इलेक्ट्रोकैलोरिक कूलिंग: विद्युत क्षेत्र से शीतलन की नई संभावना

विज्ञान-तकनीक और ऊर्जा (मुख्य परीक्षा: सामान्य अध्ययन-III) | समाचार संदर्भ: 6 मई 2026 (नेचर शोधपत्र) | प्रकाशित: 24 अक्टूबर 2026

गर्मी बढ़ने पर ठंडक की जरूरत भी बढ़ती है। घरों के अलावा भोजन, दवाओं और अनेक औद्योगिक प्रक्रियाओं के लिए भरोसेमंद शीतलन जरूरी है। लेकिन बिजली की मांग और कुछ रेफ्रिजरेंट गैसों का जलवायु प्रभाव भी महत्वपूर्ण प्रश्न हैं। इलेक्ट्रोकैलोरिक कूलिंग ठोस पदार्थ के विशेष गुण का उपयोग करने वाली एक शोध दिशा है। मई 2026 के एक अध्ययन ने ऐसे पदार्थों को कमरे के तापमान के ऊपर और नीचे उपयोगी बनाने की संभावना दिखाई। इसे बाजार में तैयार नए फ्रिज की घोषणा नहीं समझना चाहिए।

खबरों में क्यों

मई 2026 का अध्ययन

6 मई 2026 को नेचर में प्रकाशित शोध में बहुस्तरीय कैपेसिटर में इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव का अध्ययन किया गया। शोधकर्ताओं ने लेड स्कैंडियम टैंटलेट, जिसे पीएसटी कहा जाता है, में लेड मैग्नीशियम टंगस्टेट, यानी पीएमडब्ल्यू, मिलाकर पदार्थ की विशेषताएं बदलीं। उद्देश्य उपयोगी तापीय प्रभाव बनाए रखते हुए कार्य करने की तापमान सीमा को नीचे ले जाना था। मिश्रित पदार्थों में कमरे के तापमान के ऊपर और काफी नीचे भी लगभग तीन केल्विन के स्तर का प्रभाव बताया गया।

यह तापमान परिवर्तन चुने हुए पदार्थ और प्रयोग की शर्तों का परिणाम है। इससे यह नहीं निकलता कि किसी पूरे कमरे या खाद्य सामग्री को उसी समय तीन डिग्री ठंडा करने वाला तैयार उपकरण बन गया। शोध में ठोस कार्यकारी पदार्थ का मापन और आदर्श शीतलन चक्र का विश्लेषण अलग-अलग स्तर पर प्रस्तुत हैं। इस अंतर को बनाए रखना तकनीक की वास्तविक प्रगति समझने के लिए जरूरी है।

इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव क्या है?

कुछ विद्युत ध्रुवित हो सकने वाले पदार्थों में विद्युत क्षेत्र बदलने से तापमान या एंट्रॉपी में बदलाव होता है। इसे इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव कहा जाता है। विद्युत क्षेत्र पदार्थ के अंदर द्विध्रुवों की व्यवस्था को प्रभावित कर सकता है। जब ऊष्मा के आदान-प्रदान की शर्तें बदलती हैं, तो उस बदलाव का तापीय परिणाम भी अलग तरीके से मापा जा सकता है। यह सामान्य प्रतिरोधक में बिजली से केवल गर्मी पैदा होने की प्रक्रिया से अलग प्रभाव है।

सरल सकारात्मक प्रभाव के उदाहरण में, ऊष्मा का आदान-प्रदान सीमित रहते हुए क्षेत्र लगाने पर पदार्थ गर्म और क्षेत्र हटाने पर ठंडा हो सकता है। परंतु हर पदार्थ और हर तापमान में व्यवहार एक जैसा नहीं होता। प्रभाव का संकेत, आकार और उसे वापस दोहराने की क्षमता पदार्थ तथा उसकी अवस्था पर निर्भर हैं। इसलिए किसी भी कैपेसिटर को बिजली से जोड़कर उपयोगी शीतलन मिलने की उम्मीद सही नहीं है।

ठोस पदार्थ कैसे ठंडक पहुंचाएगा?

