पुनर्चक्रण योग्य PDK प्लास्टिक: सूक्ष्मजीवों से कच्चा माल बनाने का नया शोध

प्लास्टिक प्रदूषण और जैव-विनिर्माण (मुख्य परीक्षा: सामान्य अध्ययन-III) | समाचार संदर्भ: 27 जुलाई 2026 (नेचर बायोटेक्नोलॉजी) | प्रकाशित: 23 अक्टूबर 2026 प्लास्टिक प्रदूषण का समाधान केवल ऐसी वस्तु बनाना नहीं है जो इस्तेमाल के बाद छोटे टुकड़ों में टूट जाए। जरूरत ऐसी सामग्री की भी है जिसे उपयोग के बाद वापस उसके मूल रासायनिक घटकों में बदला जा सके और उनसे फिर नई सामग्री बनाई जा सके। 27 जुलाई 2026 को नेचर बायोटेक्नोलॉजी में प्रकाशित एक अध्ययन इसी दिशा में महत्वपूर्ण है। इसमें वैज्ञानिकों ने बैक्टीरिया की जैविक मशीनरी को बदलकर पुनर्चक्रण योग्य प्लास्टिक के लिए उपयोगी अणु बनाने का रास्ता दिखाया। यह शोध सिंथेटिक बायोलॉजी, रसायन विज्ञान और सामग्री विज्ञान को जोड़ता है। लेकिन इसे "बैक्टीरिया ने सारी तैयार प्लास्टिक बना दी" या "अब प्लास्टिक प्रकृति में अपने आप सुरक्षित ढंग से गल जाएगी" कहना गलत होगा। अध्ययन में जैविक तरीके से कुछ प्रारंभिक अणु बनाए गए। जिन प्लास्टिक नमूनों के गुण जांचे गए, उन्हें रासायनिक तरीके से तैयार किए गए संबंधित अणुओं से बनाया गया था। यह अंतर शोध की उपलब्धि और उसकी वर्तमान सीमा, दोनों को स्पष्ट करता है।

समस्या: हर प्लास्टिक आसानी से दोबारा नहीं बनती

कुछ प्लास्टिक को गर्म करके नया आकार देना अपेक्षाकृत आसान होता है। दूसरी ओर, क्रॉसलिंक्ड थर्मोसेट में अणुओं का जुड़ा हुआ जाल बन जाता है। ऐसे पदार्थ इलेक्ट्रॉनिक्स, निर्माण और मिश्रित सामग्रियों में उपयोगी होते हैं, लेकिन उनके पुनर्चक्रण में मुश्किल आती है। केवल पिघलाकर नया रूप देने वाला सामान्य तरीका सभी पदार्थों पर समान रूप से काम नहीं करता। इसलिए वैज्ञानिक ऐसी रासायनिक संरचनाएं विकसित कर रहे हैं जिनके बंध बाद में नियंत्रित प्रक्रिया से खोले जा सकें। अध्ययन में पॉलीडाइकीटोएनामीन, यानी PDK, नामक पॉलिमर परिवार पर काम हुआ। पॉलिमर बड़े अणुओं वाला पदार्थ होता है। मोनोमर ऐसे छोटे अणु होते हैं जो पॉलिमर बनने की प्रक्रिया में उसकी संरचना में योगदान देते हैं। PDK में कुछ रासायनिक बंधों को उपयुक्त परिस्थितियों में तोड़कर उपयोगी घटक वापस पाए जा सकते हैं। फिर भी पुनर्चक्रण योग्य होने का अर्थ यह नहीं कि बिना संग्रह, छंटाई और प्रसंस्करण के उसका वास्तविक पुनर्चक्रण अपने आप हो जाएगा।

जैविक मशीनरी में क्या बदलाव किया गया?

