एग्री आर्टिकल्स
(कृषि लेखों के लिए ई-पत्रिका)
वर्ष: 06, अंक: 03 (मई-जून, 2026)
www.agriarticles.com पर ऑनलाइन उपलब्ध
© एग्री आर्टिकल्स, आई. एस. एस. एन.: 2582-9882

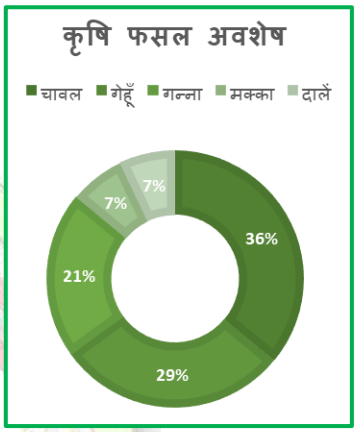
कृषि अवशेषों से हरित हाइड्रोजन

जिज्ञासा बल, *सचिन चन्नप्पा हल्लद एवं कवन कुमार वी.
नवीन एवं नवीकरणीय ऊर्जा अभियांत्रिकी विभाग, प्रौद्योगिकी एवं अभियांत्रिकी महाविद्यालय, महाराणा प्रताप कृषि एवं प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, उदयपुर, राजस्थान-313001
*संवादी लेखक का ईमेल पता: sachinhallad1444@gmail.com

यह अध्ययन कृषि अवशेषों से हरित हाइड्रोजन उत्पादन की संभावनाओं को रेखांकित करता है। थर्मोकेमिकल, पायरोलिसिस और जैविक मार्गों की तकनीकी तुलना से स्पष्ट है कि नीति समर्थन, आपूर्ति श्रृंखला और प्रौद्योगिकीय परिपक्वता के साथ यह राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन का प्रमुख स्तंभ बन सकता है।

परिचय

भारत हर वर्ष अनुमानित 870 मिलियन टन (MT) फसल अवशेष उत्पन्न करता है, जिनमें से लगभग 300 मिलियन टन को "अधिशेष" के रूप में चिन्हित किया गया है, यानी यह वह हिस्सा है जो मौजूदा उपयोगों, जैसे पशु चारा, ईंधन लकड़ी, पशु बिछौना और ग्रामीण घरेलू ऊर्जा से ऊपर बच जाता है और ऊर्जा उत्पादन के लिए उपलब्ध रह सकता है। यह अधिशेष बायोमास लगभग भारत की कुल प्राथमिक ऊर्जा खपत का लगभग 17% तक योगदान दे सकता है। चावल, गेहूँ और गन्ना अवशेष अधिशेष ऊर्जा संभावना में सबसे बड़ा योगदान करते हैं। इनका वितरण स्पष्ट रूप से संलग्न पाई चार्ट में प्रदर्शित है, जो विभिन्न फसलों के हिस्से को दर्शाता है। यह संरचना दिखाती है कि "धान पराली समस्या" जैसी पर्यावरणीय चुनौती, यदि उचित फीडस्टॉक मैपिंग, तकनीकी चयन और नीतिगत प्रोत्साहनों के साथ जोड़ी जाए, तो ग्रामीण प्रदूषण की समस्या से आगे बढ़कर औद्योगिक स्तर पर हाइड्रोजन उत्पादन के लिए एक रणनीतिक अवसर में परिवर्तित हो सकती है।



चित्र 1: भारत में विभिन्न फसलों से उत्पन्न अप्रयुक्त अवशेषों का अनुपात (MNRE, 2022)

थर्मोकेमिकल और जैविक मार्गों की तुलना केवल संख्याओं की दृष्टि से की जाए, तो दोनों अपनी-अपनी ताकत और सीमाएँ स्पष्ट रूप से दिखाते हैं। थर्मोकेमिकल मार्ग पूँजी-गहन होने के साथ उच्च तापमान (आम तौर पर 700-900 डिग्री सेल्सियस) पर चलते हैं, परंतु औद्योगिक-स्तर पर उनकी परिपक्वता, स्थापित सप्लाई-चेन और मौजूदा गैसीफिकेशन अनुभव उन्हें निकट भविष्य के लिए अपेक्षाकृत अधिक व्यवहारिक बनाते हैं।

