงสร้าง ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการเกิดปฏิกิริยาเคมีของลิกนินเป็นอย่างดี ดังนั้นการตัดสินใจผลิตผลิตภัณฑ์จากลิกนินในเชิงพาณิชย์จำควรวิเคราะห์และพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ การออกแบบทางวิศวกรรม และผลที่เกิดขึ้นทางสิ่งแวดล้อม เพื่อหาต้นทุนการผลิตทั้งหมด เพื่อประเมินความสามารถในการทำกำไรของการผลิตและประมาณราคาขายขั้นต่ำของผลิตภัณฑ์ที่จะทำให้โรงงานมีกำไร (Bajwa et al., 2019; Yu & Kim, 2020)

บทสรุป

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีโครงสร้างซับซ้อน ซึ่งโครงสร้างของลิกนินประกอบไปด้วยมอนอเมอร์หลัก 3 ชนิด คือ พี-ไฮดรอกซีฟีนิล กัวอิอาซิล และไซริงจิล โดยสัดส่วนของมอนอเมอร์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดและวิธีการสกัดลิกนิน ลิกนินมีกลุ่มฟังก์ชันหลายชนิดจึงส่งผลให้มีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เช่น ทนความร้อน สามารถดูซับรังสียูวี ต้านจุลินทรีย์และอนุมูลอิสระ และสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้หลายรูปแบบ ด้วยโครงสร้างและคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ลิกนินจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้านโดยเฉพาะในด้านที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม

ลิกนินเป็นวัสดุที่มีความเป็นไปได้ในการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้อนุภาคนาโนในการดูดซับสารมลพิษในน้ำและในดิน การพัฒนาไฮโดรเจลลิกนินสำหรับการกำจัดโลหะหนัก การผลิตถ่านกัมมันต์จากลิกนินเพื่อใช้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก และมีการใช้ลิกนินเพื่อฟื้นฟูสภาพดินที่เสื่อมโทรม ลิกนินสามารถนำใช้เป็นวัตถุดิบหรือส่วนผสมสำหรับผลิตวัสดุชีวภาพ เช่น พลาสติกชีวภาพ ไมโครแคปซูล บรรจุภัณฑ์ และเชื้อเพลิงชีวภาพ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เช่น การใช้เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา การใช้เป็นแคปซูลสำหรับนำส่งยา และการใช้เป็นตัวตรวจจับทางชีวภาพ นอกจากนี้การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากลิกนินแสดงให้เห็นถึงการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ที่จะใช้ลิกนินเป็นวัสดุทดแทนในเชิงพาณิชย์ค่อนข้างจำกัด เนื่องจากต้นทุนการผลิตสูงกว่ากระบวนการผลิตเดิม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนานวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับลิกนิน ทั้งในด้านการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของลิกนิน การพัฒนาเทคโนโลยีการใช้และผลิตผลิตภัณฑ์จากลิกนินที่เหมาะสม การขยายศักยภาพของตลาด และหาแนวทางในการลดราคาต้นทุนการผลิตให้ได้มากที่สุด

References

Agustiany, E. A., Rasyidur Ridho, M., Rahmi DN, M., Madyaratri, E. W., Falah, F., Lubis, M. A. R., & Fudholi, A. (2022). Recent developments in lignin modification and its application in lignin-based green composites: a review. *Polymer Composites, 43*(8), 4848-4865. https://doi.org/10.1002/pc.26824

Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H., & Bajwa, S. G. (2019). A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. *Industrial Crops and Products, 139*, 111526. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111526

Bertella, S., & Luterbacher, J. S. (2020). Lignin functionalization for the production of novel materials. *Trends in Chemistry, 2*(5), 440-453. https://doi.org/10.1016/j.trechm.2020.03.001

Boquera, L., Olacia, E., Fabiani, C., Pisello, A. L., D'Alessandro, A., Ubertini, F., & Cabeza, L. F. (2021). Thermo-acoustic and mechanical characterization of novel bio-based plasters: The valorisation of lignin as by-product from biomass extraction for green building applications. *Construction and Building Materials, 278*, 122373. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122373

