



Optimasi Proses *Crosslinking* Hidrogel berbasis PVA dan Gelatin sebagai Biomaterial Ramah Lingkungan

¹Putri Masruroh, ²Selly Arvinda Rakhman

¹Program Studi D3 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS. Ronggo Waluyo Telukjambe Timur, Karawang - 41363

²Program Studi S1 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS. Ronggo Waluyo Telukjambe Timur, Karawang - 41363

Korespondensi: putri.masruroh@ft.unsika.ac.id

Received: 08th Oktober 2025; Revised: 31th Oktober 2025; Accepted: 08th November 2025;
Available online: November 2022; Published regularly: November 2025



Abstrak

Penelitian ini mencari kondisi optimum *crosslinking* hidrogel dari PVA dan gelatin dengan penambahan asam sitrat sebagai *chemical crosslinking* dan proses *freeze-thaw* sebagai *physical crosslinking*. PVA dan gelatin dapat berikatan silang membentuk struktur 3 dimensi yang mampu mengikat air. Hidrogel PVA-Gelatin merupakan hidrogel hybrid yang ramah lingkungan karena sifatnya yang mudah terurari. Untuk meningkatkan sifat mekanik dari hidrogel PVA-Gelatin diperlukan mekanisme *crosslinking* yang optimum. Kondisi optimum terjadi pada komposisi PVA 10% dan gelatin 10% dengan penambahan asam sitrat dan *freeze-thaw* tiga siklus menghasilkan hidrogel yang secara visual lentur, tidak mudah sobek dan memiliki *swelling ratio* 9,47-14,65. Analisis FT-IR menunjukkan terbentuknya ikatan silang antara gugus hidrosil PVA-Gelatin dan gugus karboksilat asam sitrat, yang mengonfirmasi keberhasilan proses *crosslinking*.

Kata kunci: PVA, gelatin, *crosslinking*, *freeze-thaw*, *swelling ratio*

<https://doi.org/10.29103/jtku.v14i2.25086>

1. Pendahuluan

Hidrogel adalah material (3D) seperti gel dengan gugus fungsi hidrofilik di dalam ikatan polimer yang mampu menyimpan fluida berbasis air pada volume yang lebih besar dibandingkan massa keringnya. Hidrogel mampu menarik air karena adanya gugus fungsi polar pada kerangka makromolekul dan mampu mencegah pelarutan karena adanya ikatan silang (Andreazza et al., 2023). Hidrogel



awalnya dibuat untuk mendeskripsikan bahan koloid yang mengandung air. Saat ini hidrogel dikembangkan dengan kemampuan untuk merespon berbagai perubahan seperti suhu, pH atau konsentrasi molekul tertentu. Hidrogel menjadi material polimer yang memiliki aplikasi yang luas di bidang medis maupun lingkungan (Kaur et al., 2024). Pada bidang medis aplikasi hidrogel memanfaatkan sifat fisika hidrogel yang merupakan material berpori dan mampu menyimpan air dalam jumlah besar, sehingga lebih mirip dengan jaringan manusia dibandingkan biomaterial lain dari polimer sintesis (Skopinska-Wisniewska et al., 2024). Pada aplikasi lingkungan, hidrogel dimanfaatkan untuk pemurnian air, penghilangan polutan organik, penangkapan karbon dioksida dan sebagainya. Hidrogel berperan sebagai adsorben yang efektif dan mampu menyerap sejumlah besar logam berat serta zat pewarna atau polutan organik dari air limbah (Kundu et al., 2022).

Berdasarkan senyawa penyusunnya, hidrogel diklasifikasikan menjadi hidrogel sintesis (organik dan anorganik), hidrogel alami dan hidrogel hibrida. *Polylactic acid (PLA)*, *polyvinylpyrrolidone (PVP)*, *polycaprolactone*, *poly vinyl alcohol (PVA)* dan *polyethylene glycol (PEG)* adalah beberapa polimer sintesis yang digunakan untuk sintesis hidrogel. Beberapa polimer natural seperti selulosa, gelatin, kitosan, kitin, pati, alginat dan karagenan dapat digunakan untuk sintesis hidrogel. Hidrogel sintesis memiliki sifat fisik yang lebih kuat dibandingkan hidrogel dari material alami. Material alami seperti kitin, kitosan, selulosa, gelatin merupakan material yang dapat terdegradasi secara biologis (*biodegradable*), sedangkan material sintesis yang mudah terurai adalah akrilamida, PVA, PEG, PVP, *polyurethane* dan *Poly(N-isopropylacrilamide)* (Su et al., 2021).

Hidrogel dari bahan alami dibuat untuk kegunaan tertentu seperti pelepasan obat di dalam tubuh karena dapat mencegah degradasi obat. Hidrogel juga diaplikasikan dalam penyembuhan luka antimikroba dan regenerasi jaringan. Hidrogel menciptakan lingkungan yang lembab, yang sangat penting untuk proses penyembuhan dan dapat dipadukan dengan agen antimikroba serta senyawa bioaktif untuk membantu mengurangi risiko infeksi. (Kaur et al., 2024).

