

वितळलेल्या प्लॅस्टिकला सुप्रवाही बनवण्यासाठी 'नॅनोटेट्रापॉड्स'

काही सिंथेटिक प्लॅस्टिक मध्ये टेट्रापॉड आकाराचे नॅनोकण मिसळले असता त्या प्लॅस्टिकचा चिकटपणा कमी होऊन त्यावर प्रक्रिया करणे सुलभ होते असे आयआयटी येथील संशोधकांनी संयुक्त विद्यमाने केलेल्या एका संशोधनातून लक्षात आले



प्रतिमा : समुद्रकिनाऱ्याची धूप रोखण्यासाठी लाटरोधक म्हणून वापरले जाणारे काँक्रीटचे चतुष्पाद आकार (टेट्रापॉड).

[श्रेय : [Pexels](#)]

प्लॅस्टिक्स अत्यंत बहुपयोगी असतात कारण ती लवचिक व प्रसरणक्षम असतात आणि अगदी कोणत्याही आकारात घडवता येऊ शकतात. त्यांची लांब रेणूंपासून तयार झालेली संरचना त्यांना हे वैशिष्ट्य बहाल करते. या रेणूंना पॉलिमर्स असे म्हणले जाते. परंतु, जड आणि लांबलचक रेणू-शृंखलांनी बनलेले प्लॅस्टिकचे काही प्रकार वितळवलेल्या अवस्थेत अतिशय घट्ट व दाट बनतात आणि त्यांवर प्रक्रिया करणे कठीण होते. यालाच शास्त्रीय भाषेत उच्च श्यानता (चिकटपणा) असलेला द्रवपदार्थ असे म्हणले जाते. यामुळे, प्रक्रियेदरम्यान, हे वितळलेले प्लॅस्टिक प्रवाही ठेवणे आव्हानात्मक बनते. त्यासाठी अधिक ऊर्जा लागते व परिणामी प्रक्रियेचा खर्च वाढतो.

भारतीय तंत्रज्ञान संस्था (आयआयटी) मुंबई, आयआयटी मद्रास व आयआयटी कानपूर येथील संशोधकांच्या संयुक्त विद्यमाने नुकतेच एक अभिनव [संशोधन](#) झाले. या अभ्यासाने दाखवले की काही पॉलिमरमध्ये, समुद्रकिनाऱ्यावर लाटारोधक म्हणून वापरल्या जाणाऱ्या काँक्रीटच्या टेट्रापॉडसारखे, चार भुजा असलेल्या आकाराचे नॅनोकण मिसळले असता हे पॉलिमर अधिक प्रवाही बनतात. या पॉलिमरचा रेणू भार सामान्यपणे अधिक असतो व त्यामध्ये लांबलचक शृंखला असतात. या शृंखलांच्या गाठी बसण्याची शक्यता असते व