शोधकर्ताओं ने पॉलीकीटाइड सिंथेज, यानी PKS, नामक एंजाइमों को इंजीनियर किया। एंजाइम जैविक प्रतिक्रियाओं में मदद करने वाले उत्प्रेरक होते हैं। यहां विभिन्न एंजाइम हिस्सों को नए ढंग से जोड़कर उपयोगी रासायनिक अणु बनाने की क्षमता विकसित की गई। शोध में एस्चेरिशिया कोलाई और स्ट्रेप्टोमाइसीज जैसे सूक्ष्मजीवों को उत्पादन मंच के रूप में इस्तेमाल किया गया। इसका उद्देश्य बैक्टीरिया को खुले वातावरण में छोड़ना नहीं, बल्कि नियंत्रित उत्पादन व्यवस्था में उनका उपयोग करना है। लक्षित अणुओं का समूह बीटा-कीटो-डेल्टा-लैक्टोन, यानी BKDL, था। इनके अलग-अलग रूप आगे बनने वाली सामग्री के गुणों को प्रभावित कर सकते हैं। किस प्रकार का छोटा रासायनिक समूह जुड़ा है और अणु की त्रिविमीय व्यवस्था कैसी है, इससे अंतिम पदार्थ की कठोरता, पारदर्शिता तथा रासायनिक व्यवहार में अंतर आ सकता है। इस तरह एक ही व्यापक जैविक उत्पादन मंच से अलग जरूरतों के लिए कच्चा माल विकसित करने की संभावना बनती है।

144 उम्मीदवार और प्रयोगशाला का उत्पादन

वैज्ञानिकों ने कंप्यूटर की सहायता से 144 BKDL संरचनाओं की छानबीन की। यह संख्या तैयार और बाजार में उपलब्ध प्लास्टिक उत्पादों की नहीं है। कंप्यूटर विश्लेषण का उद्देश्य संभावित अणुओं के व्यवहार को समझना और प्रयोग के लिए बेहतर विकल्प चुनना था। अध्ययन में गणना, जैविक उत्पादन और रासायनिक परीक्षण को एक-दूसरे से जोड़ा गया। ऐसे बहु-चरणीय शोध में हर चरण से मिलने वाले प्रमाण का अर्थ अलग होता है। एक लीटर वाले बायोरिएक्टर के प्रयोग में एक लक्षित BKDL के लिए लगभग 1.84 ग्राम प्रति लीटर की सांद्रता मिली। यह नियंत्रित परिस्थितियों में हुआ प्रयोग है। इसे सीधे कारखाने में प्रतिदिन होने वाले उत्पादन या तैयार प्लास्टिक की मात्रा नहीं माना जा सकता। शोधकर्ताओं ने भी माना कि व्यावसायिक उत्पादन की जरूरतों की

तुलना में उत्पादन स्तर अभी कम है और आगे सुधार की जरूरत है। इससे उपलब्धि कम नहीं होती, बल्कि अगला शोध लक्ष्य स्पष्ट होता है।

जैविक अणु और जांचे गए प्लास्टिक में जरूरी अंतर

इस अध्ययन का एक महत्वपूर्ण तथ्य यह है कि जांचे गए सभी PDK नमूने रासायनिक तरीके से बनाए गए BKDL मोनोमर से तैयार हुए थे। इनमें कुछ अणु उन अणुओं के संरचनात्मक रूप से समान थे जिन्हें इंजीनियर किए गए एंजाइम बना सकते हैं। इसलिए अध्ययन ने दो संबंधित बातें दिखाईं: जैविक रास्ते से उपयोगी अणु बन सकते हैं, और संबंधित रासायनिक संरचना से इच्छित गुण वाले पॉलिमर बनाए जा सकते हैं। लेकिन इसका अर्थ एक ही लगातार चलती औद्योगिक प्रक्रिया में जैविक कच्चे माल से अंतिम उत्पाद तैयार हो जाना नहीं है। आगे उत्पादन बढ़ाना, पदार्थ को अलग करना, उसकी शुद्धता बनाए रखना और पॉलिमर निर्माण से जोड़ना होगा। प्रयोगशाला में उत्पाद अलग करने के लिए इस्तेमाल की गई कॉलम क्रोमैटोग्राफी को शोध ने बड़े व्यावसायिक स्तर के लिए अव्यावहारिक बताया। इसलिए शुद्धिकरण की अधिक उपयुक्त विधियां विकसित करना भी जरूरी कदम है।

गुण और पुनर्चक्रण को कैसे नियंत्रित किया गया?