PVA merupakan polimer sintesis yang aman, tidak reaktif, dan biodegradable, serta telah disetujui oleh *Food and Drug Administration* (FDA) untuk penggunaan klinis. PVA banyak digunakan sebagai pembawa obat karena dapat meningkatkan kelarutan obat. Sementara itu, gelatin adalah polimer alami, biokompatibel, dan biodegradable. Berkat sifat bioadhesif-nya, gelatin telah digunakan dalam bedah sebagai agen hemostatik dan penyembuh luka (Hernandez Rivera et al., 2024).

Proses pembuatan hidrogel dari PVA dapat dilakukan dengan cara ikatan silang fisika (*physical crosslinking*) dan ikatan silang kimia (*chemical crosslinking*). Prinsip ikatan silang secara fisika berdasarkan interaksi intramolekul seperti interaksi hidrofobik, ionik/elektrostatik dan ikatan hidrogen yang bisa dilakukan dengan metode *freeze-thaw cycle*, annealing dan lainnya (Chen et al., 2022). Metode *crosslinking* kimiawi memiliki prinsip pergantian gugus OH- dengan gugus fungsi yang lain, seperti gugus eter atau gugus fosfat. Proses *crosslinking* kimiawi maupun fisik juga digunakan untuk membentuk hidrogel berbasis gelatin. Hingga saat ini, *crosslinking* kimia merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mengubah gelatin menjadi gel yang stabil dan tidak dapat balik (*irreversible*) (Maikovych et al., 2023).

Saat ini, pengembangan hidrogel ramah lingkungan menjadi fokus penelitian, khususnya yang dapat diproduksi tanpa penggunaan bahan aditif toksik dan tanpa memerlukan tahap pemurnian tambahan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi optimum proses *crosslinking* fisika dan kimia pada pembuatan hidrogel berbasis PVA–gelatin.

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan

Bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah PVA, gelatin tulang ikan, asam sitrat dan air demineral.

2.2 Preparasi Hidrogel

Dibuat dua formula untuk membuat hidrogel. Pertama (SP-1), 10% (b/v) PVA dilarutkan pada temperatur 80°C selama 1 jam, 6% (b/v) gelatin dilarutkan pada temperatur 40°C selama 1 jam, 1% (b/v) asam sitrat dilarutkan dalam air demineral. Campurkan PVA-gelatin dan asam sitrat pada temperatur 40°C selama 1 jam. Kedua (SP-2), 10% (b/v) PVA dilarutkan pada temperatur 80°C selama 1 jam, 10% (b/v) gelatin dilarutkan pada temperatur 40°C selama 1 jam, 1% (b/v) asam sitrat dilarutkan dalam air demineral. Campurkan PVA-gelatin dan asam sitrat pada temperatur 40°C selama 1 jam. Masing-masing larutan kemudian dituang ke cawan petri dan dikeringkan pada temperatur ruang selama 48 jam.

2.3 Proses *Crosslinked*

Chemical crosslinking dilakukan dengan menambahkan asam sitrat pada preparasi hidrogel, proses *physical crosslinking* dilakukan dengan metode *freeze-thaw*. *Freezing* dilakukan pada temperatur -20°C selama 24 jam dan *thawing* dilakukan pada temperatur 30°C. Metode freeze-thaw dilakukan selama 0 siklus, 1 siklus dan 3 siklus.

2.4 Karakterisasi Hidrogel

Karakterisasi hidrogel dilakukan dengan dua metode, yaitu metode *fourier transform infrared spectroscopy* (FT-IR) dan metode *swelling degree*. Metode FT-IR dilakukan dengan membaca sampel dan standar pada rentang absorbansi 4000-400 cm^{-1} . Metode *swelling degree* dilakukan secara gravimetri menggunakan persamaan:

$$\text{Swelling ratio} = \frac{wt-w_0}{w_0} \quad (1)$$

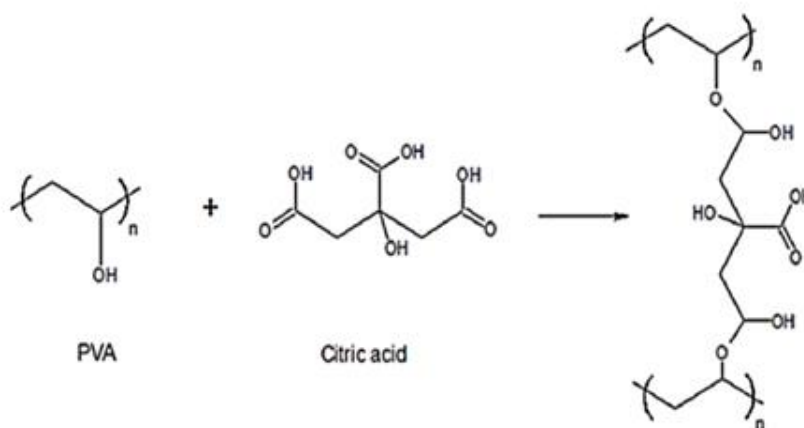
Untuk wt adalah bobot hidrogel pada waktu ke-t dan w_0 adalah bobot hidrogel pada $t=0$ (Marrella et al., 2018).

