

เทคโนโลยีไบโอรีไฟเนอรีเพื่อแปรสภาพชีวมวลเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงแบบไร้ของเสียอย่างยั่งยืน

ไบโอรีไฟเนอรีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิง สารเคมี และวัสดุเช่นพลาสติกชีวภาพจากวัตถุดิบที่ได้จากพืชซึ่งพื้นฐานจะอยู่ในรูปของลิกโนเซลลูโลสซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งสามารถผ่านกระบวนการแยกส่วนเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ได้ในรูปแบบต่างๆผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพ เซลลูโลสจัดเป็นแหล่งคาร์บอนหมุนเวียน ที่มีมากที่สุดในธรรมชาติซึ่งคิดเป็นสัดส่วน ๓๐-๖๐ เปอร์เซ็นต์ ในชีวมวลทางการเกษตร โดยเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในการเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ สารเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม เซลลูโลสตัดแปลง รวมถึงการใช้ในการผลิตวัสดุชีวภาพและคอมพอสิตในรูปแบบต่างๆ โดยกระบวนการทางเคมีหรือชีวกระบวนการ เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีมากเป็นอันดับสองในธรรมชาติ โดยคิดเป็นสัดส่วน ๒๐-๓๐ เปอร์เซ็นต์ ในชีวมวล โดยมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันไปในพื้นที่ชนิดต่างๆเช่นในรูปของกลูคูโรโนไซแลน อะราบิโนไซแลน กลูโคแมนแนน และไซโลกลูแคน และไซแลน ซึ่งสามารถใช้เปลี่ยนเป็นสารเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม และสารเติมแต่งเชิงฟังก์ชันที่หลากหลายโดยใช้กระบวนการทางเคมีและชีวภาพ ในขณะที่ลิกนินจัดเป็นแหล่งของสารอะโรมาติกที่หมุนเวียนกลับมาใช้ได้ที่มีมากที่สุดในธรรมชาติโดยคิดเป็นสัดส่วน ๒๐-๓๐ เปอร์เซ็นต์ในชีวมวลทางการเกษตร ซึ่งมีฟีนอลิกแอลกอฮอล์เป็นองค์ประกอบ โดยลิกนินที่แยกได้จากพืชในกลุ่มต่างๆ และผ่านกระบวนการสกัดที่ใช้สารเคมีและตัวทำละลายที่แตกต่างกันมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน และมีการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆนอกเหนือจากการใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์พื้นฐานในปัจจุบัน โดยเปลี่ยนไปสู่การใช้ประโยชน์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นในการผลิตวัสดุชีวภาพ คอมพอสิต และสารเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม

ความเป็นกลางทางคาร์บอน คือสถานะที่การปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ซึ่งเป็นเป้าหมายสำคัญในระดับนานาชาติเพื่อต่อสู้กับสภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นวิกฤตที่ทุกประเทศเผชิญและมีภาระผูกพันในการแก้ปัญหาาร่วมกัน การเกิดก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมและอุตสาหกรรมของมนุษย์เป็นปัจจัยหลักในการเร่งภาวะโลกร้อน การควบคุมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นประเด็นที่มีความสำคัญระดับโลกซึ่งได้รับการยอมรับจากประชาคมระหว่างประเทศ ร่างข้อตกลงปารีสยอมรับความจำเป็นในการจำกัดความร้อนให้ต่ำกว่า ๒ องศาเซลเซียส เหนือระดับก่อนยุคอุตสาหกรรม และจำกัดการเพิ่มอุณหภูมิไว้ที่ ๑.๕ องศาเซลเซียส เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบด้านสภาพอากาศที่เลวร้ายที่สุด ประชาคมระดับนานาชาติได้ดำเนินการร่วมกันเพื่อชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผ่านนโยบายต่างๆ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแหล่งพลังงานและกิจกรรมทางอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ควบคู่ไปกับการหากกลยุทธ์และเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอน ตามรายงานของ COP26 ประเทศไทยมุ่งมั่นที่จะบรรลุเป้าหมายการปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ในปี พ.ศ. ๒๕๕๓ และปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างเป็นทางการเป็นกลางในปี พ.ศ. ๒๕๖๘ โดยมีเป้าหมายระยะสั้นที่การลดก๊าซเรือนกระจกให้ได้ ๔๐ เปอร์เซ็นต์ ในปี พ.ศ. ๒๕๗๓ ประเทศไทยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ๒๗๑ ล้านเมตริกตันในปี ๒๕๕๙ โดยเพิ่มขึ้น ๑.๕๕ เปอร์เซ็นต์ต่อปี คิดเป็น ๐.๗๖ เปอร์เซ็นต์ ของส่วนแบ่งทั่วโลก อุตสาหกรรมไฟฟ้ามีส่วนรับผิดชอบต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด (๓๑.๙ เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือการเผาไหม้ในภาคอุตสาหกรรม (๒๗.๗ เปอร์เซ็นต์) และการขนส่ง (๒๓.๓ เปอร์เซ็นต์) สิ่งนี้นำไปสู่ความต้องการที่ชัดเจนในการพัฒนาเทคโนโลยีการดักจับ กักเก็บและใช้ประโยชน์จากคาร์บอน และการลงทุนโดยภาครัฐและเอกชนเพื่อให้บรรลุเป้าหมายระดับชาติที่ท้าทายนี้

ไบโอรีไฟเนอรีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิง สารเคมี และวัสดุเช่นพลาสติกชีวภาพจากวัตถุดิบที่ได้จากพืชที่มีคุณสมบัติเป็นกลางทางคาร์บอนเพื่อทดแทนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้วัตถุดิบฟอสซิล ซึ่งส่งผลในการสร้างความยั่งยืนทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยได้ผลักดันอุตสาหกรรมไบโอรีไฟเนอรี โดยมีการคาดการณ์ว่าจะส่งผลในการเพิ่มมูลค่าของภาคการเกษตรมากกว่า ๓๐๐,๐๐๐ ล้านบาทต่อปี และยกระดับประเทศไทยขึ้นสู่การเป็นศูนย์กลางของอุตสาหกรรมไบโอรีไฟเนอรีในระดับภูมิภาค เพื่อเป็นการสร้างอุตสาหกรรมใหม่นี้ให้มีความเข้มแข็ง ภาครัฐจึงได้ดำเนินการ

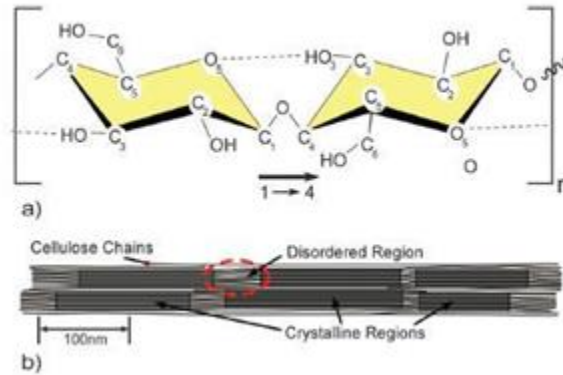
ผลักดันการสร้างองค์ความรู้และเทคโนโลยีในด้านเทคโนโลยีชีวภาพซึ่งเป็นพื้นฐานของอุตสาหกรรมไบโอรีไฟเนอรี่อย่างต่อเนื่อง โดยเป็นแผนงานหลักในโครงการจัดตั้งเขตนวัตกรรมระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออกซึ่งเป็นหนึ่งในแผนการสร้างเทคโนโลยีเพื่อขับเคลื่อนโครงการระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออกของประเทศ ด้วยสถานการณ์ในอนาคตเกี่ยวกับความหลากหลายและความไม่แน่นอนของรูปแบบเชื้อเพลิงและพลังงานที่ใช้ในภาคขนส่งเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในปัจจุบันซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงชีวภาพ และพลังงานไฟฟ้า การปรับเปลี่ยนอุตสาหกรรมเอทานอลและอุตสาหกรรมการเกษตรในปัจจุบันให้เป็นรูปแบบที่สามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพร่วมกับผลิตภัณฑ์เคมีในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการเปลี่ยนจากการใช้วัตถุดิบรุ่นที่หนึ่งซึ่งสามารถบริโภคได้ (น้ำตาลและแป้ง) เป็นวัตถุดิบรุ่นที่สองซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีความยั่งยืนกว่าและไม่มีผลกระทบต่อการใช้เป็นอาหาร รวมถึงการปรับเปลี่ยนธุรกิจของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและพลาสติกและเคมีภัณฑ์ไปสู่การใช้วัตถุดิบคาร์บอนหมุนเวียน ที่ไม่กระทบกับการเพิ่มระดับก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศยังเป็นแนวทางการสร้างธุรกิจใหม่ที่ตอบสนองกฎระเบียบและความต้องการในระดับโลกซึ่งกำหนดสัดส่วนการใช้วัตถุดิบที่ไม่ใช่ฟอสซิลมากขึ้น จึงเป็นความท้าทายของการวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีซึ่งเชื่อมโยงไปถึงความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศและการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ และจะมีบทบาทสำคัญในการผลักดันเศรษฐกิจของประเทศ ตามแผนเศรษฐกิจฐานชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว และเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนของภาครัฐอีกด้วย

