



Study of Glycine Crystal Growth in Chitosan Matrix as a Biopolymer-Based Piezoelectric Sensor Practicum Medium for Physics Education Students

Nurhandayani Nurhandayani^{1*}, Nurvadillah Angraini², Yusnita Sari³, Nurul Amalia Aris²

¹²Program Studi Pendidikan Fisika, STKIP Darud Da'wah wal Irsyad Pinrang, Indonesia.
Jl. Pettana Rajeng No.20, Pinrang.

³Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan
Universitas Halu Oleo, Indonesia.
Jl. H.E.A. Mokodompit, Kampus Hijau Bumi Tridharma, Kendari.

e-mail: handayanisukry32@gmail.com

DOI:

<https://doi.org/10.52434/jpif.v5i2.43326>

Accepted: December 25, 2025, Approved: December 26, 2025, Published: December 27, 2025

ABSTRACT

This study aims to examine the growth of glycine crystals in a chitosan matrix and assess its conceptual and educational potential as a practical medium for introducing biopolymer-based piezoelectric materials to physics education students. The research methodology involved synthesizing chitosan-glycine films using a solution method, then observing the growth and morphology of glycine crystals visually and using simple optical instruments. The results showed that glycine was able to grow in the chitosan matrix with clearly and evenly formed crystal morphology, which was influenced by the interaction between glycine and the chitosan matrix. The resulting film structure was flexible and transparent, making it suitable for use as an observation medium in practical activities. This study deliberately did not include testing of electrical properties or piezoelectric response, so the findings presented are not intended as claims of functional sensor performance. Practically, the results of this study provide a simple, inexpensive, and environmentally friendly alternative laboratory medium for introducing the concepts of crystal growth and piezoelectric materials. The social implications support sustainable science learning through the use of biopolymer materials in education

Keywords: *Biopolymer; Chitosan; Crystal Growth; Glycine; Practicum Media*

Studi Pertumbuhan Kristal Glisin dalam Matriks Kitosan sebagai Media Praktikum Sensor Piezoelektrik Berbasis Biopolimer bagi Mahasiswa Pendidikan Fisika

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengkaji pertumbuhan kristal glisin dalam matriks kitosan serta menilai potensinya secara konseptual dan edukatif sebagai media praktikum pengenalan material piezoelektrik berbasis biopolimer bagi mahasiswa Pendidikan Fisika. Metodologi penelitian

dilakukan melalui sintesis film kitosan–glisin menggunakan metode larutan, kemudian diamati pertumbuhan dan morfologi kristal glisin secara visual dan menggunakan alat optik sederhana. Hasil penelitian menunjukkan bahwa glisin mampu tumbuh dalam matriks kitosan dengan morfologi kristal yang terbentuk secara jelas dan merata, yang dipengaruhi oleh interaksi antara glisin dan matriks kitosan. Struktur film yang dihasilkan bersifat fleksibel dan transparan, sehingga sesuai digunakan sebagai media observasi dalam kegiatan praktikum. Penelitian ini secara sadar tidak mencakup pengujian sifat listrik maupun respons piezoelektrik, sehingga temuan yang disajikan tidak dimaksudkan sebagai klaim performa fungsional sensor. Secara praktis, hasil penelitian ini menyediakan alternatif media praktikum yang sederhana, murah, dan ramah lingkungan untuk memperkenalkan konsep pertumbuhan kristal dan material piezoelektrik. Implikasi sosialnya mendukung pembelajaran sains berkelanjutan melalui pemanfaatan material biopolimer dalam pendidikan.

Kata kunci: Biopolimer; Glisin; Kitosan; Media Praktikum; Pertumbuhan Kristal.

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu fisika material dalam dua dekade terakhir menunjukkan kecenderungan kuat pada pemanfaatan material ramah lingkungan dan berkelanjutan, seiring meningkatnya kesadaran global terhadap isu lingkungan dan keselamatan penggunaan bahan kimia sintetis. Salah satu material yang banyak dikaji adalah biopolimer, yaitu polimer berbasis bahan alam yang bersifat *biodegradable* dan *biocompatible* (Amponsah et al., 2025; Mukherjee et al., 2023). Di antara berbagai biopolimer, kitosan menjadi material yang paling luas dikembangkan karena memiliki struktur kimia yang stabil, mudah diproses, serta mampu berinteraksi dengan berbagai molekul organik maupun anorganik (Nicolle et al., 2021; Pellis et al., 2022). Karakteristik tersebut menjadikan kitosan tidak hanya relevan dalam bidang medis dan lingkungan, tetapi juga potensial sebagai media pembelajaran dan praktikum dalam pendidikan sains.