Börcsök, Z., & Pásztory, Z. (2021). The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: An abbreviated literature survey. *European Journal of Wood and Wood Products, 79*, 511-526. https://doi.org/10.1007/s00107-020-01637-3

Casimiro, F. M., Costa, C. A., Vega-Aguilar, C., & Rodrigues, A. E. (2022). Hardwood and softwood lignins from sulfite liquors: Structural characterization and valorization through depolymerization. *International Journal of Biological Macromolecules, 215*, 272-279. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.067

Chauhan, P. S., Agrawal, R., Kumar, R., Gupta, R. P., & Ramakumar, S. S. V. (2022). Next generation applications of lignin derived commodity products, their life cycle, techno-economics and societal analysis. International Journal of Biological Macromolecules, 197, 179-200. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.146

Chen, M., Li, Y., Liu, H., Zhang, D., Shi, Q. S., Zhong, X. Q., & Xie, X. B. (2023). High value valorization of lignin as environmental benign antimicrobial. *Materials Today Bio, 18*, 100520. https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100520

Damayanti, D., Wulandari, Y. R., & Wu, H. S. (2020). Product distribution of chemical product using catalytic depolymerization of lignin. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 15,* 432-453. https://doi.org/10.9767/bcrec.15.2.7249.432-453

Djajadi, D. T., Jensen, M. M., Oliveira, M., Jensen, A., Thygesen, L. G., Pinelo, M., & Meyer, A. S. (2018). Lignin from hydrothermally pretreated grass biomass retards enzymatic cellulose degradation by acting as a physical barrier rather than by inducing nonproductive adsorption of enzymes. *Biotechnology for Biofuels, 11,* 1-13. https://doi.org/10.1186/s13068-018-1085-0

Durmaz, E., Sertkaya, S., Yilmaz, H., Olgun, C., Ozcelik, O., Tozluoglu, A., & Candan, Z. (2023). Lignocellulosic bionanomaterials for biosensor applications. Micromachines, 14(7), 1450. https://doi.org/10.3390/mi14071450

Enayathali, S. S., & Nachiappan, V. (2024). Environment friendly soil stabilization using lignin biopolymer. International Research Journal on Advanced Engineering Hub, 2(6), 1600-1605. https://doi.org/10.47392/IRJAEH.2024.0219

Fu, F., Luo, J., Zhao, L., Yang, F., & Wang, N. (2024). Impact of cellulose and lignin on restoration of vegetation and soil chemical properties for saline-alkali soil of songnen plain. *Plos One, 19*(1), e0296366. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296366

Hasan, M. S., Sardar, M. R., Shafin, A. A., Rahman, M. S., Mahmud, M., & Hossen, M. M. (2023). A brief review on applications of lignin. *Journal of Chemical Reviews, 5*(1), 56-82. https://doi.org/10.22034/jcr.2023.359861.1186

He, L., Dai, Z., Liu, X., Tang, C., & Xu, J. (2021). Effect of alkaline lignin on immobilization of cadmium and lead in soils and the associated mechanisms. *Chemosphere, 281*, 130969. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130969

Jeong, J., Kim, W. S., Lee, M. W., & Goh, M. (2021). Liquefaction of lignin using chemical decomposition and its application to polyurethane foam. *ACS omega, 6*(16), 10745-10751. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00285

Kai, D., Chow, L. P., & Loh, X. J. (2018). Lignin and its properties. In J. X. Loh, D. Kai, & Z. Li (Eds.), *Functional materials from lignin: Methods and advances (Vol. 3)* (pp. 1-28). London: World Scientific Publishing.

