भारतीय वैज्ञानिक एवं औद्योगिक अनुसंधान पत्रिका
वर्ष 33 अंक (2) दिसम्बर 2025 पृ. 132-137
DOI: 10.56042/bvaap.v33i2.10770

लिग्नोसेल्युलोसिक बायोमास से बायोएथेनॉल उत्पादनः एक समीक्षा

अर्चना सक्सेना
रसायन विभाग, स्वामी केशवानंद प्रौद्योगिकी, प्रबंधन और ग्रामोत्थान संस्थान, जयपुर राजस्थान 302017 (भारत)
[ई-मेलः draschem@gmail.com]

सारांश

लिग्नोसेल्युलोसिक बायोमास (एलबी) से बायोएथेनॉल उत्पादन नवीकरणीय ऊर्जा के लक्ष्यों को प्राप्त करने में काफी संभावनाएं रखता है। यह शोध समीक्षा पत्र प्रासंगिक अध्ययनों और संदर्भों का विश्लेषण करके इस क्षेत्र में विधियों और प्रगति का अवलोकन प्रदान करता है। बायोएथेनॉल जैसे नवीकरणीय ऊर्जा स्रोत में पर्यावरणीय पर्यावरण मित्र के रूप में जीवाश्म ईंधन पर निर्भरता कम करने की अत्यधिक क्षमता है। लिग्नोसेल्युलोसिक बायोमास एक कार्बन तटस्थ और प्रचुर कच्चा माल है जो अपनी कम लागत और उच्च सेल्युलोसिक सामग्री के कारण इथेनॉल उत्पादन के विकल्प खोलता है। इस शोध समीक्षा पत्र में लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास से बायोएथेनॉल उत्पादन की पद्धतियों, चुनौतियों और सीमाओं, मामले के अध्ययन और प्रयोगात्मक परिणाम, पर्यावरणीय चिंताओं और आर्थिक आकलन पर चर्चा की गई है।

मुख्य शब्दः बायोएथेनॉल, लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास, एंजाइमैटिक हाइड्रोलिसिस, उत्पादन, कृषि अपशिष्ट, समुद्री शैवाल

Bioethanol production from lignocellulosic biomass: a review

Archana Saxena
Department of Chemistry, Swami Keshavanand Institute of Technology, Management and Rural Development,
Jaipur Rajasthan 302 017 (India)
[Email-draschem@gmail.com]

Abstract

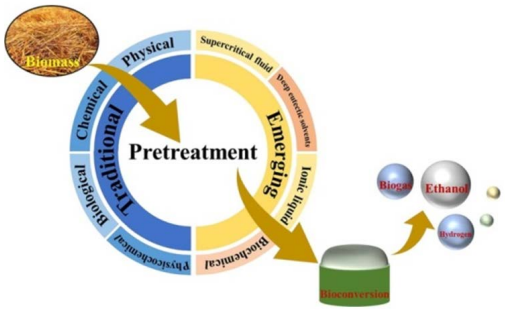
Bioethanol production from Lignocellulosic biomass (LB) holds great potential in achieving goals of sustainable energy. This research review paper provides an overview of the methods and advancements in this field by analyzing relevant studies and references. Renewable energy source, like bioethanol, has tremendous potential to mitigate environmental issues and reduce dependence on fossil fuels.
Lignocellulosic biomass a carbon neutral and abundant feedstock opens options for ethanol production due to its low cost and high cellulosic content. Methodologies for bioethanol production from Lignocellulosic biomass, challenges and limitations, case studies and experimental results, environmental concerns and economic assessments are discussed in this research review paper.