Di sisi lain, glisin merupakan asam amino sederhana yang dikenal memiliki kemampuan membentuk kristal dengan beberapa fase polimorfik, di antaranya α -, β -, dan γ -glycine (Broadhurst et al., 2020; Bull et al., 2017). Fase β -glycine menarik perhatian peneliti karena memiliki sifat *non-centrosymmetric* yang menjadi prasyarat terbentuknya efek piezoelektrik (Bishara & Berger, 2018; Guerin et al., 2018). Pertumbuhan kristal glisin telah banyak dipelajari melalui berbagai metode, termasuk metode larutan, karena kesederhanaan prosesnya dan kemudahan observasi pertumbuhan kristal (Matsumoto et al., 2019a; Vera et al., 2019). Dalam konteks pendidikan fisika, fenomena pertumbuhan kristal glisin menawarkan peluang pembelajaran yang kaya, karena mencakup konsep-konsep dasar seperti nukleasi, pertumbuhan kristal, interaksi molekul, dan keterkaitannya dengan sifat fisis material (Cotting et al., 2025; Little et al., 2017).

Penggabungan glisin ke dalam matriks kitosan menghasilkan sistem biokomposit yang menarik untuk dikaji. Matriks kitosan berperan sebagai medium pendukung pertumbuhan kristal (Butto et al., 2020), sekaligus membatasi dan mengarahkan morfologi kristal yang terbentuk melalui interaksi ikatan hidrogen antara gugus amina kitosan dan molekul glisin (Rahmani et al., 2023). Beberapa penelitian terbaru melaporkan bahwa keberadaan matriks biopolimer dapat memengaruhi ukuran, distribusi, dan bentuk kristal yang tumbuh, bahkan tanpa perlakuan instrumen canggih (Yu et al., 2022; Zaccone et al., 2022). Namun demikian, sebagian besar kajian tersebut masih berorientasi pada karakterisasi material untuk kepentingan aplikasi lanjutan,

sedangkan penelitian yang secara khusus mengkaji pemanfaatan sistem glisin–kitosan sebagai media praktikum sederhana untuk mengamati morfologi kristal dalam konteks pendidikan sains masih sangat terbatas.

Dalam konteks pendidikan fisika, pembelajaran berbasis praktikum memegang peranan penting dalam membantu mahasiswa membangun pemahaman konseptual melalui pengalaman langsung (Susanti et al., 2022), seperti yang diketahui bahwa Fisika diakui memiliki tingkat konsep yang sangat abstrak, yang menyebabkan kebutuhan bagi Mahasiswa untuk terlibat secara aktif dalam kegiatan belajar (Nurhandayani et al., 2025). Sayangnya, banyak praktikum fisika material dan sensor masih bergantung pada peralatan mahal, bahan kimia berbahaya, serta prosedur yang kompleks, sehingga sulit diimplementasikan secara merata, khususnya di program studi pendidikan fisika dengan keterbatasan fasilitas laboratorium. Oleh karena itu, diperlukan alternatif media praktikum yang sederhana, aman, murah, dan tetap relevan dengan perkembangan ilmu fisika modern. Pengamatan pertumbuhan kristal glisin dalam matriks kitosan melalui metode larutan sederhana berpotensi menjawab kebutuhan tersebut, karena dapat dilakukan dengan peralatan dasar dan memberikan pengalaman eksperimen yang bermakna bagi mahasiswa.