Karagoz, P., Khiawjan, S., Marques, M. P., Santzouk, S., Bugg, T. D., & Lye, G. J. (2024). Pharmaceutical applications of lignin-derived chemicals and lignin-based materials: Linking lignin source and processing with clinical indication. *Biomass Conversion and Biorefinery, 14*(21), 26553-26574. https://doi.org/10.1007/s13399-023-03745-5

Khan, P., Ali, S., Jan, R., & Kim, K. M. (2024). Lignin Nanoparticles: Transforming Environmental Remediation. *Nanomaterials, 14*(18), 1541. https://doi.org/10.3390/nano14181541

Kocaturk, E., Salan, T., Ozcelik, O., Alma, M. H., & Candan, Z. (2023). Recent advances in lignin-based biofuel production. *Energies, 16*(8), 3382. https://doi.org/10.3390/en16083382

Krzyzaniak, M., Stolarski, M. J., & Warmiński, K. (2019). Life cycle assessment of poplar production: Environmental impact of different soil enrichment methods. *Journal of Cleaner Production, 206*, 785-796. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.180

Lee, J. G., Larive, L. L., Valsaraj, K. T., & Bharti, B. (2018). Binding of lignin nanoparticles at oil–water interfaces: An ecofriendly alternative to oil spill recovery. *ACS applied materials & Interfaces, 10*(49), 43282-43289. https://doi.org/10.1021/acsami.8b17748

Li, D., Li, Z., Wei, X., Hu, T., Deng, J., Zhang, M., & Zhang, Y. (2024). Efficient removal of lead from polluted paddy soil by one-pot synthesized Nano-Fe3O4 incorporated stable lignin hydrogel. *Chemical Engineering Journal, 496*, 154196. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154196

Li, K., Zhong, W., Li, P., Ren, J., Jiang, K., & Wu, W. (2023). Recent advances in lignin antioxidant: Antioxidant mechanism, evaluation methods, influence factors and various applications. *International Journal of Biological Macromolecules, 2023*, 125992. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125992

Lisý, A., Ház, A., Nadányi, R., Jablonský, M., & Šurina, I. (2022). About Hydrophobicity of lignin: A review of selected chemical methods for lignin valorisation in biopolymer production. *Energies, 15*(17), 6213. https://doi.org/10.3390/en15176213

Liu, Y., Huang, Y., Zhang, C., Li, W., Chen, C., Zhang, Z., & Zhang, Y. (2020). Nano-FeS incorporated into stable lignin hydrogel: A novel strategy for cadmium removal from soil. *Environmental Pollution, 264*, 114739. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114739

Liu, L., Cui, B., Tan, L., & Wang, W. (2021). Improving the combination of cellulose and lignin using xylan as a compatibilizer. *Cellulose, 28*(9), 5335-5349. https://doi.org/10.1007/s10570-021-03864-0

Lu, X., & Gu, X. (2022). A review on lignin pyrolysis: pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading to improve process efficiency. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 15(1), 106. https://doi.org/10.1186/s13068-022-02203-0

Meng, X., Scheidemantle, B., Li, M., Wang, Y. Y., Zhao, X., Toro-González, M., & Ragauskas, A. J. (2020). Synthesis, characterization, and utilization of a lignin-based adsorbent for effective removal of azo dye from aqueous solution. *ACS Omega, 5*(6), 2865-2877. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03717

Mergbi, M., Galloni, M. G., Aboagye, D., Elimian, E., Su, P., Ikram, B. M., & Djellabi, R. (2023). Valorization of lignocellulosic biomass into sustainable materials for adsorption and photocatalytic applications in water and air remediation. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(30), 74544-74574. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27484-2

More, A., Elder, T., & Jiang, Z. (2021). A review of lignin hydrogen peroxide oxidation chemistry with emphasis on aromatic aldehydes and acids. *Holzforschung, 75*(9), 806-823. https://doi.org/10.1515/hf-2020-0165

Moreno, A., & Sipponen, M. H. (2020). Lignin-based smart materials: a roadmap to processing and synthesis for current and future applications. *Materials Horizons, 7*(9), 2237-2257. https://doi.org/10.1039/D0MH00798F