Keywords: Bioethanol, lignocellulosic biomass, enzymatic hydrolysis, production, agricultural waste, wood feedstock, marine algae

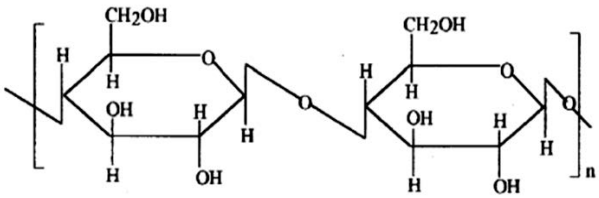
प्रस्तावना

लिग्नोसेल्युलोसिक बायोमास से तरल जैव ईंधन का उत्पादन तेल पर दुनिया की निर्भरता को काफी कम कर सकता है, इसलिए यह कई सरकारों, शैक्षणिक समूहों और कंपनियों के लिए बहुत रुचि का अनुसंधान क्षेत्र बन गया है। आज कृषि और जैव प्रौद्योगिकी में प्रगति के कारण जैव ईंधन, विशेष रूप से लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास के साथ-साथ अन्य बायोमास फीडस्टॉक्स पर आधारित जैव-इथेनॉल के सस्ते उत्पादन करना संभव है।

नवीकरणीय ऊर्जा स्रोत के संभावित विकल्प के रूप में, बायोएथेनॉल ने हाल के दिनों में बहुत अधिक ध्यान आकर्षित किया है। जलवायु परिवर्तन, ग्लोबल वार्मिंग[1] प्राकृतिक संसाधनों का दोहन चिंता के महत्वपूर्ण पर्यावरणीय मुद्दे हैं। लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास ने वैश्विक



चित्र स्रोतः बायोएनर्जी उत्पादन के लिए लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास के प्रीट्रीटमेंट में प्रगतिः चुनौतियां और दृष्टिकोण, लेखकः लेई झाओ, झोंग-फैंग सन, चेंग-चेंग झांग, जुन्नन, नान-की रेन, डुउ-जोंग ली, चुआन चेन, प्रकाशनः बायोरिसोर्स टेक्नोलॉजी, (एल्सेवियर), जनवरी 2022



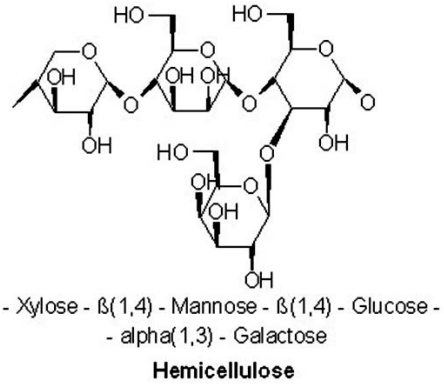
खाद्य सुरक्षा को प्रभावित किए बिना जैव ईंधन और अन्य जैव आधारित रसायनों का उत्पादन करने के लिए जीवाश्म ईंधन के स्थायी विकल्प के रूप में शोधकर्ताओं को लगातार आकर्षित किया है[2]। लिग्नोसेल्युलोसिक बायोमास प्रचुर मात्रा में उपलब्ध नवीकरणीय संसाधन है। यह मुख्य रूप से पॉलीसैकेराइड (सेलूलोज़ और हेमीसेल्यूलोज) और पॉलिमर (लिग्निन) से बना है। कृषि अपशिष्ट जैसे अनाज का भूसा[3] गन्ना खोई[4] वन अवशेष जैसे पाइन[5] चावल का भूसा और गेहूं का भूसा भी लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास हैं।

लिग्नोसेल्युलोसिक बायोमास की संरचना

लिग्नोसेल्यूलोसिक सामग्रियों में तीन मुख्य घटक होते हैंः सेल्यूलोज, हेमीसेल्यूलोज और लिग्निन। सेलूलोज और हेमिकेलुलोज सभी बायोमास का 70% हिस्सा बनाते हैं। सेल्युलोज और हेमिकेलुलोज दोनों सहसंयोजक और हाइड्रोजन बंध के माध्यम से लिग्निन से जुड़े होते हैं, जो इसकी संरचना को जटिल बनाते हैं[6]।