Berdasarkan uraian tersebut, masalah utama dalam penelitian ini adalah bagaimana karakteristik pertumbuhan dan morfologi kristal glisin dalam matriks kitosan ketika disintesis menggunakan metode sederhana, serta sejauh mana sistem tersebut berpotensi dimanfaatkan sebagai media praktikum pendidikan. Selama ini, sebagian besar penelitian terkait glisin dan kitosan lebih berfokus pada karakterisasi material untuk aplikasi fungsional dan pengembangan perangkat sensor, sementara kajian yang secara khusus memanfaatkan sistem glisin–kitosan sebagai media praktikum sederhana yang mudah dibuat, murah, dan ramah lingkungan bagi mahasiswa masih sangat terbatas. Kondisi ini menimbulkan kesenjangan penelitian (research gap) pada aspek pemanfaatan material biopolimer tidak hanya sebagai objek riset material, tetapi juga sebagai sarana pembelajaran konseptual mengenai pertumbuhan kristal dan material piezoelektrik.

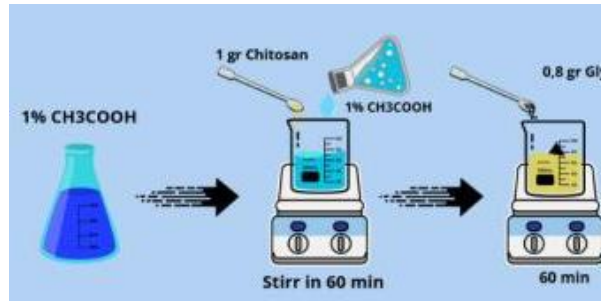
Penelitian ini secara khusus difokuskan pada observasi morfologi pertumbuhan kristal tanpa analisis sifat listrik atau karakterisasi lanjut. Fokus tersebut penting secara urgensi pendidikan karena memberikan alternatif media praktikum yang sederhana, kontekstual, dan mudah direplikasi di lingkungan pendidikan tinggi, sekaligus mendukung pembelajaran sains berkelanjutan melalui pemanfaatan material berbasis biopolimer.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium dengan pendekatan deskriptif kualitatif yang bertujuan mengamati pertumbuhan dan morfologi kristal glisin dalam matriks kitosan sebagai media praktikum berbasis biopolimer bagi mahasiswa Pendidikan Fisika. Penelitian dilaksanakan melalui tahapan sintesis material dan observasi fenomena fisis tanpa menggunakan instrumen karakterisasi lanjutan, sehingga prosedur yang dilakukan bersifat sederhana dan mudah direplikasi dalam kegiatan praktikum pendidikan.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kitosan, glisin, larutan asam asetat sebagai pelarut kitosan, dan akuades. Proses sintesis dilakukan dengan melarutkan 1 gr kitosan

dalam larutan asam asetat 1% hingga terbentuk larutan homogen, kemudian glisin sebanyak 0,8 gr ditambahkan ke dalam larutan kitosan dengan perbandingan (1:0,8) diaduk secara perlahan sampai tercampur merata. Larutan campuran tersebut selanjutnya dituangkan ke dalam Cawan Petri menggunakan metode solution casting dan dibiarkan mengering pada suhu ruang untuk memungkinkan terjadinya proses nukleasi dan pertumbuhan kristal glisin di dalam matriks



kitosan prosesnya dapat dilihat pada gambar Berikut:

Gambar 1. Proses sintesis Glycine dan Kitosan

Observasi pertumbuhan kristal glisin dilakukan secara visual dan menggunakan Mikroskop Optik selama proses pengeringan berlangsung. Pengamatan difokuskan pada bentuk, ukuran relatif, distribusi, serta pola pertumbuhan kristal yang terbentuk pada permukaan dan bagian dalam film. Dokumentasi dilakukan melalui pengambilan gambar secara berkala untuk merekam perubahan morfologi kristal dari waktu ke waktu.

Data hasil pengamatan dianalisis secara deskriptif kualitatif dengan mengaitkan karakteristik morfologi kristal yang terbentuk terhadap proses sintesis dan interaksi antara glisin dan matriks kitosan. Deskripsi dilakukan berdasarkan kriteria pertumbuhan kristal pada tiga tahapan waktu pengamatan, yaitu saat kondisi masih berupa cairan, setelah 18 jam, dan setelah 24 jam, dengan menilai perubahan morfologi dari fase awal hingga mendekati fase terbentuk sempurna. Hasil analisis disajikan dalam bentuk uraian naratif yang didukung dokumentasi visual, sehingga dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi sistem kitosan–glisin sebagai media praktikum dalam pembelajaran fisika material dan sensor berbasis biopolimer.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Penelusuran Morfologi Fase α dan β Glis in sebagai Komponen Piezoelektrik