Moretti, C., Corona, B., Hoefnagels, R., Vural-Gürsel, I., Gosselink, R., & Junginger, M. (2021). Review of life cycle assessments of lignin and derived products: Lessons learned. *Science of the Total Environment, 770*, 144656. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144656

Neiva, D. M., Rencoret, J., Marques, G., Gutiérrez, A., Gominho, J., Pereira, H., & Del Río, J. C. (2020). Lignin from tree barks: chemical structure and valorization. *ChemSusChem, 13*(17), 4537-4547. https://doi.org/10.1002/cssc.202000431

Nikolic, M., Cáceres Najarro, M., Johannsen, I., Iruthayaraj, J., Ceccato, M., & Feilberg, A. (2020). Copper adsorption on lignin for the removal of hydrogen sulfide. *Molecules, 25*(23), 5577. https://doi.org/10.3390/molecules25235577

Ouyang, X. P., Tan, Y. D., & Qiu, X. Q. (2014). Oxidative degradation of lignin for producing monophenolic compounds. *Journal of Fuel Chemistry and Technology, 42*(6), 677-682. https://doi.org/10.1016/S1872-5813(14)60030-X

Pandian, B., Ramalingam, S., Sreeram, K. J., & Rao, J. R. (2021). Natural pigment: Preparation of brown pigment from lignin biomass for coloring application. *Dyes and Pigments, 195*, 109704. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109704

Patel, R., Dhar, P., Babaei-Ghazvini, A., Dafchahi, M. N., & Acharya, B. (2023). Transforming lignin into renewable fuels, chemicals, and materials: A review. Bioresource Technology Reports, 22, 101463. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101463

Piccinino, D., Capecchi, E., Tomaino, E., Gabellone, S., Gigli, V., Avitabile, D., & Saladino, R. (2021). Nano-structured lignin as green antioxidant and UV shielding ingredient for sunscreen applications. *Antioxidants, 10*(2), 274. https://doi.org/10.3390/antiox10020274

Qin, Z., Liu, H. M., Gu, L. B., Sun, R. C., & Wang, X. D. (2020). Lignin as a natural antioxidant: Property-structure relationship and potential applications. In T.J. Gutiérrez (Ed.), *Reactive and functional polymers (Vol. 1)* (pp. 65-93). Switzerland: Springer Nature.

Reyes, D. C., Ma, Z., & Romero, J. J. (2024). The Antimicrobial Properties of Technical Lignins and Their. *Derivatives—A Review. Polymers, 16*(15), 2181. https://doi.org/10.3390/polym16152181

Rizal, S., Alfatah, T., HPS, A. K., Mistar, E. M., Abdullah, C. K., Olaiya, F. G., & Muksin, U. (2021). Properties and characterization of lignin nanoparticles functionalized in macroalgae biopolymer films. *Nanomaterials, 11*(3), 637. https://doi.org/10.3390/nano11030637

Sajjadi, M., Ahmadpoor, F., Nasrollahzadeh, M., & Ghafuri, H. (2021). Lignin-derived (nano) materials for environmental pollution remediation: Current challenges and future perspectives. *International Journal of Biological Macromolecules, 178*, 394-423. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.165

Sharma, S., & Kumar, A. (2020). *Lignin: biosynthesis and transformation for industrial applications*. Switzerland: Springer Nature.

Shi, X., Qiao, Y., An, X., Tian, Y., & Zhou, H. (2020). High-capacity adsorption of Cr (VI) by lignin-based composite: Characterization, performance and mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules, 159*, 839-849. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.130

Shi, K., Liu, G., Sun, H., & Weng, Y. (2023). Polylactic acid/lignin composites: A review. *Polymers, 15*(13), 2807. https://doi.org/10.3390/polym15132807

Supanchaiyamat, N., Jetsrisuparb, K., Knijnenburg, J. T., Tsang, D. C., & Hunt, A. J. (2019). Lignin materials for adsorption: Current trend, perspectives and opportunities. *Bioresource Technology, 272*, 570-581. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.139