जांचे गए पॉलिमर में ग्लास ट्रांजिशन तापमान लगभग 53 से 98 डिग्री सेल्सियस के बीच बदला जा सका। यह पदार्थ के कठोर और अपेक्षाकृत लचीले व्यवहार से जुड़ा माप है। इसे पिघलने का तापमान या पुनर्चक्रण का तापमान मानना सही नहीं होगा। अध्ययन में कुछ नमूनों के रासायनिक विघटन के लिए अलग तापमान की जरूरत पड़ी। इससे अलग संरचनाओं की सामग्री को अलग परिस्थितियों में वापस घटकों में बदलने की संभावना समझी गई। महत्वपूर्ण बात यह है कि यह नियंत्रित रासायनिक पुनर्चक्रण था। मुख्य परीक्षणों में प्रबल अम्लीय माध्यम का उपयोग हुआ। केवल गर्मी पड़ने, बरसात होने या समुद्र में पहुंचने से यही प्रक्रिया हो जाएगी, ऐसा निष्कर्ष नहीं निकलता। विभिन्न नमूनों के लिए समय और तापमान की जरूरत भी समान नहीं थी। इसलिए “कम तापमान पर पुनर्चक्रण” लिखते समय रासायनिक माध्यम और प्रयोग की शर्तें छिपाना भ्रामक होगा।

लागत और उत्सर्जन: मॉडल बनाम बाजार

शोध में तकनीकी-आर्थिक विश्लेषण और जीवन-चक्र आकलन भी किया गया। मक्का की कटाई के बाद बचने वाले अवशेष से मिलने वाले कच्चे माल को आधार बनाकर बड़े उत्पादन की संभावनाएं मॉडल की गईं। कुछ परिदृश्यों में BKDL की लागत और ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन पेट्रोकेमिकल डाइमीडोन की तुलना में कम होने की संभावना मिली। लेकिन यह बाजार में बिक्री के वास्तविक आंकड़े या चालू बड़े संयंत्र से मापे गए परिणाम नहीं हैं। मॉडल में उत्पादन की अलग दक्षताओं और अन्य मान्यताओं का प्रभाव है। तुलना का आधार भी महत्वपूर्ण है। किसी मोनोमर की तुलना में कम लागत मिलना, हर सामान्य प्लास्टिक से सस्ता अंतिम उत्पाद मिलने के समान नहीं है। इसी प्रकार अध्ययन का प्रमुख उत्सर्जन विश्लेषण कच्चे माल से उत्पादन द्वार तक की सीमा पर आधारित था। उपयोग, संग्रह और अनेक पुनर्चक्रण चक्रों सहित पूरी व्यवस्था का आकलन आगे की जरूरत बना रहता है।

जैव-आधारित का अर्थ जैव-अपघटनीय नहीं

यूरोपीय पर्यावरण एजेंसी की व्याख्या के अनुसार जैव-आधारित प्लास्टिक और जैव-अपघटनीय प्लास्टिक अलग अवधारणाएं हैं। पहली का संबंध कच्चे माल के स्रोत से है। दूसरी का संबंध सूक्ष्मजीवों द्वारा निर्धारित परिस्थितियों में टूटने से है। कंपोस्ट होने की क्षमता भी खास परिस्थितियों पर निर्भर करती है। औद्योगिक कंपोस्टिंग का प्रमाण अपने आप घर के कंपोस्ट, मिट्टी या समुद्र में समान व्यवहार नहीं बताता। इस नए PDK अध्ययन में रासायनिक पुनर्चक्रण को केंद्र में रखना चाहिए। जैविक कच्चे माल की संभावना को “प्रकृति में कचरा डालने की छूट” नहीं माना जा सकता। माइक्रोप्लास्टिक का पूरी तरह अंत, समुद्री जीवों के लिए पूर्ण सुरक्षा या हर प्रकार की प्लास्टिक के तत्काल विकल्प जैसे दावे इस अध्ययन से सिद्ध नहीं होते। नई सामग्री के साथ संग्रह प्रणाली, डिजाइन, सही उपयोग और जिम्मेदार निपटान भी जरूरी हैं।