शीतलन का अर्थ गर्मी का गायब हो जाना नहीं है। उपयोगी उपकरण को ठंडे हिस्से या भार से ऊष्मा लेनी और गर्म हिस्से में छोड़नी होती है। इलेक्ट्रोकैलोरिक पदार्थ का तापमान बढ़ना और घटना इस चक्र में सहायता कर सकता है। लेकिन इसके लिए ऊष्मा के आने-जाने का सही क्रम, बाहरी कार्य और गर्मी छोड़ने की व्यवस्था चाहिए। केवल पदार्थ ठंडा हो जाने का एक क्षण पूरा रेफ्रिजरेशन चक्र नहीं है।

पदार्थ को क्षेत्र लगाकर गर्म किया जा सकता है, फिर उससे ऊष्मा बाहर निकाली जा सकती है। उपयुक्त क्रम में क्षेत्र हटाने से वह नीचे के तापमान पर पहुंच सकता है और ठंडे भार से ऊष्मा ले सकता है। वास्तविक डिजाइन में चरण, ताप-संपर्क और नियंत्रण अधिक जटिल हो सकते हैं। यह सामान्य व्याख्या है, उच्च विद्युत क्षेत्र वाला घरेलू प्रयोग करने की विधि नहीं।

बहुस्तरीय कैपेसिटर क्यों?

कैपेसिटर में विद्युत आवेश और ऊर्जा संग्रह की क्षमता होती है। बहुस्तरीय डिजाइन में पदार्थ की पतली परतें और इलेक्ट्रोड व्यवस्थित किए जाते हैं। पतली सक्रिय परत में उपयोगी विद्युत क्षेत्र प्राप्त करने और कार्यकारी पदार्थ का पर्याप्त आयतन रखने के बीच संतुलन बनाया जा सकता है। परतों की मोटाई, इलेक्ट्रोड और निष्क्रिय हिस्सों का तापीय व्यवहार परिणाम पर असर डालता है।

सिर्फ सक्रिय पदार्थ का बड़ा प्रभाव पूरे कैपेसिटर में समान प्रभाव की गारंटी नहीं है। इलेक्ट्रोड और दूसरे हिस्से भी गर्म या ठंडे होते हैं। प्रयोग में तापमान मापने वाला सेंसर तक कुछ प्रभाव डाल सकता है। मई के शोध ने सक्रिय पदार्थ, मापी गई तापमान छलांग और प्रभावी तापमान परिवर्तन के बीच इन अंतरों पर ध्यान दिया।

कमरे के तापमान के नीचे काम करने का महत्व

कुछ पहले के पीएसटी-आधारित कार्यकारी पदार्थ मुख्य रूप से कमरे के तापमान के ऊपर बेहतर प्रदर्शन करते थे। उपयोगी रेफ्रिजरेशन के लिए परिवेश के ऊपर से नीचे तक ऊष्मा स्थानांतरण की क्षमता चाहिए। केवल पहले से गर्म हिस्से में प्रभाव मिलना अनेक रोजमर्रा की जरूरतों के लिए पर्याप्त नहीं होगा। नए मिश्रित पदार्थ में तापमान सीमा नीचे ले जाना इसी बाधा से जुड़ा है।

शोध में क्यूरी तापमान घटाने के साथ पदार्थ के भीतर कुछ महत्वपूर्ण क्रम और गुप्त ऊष्मा बनाए रखने का प्रयास हुआ। क्यूरी तापमान यहां अवस्था-परिवर्तन से जुड़ा वैज्ञानिक मान है। इसे पूरे उपकरण का न्यूनतम प्राप्त तापमान नहीं समझना चाहिए। इसी तरह पदार्थ की प्रभावी प्रतिक्रिया से निकाली गई शीतलन संभावना और वास्तव में ठंडा किया गया उपयोगी भार अलग बातें हैं।

निर्माण की प्रक्रिया में क्या बदला?