सेल्यूलोज

सेलूलोज़ एक रैखिक, लंबी श्रृंखला वाला ग्लूकोज मोनोमर (β–D-ग्लूकोपाइरानोज) है जो β–(1,4)-ग्लाइकोसिडिक बांड से जुड़ा होता है। इसमें सेलोबायोज (दोहराई जाने वाली इकाई) के साथ लंबाई में ग्लूकोज की एक हजार से अधिक इकाइयां हो सकती हैं। सेल्यूलोसिक श्रृंखलाएं माइक्रोफाइब्रिल्स में व्यवस्थित होती हैं। ये तंतु



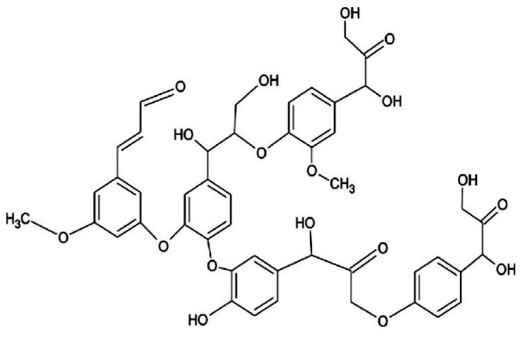
हाइड्रोजन लिंकेज के साथ एक लिग्नोसेल्यूलोसिक नेटवर्क बनाते हैं, जो सेल्यूलोज को इसकी संरचना में प्रतिरोधी, मजबूत और कॉम्पैक्ट बनाता है[7]।

हेमीसेल्यूलोज

हेमीसेल्यूलोज एक विषम और अनाकार बहुलक है जो विभिन्न मोनोसैकेराइड से बना है, जिसमें डी-ग्लूकोज, डी-मैनोज, डी-गैलेक्टोज, डी-जाइलोज और एल-अरबिनोज और अन्य शर्करा एसिड, जैसे डी-ग्लुकुरोनिक और डी-गैलेक्टुरोनिक एसिड शामिल हैं[8]। हेमीसेल्यूलोज अनियत रूप है और इसलिए मजबूत नहीं है। इसका हाइड्रोलिसिस हेमीसेल्यूलोज एंजाइम द्वारा आसानी से किया जाता है[9]।

लिग्निन

लिग्निन लिग्निन एक महत्वपूर्ण कार्बनिक बहुलक है जो कोशिका दीवारों में प्रचुर मात्रा में पाया जाता है। कोशिका भित्ति में सेल्यूलोज और हेमीसेल्यूलोज के बीच जोड़ने वाला हिस्सा है। बहुलक लिग्निन विभिन्न जाइलेन्स के साथ सहसंयोजक बंधों से जुड़ा होता है। लिग्निन फेनिलप्रोपेनॉइड इकाइयों का एक हेटरोपॉलिमर है और फेनोलिक मोनोमर्स से बना है, लिग्निन में कठोर संरचना और हाइड्रोफोबिसिटी है[10] यह एक भौतिक बाधा के रूप में कार्य करता है और पॉलीसैकेराइड्स तक पहुंच को सीमित कर सकता है[11]। लिग्निन की सबसे अधिक मात्रा सॉफ्टवुड (लगभग 30-60%) में होती है, घास और कृषि अपशिष्टों में लिग्निन की कम मात्रा (लगभग 10-30%) होती है। एलबी पॉलिमर का एक जटिल संयोजन है जो सेल्यूलोज, हेमीसेल्यूलोज और लिग्निन से बना है, और एंजाइमैटिक रूपांतरण के प्रति अड़ियल रवैया दिखाता है जो सीधे इसकी संरचना से जुड़ा हुआ है। इन बहुलक घटकों के बीच मजबूत क्रॉस-लिंकेज मौजूद होते हैं कोशिका दीवार के टूटने में बाधा उत्पन्न करते हैं। पॉलीसैकेराइड और लिग्निन, एस्टर और ईथर लिंकेज[12] के माध्यम से क्रॉस-लिंक्ड हैं। सेल्युलोज, हेमीसेल्यूलोज और लिग्निन द्वारा निर्मित माइक्रोफाइब्रिल्स पौधे की कोशिका दीवार संरचना की रक्षा करते हैं[13]। इसलिए एलबी