Gambar 2. Pertumbuhan kristal *Glycine* tanpa *Chitosan*, a) bentuk kristal *Glycine* fase β , b) bentuk kristal *Glycine* fase α dan c) bentuk kristal *Glycine* fase β - α

Kristal fase α -*glycine* pada **Gambar 2a)** umumnya menunjukkan pertumbuhan yang lebih stabil dan simetris, ditandai dengan bentuk lempeng atau prisma pendek yang tersusun rapat. Fase

ini merupakan bentuk termodinamika paling stabil dari glisin pada kondisi lingkungan normal, namun memiliki struktur kristal *centrosymmetric* sehingga tidak menunjukkan sifat piezoelektrik. Keberadaan fase α pada pengamatan ini menunjukkan kondisi pertumbuhan larutan yang relatif stabil dan mendukung pembentukan fase keseimbangan.

Sebaliknya, fase β -*glycine* tampak pada **Gambar 2b**) sebagai kristal memanjang dan tipis dengan orientasi pertumbuhan yang tidak seragam. Morfologi ini mencerminkan sifat metastabil β -*glycine* yang cenderung terbentuk pada kondisi pertumbuhan yang lebih cepat atau tidak seimbang, seperti perubahan konsentrasi larutan dan laju penguapan pelarut (Matsumoto et al., 2019b). Fase β -*glycine* memiliki struktur *non-centrosymmetric*, yang menjadi prasyarat utama munculnya efek piezoelektrik. Oleh karena itu, identifikasi visual terhadap kristal β -*glycine* pada sistem glisin murni ini menjadi langkah awal yang penting sebelum pengembangan material piezoelektrik berbasis biopolimer.

Citra mikroskop optik pada Gambar menunjukkan morfologi kristal glisin murni yang tumbuh tanpa adanya matriks kitosan, sehingga dapat digunakan sebagai gambaran dasar untuk mengidentifikasi fase polimorfik glisin. Dua morfologi kristal yang berbeda dapat diamati secara jelas, yaitu kristal dengan bentuk relatif tebal dan berbidang datar yang diasosiasikan dengan fase α -*glycine*, serta kristal dengan bentuk memanjang, ramping, dan menyerupai jarum yang diasosiasikan dengan fase β -*glycine*, hal ini menunjukkan kesesuaian *glycine* yang akan digunakan sebagai sumber pieoelektrik dan tela terkonfirmasi sesuai bentuk kristal α dan β dari Penelitian-penelitian sebelumnya (Bishara & Berger, 2018; Offiler et al., 2025). Penelusuran fase α dan β pada kristal glisin murni ini berfungsi sebagai referensi awal untuk memahami hubungan antara morfologi kristal dan sifat fisis material. Dengan adanya gambaran dasar ini, proses pencampuran glisin ke dalam matriks kitosan pada tahap penelitian selanjutnya dapat diarahkan untuk mempertahankan atau meningkatkan keberadaan fase β -*glycine*.

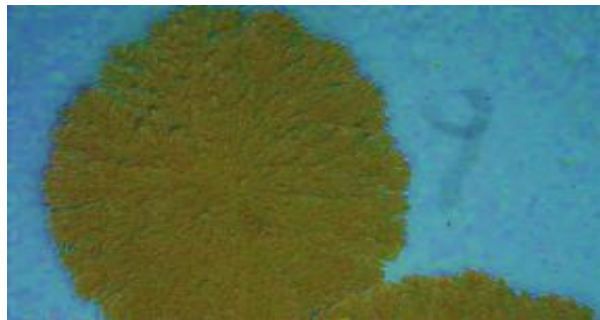
Dalam konteks pendidikan fisika, pendekatan ini memiliki nilai pedagogis yang tinggi karena memungkinkan mahasiswa mengalami proses pembelajaran yang bersifat konkret-konseptual. Melalui pengamatan langsung, mahasiswa dapat terlebih dahulu memahami perbedaan fase kristal glisin secara visual dan empiris, sebelum mengaitkannya dengan konsep abstrak seperti simetri kristal dan sifat piezoelektrik pada material komposit. Proses ini sejalan dengan prinsip *experiential learning* yang menekankan pentingnya pengalaman langsung sebagai dasar pembentukan pemahaman konseptual, serta terbukti dapat meningkatkan keterlibatan belajar, kemampuan observasi ilmiah, dan pemahaman konsep materi (Morris, 2019; Pherson-Geyser et al., 2020). Sejumlah penelitian juga melaporkan bahwa penggunaan media praktikum berbasis material nyata dan prosedur sederhana dalam pendidikan fisika mampu meningkatkan literasi sains, keterampilan proses, serta kemampuan menghubungkan fenomena mikroskopik dengan sifat fisis material (Misbah et al., 2018; Subekti & Ariswan, 2016). Dengan demikian, penerapan sistem glisin-kitosan sebagai media praktikum tidak hanya relevan secara konseptual, tetapi juga memiliki dasar pedagogis yang kuat.