शोधकर्ताओं के अनुसार कुछ पहले के पीएसटी कैपेसिटर में उपयोगी आंतरिक क्रम के लिए लंबे एनीलिंग चरण की जरूरत पड़ती थी। नए मिश्रण में उपयुक्त प्रसंस्करण के जरिए उस लंबे अतिरिक्त चरण के बिना अच्छा क्रम बनाए रखने का रास्ता दिखाया गया। इससे सामग्री निर्माण की ऊर्जा और समय लागत पर काम करने की संभावना बनती है।

लेकिन एनीलिंग का लंबा चरण हटने का अर्थ पूरे निर्माण में गर्मी या ऊर्जा की जरूरत समाप्त हो जाना नहीं है। शोध में मिश्रण को सघन बनाने के लिए उच्च तापमान की सिंटरिंग फिर भी शामिल थी। किसी एक चरण का सुधार पूरे उत्पाद की जीवन-चक्र लागत या उत्सर्जन में तय प्रतिशत कमी का अपने आप प्रमाण नहीं बनता।

दक्षता के आंकड़े कैसे पढ़ें?

अध्ययन में आदर्श द्रव रीजेनेरेटर और विद्युत कार्य की पूर्ण पुनर्प्राप्ति जैसी मान्यताओं के आधार पर चक्रों का विश्लेषण किया गया। प्रकाशित लगभग 70 से 90 प्रतिशत चक्र-दक्षता को इन मान्यताओं और कार्नो सीमा से तुलना के संदर्भ में पढ़ना चाहिए। यह किसी बाजार में उपलब्ध फ्रिज की मापी गई दीवार-प्लग दक्षता या बिजली बिल में उतनी बचत की घोषणा नहीं है।

रेफ्रिजरेटर का प्रदर्शन गुणांक, यानी सीओपी, हटाई गई ऊष्मा को दिए गए कार्य से तुलना करता है। यह साधारण विद्युत उपकरण की प्रतिशत दक्षता जैसा नहीं है। पूरा उपकरण बनने पर पंप, नियंत्रण, तापीय नुकसान और शक्ति इलेक्ट्रॉनिक्स की लागत भी देखनी होगी। आदर्श चक्र का अच्छा अनुमान उपयोगी दिशा देता है, लेकिन वास्तविक उत्पाद के स्वतंत्र परीक्षण की जगह नहीं लेता।

क्या रेफ्रिजरेंट गैस पूरी तरह समाप्त होगी?

इस दिशा में ठोस पदार्थ कार्यकारी तापीय भूमिका निभाता है। इससे पारंपरिक वाष्प-संपीड़न वाली रेफ्रिजरेंट व्यवस्था के विकल्प खोजे जा सकते हैं। लेकिन ठोस-अवस्था का अर्थ उपकरण में कोई द्रव, कोई गति या कोई सहायक हिस्सा न होना नहीं है। मई के चक्र-विश्लेषण में भी द्रव रीजेनेरेटर का उपयोग मान लिया गया था।

अमेरिकी ऊर्जा विभाग की 2015 की एक परियोजना ने इलेक्ट्रोकैलोरिक हीट पंप की संभावना को शोध-लक्ष्य के रूप में प्रस्तुत किया था। उससे पता चलता है कि दिशा पुरानी है और मई 2026 पूरी अवधारणा की पहली शुरुआत नहीं है। उस पुरानी परियोजना के लक्ष्य को आज सिद्ध व्यावसायिक प्रदर्शन या कीमत की तरह नहीं अपनाना चाहिए।

पदार्थ की सुरक्षा और टिकाऊपन

पीएसटी और पीएमडब्ल्यू में सीसा शामिल है। सीसे का मौजूद होना ध्यान देने योग्य सामग्री-सुरक्षा प्रश्न है। विश्व स्वास्थ्य संगठन के अनुसार सीसे का संपर्क स्वास्थ्य को हानि पहुंचा सकता है। हालांकि किसी बंद उपकरण में सीसा होने से हर उपयोगकर्ता का संपर्क अपने आप साबित नहीं होता। निर्माण, टूट-फूट, निपटान और पुनर्चक्रण के दौरान संपर्क रोकने की व्यवस्था का आकलन जरूरी होगा।