बायोमास गैसीफिकेशन से हाइड्रोजन उत्पादन में कई तकनीकी चुनौतियाँ और लाभ दोनों मौजूद हैं। इस प्रक्रिया में कार्बन डाइऑक्साइड (CO_2) का निर्माण होता है, साथ ही टार और चार के कारण उत्प्रेरक (catalyst) की निष्क्रियता भी देखी जाती है। इसके अलावा, बायोमास की प्रकृति और विविधताओं का हाइड्रोजन उत्पादन पर सीधा प्रभाव पड़ता है। यह तकनीक उच्च तापमान की आवश्यकता रखती है, उत्प्रेरकों का पुनर्जनन करना पड़ता है, और महंगे रिएक्टर डिज़ाइन की मांग करती है। इसके बावजूद, बायोमास गैसीफिकेशन का औद्योगिक दृष्टिकोण अत्यंत उपयुक्त और प्रभावी माना जाता है। यह विभिन्न प्रकार के अपशिष्टों के पुनर्चक्रण की सुविधा देता है और उच्च

दक्षता के साथ बायोमास रूपांतरण सुनिश्चित करता है। इस प्रक्रिया से हाइड्रोजन की उपज 40–190 ग्राम प्रति किलोग्राम फीडस्टॉक तक दर्ज की गई है।

बायोमास पायरोलिसिस से हाइड्रोजन उत्पादन में कुछ तकनीकी चुनौतियाँ और लाभ दोनों मौजूद हैं। इस प्रक्रिया में कार्बन डाइऑक्साइड (CO_2) का उत्सर्जन होता है और टार तथा चार के कारण उत्प्रेरक (catalyst) निष्क्रिय हो जाते हैं। उत्प्रेरकों का पुनर्जनन आवश्यक होता है और इसके लिए महंगे रिएक्टर डिज़ाइन की आवश्यकता पड़ती है। इसके बावजूद, पायरोलिसिस एक अपेक्षाकृत सरल और वर्तमान औद्योगिक स्तर पर प्रभावी प्रक्रिया है। यह वन और औद्योगिक अवशेषों से प्राप्त विभिन्न अपशिष्टों के पुनर्चक्रण की सुविधा देता है और बायोमास को लचीले ढंग से गैस, बायो-ऑयल या बायोचार में परिवर्तित कर सकता है। इस प्रक्रिया से हाइड्रोजन की उपज 25–65 ग्राम प्रति किलोग्राम फीडस्टॉक तक दर्ज की गई है।

जैविक किण्वन प्रक्रियाओं के माध्यम से बायोमास से हाइड्रोजन उत्पादन को मुख्यतः दो श्रेणियों में बाँटा जा सकता है, डार्क फर्मेंटेशन और लाइट-मीडिएटेड फर्मेंटेशन। डार्क फर्मेंटेशन अभी विकास के चरण में है और इसमें कम उत्पादन दर, उप-उत्पादों की बड़ी मात्रा का निर्माण, तथा पूर्व-उपचार की आवश्यकता जैसी चुनौतियाँ हैं। इसके बावजूद, यह जैविक और कार्बनिक अपशिष्ट के प्रभावी प्रसंस्करण, शैवाल बायोमास के रूपांतरण, तथा मध्यम दबाव और तापमान की परिस्थितियों में संचालन जैसे लाभ प्रदान करता है। डार्क फर्मेंटेशन से प्राप्त हाइड्रोजन की उपज 2.57-2.80 ग्राम/किलोग्राम फीडस्टॉक के बीच पाई गई है। लाइट-मीडिएटेड फर्मेंटेशन में हाइड्रोजन उत्पादन दर और उपज कम होती है, सौर ऊर्जा रूपांतरण दक्षता भी कम होती है, और इसमें सतह क्षेत्र में सुधार, बैक्टीरिया प्रबंधन तथा उच्च ऊर्जा इनपुट की आवश्यकता होती है। फिर भी, इसके लाभों में जैविक और कार्बनिक अपशिष्ट पदार्थों का उपयोग, पूरे सब्सट्रेट का प्रभावी रूपांतरण, तथा कम तापमान और दबाव की परिस्थितियों में संचालन शामिल हैं। इस प्रक्रिया से हाइड्रोजन की उपज 2.83-3.89 ग्राम/किलोग्राम फीडस्टॉक के बीच दर्ज की गई है। इन दोनों जैविक दृष्टिकोणों से स्पष्ट होता है कि बायोमास-आधारित हाइड्रोजन उत्पादन में संभावनाएँ तो हैं, लेकिन वर्तमान तकनीकी सीमाएँ इसकी दक्षता और बड़े पैमाने पर उपयोग को बाधित करती हैं। इसलिए, आगे के अनुसंधान और तकनीकी सुधार आवश्यक हैं ताकि इसे अधिक प्रभावी और व्यावहारिक बनाया जा सके।