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่างๆมีโครงสร้างทางเคมีในรูปของลิกโนเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานสามชนิดได้แก่ (๑) เซลลูโลส (๓๕-๕๐ เปอร์เซ็นต์) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบเบต้า 1.4 ซึ่งมีความเป็นผลึกสูงและมีการจัดเรียงในรูปแบบของไมโครไฟเบอร์ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของเส้นใยพืช (๒) เฮมิเซลลูโลส (๒๐-๓๕ เปอร์เซ็นต์) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งที่ประกอบด้วยน้ำตาลเพนโทสและเฮกโซสหลากหลายชนิด รวมถึงอนุพันธ์ของน้ำตาลต่างๆ โดยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงกับ (๓) ลิกนิน (๑๐-๒๕ เปอร์เซ็นต์) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ของสารในกลุ่มฟีนอลิกแอลกอฮอล์ ซึ่งมีหน้าที่ในการให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์พืช โดยอยู่ในรูปแบบเชิงซ้อนกับส่วนเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารในกลุ่มโปรตีน ไขมัน และเถ้าเป็นองค์ประกอบรอง (Fengel, D. and Wegener, G. (1984)) โดยองค์ประกอบหลักทั้งสามส่วนนี้มีความแตกต่างกันในเชิงโครงสร้างทางเคมีในรายละเอียดในพืชชนิดต่างๆเช่นในกลุ่มไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน และพืชล้มลุก ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีชีวภาพแบบบูรณาการ โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสมีความแข็งแรงต่อปัจจัยภายนอกทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ การพัฒนาเทคโนโลยีในการใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบต่างๆของวัสดุลิกโนเซลลูโลสซึ่งมีความแข็งแรงทนทานนี้เป็นโจทย์วิจัยหลักในงานวิจัยด้านอุตสาหกรรมไบโอรีไฟเนอรี่ กระบวนการแยกองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสเป็นขั้นตอนเริ่มต้นที่สำคัญเพื่อแยกองค์ประกอบในรูปของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยจะทำให้แต่ละสัดส่วนมีความบริสุทธิ์ในระดับสูง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการนำแต่ละส่วนไปใช้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพและสารเคมีพื้นฐานจากชีวมวล โดยการแยกองค์ประกอบนี้สามารถทำได้หลายวิธีเช่นวิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมีเช่นการใช้กรด ต่างหรือสารออกซิเดชัน และวิธีการทางเคมีความร้อนเช่นการระเหยไอน้ำ หรือการใช้ความร้อนความดันสูง หรือการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีความจำเพาะต่อองค์ประกอบต่างๆของชีวมวล โดยแต่ละวิธีจะมีความจำเพาะต่อการแยกองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสชนิดต่างๆแตกต่างกัน และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกัน โดยสามารถใช้ในรูปของขั้นตอนเดียวหรือประกอบหลายขั้นตอนเข้าด้วยกัน

การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่มีมากที่สุดในชีวมวล เซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยของ β -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง β -1-4-linkages เกิดเป็นสาย ดังแสดงในรูปที่ ๑ ซึ่งแสดงการรวมกันของวงแหวนสองวงของ anhydroglucose ($(C_6H_{10}O_5)_n$, $n=10,000-15,000$) ที่เชื่อมต่อกันของกลูโคสหรือที่เรียกว่าเซลโลไบโอส ในหนึ่งโมโนเมอร์ของกลูโคสจะมีหมู่ไฮดร

ออกซิเจนอยู่ ๓ หมู่ ที่สามารถสร้างพันธะกับไฮโดรเจนได้ โดยพันธะนี้ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดความเป็นผลึกของเซลลูโลส รวมถึงการกำหนดลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลสอีกด้วย โดยโครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน



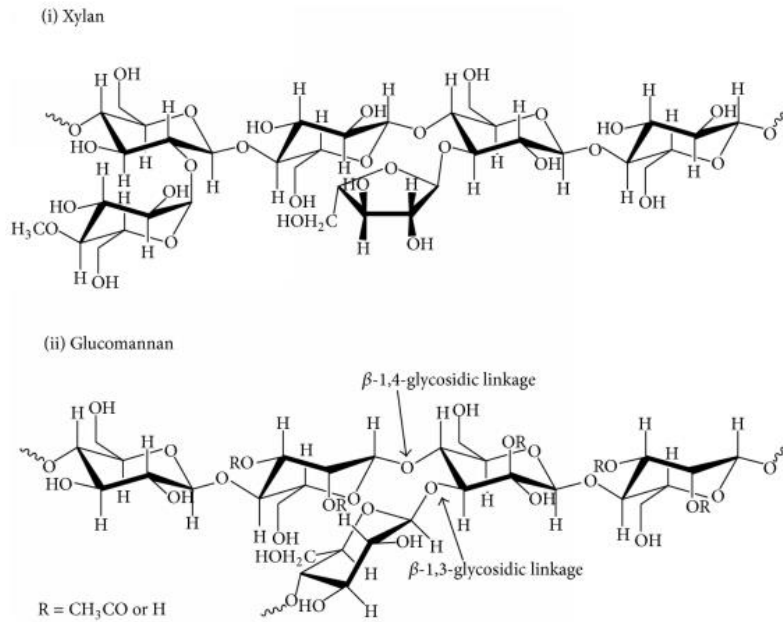
รูปที่ ๑ การจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ของกลูโคสและโครงสร้างเซลลูโลสไมโครไฟบริล (Robert J. Moon, Ashlie Martini, John Nairn, John Simonsen and Jeff Youngblood, 2011)

ปัจจุบันมีการนำเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆที่หลากหลายทั้งในรูปของพอลิเมอร์หรืออนุพันธ์เช่นการใช้ในรูปของนาโนเซลลูโลสหรือเซลลูโลสที่มีการเติมหมู่ฟังก์ชันทางเคมีชนิดต่างๆ หรือผ่านการย่อยเป็นน้ำตาลเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการหมักหรือทางเคมีเพื่อเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเช่นเอทานอล และชีวเคมีภัณฑ์ชนิดต่าง เช่น กรดแลคติก กรดซัลซินิก หรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ในรูปซอร์บิทอล ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆเช่น อาหาร เกษีกรรม ด้านการแพทย์ พลาสติกชีวภาพและเป็นสารเสริมความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิทต่างๆ นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุธรรมชาติซึ่งสกัดจากเซลลูโลสในพืช มีเอกลักษณ์และคุณสมบัติเฉพาะ ได้รับความสนใจอย่างมากในการพัฒนาใช้งานเป็นวัสดุทางการแพทย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นด้านเคมีพื้นผิวพิเศษ ดัดแปลงได้ง่าย และคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดีเยี่ยม มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และความเป็นพิษต่ำ ปัจจุบันนาโนเซลลูโลส ๓ ชนิดที่นิยมนำมาใช้ทางด้านทางการแพทย์ ได้แก่ เซลลูโลสนาโนคริสตัล เซลลูโลสนาโนไฟบริล และเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ซึ่งถูกนำมาใช้และเปรียบเทียบในแง่ของการผลิต คุณสมบัติ และการใช้งานด้านชีวการแพทย์ กรรมวิธีการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากชีวมวลที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การปรับสภาพทางเคมี ทางกล เคมีกายภาพ และเอนไซม์ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุนาโนเซลลูโลสส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับเทคนิคการสกัดแหล่งที่มาของเซลลูโลส และการดัดแปลงพื้นผิวของนาโนเซลลูโลสที่ได้ย่อมมีประสิทธิภาพ (Thakur, V.; Guleria, A.; Kumar, S.; Sharma, S.; Singh, K. 2021) จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมา พบว่านาโนเซลลูโลสที่แยกจากผนังเซลล์พืช อาทิ วัสดุลิกโนเซลลูโลสจากการเกษตร ด้วยวิธีการทางเคมี ได้แก่ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น หรือกรดแก่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยที่ค่อนข้างสั้นและมีความยาวที่แตกกัน ควบคุมขนาดความยาวเส้นใยได้ยาก (Zuluaga, R.; Putaux, J.-L.; Restrepo, A.; Mondragon, I.; Gañán, P. 2007) หลักการสำคัญคือการไฮโดรไลซิสของกรดจะทำลายบริเวณออสัณฐานของเซลลูโลส ในขณะที่ยังคงรักษาบริเวณที่เป็นผลึกด้วยความเป็นผลึกที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของการสกัดนาโนเซลลูโลสด้วยกรดที่สำคัญคือความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม การกักตุนอุปกรณ์ ตลอดจนต้นทุนในการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการ (Li, C.; Knierim, B.; Manisseri, C.; Arora, R.; Scheller, H. V.; Auer, M.; Vogel, K. P.; Simmons, B. A.; Singh, S. 2010) นอกจากการใช้กรด ยังพบรายงานวิจัยการใช้สารเคมีอื่นๆ ในการสกัดเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ออกซิเจน โอโซน (García-Cubero, M. T.; Palacín, L. G.; González-Benito, G.; Bolado, S.; Lucas, S.; Coca, M. 2013) และการใช้ตัวทำละลาย