की भौतिक/रासायनिक संरचना को बदलकर सेलूलोज़ को अधिक सुलभ बनाने के लिए पूर्व-उपचार बहुत महत्वपूर्ण कदम है और अनिवार्य है। पूर्व-उपचार पॉलीसैकेराइड को किण्वित शर्करा में बदलने की सुविधा प्रदान करता है[14]।

बायोएथेनॉल उत्पादन के चरण

फीडस्टॉक का पूर्व उपचार

फीडस्टॉक का पूर्व उपचार बहुत महत्वपूर्ण है। एलबी की बहुलक संरचना में क्रॉस लिंकेज हैं। एलबी से बायो इथेनॉल की अच्छी उपज प्राप्त करने के लिए इन क्रॉस लिंकेज को तोड़ना महत्वपूर्ण है।

फीडस्टॉक (लिग्नोसेल्युलोसिक बायोमास युक्त कृषि अपशिष्ट) के लिए कुछ सामान्य पूर्व-उपचार विधियों पर यहां चर्चा की गई है:

भौतिक पूर्व उपचार: इसमें मिलिंग, ग्राइंडिंग, माइक्रोवेव विकिरण, मैकेनिकल एक्सट्रूज़न, पायरोलिसिस, पल्स इलेक्ट्रिक फील्ड (पीईएफ) जैसी भौतिक प्रक्रियाएं शामिल हैं।

मिलिंग या पीसने से फीडस्टॉक छोटे कणों में परिवर्तित हो जाता है, जिससे एंजाइमी पहुंच के लिए सतह क्षेत्र बढ़ जाता है। विभिन्न प्रकार की मिलों जैसे बॉल मिल, कोलाइड मिल, वाइब्रो-एनर्जी मिल, हैमर मिल और टू-रोल मिल का उपयोग किया जाता है। गीली सामग्री के लिए, कोलाइड मिल, डिसॉल्वर और फ़ाइब्रिलेटर उपयुक्त हैं, जबकि सूखी सामग्री के लिए हैमर मिल, एक्सट्रूडर, क्रायोजेनिक मिल और/या रोलर मिल का उपयोग किया जाता है। गीली और सूखी दोनों सामग्री के लिए, बॉल मिलिंग उपयुक्त है। बेकार कागज के लिए, हथौड़ा मिलिंग एक अच्छा प्रीट्रीटमेंट विकल्प है। भौतिक पूर्व उपचार में एक्सट्रूज़न और भाप विस्फोट जैसी तकनीकें भी शामिल हैं। बॉल मिलिंग से क्रिस्टलीयता सूचकांक में 4.9 से 74.2% तक की भारी कमी आती है, जो इस प्रक्रिया को किण्वित शर्करा के अधिक उत्पादन के साथ हल्के हाइड्रोलाइटिक स्थितियों में पुआल के पवित्रीकरण के लिए अधिक उपयुक्त बनाती है[15]।

रासायनिक पूर्व उपचार: रासायनिक अभिकर्मकों का उपयोग एलबी के फीडस्टॉक की संरचना को संशोधित करने के लिए किया जाता है, जो इसे एंजाइमेटिक हाइड्रोलिसिस के लिए अधिक उपयुक्त बनाता है। रासायनिक पूर्व उपचार में एलबी के फीडस्टॉक की एसिड या क्षार या कार्बनिक विलायक के साथ क्रिया की जाती है। एसिड उपचार में पाउडर एलबी की तनु सल्फ्यूरिक अम्ल या अन्य अम्ल के साथ क्रिया की जाती है, यह बायोमास के हेमी सेल्यूलोसिक अंश को हाइड्रोलाइज करता है। क्षार पूर्व उपचार में सोडियम हाइड्रॉक्साइड जैसे क्षार का उपयोग किया जाता है, यह लिग्निन को हटा देता है और सेलूलोज़ की पहुंच को बढ़ाता है। ऑर्गेनो-सॉल्वेंट उपचार में बायोमास से लिग्निन निकालने के लिए इथेनॉल-जल या मेथनॉल-जल मिश्रण जैसे कार्बनिक सॉल्वैंट्स का उपयोग किया जाता है।