इसी तरह बार-बार विद्युत क्षेत्र लगाने पर प्रदर्शन का टिकना महत्वपूर्ण है। मई के अध्ययन में अनेक चक्रों में दोहराव और विद्युत टूटन के विरुद्ध परीक्षण बताए गए। लेकिन किसी नमूने का चक्र-परीक्षण पूरे व्यावसायिक उपकरण की हर जलवायु, हर उपयोग और कई दशकों की सेवा-आयु की गारंटी नहीं है। पैकेजिंग, इलेक्ट्रोड, नियंत्रण और तापीय संपर्क भी विश्वसनीय होने चाहिए।

सतत शीतलन की व्यापक जरूरत

संयुक्त राष्ट्र पर्यावरण कार्यक्रम की 2025 की ग्लोबल कूलिंग वॉच ने बढ़ती गर्मी, शीतलन मांग और असमान पहुंच को महत्वपूर्ण चुनौती बताया। यह मई के पदार्थ-अध्ययन का प्रत्यक्ष प्रभाव-आकलन नहीं है। इससे व्यापक समस्या समझ में आती है जिसके लिए बेहतर उपकरणों के साथ भवन डिजाइन, छाया, ऊर्जा दक्षता और स्वच्छ बिजली जैसे उपाय भी महत्वपूर्ण हैं।

भारत के लिए यह मटेरियल साइंस, शक्ति इलेक्ट्रॉनिक्स और ऊर्जा-कुशल उपकरणों के बीच संबंध समझने का उदाहरण है। किसी विदेशी प्रयोग से भारत में नई तकनीक का उत्पादन, सरकारी स्वीकृति या घरेलू बाजार में उपलब्धता सिद्ध नहीं होती। शोध की उपयोगिता स्वीकार करते हुए प्रयोगशाला से भरोसेमंद उत्पाद तक की बाकी दूरी स्पष्ट बतानी चाहिए।

मुख्य परीक्षा अभ्यास प्रश्न

इलेक्ट्रोकैलोरिक शीतलन की अवधारणा समझाइए। इसके संभावित पर्यावरणीय लाभों के साथ ऊर्जा लागत, सामग्री-सुरक्षा और व्यावसायिक उपयोग की चुनौतियों पर चर्चा कीजिए। (250 शब्द, 15 अंक)

उत्तर की रूपरेखा:

भूमिका में: इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव को कुछ पदार्थों में विद्युत क्षेत्र बदलने से तापमान या एंट्रॉपी में बदलाव के रूप में समझाएँ और बताएँ कि यह साधारण प्रतिरोधक की गर्मी से अलग है। 6 मई 2026 को नेचर में प्रकाशित बहुस्तरीय कैपेसिटर के अध्ययन का उल्लेख करें, जिसमें पीएसटी में पीएमडब्ल्यू मिलाकर कार्य-तापमान सीमा नीचे ले जाने का प्रयास हुआ। साफ लिखें कि यह शोध है, बाजार में तैयार फ्रिज की घोषणा नहीं।

मुख्य भाग में: पर्यावरणीय लाभ में बढ़ती शीतलन मांग, बिजली की मांग और कुछ रेफ्रिजरेंट गैसों के जलवायु प्रभाव की समस्या रखें, और ठोस पदार्थ आधारित शीतलन को पारंपरिक रेफ्रिजरेंट व्यवस्था का संभावित विकल्प बताएँ। तुरंत जोड़ें कि इसका अर्थ उपकरण में द्रव या सहायक हिस्से न होना नहीं है, क्योंकि मई के चक्र-विश्लेषण में भी द्रव रीजेनेरेटर माना गया था, और लेख रेफ्रिजरेंट गैस के पूरी तरह समाप्त होने का दावा नहीं करता। ऊर्जा लागत में लगभग 70 से 90 प्रतिशत चक्र-दक्षता को आदर्श द्रव रीजेनेरेटर और विद्युत कार्य की पूर्ण पुनर्प्राप्ति जैसी मान्यताओं तक सीमित रखें; यह बाजार के फ्रिज की मापी गई दक्षता या बिजली बिल की बचत नहीं है। निर्माण में लंबे एनीलिंग चरण के बिना अच्छा क्रम बनाए रखने की संभावना रखें, पर बताएँ कि उच्च तापमान की सिंटरिंग फिर भी शामिल थी और जीवन-चक्र लागत या उत्सर्जन में प्रतिशत कमी सिद्ध नहीं है। सामग्री-सुरक्षा में पीएसटी और पीएमडब्ल्यू में सीसे की उपस्थिति, विश्व स्वास्थ्य संगठन के अनुसार सीसे के संपर्क से हानि, और निर्माण, टूट-फूट, निपटान तथा पुनर्चक्रण में संपर्क रोकने की जरूरत रखें, पर बंद