อินทรีย์ อาทิ เมทานอล เอทานอล บิวทานอล ไตรเอทิลีนไกลคอล เตตระไฮโดรฟิวแรน อีเธอร์ คีโตน เบนซีน เป็นต้น (Akhtar, N.; Gupta, K.; Goyal, D.; Goyal, A. 2016) สำหรับการผลิตนาโนเซลลูโลสด้วยคอมเพล็กซ์ของเอนไซม์เซลลูเลส Cellobiohydrolase ได้แก่ Exoglucanases ซึ่งไฮโดรไลซ์ส่วนที่เป็นผลึกเซลลูโลสจากปลายสารโซ่ Endoglucanases ซึ่งทำการไฮโดรไลซ์ส่วนที่เป็นอสัณฐานร่วมกับเอนไซม์เฮมิเซลลูเลส เพคตินเนสซึ่งกำจัดเฮมิเซลลูโลสและเพคตินตามลำดับ ทำให้สามารถทำลายโครงสร้างแมทริกซ์เซลลูโลสให้ได้นาโนเซลลูโลส ซึ่งพบว่าการใช้เอนไซม์เป็นวิธีที่จำเพาะ ให้ผลได้นาโนเซลลูโลสสูง ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้อุณหภูมิไม่สูง อย่างไรก็ตามพบว่าข้อเสียคือราคาเอนไซม์และกระบวนการที่ใช้ระยะเวลานานในการ Disintegrate เซลลูโลสสำหรับการแยกนาโนเซลลูโลสด้วยวิธีทางกล มีรายงานวิจัยการใช้ความดันที่สูง คลื่นเสียง ความเย็นจะทำให้ได้นาโนเซลลูโลสที่มีขนาดแตกต่างกันมาก ควบคุมได้ยากและสิ้นเปลืองพลังงานสูง ดังนั้นการผสมผสานเทคนิคทางเคมีกายภาพร่วมกับเทคนิคเชิงกลคาดว่าจะมีความเป็นไปได้สูงในการผลิตนาโนเซลลูโลสในปริมาณมากได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด ความท้าทายหลักในการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวนาโนเซลลูโลสคือการเลือกเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ฟังก์ชันเกิดขึ้น ฟังก์ชันพื้นผิวสามารถทำได้ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมหรือหลังการผลิตนาโนเซลลูโลส (Wei, L.; Agarwal, U. P.; Hirth, K. C.; Matuana, L. M.; Sabo, R. C.; Stark, N. M. 2017) กระบวนการนี้ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติขั้นสุดท้ายของนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันพื้นผิว เช่น ความเป็นผลึก ผลผลิต ขนาดและสัณฐานวิทยา เคมีพื้นผิว เคมีกายภาพ และคุณสมบัติทางความร้อน หากเลือกแนวทางกระบวนการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ถูกต้อง เครื่องขยายคริสตัล ๓ มิติอาจถูกทำลายในระหว่างปฏิกิริยาการดัดแปลง ดังนั้นคุณสมบัติทางกลของนาโนเซลลูโลสอาจลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้จำกัดการใช้งานของนาโนเซลลูโลสที่ดัดแปลง ในบางวิธีนาโนเซลลูโลสจะถูกดัดแปลงในระหว่างขั้นตอนการผลิต ในขณะที่กรรมวิธีที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา จะทำการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสก่อนแล้วตามด้วยการทำปฏิกิริยาการปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันพื้นผิว

การใช้ประโยชน์จากเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีมากเป็นอันดับที่สองในธรรมชาติรองจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างในรูป heteropolysaccharide แบบกิ่งซึ่งมีลักษณะแบบอสัณฐานโดยประกอบด้วยน้ำตาลในกลุ่มเพนโตส (ไซโลส อะราบิโนส) เป็นหลักร่วมกับน้ำตาลในกลุ่มเฮกโซส (แมนโนส และกาแลกโตส) รวมถึงอนุพันธ์ของน้ำตาลเช่นในรูป sugar acid หรือมีการแทนที่ด้วยหมู่ฟีนอลิก ยูโรนิค อะซีทิล ไซแลนเป็นเฮมิเซลลูโลสที่มีมากในไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่นขานอ้อย ฟาง และรำข้าว ของเสียจากปาล์ม และชังข้าวโพด โดยมีองค์ประกอบหลักคือ 1,4-linked β -D-xylopyranose และมีส่วนกิ่งที่ประกอบด้วยน้ำตาลอะราบิโนส กรดกลูคูโรนิค หรืออนุพันธ์ในรูป-O-methyl 4 ether, acetic, ferulic, และ p-coumaric acid ซึ่งมีตำแหน่งและสัดส่วนที่แตกต่างกันไปตามแหล่งของไซแลน (รูปที่ ๒)



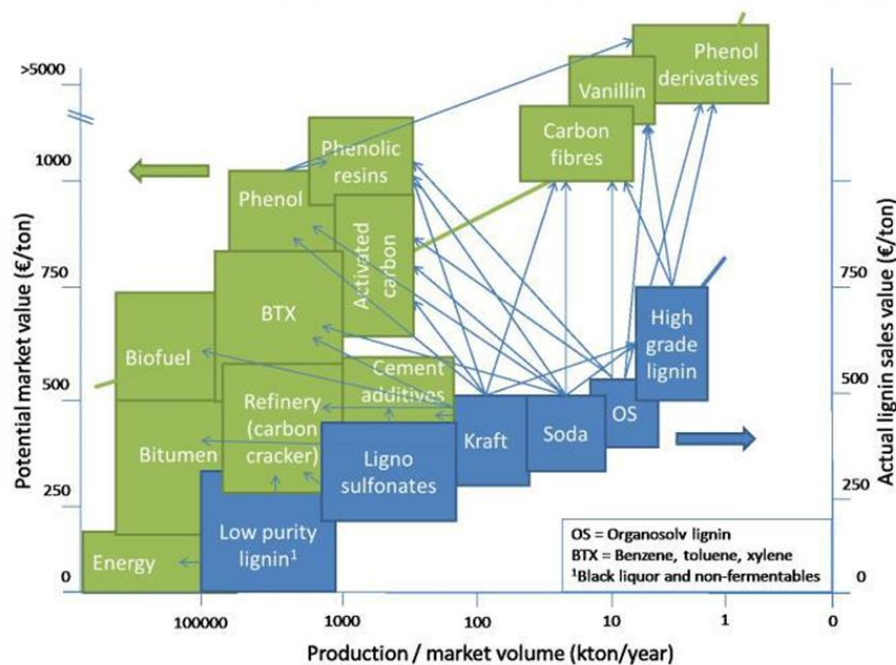
รูปที่ ๒ โครงสร้างทางเคมีของไซแลน (Otieno and Ahring, 2012)