नीति और मिशन

भारत सरकार ने 4 जनवरी 2023 को 19,744 करोड़ रुपये के कुल परिव्यय के साथ राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन को मंज़ूरी दी, जिसका व्यापक उद्देश्य 2030 तक 5 मिलियन टन प्रति वर्ष हरित हाइड्रोजन उत्पादन के लक्ष्य के साथ भारत को ग्रीन हाइड्रोजन और इसके व्युत्पन्नों के उत्पादन, उपयोग और निर्यात के लिए एक वैश्विक केंद्र के रूप में स्थापित करना है। मिशन के तहत मांग-सृजन, "स्ट्रैटेजिक इंटरवेंशन फॉर ग्रीन हाइड्रोजन ट्रांज़िशन (SITE)" कार्यक्रम, इस्पात, आवाजाही, शिपिंग, विकेन्द्रीकृत ऊर्जा-उपयोग, बायोमास से हाइड्रोजन उत्पादन और हाइड्रोजन भंडारण जैसी पायलट परियोजनाएँ, ग्रीन हाइड्रोजन हब डेवलपमेंट, अवसंरचना समर्थन, विनियम एवं मानक, अनुसंधान एवं विकास (पब्लिक–प्राइवेट भागीदारी सहित), कौशल-विकास तथा जन-जागरूकता जैसे विस्तृत घटक शामिल किए गए हैं। वित्त वर्ष 2024-25 के लिए मिशन में विभिन्न मदों के अंतर्गत 600 करोड़ रुपये का परिव्यय निर्धारित है, जबकि 2030 तक परिकल्पित हरित हाइड्रोजन उत्पादन से जुड़े निवेश से 8 लाख करोड़ रुपये से अधिक के कुल आर्थिक लाभ और लगभग 6,00,000 नए रोजगार सृजित होने की संभावना व्यक्त की गई है। साथ ही, हरित हाइड्रोजन के माध्यम से उर्वरक उत्पादन, पेट्रोलियम शोधन, परिवहन, इस्पात निर्माण और शिपिंग प्रोपल्शन जैसे क्षेत्रों में आयातित जीवाश्म-ईंधन के स्थान पर घरेलू हाइड्रोजन के प्रयोग से 2030 तक लगभग 1 लाख करोड़ रुपये के फॉसिल-फ्यूल आयात में कमी आने का अनुमान है।

इन नीतिगत तथ्यों के आलोक में यदि कृषि-अवशेष आधारित हाइड्रोजन को देखा जाए, तो स्पष्ट होता है कि मिशन के "बायोमास से हाइड्रोजन उत्पादन", "हाइड्रोजन भंडारण", "डिसेंट्रलाइज़्ड एनर्जी यूज़", "ग्रीन हाइड्रोजन हब" और "R&D-PPP" घटक ग्रामीण-केंद्रित बायो-हाइड्रोजन क्लस्टर, किसान उत्पादक संगठनों के साथ