Solihat, N. N., Sari, F. P., Falah, F., Ismayati, M., Lubis, M. A. R., Fatriasari, W., & Syafii, W. (2021). Lignin as an active biomaterial: a review. *Jurnal Sylva Lestari, 9*(1), 1-22. https://doi.org/10.23960/jsl191-22

Tedeschi, G., Guzman-Puyol, S., Ceseracciu, L., Paul, U. C., Picone, P., Di Carlo, M., & Heredia-Guerrero, J. A. (2020). Multifunctional bioplastics inspired by wood composition: effect of hydrolyzed lignin addition to xylan–cellulose matrices. *Biomacromolecules, 21*(2), 910-920. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b01569

Torres, L. A. Z., Woiciechowski, A. L., de Andrade Tanobe, V. O., Karp, S. G., Lorenci, L. C. G., Faulds, C., & Soccol, C. R. (2020). Lignin as a potential source of high-added value compounds: A review. *Journal of Cleaner Production, 263,* 121499. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121499

Vasile, C., & Baican, M. (2023). Lignins as promising renewable biopolymers and bioactive compounds for high-performance materials. *Polymers, 15*(15), 3177. https://doi.org/10.3390/polym15153177

Verdini, F., Gaudino, E. C., Canova, E., Tabasso, S., Behbahani, P. J., & Cravotto, G. (2022). Lignin as a natural carrier for the efficient delivery of bioactive compounds: From waste to health. *Molecules, 27*(11), 3598. https://doi.org/10.3390/molecules27113598

Wang, B., Wang, S. F., Lam, S. S., Sonne, C., Yuan, T. Q., Song, G. Y., & Sun, R. C. (2020). A review on production of lignin-based flocculants: Sustainable feedstock and low carbon footprint applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134*, 110384. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110384

Wenger, J., Haas, V., & Stern, T. (2020). Why can we make anything from lignin except money? Towards a broader economic perspective in lignin research. *Current Forestry Reports, 6*, 294-308. https://doi.org/10.1007/s40725-020-00126-3

Xiao, D., Ding, W., Zhang, J., Ge, Y., Wu, Z., & Li, Z. (2019). Fabrication of a versatile lignin-based nano-trap for heavy metal ion capture and bacterial inhibition. *Chemical Engineering Journal, 358*, 310-320. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.037

Xiao, L., Liu, W., Huang, J., Lou, H., & Qiu, X. (2020). Study on the antioxidant activity of lignin and its application performance in SBS elastomer. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 60*(1), 790-797. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04699

Yu, O., & Kim, K. H. (2020). Lignin to materials: A focused review on recent novel lignin applications. *Applied Sciences, 10*(13), 4626. https://doi.org/10.3390/app10134626

Zhang, X., Xu, H., Xiang, W., You, X., Dai, H., & Gao, B. (2024). Lignin-impregnated biochar assisted with microwave irradiation for CO2 capture: adsorption performance and mechanism. *Biochar, 6*(1), 22. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00310-9

Zhang, Y., & Naebe, M. (2021). Lignin: A review on structure, properties, and applications as a light-colored UV absorber. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9*(4), 1427-1442. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06998

Zhang, Z., Terrasson, V., & Guénin, E. (2021). Lignin nanoparticles and their nanocomposites. *Nanomaterials, 11*(5), 1336. https://doi.org/10.3390/nano11051336

Zhao, J., Zhang, W., Wang, Q., Shen, D., & Wang, Z. (2024). Lignin-derived porous carbons for efficient CO_2 adsorption. *Carbon Capture Science & Technology, 13*, 100233. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100233

Zhao, Y., Xue, L., Huang, Z., Lei, Z., Xie, S., Cai, Z., & Xie, S. (2024). Lignin valorization to bioplastics with an aromatic hub metabolite-based autoregulation system. *Nature Communications, 15*(1), 9288. https://doi.org/10.1038/s41467-024-53609-3