การใช้ประโยชน์จากส่วนเฮมิเซลลูโลสมีความสำคัญในการเพิ่มความน่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์ ของอุตสาหกรรมเคมีชีวภาพแบบบูรณาการซึ่งเน้นการใช้ประโยชน์สูงสุดจาก องค์ประกอบทุกส่วนของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเฮมิเซลลูโลสเพื่อ วัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น การผลิต cationic hemicellulose ซึ่งใช้ในการผลิตกระดาษรวมถึงการใช้ไซโลสในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่นเอทานอล และบิวทานอล และสารเคมีในกลุ่มต่างๆเช่น Xylitol ซึ่งใช้เป็นสารให้ความหวาน Furfural ซึ่งเป็น precursor ในอุตสาหกรรมเคมี หรือสารเคมีในกลุ่ม commodity อื่นๆ เช่น furfural, levulinic acid รวมถึงในรูปของ xylo-oligosaccharide ซึ่งได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในการใช้เป็น pre-bioticในอุตสาหกรรมอาหารและอาหารเสริม กระบวนการผลิตโอลิโกแซคคาไรด์สามารถแบ่งได้เป็นขั้นตอนต่างๆ เริ่มตั้งแต่การแยกหรือเพิ่มระดับการเข้าถึงต่อพอลิแซคคาไรด์เป้าหมายที่เป็นซับซ้อนจากวัตถุดิบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรืออุตสาหกรรมโดยใช้วิธีทางเคมีหรือกายภาพ ก่อนทำการย่อยพอลิแซคคาไรด์เป้าหมายด้วยกระบวนการที่เหมาะสม เช่น กระบวนการทางเคมีโดยใช้กรด กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เช่น การใช้น้ำร้อนความดันสูงในสภาวะก่อนวิกฤต การใช้รังสีแกมมาในการลดขนาดโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ตั้งต้นเป็นโอลิโกแซคคาไรด์ หรือการใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ (Chen, R. 2018) ทั้งนี้กระบวนการทางเคมีหรือไฮโดรเทอร์มอลจะมีข้อจำกัดในการใช้อุณหภูมิสูง และมีการใช้สารเคมีเช่นกรด ซึ่งทำให้ต้องใช้ระบบปฏิกรณ์เคมีที่มีต้นทุนสูง รวมถึงยังมีความยากในการควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์ รวมถึงเกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์จากปฏิกิริยาเคมีที่ไม่จำเพาะซึ่งทำให้เป็นการเพิ่มความซับซ้อนในขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์ เช่นเดียวกับการใช้รังสีซึ่งมีข้อจำกัดในการขยายขนาดกระบวนการ กระบวนการผลิตโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเอนไซม์เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงทั้งในเชิงปริมาณและความจำเพาะต่อขนาดของผลิตภัณฑ์ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถแข่งขันในเชิงเศรษฐศาสตร์

การใช้ประโยชน์จากลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบที่อยู่ในผนังชั้นที่สองของผนังเซลล์โดยทำหน้าที่ห่อหุ้มเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งทำให้ผนังเซลล์ที่เพิ่มความแข็งแรงทางกายภาพ รวมถึงป้องกันการย่อยสลายและเน่าเปื่อยจากจุลินทรีย์ ปริมาณองค์ประกอบ ลิกนินในชีวมวลมีความหลากหลาย โดยมีปริมาณตั้งแต่ร้อยละ ๑๕-๓๐ หรือบางกรณีอาจสูงถึงร้อยละ ๔๐ ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช เช่น