2. Morfologi Kristal Piezoelektrik



Gambar 2. Gly/Cs dalam keadaan cair

Gambar mikroskop optik menunjukkan perubahan morfologi pertumbuhan kristal glisin dalam matriks kitosan pada berbagai tahapan pengeringan. Pada kondisi awal, yaitu saat sistem Gly/Cs masih dalam keadaan cair, belum terlihat struktur kristal yang berkembang secara signifikan. Pada tahap ini, glisin masih terdispersi dalam larutan kitosan dan berada dalam fase terlarut. Interaksi antara molekul glisin dan rantai kitosan mulai terjadi melalui ikatan hidrogen, namun belum cukup kuat untuk memicu proses nukleasi kristal yang teramati secara optik.



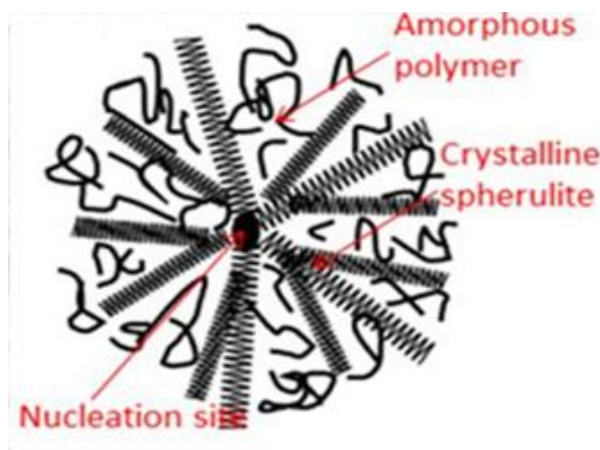
Gambar 3. Gly/Cs dikeringkan selama 18 jam

Setelah melalui proses pengeringan selama 18 jam, yang merupakan fase sebelum pertumbuhan kristal mencapai tahap penuh pada permukaan kitosan (yakni sebelum 24 jam), kristal yang terbentuk menunjukkan morfologi seperti ditampilkan pada **Gambar 3**, mulai terlihat pembentukan struktur kristal glisin dengan pola radial yang berkembang dari satu titik pusat. Pola ini mengindikasikan terjadinya proses nukleasi yang diikuti oleh pertumbuhan kristal secara bertahap di dalam matriks kitosan. Matriks kitosan berperan sebagai media pembatas yang mengarahkan pertumbuhan kristal, sehingga kristal glisin tumbuh menyebar secara relatif seragam (Chen et al., 2022). Morfologi yang terbentuk menyerupai struktur sferulit, yang umum dijumpai pada pertumbuhan kristal dalam sistem polimer atau biopolimer.