पॉलिमरिक सामग्री को एसिड/क्षार या कार्बनिक विलायक की उपस्थिति में बार-बार, कटा, कूटा या पीसा जाता है[16]। ऐसा "मैकेनो-कैमिकल" क्षरण सभी ज्ञात पॉलिमर के लिए सार्वभौमिक है[17]।

जैविक पूर्व उपचार: लिग्नोसेल्युलोसिक बायोमास के जैविक पूर्व उपचार में कवक और बैक्टीरिया जैसे कुछ सूक्ष्मजीवों की लिग्निनोलिटिक क्षमता का उपयोग किया जाता है। लिग्निनोलिटिक एंज़ाइम जो ज्यादातर सफेद सड़न कवक (लकड़ी के क्षय कवक का एक प्रकार) में पाया जाता है, उच्च रेडॉक्स संभावित ऑक्सीडो-रिडक्टेस के एक सेट का उपयोग करके, लिग्निन को प्रभावी ढंग से कम करने में सक्षम है।

सूक्ष्मजीवों को सीधे फीडस्टॉक पर उगाया जा सकता है[18] या एंजाइम अर्क का सीधे उपयोग किया जा सकता है। आणविक जीव विज्ञान में हाल की प्रगति ने लिग्निनोलिटिक प्रणालियों के बारे में ज्ञान का बहुत खुलासा किया है। नए एंजाइमों की खोज की गई है और इंजीनियर सिस्टम विकसित किए गए हैं, जिससे बायोएथेनॉल के उत्पादन के लिए प्रभावी पूर्व-उपचार और लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास के पूर्ण उपयोग की क्षमता में वृद्धि हुई है।

संयुक्त पूर्व-उपचार विधियाँ: प्रक्रिया की प्रभावकारिता और दक्षता को अधिकतम करने के लिए आवश्यकता के अनुसार कई पूर्व-उपचार विधियों को जोड़ा जा सकता है। उदाहरण के लिए एक सामान्य विधि भाप विस्फोट के बाद एंजाइमेटिक हाइड्रोलिसिस होता है जो बायोमास संरचना को विघटित करने में मदद करता है।

पूर्व-उपचार विधि का चुनाव फीडस्टॉक विशेषताओं, वांछित इथेनॉल मात्रा और प्रक्रिया, लागत जैसे विभिन्न कारकों पर निर्भर करता है। दक्षता, लागत, समय और पर्यावरणीय प्रभाव के संदर्भ में प्रत्येक विधि की अपनी उपयुक्तता और सीमाएं होती हैं।

पहले से उपचारित बायोमास को सेल्युलोज को किण्वित शर्करा में और फिर बायोएथेनॉल में परिवर्तित करने के लिए एंजाइमेटिक रूप से हाइड्रोलाइज्ड किया जाता है।

एंजाइमैटिक हाइड्रोलिसिस

बायोएथेनॉल के उत्पादन के लिए एंजाइमैटिक हाइड्रोलिसिस विधि सबसे आकर्षक और टिकाऊ विधि है जिसमें पॉलीसैकराइड को मोनोसैकराइड में हाइड्रोलाइज किया जाता है, जिसे बाद में जैव ईंधन में परिवर्तित किया जाता है। एंजाइमेटिक हाइड्रोलिसिस के फायदे में कम विषाक्तता, कम गिरावट और क्षरण, कम उपयोगिता लागत, कोई अवरोधक उपोत्पाद नहीं और कोई पर्यावरणीय क्षति नहीं है।