ไม้ล้มลุก (annual plant) ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) หรือไม้เนื้ออ่อน (softwood) อายุ และสภาวะในการเจริญเติบโต ลิกนิน เป็นสารโพลิเมอร์ polymer ที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ ๑๐ ถึง ๑๐๐๐ ดาลตัน หรือมากกว่า โดยสังเคราะห์ขึ้นจาก phenylpropane 3 ชนิด ซึ่งมีความแตกต่างของ methoxy groups ได้แก่ p-coumaryl alcohol (H), coniferyl alcohol (G) และ sinapyl alcohol (S) การใช้ประโยชน์จากส่วนลิกนินจัดเป็นหัวข้องานวิจัยที่ทำนายในการพัฒนาอุตสาหกรรมไบโอรีไฟเนอรีเนื่องจากความหลากหลายขององค์ประกอบและความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง โดยลิกนินส่วนใหญ่ที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษถูกใช้ในการผลิตพลังงานในรูปความร้อนเพื่อใช้ในโรงงานซึ่งมีมูลค่าทางเศรษฐกิจต่ำ (๗๐-๑๕๐ เหรียญสหรัฐ/ตัน) ในขณะที่บางส่วนได้รับการแยกให้อยู่ในรูปของลิกโนซัลโฟเนต (ร้อยละ ๘๐) และคราฟท์ลิกนิน ซึ่งจัดเป็นลิกนินกลุ่มที่มีซัลเฟอร์ซึ่งถูกนำไปใช้ในการผลิตสารยึดเกาะ สารผสมซีเมนต์ หรือเรซิน ซึ่งราคาค่อนข้างต่ำ [44] ในปัจจุบันมีความสนใจในการใช้ประโยชน์จากลิกนินที่ได้จากกระบวนการไบโอรีไฟเนอรีเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะลิกนินที่เตรียมได้จากกระบวนการแอลคาไล (โซดาลิกนิน) ซึ่งได้จากการสกัดโดยใช้เบสเช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และออร์กาโนโซลฟ์ ลิกนินซึ่งได้จากกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เช่นเอทานอล กรดอินทรีย์ หรือคีโตน โดยลิกนินทั้งสองชนิดนี้จัดเป็นกลุ่มลิกนินที่ปราศจากซัลเฟอร์และมีความบริสุทธิ์สูงกว่า รวมถึงมีสามารถรักษาโครงสร้างตามธรรมชาติของลิกนินได้ดีกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของออร์กาโนโซลฟ์ลิกนิน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆที่หลากหลายและมีมูลค่าสูง เช่นการนำไปใช้ผลิตสารพีนอลิก คาร์บอนไฟเบอร์ และสารเคมีชนิดต่างๆ (รูปที่ ๓)



รูปที่ ๓ การใช้ประโยชน์จากลิกนินในการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ (Espinoza-Acosta J., L, Torres-Chávez P.,I., Ramirez-Wong B., López-Saiz C.M., Montano-Leyva B. (2016))

ในบริบทของประเทศไทยนั้น ชานอ้อยเป็นชีวมวลทางการเกษตรที่มีศักยภาพของประเทศไทย ที่มีปริมาณมากกว่า ๓๐ ล้านตันต่อปี ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตลิกนินได้มากถึง ๗.๕ ล้านตันต่อปี อย่างไรก็ตามชานอ้อยเกือบทั้งหมดในปัจจุบันถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนในโรงงานน้ำตาลและโรงงานเอทานอลซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจค่อนข้างต่ำ โดยภาคเอกชนชั้นนำในประเทศไทยมีความสนใจอย่างมากในการเพิ่มมูลค่าชานอ้อยที่มีอยู่ในรูปแบบที่ใช้เป็นวัตถุดิบใน

อุตสาหกรรมไบโอรีไฟเนอรี ซึ่งสามารถแบ่งมาได้ ๑๐-๒๐ เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณขานอ้อยทั้งหมดในเบื้องต้น นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปาล์ม น้ำมัน และการแปรรูปไม้ยางพารา อย่างไรก็ตาม การศึกษาการใช้ประโยชน์จากลิกนินของขานอ้อยรวมถึงชีวมวลอื่น ๆ ในประเทศยังมีอยู่อย่างจำกัดเนื่องจากข้อจำกัดในเชิงเทคโนโลยีในการสกัดในระดับขยายขนาด รวมถึงข้อจำกัดเชิงเทคนิคในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของลิกนิน ที่ผ่านมามีการศึกษาการใช้ประโยชน์ลิกนินจากขานอ้อยในด้านต่างๆ (Sunthornvarabhas J., Liengprayoon S., Suwonsichon T. (2017)) ได้รายงานการสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ของแอลคาไลลิกนินที่ได้จากขานอ้อยที่สกัดที่อุณหภูมิต่ำ (<๑๐๕ องศาเซลเซียส) และการประยุกต์ใช้ในการเคลือบเส้นใยสิ่งทอ โดย Sriroth & Sunthornvarabhas 2018 ได้รายงานการประเมินต้นทุนของลิกนินที่ได้ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้เป็นสารยับยั้งแบคทีเรีย Ratanasumarn & Chitprasert 2020 ได้รายงานศักยภาพของแอลคาไลลิกนินที่สกัดจากในการใช้เป็นสารเติมแต่งในเครื่องสำอาง เช่น สมบัติการป้องกันรังสียูวี และการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส อย่างไรก็ตาม ยังคงเป็นการสกัดลิกนินในระดับหลอดทดลองขนาดเล็กที่ปริมาณของแข็งตั้งต้นต่ำมาก (๑:๕๐) ภายใต้สภาวะที่จำกัด ทั้งนี้ งานวิจัยที่ผ่านมามีส่วนใหญ่มุ่งคงเป็น การศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเน้นการศึกษาเฉพาะลิกนินที่สกัดได้โดยตรงจากกระบวนการที่ใช้แอลคาไลภายใต้สภาวะจำเพาะและเป็นการใช้โดยตรงโดยไม่ผ่านการแยกหรือปรับแต่งเชิงโครงสร้าง รวมทั้งมีการศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพและสมบัติหน้าที่เชิงเคมีรวมถึงการประยุกต์ใช้ที่จำกัด ซึ่งทำให้มีความจำเป็นในการทำการศึกษาลิกนินจากวัตถุดิบต่างๆ ที่มีความแตกต่างกันในเชิงโครงสร้างทางเคมี ในระดับที่ขยายขนาด และมีการทดสอบการประยุกต์ใช้ที่ครอบคลุมความสนใจด้านต่างๆ ของภาคเอกชนในเชิงลึกมากขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมได้