Gambar 3. Gly/Cs dikeringkan selama 24 jam

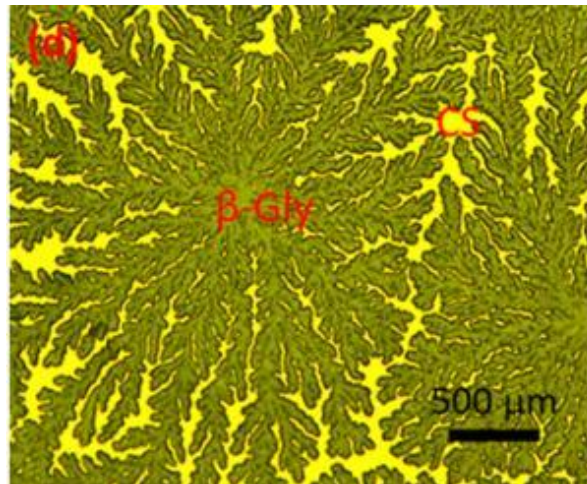
Pada tahap pengeringan selama 24 jam, morfologi kristal glisin berkembang lebih lanjut dengan struktur yang semakin kompleks dan jelas. Pola radial tampak lebih tegas, dengan cabang-cabang kristal yang memanjang dan saling berinteraksi membentuk jaringan menyerupai dendrit. Hal ini menunjukkan bahwa proses pertumbuhan kristal masih berlangsung seiring berkurangnya kandungan pelarut, sehingga molekul glisin memiliki mobilitas terbatas dan cenderung tumbuh mengikuti jalur energi minimum yang diarahkan oleh matriks kitosan. Perubahan morfologi ini mengindikasikan transisi dari tahap nukleasi awal menuju pertumbuhan kristal yang lebih matang.



Gambar 4. Gambaran skematis kristalisasi sferulit, b) Gly/Cs setelah dikeringkan selama 24 jam

Sumber: <https://dx.doi.org/10.1021/acsami.9b21052?ref=pdf>

Pada gambar diatas memperlihatkan bahwa hasil Penelitian dan pengamatan pertumbuhan kristal sudah sesuai dengan Penelitian terdahulu dimana pada gambar 4 menunjukkan adanya inti kristal, Sferulit dan *amorphous polymer* yang terdapat pada hasil Penelitian ini.



Gambar 5. Gly/Cs setelah dikeringkan selama 24 jam

Pada Gambar 4b menunjukkan secara visual hasil pertumbuhan kristal setelah dikeringkan selama 24 jam dan gambar ini mengkonfirmasi adanya sumber piezoelektrik yang tumbuh pada matriks kitosan. Gambar 3 yang merupakan hasil penelitian yaitu pertumbuhan kristal *Glycine* setelah dikeringkan dalam waktu 24 jam menunjukkan kesesuaian hasil Penelitian dengan Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh (Hosseini et al., 2020).

Secara keseluruhan, hasil pengamatan ini menunjukkan bahwa waktu pengeringan berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan dan morfologi kristal glisin dalam matriks kitosan. Matriks kitosan tidak hanya berfungsi sebagai pengikat, tetapi juga berperan dalam mengontrol arah dan pola pertumbuhan kristal. Fenomena ini sangat relevan untuk digunakan sebagai media praktikum pendidikan fisika, karena memungkinkan mahasiswa mengamati secara langsung proses nukleasi dan pertumbuhan kristal melalui metode sederhana tanpa instrumen canggih.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengkaji pertumbuhan dan morfologi kristal glisin melalui metode larutan sederhana dengan pendekatan observasi mikroskop optik. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa proses pengeringan berpengaruh terhadap pembentukan dan perkembangan kristal glisin, yang ditandai dengan perubahan morfologi dari fase terlarut menuju struktur kristal yang semakin jelas dan terorganisasi. Selain itu, penelusuran kristal glisin murni memperlihatkan keberadaan dua fase polimorfik utama, yaitu fase α -glycine yang bersifat stabil namun tidak piezoelektrik, serta fase β -glycine yang memiliki struktur non-centrosymmetric dan berpotensi sebagai penyusun sifat piezoelektrik. Temuan ini memberikan dasar konseptual yang penting sebelum glisin dikombinasikan dengan matriks kitosan dalam pengembangan material piezoelektrik berbasis biopolimer. Dari perspektif pendidikan, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan media praktikum yang kontekstual, berkelanjutan, dan mudah direplikasi karena menggunakan bahan yang relatif aman, metode sederhana, serta memungkinkan mahasiswa mengamati langsung hubungan antara struktur kristal dan sifat fisis material. Dengan demikian, penelitian ini relevan untuk mendukung pembelajaran fisika material dan pengenalan konsep sensor berbasis biopolimer di lingkungan pendidikan tinggi.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada ruang lingkup yang masih berfokus pada observasi morfologi kristal tanpa disertai karakterisasi kuantitatif struktur kristal (seperti XRD atau FTIR) serta tanpa pengukuran sifat listrik dan respons piezoelektrik, sehingga belum dapat menggambarkan performa fungsional material sebagai sensor secara komprehensif. Selain itu, penelitian ini belum mengkaji stabilitas kristal dalam jangka waktu tertentu serta pengaruh variasi komposisi atau kondisi lingkungan terhadap pertumbuhan kristal.