उपकरण में हर उपयोगकर्ता के संपर्क को स्वतः सिद्ध न मानें। व्यावसायिक उपयोग में लगभग तीन केल्विन के प्रभाव को चुने हुए पदार्थ और प्रयोग की शर्तों का परिणाम बताएँ, पूरे कमरे को ठंडा करने वाला उपकरण नहीं; चक्र-परीक्षण को दशकों की सेवा-आयु की गारंटी न मानें; और पैकेजिंग, इलेक्ट्रोड, नियंत्रण तथा तापीय संपर्क की विश्वसनीयता तथा स्वतंत्र उत्पाद-परीक्षण की जरूरत रखें। भारत में उत्पादन, स्वीकृति या बाजार-उपलब्धता के दावे या लागत के आंकड़े न गढ़ें।

निष्कर्ष में: निष्कर्ष में लिखें कि यह तकनीक शीतलन की दिशा में उपयोगी शोध है, पर भवन डिजाइन, छाया, ऊर्जा दक्षता और स्वच्छ बिजली जैसे उपाय भी जरूरी हैं। प्रयोगशाला से भरोसेमंद उत्पाद तक की बाकी दूरी स्पष्ट बताएँ।

स्रोत

1. नेचर: कमरे के तापमान के ऊपर और नीचे इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव, 6 मई 2026
2. कैम्ब्रिज: उसी अध्ययन का स्वीकृत संस्करण और सार
3. फ्रंटियर्स इन एनर्जी: इलेक्ट्रोकैलोरिक मॉडल की समीक्षा, 2023
4. अमेरिकी ऊर्जा विभाग: इलेक्ट्रोकैलोरिक हीट पंप का ऐतिहासिक शोध-लक्ष्य, 2015
5. संयुक्त राष्ट्र पर्यावरण कार्यक्रम: ग्लोबल कूलिंग वॉच, 2025
6. विश्व स्वास्थ्य संगठन: सीसे के संपर्क और स्वास्थ्य का परिचय

अक्सर पूछे जाने वाले प्रश्न (FAQ)

संक्षिप्त उत्तर: कुछ विद्युत ध्रुवित हो सकने वाले पदार्थों में विद्युत क्षेत्र बदलने से तापमान या एंट्रॉपी में बदलाव होता है। इसे इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव कहा जाता है।

प्रश्न: इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव क्या है?

कुछ विद्युत ध्रुवित हो सकने वाले पदार्थों में विद्युत क्षेत्र बदलने से तापमान या एंट्रॉपी में बदलाव होता है। इसे इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव कहा जाता है।

प्रश्न: नेचर के अध्ययन में कौन-से पदार्थों पर काम हुआ?

6 मई 2026 को नेचर में प्रकाशित शोध में बहुस्तरीय कैपेसिटर में इलेक्ट्रोकैलोरिक प्रभाव का अध्ययन किया गया। शोधकर्ताओं ने लेड स्कैंडियम टैंटलेट, जिसे पीएसटी कहा जाता है, में लेड मैग्नीशियम टंगस्टेट, यानी पीएमडब्ल्यू, मिलाकर पदार्थ की विशेषताएं बदलीं।

प्रश्न: क्षेत्र लगाने और हटाने से तापमान कैसे बदल सकता है?

सरल सकारात्मक प्रभाव के उदाहरण में, ऊष्मा का आदान-प्रदान सीमित रहते हुए क्षेत्र लगाने पर पदार्थ गर्म और क्षेत्र हटाने पर ठंडा हो सकता है। परंतु हर पदार्थ और हर तापमान में व्यवहार एक जैसा नहीं होता।