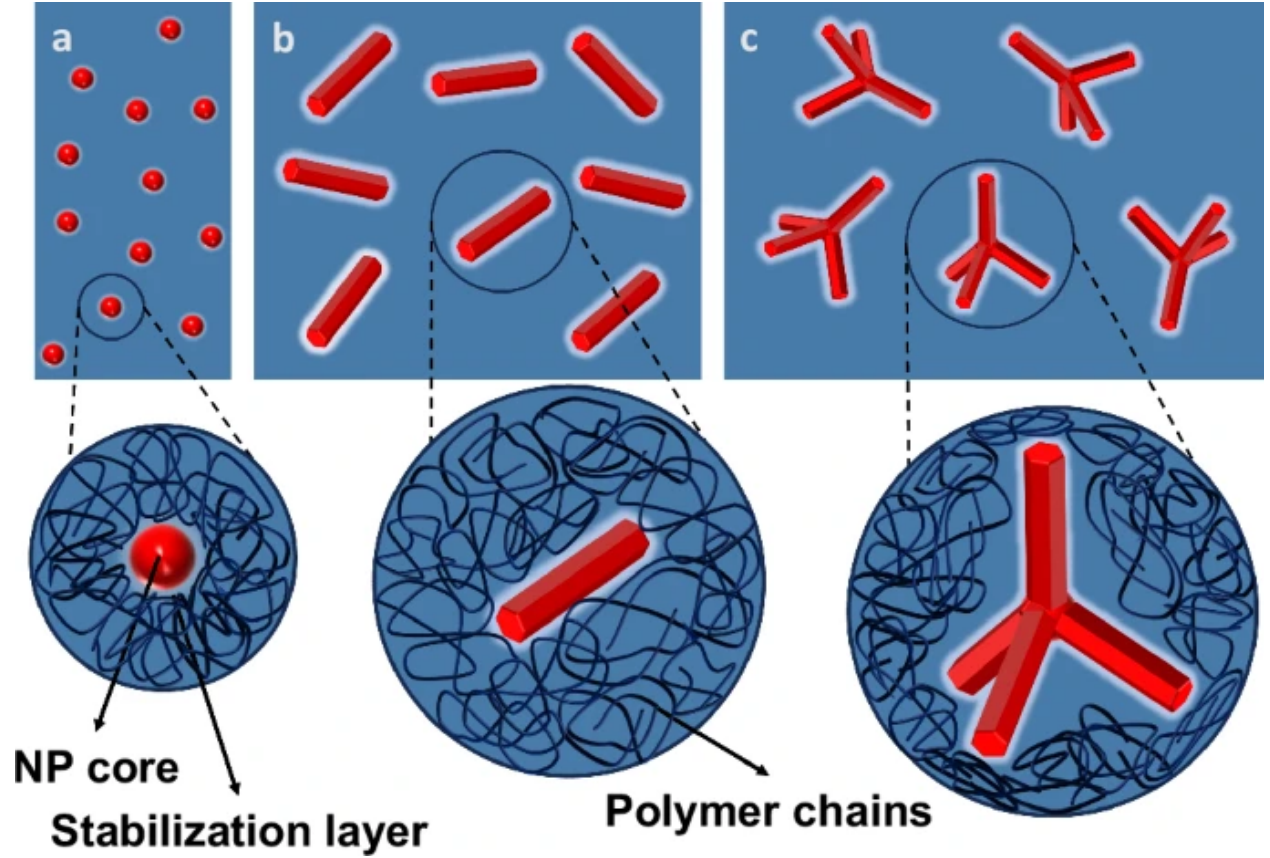
त्यामुळे प्रवाहास प्रतिरोध निर्माण होतो. परंतु, टेट्रापॉडसारख्या आकाराच्या नॅनोकणांमुळे प्रवाह प्रतिरोध कमी होण्यास मदत होते. संशोधकांनी पॉलिस्टायरीन (पीएस) या पॉलिमरचा वापर करून हा परिणाम यशस्वीरित्या दाखवला. आयआयटी मुंबई येथील 'लॅब ऑफ सॉफ्ट इंटरफेसेस'चे प्रमुख प्रा. मिथुन चौधुरी यांनी या संशोधनाचे नेतृत्व केले. या संशोधनासाठी त्यांना प्रा. अनिंद दत्ता (आयआयटी मुंबई), प्रा. तारक के. पात्रा (आयआयटी मद्रास) आणि प्रा. शिवसुरेंद्र चंद्रन (आयआयटी कानपूर) यांचे सहकार्य लाभले. ज्योतिप्रिय सरकार, मिथुन मधुसूदनन, हर्षित यादव, डॉ. फरियाद अली (आयआयटी मुंबई), आणि डॉ. सचिन एम. बी. गौतम (आयआयटी मद्रास) यांनी बहुतांशी प्रायोगिक आणि विश्लेषणात्मक काम पाहिले.

संशोधनाच्या संभाव्य प्रभावाकडे लक्ष वेधत प्रा. चौधुरी म्हणाले, “या अभ्यासातील शोधामुळे भविष्यात प्रक्रियांसाठी आवश्यक ऊर्जेची मागणी कमी करता येऊ शकेल. परंतु, शाश्वत पद्धतीने अचूक आकाराचे नॅनोकण तयार करता आले तर हे शक्य आहे.” यासाठी टेट्रापॉड आकार वापरण्याची प्रेरणा एका सहज प्रसंगातून मिळाली. “मरिन ड्राइव्हर फिरत असताना, आम्ही लाटा थोपवण्यासाठी वापरलेले काँक्रीटचे मोठे टेट्रापॉड पाहिले. तेव्हा एक प्रश्न पडला : जर आपण या आकाराच्या सूक्ष्म प्रतिकृती दाट पॉलिमर द्रवांमध्ये वापरल्या तर काय होईल ?” अशी आठवण प्रा. चौधुरी यांनी सांगितली. टेट्रापॉड या आकाराच्या असामान्य भूमितीमुळे हा आकार घेऊन प्रयोग करण्याची प्रेरणा प्रा. चौधुरी यांना मिळाली. गोल किंवा दंडाकार अशा इतर आकारांच्या नॅनोकणांमुळे बहुतांशी द्रवाचा चिकटपणा (स्थानता) वाढतो व प्रवाहीपणा कमी होतो, हे पूर्वीपासून ज्ञात आहे.