सेलूलोज़ एक क्रिस्टलीय पदार्थ है और इसमें हाइड्रोजन बंध होता है, इसकी क्रिस्टलीय प्रकृति के कारण सेलूलोज़ का हाइड्रोलिसिस स्टार्च की तुलना में अधिक कठिन होता है। एंजाइमैटिक हाइड्रोलिसिस लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास के कार्बोहाइड्रेट, सेल्युलोज और हेमिसेल्युलोज से मोनोमेरिक शर्करा को मुक्त करता है। हाइड्रोलिसिस प्रतिक्रियाएं एसिड या एंजाइम द्वारा उत्प्रेरित होती हैं।

तापमान और पीएच की कम स्थितियों और सेल्यूलेज एंजाइमों की उपस्थिति में, सेल्यूलोज ग्लूकोज (40 से 50 डिग्री सेल्सियस तापमान और 4.5-5 पीएच) में परिवर्तित हो जाता है। नवोन्मेषी एंजाइम ज़ाइलैनेज़ का उपयोग हेमिसेल्युलोज हाइड्रोलिसिस को सक्षम बनाता है।

ज़ाइलैनेज़ दूसरा सबसे प्रचुर मात्रा में पाया जाने वाला पॉलीसैकेराइड हाइड्रोलेज़ है। ज़ाइलैनेसेज़ पौधे के कोशिका घटक ज़ाइलान को डीपॉलीमराइज़ करते हैं। इस अद्भुत हाइड्रॉलेज़ जाइलानेज़ का मुख्य व्यावसायिक स्रोत फिलामेंटस कवक है। यह कवक, बैक्टीरिया, खमीर, समुद्री शैवाल, प्रोटोजोआ, घोंघे, क्रस्टेशियंस, कीट, बीज आदि द्वारा भी निर्मित होता है। हाइड्रोलिसिस में विभिन्न सब्सट्रेट्स का उपयोग किया जाता है, जैसे ओट स्पेल्ट, गन्ना खोई और गेहूं का भूसा[19]। सेल्यूलोज की क्रिस्टलीय संरचना हाइड्रोलिसिस की दर और एलबी से बायोएथेनॉल की उपज के प्रतिशत को प्रभावित करती है क्योंकि लिग्निन, हेमिसेल्यूलोज, और सेल्यूलोज के साथ एक बंध बनाते हैं और हाइड्रोलिसिस की प्रक्रिया को सीमित करते हैं। गैर-आयनिक सर्फेक्टेंट या पीईजी (पॉली एथिलीन ग्लाइकॉल) युक्त पॉलिमर सेलूलोज़ की सतह के गुणों को बदलकर, हाइड्रोलिसिस की दक्षता को बढ़ाते हैं [20]।

किण्वन

प्रीट्रीटमेंट और हाइड्रोलिसिस प्रक्रियाएं एक अनुकूलित किण्वन प्रक्रिया[21] की कुंजी हैं। किण्वन एक प्राकृतिक मार्ग है जिसमें किण्वित शर्करा को अल्कोहल या लैक्टिक एसिड या कई अन्य विभिन्न अंतिम उत्पादों में परिवर्तित करने के लिए सूक्ष्मजीवों की आवश्यकता होती है। वाइन, शराब की भठ्ठी और अन्य अल्कोहल-उत्पादक उद्योगों में *एस. सेरेविसिया* जैसे यीस्ट का उपयोग किया जाता है[22]।