Sebagai saran penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan karakterisasi struktur kristal secara lebih mendalam menggunakan teknik instrumen, serta menguji respons piezoelektrik secara eksperimental guna mengonfirmasi potensi fungsionalnya. Pengembangan sistem komposit glisin–kitosan dengan variasi konsentrasi, kondisi pengeringan, dan geometri film juga penting dilakukan untuk memperoleh performa material yang lebih optimal. Dari sisi pendidikan, penelitian lanjutan dapat mengembangkan modul praktikum berbasis temuan ini, termasuk prosedur terstandar, lembar kerja mahasiswa, serta evaluasi efektivitasnya terhadap peningkatan pemahaman konsep material piezoelektrik.

REFERENSI

- Amponsah, O., Nopuo, P. S. A., Manga, F. A., Catli, N. B., & Labus, K. (2025). Future-Oriented Biomaterials Based on Natural Polymer Resources: Characteristics, Application Innovations, and Development Trends. *International Journal of Molecular Sciences*, 26. <https://doi.org/10.3390/ijms26125518>
- Bishara, H., & Berger, S. (2018). Polymorphism and piezoelectricity of glycine nano-crystals grown inside alumina nano-pores. *Journal of Materials Science*, 54, 4619–4625. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03211-y>
- Broadhurst, E., Xu, H., Clabbers, M., Lightowler, M., Nudelman, F., Zou, X., & Parsons, S. (2020). Polymorph evolution during crystal growth studied by 3D electron diffraction. *IUCrJ*, 7, 5–9. <https://doi.org/10.1107/s2052252519016105>
- Bull, C., Flowitt-Hill, G., De Gironcoli, S., Küçükbenli, E., Parsons, S., Pham, C., Playford, H., & Tucker, M. (2017). ζ -Glycine: insight into the mechanism of a polymorphic phase transition. *IUCrJ*, 4, 569–574. <https://doi.org/10.1107/s205225251701096x>
- Butto, N., Vera, N. C., Díaz-Soler, F., Yazdani-Pedram, M., & Neira-Carrillo, A. (2020). Effect of Chitosan Electrospun Fiber Mesh as Template on the Crystallization of Calcium Oxalate. *Crystals*. <https://doi.org/10.3390/cryst10060453>
- Chen, W., Cao, P., Liu, Y.-Z., Yu, A., Wang, D., Chen, L., Sundarraj, R., Yuchi, Z., Gong, Y., Merzendorfer, H., & Yang, Q. (2022). Structural basis for directional chitin biosynthesis. *Nature*, 610, 402–408. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05244-5>
- Cotting, G., Urquidi, O., Besnard, C., Brazard, J., & Adachi, T. (2025). The effect of salt additives on the glycine crystallization pathway revealed by studying one crystal nucleation at a time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2419638122>