आयआयटी मुंबई येथील प्रा. दत्ता यांच्या प्रयोगशाळेमध्ये अशा प्रकारच्या नॅनोकणांचे संश्लेषण गेल्या काही काळापासून सुरू होते. त्यामुळे लवकरच या प्रेरणेतून एक औपचारिक प्रयोग सुरू झाला. प्रा. चौधुरी व त्यांचे पीएचडीचे विद्यार्थी ज्योतिप्रिय सरकार यांनी प्रा. दत्ता यांच्या प्रयोगशाळेतून कॅडमियम-सेलेनियम टेट्रापॉड प्राप्त केले व काळजीपूर्वकरित्या त्यांचा पॉलिस्टायरीनमध्ये समावेश करून त्याच्या चाचण्या घेतल्या. पॉलिस्टायरीनचे भौतिक व प्रवाहीकीय (रियॉलॉजिकल) गुणधर्म, म्हणजेच एखादे द्रव्य कसे वाहते, ताण आल्यावर कसे रूपांतरित होते इत्यादी वैशिष्ट्ये चांगली ज्ञात आहेत. त्यामुळे नॅनोकण मिसळल्यानंतर प्रवाह-वर्तनात नेमके कोणते बदल होतात हे पॉलिस्टायरीनच्या वापरामुळे संशोधकांना स्पष्टपणे लक्षात आले. तुलनेसाठी त्यांनी कॅडमियम-सेलेनियमच्या गोलाकार आणि दंडाकार नॅनोकणांसह नियंत्रित प्रयोगही केले आणि असे आढळले की फक्त टेट्रापॉड आकारानेच प्रवाह सुधारला, व इतर आकारांच्या नॅनोकणांमुळे पॉलिमरची स्थानता व प्रवाह-प्रतिरोध वाढला. हे निरीक्षण सूचित करते की स्थानतेत दिसणारी घट ही टेट्रापॉड्सच्या विशिष्ट भूमितीमुळेच होते. याशिवाय, नॅनो-टेट्रापॉड मिसळल्याने पॉलिमरची यांत्रिक किंवा ऊष्मीय स्थिरता बाधित होत नाही असेही संशोधकांनी दर्शविले.

आकारांमुळे पडणाऱ्या फरकामागील भौतिकशास्त्रीय स्पष्टीकरण जाणून घेण्यासाठी संशोधकांनी ‘क्रेमर-ग्रेस्ट बीड-स्प्रिंग मॉडेल’वर आधारित रेण्वीय अनुरूपणांचा वापर केला. यामध्ये पॉलिमरचे अतिसूक्ष्म स्तरावरील वास्तविक वर्तन टिपले जाते. संबंधित अनुरूपणाधारित अभ्यास आयआयटी मद्रास येथील प्रा. पात्रा व डॉ. गौतम यांनी पार पाडला. “या अनुरूपणातून दिसून आले की टेट्रापॉडच्या आतील वक्र कडांमुळे पॉलिमर शृंखला प्रवेश करू शकणार नाहीत असा प्रदेश निर्माण होतो,” प्रा. चौधुरी यांनी विशद केले. “यामुळे नॅनो-टेट्रापॉडभोवतीच्या पॉलिमरची संख्या कमी होते व पॉलिमर शृंखला एकमेकांवरून घसरून सुरळीतपणे पुढे जाण्यास मदत होते.” भौमितीय आकारामुळे निर्माण होणारा हा परिणाम लहान शृंखला असलेल्या पॉलिमरमध्ये किंवा साध्या द्रवरूप पदार्थांमध्ये दिसून येत नाही. त्यामुळे या अभ्यासाचे

निष्कर्ष सगळ्या पॉलिमर्स ना लागू करता येणार नाहीत असा इशारा प्रा. चौधुरी यांनी दिला.