मुख्य किण्वक स्ट्रेन के रूप में एस. सेरेविसिया का उपयोग शर्करा आधारित जैव ईंधन उद्योगों में भी किया जाता है। एलबी सामग्री या उसके घोल को पूर्व उपचार द्वारा किण्वित शर्करा में परिवर्तित किया जाता है। किण्वन बैच या निरंतर प्रक्रियाओं में किया जा सकता है। किण्वन की बैच प्रक्रिया में घोल को पानी के साथ मिलाया जाता है और झाग बनता है। अवायवीय परिस्थितियों में ग्लूकोज जैसे हेक्सोज शर्करा को इथेनॉल में किण्वित करने के लिए यीस्ट *एस. सेरेविएज़* को मिलाया जाता है। CO_2 उप-उत्पाद किण्वन की प्रक्रिया में बनते हैं; नाइट्रोजन की आपूर्ति प्रतिक्रिया को तेज करती है। किण्वन लिग्नोसेल्युलोसिक हाइड्रोलाइज़ेट और प्रयुक्त खमीर के गतिज गुणों पर निर्भर करता है। ऐसी किण्वन प्रक्रियाओं में हेक्सोज़ शर्करा से एस. सेरेविएज़ द्वारा उच्च बायोएथेनॉल पैदावार उत्पन्न की जाती है। किण्वन की निरंतर प्रक्रिया में, फ़ीड और कल्चर माध्यम युक्त सब्सट्रेट को लगातार रिएक्टर में पंप किया जाता है जिसमें सक्रिय सूक्ष्मजीव होते हैं। औद्योगिक अनुप्रयोगों में निरंतर और बैच दोनों प्रक्रियाओं के उपयोग की तुलना में फेड-बैच रिएक्टरों को प्राथमिकता दी जाती है। एक ही रिएक्टर में हाइड्रोलिसिस और किण्वन चरण को संयोजित करने के लिए विभिन्न तकनीकों और रणनीतियों का उपयोग किया जाता है।[23,24]

निष्कर्ष

प्रीट्रीटमेंट, हाइड्रोलिसिस और किण्वन की ज्ञात तकनीकें समाज की जरूरतों को पूरा करने के लिए पर्याप्त बायोएथेनॉल का उत्पादन करने के लिए पर्याप्त नहीं हैं। रिकाल्सिट्रॉन्स एक बड़ी चुनौती है जिस पर अधिक ध्यान देने की आवश्यकता है। लागत जैसी कुछ अन्य बाधाएँ भी चिंता का विषय हैं। इसके अलावा, अधिक उपयुक्त सूक्ष्मजीवों या एंजाइमों को खोजने के क्षेत्र में अनुसंधान और नए प्रोटोकॉल की आवश्यकता है। इससे सेल्युलोज को ग्लूकोज में परिवर्तित करके बायोएथेनॉल की उपज में वृद्धि होगी।

संदर्भ

1. Anderson EM, Stone ML, Katahira R, Reed M, Muchero W, Ramirez KJ, Beckham GT, Román-Leshkov Y. Differences In S/G Ratio In Natural Poplar Variants Do Not Predict Catalytic Depolymerization Monomer Yields. Nat Commun., **10** (1) (2019) 2033 - 2038.