- Guerin, S., Stapleton, A., Chovan, D., Mouras, R., Gleeson, M., McKeown, C., Noor, M., Silien, C., Rhen, F., Kholkin, A., Liu, N., Soulimane, T., Tofail, S., & Thompson, D. (2018). Control of piezoelectricity in amino acids by supramolecular packing. *Nature Materials*, 17 2, 180–186. <https://doi.org/10.1038/nmat5045>
- Hosseini, E. S., Manjakkal, L., Shakthivel, D., & Dahiya, R. (2020). Glycine-Chitosan-Based Flexible Biodegradable Piezoelectric Pressure Sensor. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(8), 9008–9016. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b21052>
- Little, L., King, A., Sear, R., & Keddie, J. (2017). Controlling the crystal polymorph by exploiting the time dependence of nucleation rates. *The Journal of Chemical Physics*, 147 14, 144505. <https://doi.org/10.1063/1.4993566>
- Matsumoto, M., Wada, Y., Maesawa, S., Hiaki, T., & Onoe, K. (2019a). Expanding production regions of α -form and β -form glycine using an antisolvent crystallization method assisted by N₂ fine bubbles. *Advanced Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.12.021>
- Misbah, M., Wati, M., Rif'at, M., & Prastika, M. D. (2018). Pengembangan Petunjuk Praktikum Fisika Dasar I Berbasis 5M Untuk Melatih Keterampilan Proses Sains dan Karakter Wasaka. *Flux*, 15, 26–30. <https://doi.org/10.20527/flux.v15i1.4480>
- Morris, T. (2019). Experiential learning – a systematic review and revision of Kolb's model. *Interactive Learning Environments*, 28, 1064–1077. <https://doi.org/10.1080/10494820.2019.1570279>
- Mukherjee, C., Varghese, D., Krishna, J., Boominathan, T., Rakeshkumar, R., Dineshkumar, S., Rao, B., & Sivaramakrishna, A. (2023). Recent Advances in Biodegradable Polymers – Properties, Applications and Future Prospects. *European Polymer Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112068>
- Nicolle, L., Journot, C., & Gerber-Lemaire, S. (2021). Chitosan Functionalization: Covalent and Non-Covalent Interactions and Their Characterization. *Polymers*, 13. <https://doi.org/10.3390/polym13234118>
- Nurhandayani, N., Amalia Aris, N., Angraini, N. A., Indira Nurnaifah Idris, I., Fisika, P., Darud Da, S., & wal Irsyad Pinrang, wah. (2025). Efektivitas Strategi Whole Brain Teaching dalam Mengoptimalkan Hasil Belajar Fisika Siswa Sekolah Menengah Atas. *Jurnal Luminous: Riset Ilmiah Pendidikan Fisika*, 6(2), 58–67.
- Offiler, C., Davey, R., Cruz-Cabeza, A., & Vetter, T. (2025). Investigating Additive Effects on α -Glycine Growth through the Measurement of Facet Specific Growth Rates. *Crystal Growth & Design*, 25, 1644–1652. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5c00028>
- Pellis, A., Guebitz, G., & Nyanhongo, G. (2022). Chitosan: Sources, Processing and Modification Techniques. *Gels*, 8. <https://doi.org/10.3390/gels8070393>

- Pherson-Geyser, G. M., De Villiers, R., & Kawai, P. (2020). The Use of Experiential Learning as a Teaching Strategy in Life Sciences. *International Journal of Instruction*. <https://doi.org/10.29333/iji.2020.13358a>
- Rahmani, F., Bouamrane, O. L., Bouabdallah, A. Ben, Atanase, L., Hellal, A., & Apintiliesei, A. N. (2023). Biomimetic Hydroxyapatite Crystals Growth on Phosphorylated Chitosan Films by In Vitro Mineralization Used as Dental Substitute Materials. *Polymers*, 15. <https://doi.org/10.3390/polym15112470>
- Subekti, Y., & Ariswan, A. (2016). Pembelajaran fisika dengan metode eksperimen untuk meningkatkan hasil belajar kognitif dan keterampilan proses sains. *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA*, 2, 252–261. <https://doi.org/10.21831/jipi.v2i2.6278>
- Susanti, S., Ernawati, T., & Erlangga, S. (2022). The Effect of Online Practicum Learning on Concept Understanding of UST Yogyakarta Science Student. *Al Hikmah: Journal of Education*. <https://doi.org/10.54168/ahje.v3i1.99>
- Vera, H. U. R., Baillon, F., Espitalier, F., Accart, P., & Louisnard, O. (2019). Crystallization of α -glycine by anti-solvent assisted by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104671. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104671>
- Yu, S., Wang, Z., Yuanchang, & Xue, F. (2022). Effect of natural polymer additives on crystal form and morphology of clozapine anhydrate and monohydrate. *Journal of Molecular Liquids*. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119985>
- Zaccone, M., Patel, M., De Brauwer, L., Nair, R., Montalbano, M. L., Monti, M., & Oksman, K. (2022). Influence of Chitin Nanocrystals on the Crystallinity and Mechanical Properties of Poly(hydroxybutyrate) Biopolymer. *Polymers*, 14. <https://doi.org/10.3390/polym14030562>