NP core	नॅनोकण केंद्र
Stabilization layer	स्थैर्य स्तर
Polymer chains	पॉलिमर शृंखला

वेगवेगळ्या आकारांच्या नॅनोकणांभोवती पॉलिमरच्या रेणूंचे वेगवेगळे वर्तन आढळते हे दाखवणारी प्रतिमा. प्रतिमेत दिसणारे धागे या पॉलिमर शृंखला असून लाल आकार हे नॅनोकण आहेत. टेट्रापॉड आकाराभोवती शृंखलांची घनता कमी दिसते. [श्रेय: सदर अभ्यासाचे लेखक]

अभ्यासाचे निष्कर्ष सुचवतात की नॅनोकणांच्या आकाराचा वापर करून प्लॅस्टिकच्या प्रवाहाचे सूक्ष्म समायोजन करणे देखील शक्य आहे. ते कसे याचा खुलासा करताना प्रा. चौधुरी म्हणाले, “कोटिंग, चिकटवण्यासाठी वापरले जाणारे पदार्थ (अडेसिव्ह) किंवा ३डी प्रिंटिंगच्या रेझिन्ससारख्या अनेक वापरांमध्ये आकार किंवा भार वहन क्षमता टिकवून ठेवण्यासाठी विशिष्ट श्यानता (चिकटपणा) आवश्यक असते. नॅनोकणांमुळे श्यानता वाढते याची अनेक उदाहरणे उपलब्ध आहेत. परंतु आमचा अभ्यास दर्शवतो की या परिणामांचा वापर दोन्ही प्रकारे केला जाऊ शकतो. म्हणजे, गोल किंवा दंडगोल अशा सघन किंवा सुटसुटीत आकाराचे कण मिसळून पदार्थ अधिक दाट करता येऊ शकतो, तर टेट्रापॉडसारख्या शाखायुक्त भूमितीय आकारामुळे पदार्थ अधिक पातळ होऊ शकतो.”

पॉलिमर व नॅनोकणांचे संमिश्र पदार्थ तयार करण्याच्या प्रक्रियेला व्यापक स्तरावर नेण्याचे आणि ती विविध

प्रकारच्या पॉलिमरसाठी अनुकूल करण्याचे मार्ग शोधण्यावर संशोधन गट सध्या काम करत आहे. मोठ्या प्रमाणावर नॅनोकणांचे संश्लेषण करणे आणि कॅडमियमसारख्या विषारी पदार्थांऐवजी अधिक पर्यावरणपूरक पर्यायांचा वापर करणे ही काही प्रमुख आव्हाने अद्यापही शिल्लक आहेत. प्रा. चौधुरी सांगतात, “भविष्यात आम्ही इतर पॉलिमर व भौमितीयदृष्ट्या अधिक गुंतागुंतीच्या आकारांच्या नॅनोकणांवर प्रयोग करणार आहोत.” आगामी काळात, कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) किंवा मशीन लर्निंग तंत्रज्ञानांचा वापर करून नॅनोकणांच्या आकाराच्या आधारे पॉलिमर व नॅनोकणांच्या संमिश्र पदार्थांचे वर्तन आणि प्रवाह कसे असतील याचे अंदाज वर्तवू शकणारी मॉडेल्स विकसित करण्याचा संशोधक गटाचा उद्देश आहे.

एखादे जिज्ञासाप्रेरित कार्य हाती घेऊन वेगवेगळ्या आयआयटी संस्थांनी एकत्र येऊन काम केल्यास औद्योगिक क्षेत्रात यशस्वी ठरू शकतील असे शोध लागू शकतात हे देखील या संशोधनाद्वारे समोर आले. “हे संशोधन सहयोगामुळे शक्य झाले असे निस्संदिग्धपणे म्हणता येईल,” प्रा. चौधुरी म्हणाले. “माझा पीएचडीचा विद्यार्थी, ज्योतिप्रिय सरकार याच्या नेतृत्वाखाली भौतिक व प्रवाहीकीय अभ्यास आयआयटी मुंबई येथील आमच्या लॅब ऑफ सॉफ्ट इंटरफेसेसमध्ये केला गेला. तर, नॅनोकणांचे संश्लेषण प्रा. अनिंद्या दत्ता यांच्या प्रयोगशाळेत पार पडले. आयआयटी मद्रासमधील प्रा. तारक पात्रा यांच्या गटाने रेण्वीय अनुरूपणांचे काम सांभाळले, आणि आयआयटी कानपूरचे प्रा. शिवसुरेंद्र चंद्रन यांनी संकल्पनेबाबत मोलाचे योगदान केले. अचूक प्रयोग आणि संगणकीय मॉडेलिंग यशस्वीरीत्या एकत्र येणे अत्यावश्यक होते. कोणत्याही एका मार्गाने पूर्ण चित्र स्पष्ट झालेच नसते.”