2. Chandel A. K., Garlapati V. K., Singh A. K., Antunes F. A. F., da Silva S. S., The Path Forward For Lignocellulose Biorefineries: Bottlenecks, Solutions, And Perspective On Commercialization, Bioresource Technology, **264** (2018) 370-381.
3. Yuan Z., Wen Y., Li G., Production of Bioethanol and Value Added Compounds From Wheat Straw Through Combined Alkaline/Alkaline-Peroxide Pretreatment, Bioresource Technology, **259** (2018) 228-236.
4. Cardona C.A., Quintero J.A., Paz I.C., Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives, Bioresource Technology, **101**(13) (2010) 4754-4766
5. Cotana, F., Cavalaglio, G., Gelosia, M., Nicolini, A., Coccia, V. and Petrozzi, A., , Production of Bioethanol in a Second Generation Prototype from Pine Wood Chips, Energy Procedia, **45** (2014) 42-51
6. Ufodike C.O., Eze V.O., Ahmed M.F., Oluwalowo A., Park J.G., Okoli O.I., Wang H. Valuation of The Inter-Particle Interference of Cellulose and Lignin In Lignocellulosic Materials, International journal of biological macromolecules, **147** (2020) 762-767.
7. Zoghlami, A. and Paës, G.,Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance And Predicting Hydrolysis, Frontiers in chemistry, vol. **7** (2019) 874.
8. Saha, B.C., Hemicellulose Bioconversion, Journal of industrial microbiology and biotechnology, **30** (5) (2003) 279-291.
9. Isikgor F.H., Becer C.R., Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Platform For The Production Of Bio-Based Chemicals And Polymers, Polymer chemistry, **6** (25) (2015) 4497-4559.
10. Agbor V.B., Cicek N., Sparling R., Berlin A., Levin D.B. Biomass Pretreatment: Fundamentals toward Application. Biotechnol. Biotechnology advances, **29** (6) (2011) 675-685.
11. Santos R.B., Lee J.M., Jameel H., Chang H.-M., Lucia L.A. Effects of Hardwood Structural and Chemical Characteristics on Enzymatic Hydrolysis for Biofuel Production. Bioresource Technology, **110** (2012) 232-238
12. "Da Costa Sousa L, et al., ", "Cradle-to-grave" assessment of existing lignocellulose pretreatment technologies. Current Opinion in Biotechnology. **20** (3) (2009) 339-347.
13. Mtui GYS. Recent Advances In Pretreatment Of Lignocellulosic Wastes And Production Of Value Added Products. African Journal of Biotechnology, **8** (2009) 1398-1415.
14. Kumar, A. K., & Sharma, S., Recent Updates On Different Methods of Pretreatment of LignocellulosicFeedstocks: A Review. Bioresources and bioprocessing, **4** (1) (2017)1-19.
15. Taherzadeh MJ, Karimi K. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. International Journal of Molecular Sciences, **9** (9) (2008) 1621-1651.
16. Boulatov, R. The Challenges and Opportunities of Contemporary Polymer Mechanochemistry, ChemPhysChem, **18** (2017) 1419-1421.
17. Anderson, L. &Boulatov, R., Polymer Mechanochemistry: A New Frontier for Physical Organic Chemistry, Adv. Phys. Org. Chem. **52** (2018) 87-143.
18. "Solange, I. M.,Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery. Chapter 24-Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass, Science Direct, (2016) 561-585.
19. Börjesson, J., Peterson, R., Tjerneld, F., "Börjesson, J., et al., Enhanced Enzymatic Conversion of Softwood Lignocellulose by Poly (Ethylene Glycol) Addition, Enzyme and Microbial Technolology, **40**(2007) 754-762.
20. Ostadjoo S, Hammerer F, Dietrich K, Dumont MJ, Frišcic T, Auclair K., Efficient Enzymatic Hydrolysis of Biomass Hemicellulose in the Absence of Bulk Water. Molecules, **24** (23), 4206-4212.
21. Su, T., Zhao, T., Khodadadi, M., Len, C., Lignocellulosic Biomass for Bioethanol: Recent Advances, Technology Trends, and Barriers to Industrial Development. CurrOpin. In Green and Sustain. Chem., **24** (2020) 56-60.

22. Mohd A.S.H., Abdulla R., Jambo S.A., Marbawi H., Gansau J.A., Mohd F.A.A., Rodrigues K.F., Yeasts in sustainable bioethanol production: A review., Biochem. Biophys., **10** (2017) 52-61.

23. Szambelan, K., Nowak, J., Szwengiel, A., Jele?, H., ?ukaszewski, G., Separate Hydrolysis and Fermentation and Simultaneous Saccharification and Fermentation Methods in Bioethanol Production and Formation of Volatile By-Products from Selected Corn Cultivars, Ind. Crop. Prod., **118** (2018) 355-361.

24. Mani Jayakumar, GadissaTokumaGindaba, KaleabBizunehGebeyehu, SelvakumarPeriyasamy, AbdisaJabesa, GurunathanBaskar, Beula Isabel John, ArivalaganPugazhendhi,Bioethanol production from agricultural residues as lignocellulosic biomass feedstock's waste valorization approach: A comprehensive review,Science of The Total Environment, **879** (2023)163158