संयुक्त-उद्यम मॉडल और ज़िला-स्तरीय फीडस्टॉक-मैपिंग को सीधे समर्थन दे सकते हैं। यदि 5 मिलियन टन प्रति वर्ष लक्ष्य के भीतर मान लें कि 20-25% हिस्सा भी कृषि-बायोमास आधारित हाइड्रोजन से आता है, तो यह लाखों टन फसल-अवशेषों को नियंत्रित रूप से उपयोग में लाते हुए किसानों की आय-वृद्धि और ग्रामीण रोज़गार सृजन के लिए एक ठोस अवसर प्रस्तुत करेगा। राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन ने 2030 तक 5 मिलियन टन प्रति वर्ष हरित हाइड्रोजन उत्पादन का लक्ष्य निर्धारित किया है; इस दृष्टि से कृषि-आधारित बायोमास अकेले इस राष्ट्रीय लक्ष्य से भी अधिक क्षमता प्रदर्शित करता है, बशर्ते प्रौद्योगिकीय परिपक्वता, आपूर्ति-श्रृंखला और नीति-समर्थन एक साथ उपलब्ध हों। इसलिए राष्ट्रीय स्तर की नीति के साथ-साथ राज्य और ज़िला स्तर की बायोमास प्रबंधन रणनीतियाँ जैसे फीडस्टॉक कॉरिडोर, अनुबंधित संग्रहण और परिवहन-सहायता अनिवार्य होंगी। कार्बन बैलेंस की दृष्टि से बायोमास गैसीफिकेशन से निकला बायोचार, राख और CO_2 यदि मृदा-सुधार (biochar), कार्बन कैप्चर, उपयोग एवं भंडारण के माध्यम से प्रबंधित किए जाएँ, तो पूरी वैल्यू-चेन को नेट-ज़ीरो से आगे बढ़कर "कार्बन-नेगेटिव" की दिशा में भी डिज़ाइन किया जा सकता है, बशर्ते जीवन-चक्र विश्लेषण और ग्रीनहाउस-गैस इन्वेंटरी के लिए स्पष्ट डेटा-प्रोटोकॉल तैयार हों।

किसानों की आय संरचना के संदर्भ में मुख्य प्रश्न यह है कि 1 टन सूखे crop residue के बदले उन्हें क्या मूल्य मिलेगा; यदि यह मूल्य केवल ईंधन लकड़ी के समतुल्य (लगभग 500-800 रुपये प्रति टन) तक सीमित रहता है, तो हाइड्रोजन वैल्यू-चेन में किसानों की हिस्सेदारी मामूली रहेगी, जबकि हाइड्रोजन के उच्च बाजार मूल्य और संभावित कार्बन-क्रेडिट को देखते हुए profit-sharing, floor-price या कार्बन-रिवेन्यू-शेयरिंग मॉडल विकसित किए जाएँ, तो यह वास्तविक "आय-सुरक्षा" और जोखिम-साझेदारी का औज़ार बन सकता है। क्रॉस-सेक्टर इंटरफ़ेस की दृष्टि से कृषि-आधारित हाइड्रोजन, फ्यूल-सेल, वाहनों के लिए ईंधन, उर्वरक उद्योग के लिए हरित अमोनिया, रिफाइनरी और इस्पात जैसे कठिन-से-घटाए जाने वाले (hard-to-abate) सेक्टरों के लिए फीडस्टॉक तथा ग्रामीण-औद्योगिक क्लस्टरों के लिए विकेन्द्रीकृत ऊर्जा-स्रोत के रूप में कार्य कर सकता है। व्यावहारिक रूप से इसका अर्थ यह है कि कृषि मंत्रालय, नवीन एवं नवीकरणीय ऊर्जा मंत्रालय, रसायन एवं उर्वरक मंत्रालय, इस्पात एवं पेट्रोलियम मंत्रालय और उद्योग-संस्थाएँ मिलकर "hydrogen from agricultural residue" के लिए एक समन्वित रोडमैप तैयार करें, जिसमें फीडस्टॉक सुरक्षा, पायलट-प्रोजेक्ट, हब-विकास, मानक-निर्धारण, कौशल-विकास और वित्तीय-प्रोत्साहन को एक ही नीति-फ्रेमवर्क में समाहित किया जाए।

निष्कर्ष

अंततः इन तथ्यों का संयोजन यह संकेत देता है कि कृषि-आधारित हाइड्रोजन किसी हाशिए के विकल्प के बजाय राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन रणनीति का एक गंभीर स्तंभ बन सकता है; चुनौती यह नहीं कि बायोमास से हाइड्रोजन बन सकती है या नहीं, बल्कि यह है कि क्या भारत इसे किसानों के लिए न्यायसंगत, पर्यावरणीय दृष्टि से टिकाऊ और आर्थिक रूप से प्रतिस्पर्धी बना पाएगा, और क्या वैज्ञानिक डेटा, टेक्नो-इकोनॉमिक मॉडलिंग, जीवन-चक्र विश्लेषण तथा किसान-केंद्रित नीति-डिज़ाइन को एक साथ लाकर "खेत से हाइड्रोजन" तक की इस संभावित यात्रा को वास्तविक, दीर्घकालिक और समावेशी बनाया जा सकेगा।