เอกสารอ้างอิง

- Akhtar, N.; Gupta, K.; Goyal, D.; Goyal, A. Recent advances in pretreatment technologies for efficient hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 2016, 35 (2), 489-511.
- Chen, R. 2018. Enzyme and microbial technology for synthesis of bioactive oligosaccharides: an update. *Appl Microbiol Biotechnol*, 102(7), 3017-3026.
- Espinoza-Acosta J., L, Torres-Chávez P.,I., Ramirez-Wong B., López-Saiz C.M., Montano-Leyva B. (2016) Antioxidant, antimicrobial, and antimutagenic properties of technical lignins and their applications. *BioResources* 11: 5452-5481.
- Fengel, D. and Wegener, G. (1984) Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter, 613, 1960-1982.
- García-Cubero, M. T.; Palacín, L. G.; González-Benito, G.; Bolado, S.; Lucas, S.; Coca, M. An analysis of lignin removal in a fixed bed reactor by reaction of cereal straws with ozone. *Bioresour. Technol.* 2012, 107, 229-234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.010>. Bule, M. V.; Gao, A. H.; Hiscox, B.; Chen, S. Structural Modification of Lignin and Characterization of Pretreated Wheat Straw by Ozonation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2013, 61 (16), 3916-3925.
- Li, C.; Knierim, B.; Manisseri, C.; Arora, R.; Scheller, H. V.; Auer, M.; Vogel, K. P.; Simmons, B. A.; Singh, S. Comparison of dilute acid and ionic liquid pretreatment of switchgrass: Biomass recalcitrance, delignification and enzymatic saccharification. *Bioresour. Technol.* 2010, 101 (13), 4900-4906.

- Otieno and Ahring, 2012. *Carbohydr Res*, 360, 84-92
- Ratanasumarn N., Chaiprasert P. (2020) Cosmetic potential of lignin extracts from alkaline-treated sugarcane bagasse: optimization of extraction conditions using surface response methodology. *Inter J Biol Macromol*.
- Robert J. Moon, Ashlie Martini, John Nairn, John Simonsen and Jeff Youngblood, *Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites*, 2011. 40 (7), 3941-3994
- Sriroth K, Sunthornvarabhas J. (2018) Lignin from sugar process as natural antimicrobial agent. *Biochemistry & Pharmacology: Open access*. 7, 1000239.
- Sunthornvarabhas J., Liengprayoon S., Suwonsichon T. (2017) Antimicrobial kinetic activities of lignin from sugarcane bagasse for textile product. *Indus Crop Prod* 109: 857-861.
- Thakur, V.; Guleria, A.; Kumar, S.; Sharma, S.; Singh, K. Recent advances in nanocellulose processing, functionalization and applications: a review. *Materials Advances* 2021, 2 (6), 1872-1895
- Wei, L.; Agarwal, U. P.; Hirth, K. C.; Matuana, L. M.; Sabo, R. C.; Stark, N. M. Chemical modification of nanocellulose with canola oil fatty acid methyl ester. *Carbohydr. Polym.* 2017, 169, 108-116.
- Zuluaga, R.; Putaux, J.-L.; Restrepo, A.; Mondragon, I.; Gañán, P. Cellulose microfibrils from banana farming residues: isolation and characterization. *Cellulose* 2007, 14 (6), 585-592. DOI: 10.1007/s10570-007-9118-z. Alemdar, A.; Sain, M. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues – Wheat straw and soy hulls. *Bioresour. Technol.* 2008, 99 (6), 1664-1671.