परीक्षा के लिए मुख्य बातें

यह अध्ययन चक्रीय अर्थव्यवस्था और जैव-विनिर्माण को जोड़ता है। इसका लक्ष्य उपयोग के बाद सामग्री के मूल घटक वापस पाकर उनका दोबारा इस्तेमाल करना है। भारत के संदर्भ में इससे शोध-उद्योग सहयोग, कृषि अवशेषों के मूल्यवर्धन और पुनर्चक्रण के लिए उत्पाद डिजाइन पर चर्चा की जा सकती है। फिर भी इसे भारत में स्वीकृत उत्पाद, शुरू हो चुकी भारतीय परियोजना या किसी नीति की घोषणा के रूप में नहीं लिखना चाहिए। **प्रश्न:** निम्न कथनों पर विचार कीजिए: (1) जैव-आधारित हर प्लास्टिक प्राकृतिक वातावरण में शीघ्र जैव-अपघटित होती है। (2) शोध में जांचे गए PDK नमूने रासायनिक रूप से तैयार BKDL मोनोमर से बने थे। (3) कंप्यूटर से जांची गई 144 संरचनाओं का अर्थ 144 व्यावसायिक उत्पाद बन जाना है। सही उत्तर केवल कथन 2 है। **मुख्य परीक्षा संकेत:** "चक्रीय अर्थव्यवस्था के लिए नई सामग्री के साथ वापसी-संग्रह और पुनर्चक्रण ढांचा भी जरूरी है।" उत्तर में जैव-विनिर्माण, मोनोमर की पुनर्प्राप्ति, उत्पादन लागत, शुद्धिकरण, पर्यावरणीय आकलन और सही लेबलिंग को जोड़ें। निष्कर्ष यह हो सकता है कि बेहतर रसायन उपयोगी अवसर देता है, लेकिन सफल समाधान के लिए पूरी सामग्री व्यवस्था पर काम करना पड़ता है।

स्रोत और सीमाएँ

- नेचर बायोटेक्नोलॉजी शोधपत्र, 27 जुलाई 2026 (सार, मुख्य परिणाम, चर्चा और प्रारंभिक विधियाँ पढ़ीं; पूर्ण विधियाँ/परिशिष्ट नहीं): https://www.nature.com/articles/s41587-026-03229-7
- प्रकाशक संशोधन (Publisher Correction), 3 अगस्त 2026 (पूर्ण पढ़ा; केवल चित्र-4 लेबल संशोधन, परिणाम में बदलाव नहीं): https://www.nature.com/articles/s41587-026-03285-z
- लॉरेंस बर्कले ऊर्जा प्रौद्योगिकी क्षेत्र संस्थागत रिकॉर्ड, 27 जुलाई 2026 (उसी शोधपत्र का सार; स्वतंत्र प्रतिकृति नहीं): https://eta.lbl.gov/publications/engineered-polyketide-synthases
- यूरोपीय पर्यावरण एजेंसी विश्लेषण, 27 अगस्त 2020 (पृष्ठभूमि: जैव-आधारित/जैव-अपघटनीय/कम्पोस्टेबल अंतर): https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/biodegradable-and-compostable-plastics-challenges-and-opportunities
- OECD प्रेस-विज्ञप्ति, 22 फ़रवरी 2022 (पृष्ठभूमि: प्लास्टिक अपशिष्ट संदर्भ; पुराने आंकड़े लेख में नहीं दोहराए गए): https://www.oecd.org/en/about/news/press-releases/2022/02/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.html
- IUPAC गोल्ड बुक, मोनोमर परिभाषा (तकनीकी संदर्भ): https://goldbook.iupac.org/terms/view/M04019
- **सीमाएँ:** पूर्ण शोधपत्र/परिशिष्ट नहीं पढ़ा गया। परीक्षित PDK रासायनिक रूप से बनाए गए मोनोमर से हैं; जीव-विज्ञान से मोनोमर बनाना अलग प्रयोग है। 144 उम्मीदवार कंप्युटरीय जाँच हैं, उत्पाद नहीं। प्रयोगशाला-स्तरीय आंकड़े; वाणिज्यिक उत्पादन, लागत या मिट्टी/समुद्र में अपघटन का प्रमाण नहीं।