सामूहिक शोधकार्य यशस्वी होण्यासाठी परस्परांवरील विश्वास व एकत्रित कुतूहलाचे वातावरण आवश्यक आहे या गोष्टीवर प्रा. चौधुरी भर देतात. संशोधनाच्या प्रवासाकडे मागे वळून पाहताना ते म्हणाले, “आम्ही सहकारी तर आहोतच पण त्यापेक्षा चांगले मित्र आहोत. कुतूहलाची प्रेरणा असलेले विचारप्रवर्तक काम करण्यासाठी कामाचा आनंद मिळणारे मैत्रीपूर्ण वातावरण हवे. आणि ते अबाधित ठेवण्याचा आम्ही पूर्ण प्रयत्न केला.”

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	Nanotetrapods promote polymer flow through confinement induced packing frustration
DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1038/s41467-025-63555-3
List of all researchers with affiliations	Jotypriya Sarkar, Mithun Madhusudanan & Mithun Chowdhury, Lab of Soft Interfaces, Department of Metallurgical Engineering and Materials Science, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai; Fariyad Ali & Anindya Datta, Department of Chemistry, Indian Institute of Technology Bombay;

	Harshit Yadav, Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay; Sachin M. B. Gautham & Tarak K. Patra, Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai; Sivasurender Chandran, Soft and Biological Matter Laboratory, Department of Physics, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur.
Email of researcher/s	mithunc@iitb.ac.in , anindya@chem.iitb.ac.in , 204110001@iitb.ac.in
Writer name	ArulGanesh S S
Credits to Graphic:	Lead image: https://www.pexels.com/photo/a-close-up-shot-of-a-pile-of-tetrapods-12634488/ Inline image: Authors of the study.
Subject [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED (Multiple allowed)	Science/Technology/Engineering/Ecology/Health/Society
Article to be Sectioned Under [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED	Deep Dive/Friday Features/Fiction Friday/Joy of Science/News+Views/News/Scitoons/Catching up/OpEd/Featured/Sci-Qs/Infographics/Events
Social Media TAGS separated by Comma	
Social Media Posts Suggestions/ Links to interesting relevant content [optional] [writer]	
Social Media Handles to be added	(as an example, @DSTIndia @iitbombay)
Social Media handles of writer	sreesreearul (Twitter), Arul Ganesh S S(LinkedIn)
Social Media handles of researchers	https://x.com/MithunC96527431

	https://in.linkedin.com/in/mithun-chowdhury-0a1ab7284 https://in.linkedin.com/in/anindya-datta-81314644 https://in.linkedin.com/in/jotypriya-sarkar https://in.linkedin.com/in/sivasurender-chandran-335b7623 https://in.linkedin.com/in/tarak-patra-68b65288 https://x.com/tarak_patra?lang=en
Funding information (Source: Research paper)	M.C. acknowledges support from the Anusandhan National Research Foundation (ANRF; formerly SERB) through the Ramanujan Fellowship (SB/S2/RJN-084/2018), and the Early Career Research Award (ECR/2018/001740). Additional support from IIT Bombay was acknowledged through SEED (RD/0519-IRCCSH0-033) and IOE-SCPP (RD/0523-IOE00I0-193) grants. S.C. acknowledges the funding from the Startup Research Grant (SRG/2021/001276) from the ANRF and the Kotak Sustainable School, IITK. A.D. is grateful to ANRF for a generous research grant.
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	The authors declare no competing interests.
Co-PI information (Source: Research paper)	
Location:	Mumbai