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Mekanisme *Crosslinked*

Pada penelitian ini, dibuat hidrogel *hybrid* dari bahan sintesis PVA dan bahan alami gelatin untuk mendapatkan hidrogel dengan struktur yang baik dengan toksisitas rendah. PVA-gelatin dapat berikatan silang secara fisika, tetapi pada penelitian ini ditambahkan asam sitrat sebagai agen *crosslinking*. Gugus karboksilat



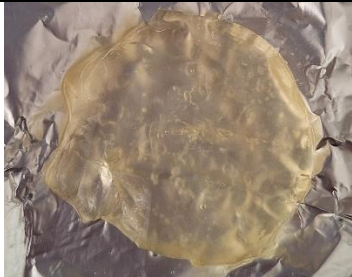

(-COOH) pada asam sitrat akan berikatan dengan gugus hidroksil (-OH) dalam PVA membentuk ikatan ester (-COO-) yang stabil terhadap air.

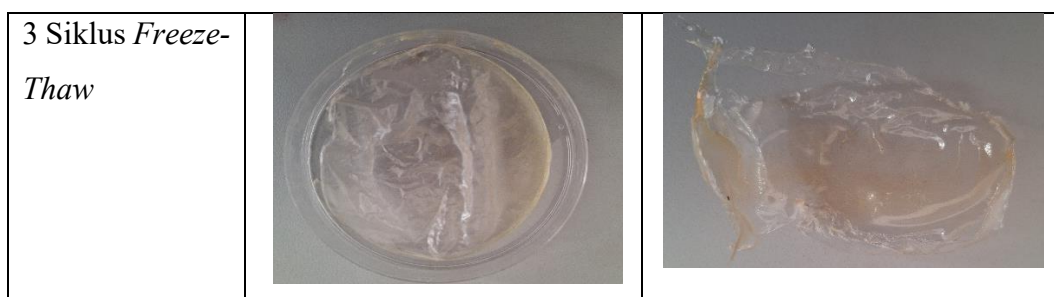


Gambar 1. *Chemical crosslinking* PVA dan asam sitrat (Gartner Vargas, 2022).

Pada penelitian ini, sampel SP-1 dan SP-2 mengalami dua perlakuan berbeda, yaitu tanpa proses freeze–thaw dan dengan proses freeze–thaw. Secara visual, hidrogel yang terbentuk sebagai berikut:

Tabel 1. Hidrogel Sampel 1 (SP-1) dan Sampel 2 (SP-2) tanpa Freeze Thaw dan dengan Feeze Thaw.

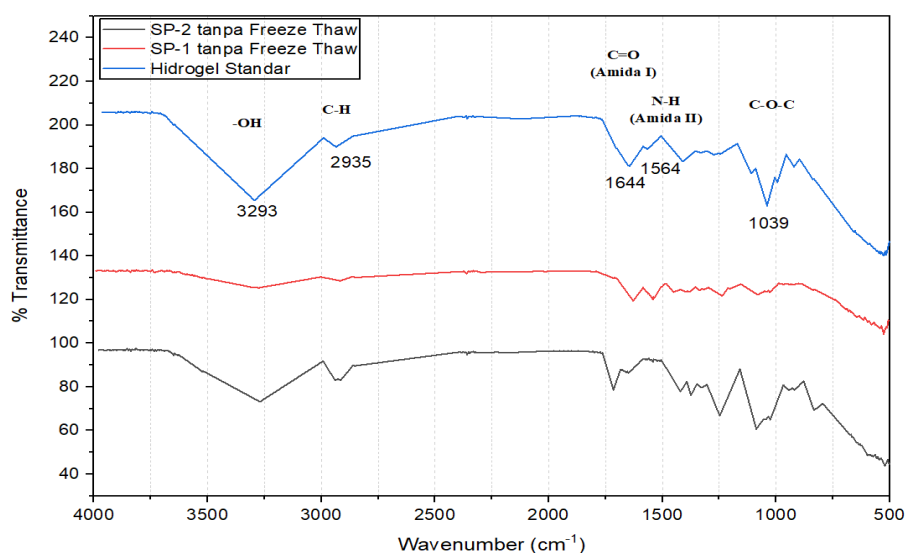
	SP-1	SP-2
Tanpa <i>Freeze-Thaw</i>		
1 Siklus <i>Freeze-Thaw</i>		



3.2 Pengaruh Asam Sitrat pada *Chemical Crosslinking*

Hidrogel adalah jaringan polimer silang (*cross-linked network*) yang tersusun dari polimer sintesis dan/atau biopolimer, baik sejenis maupun berbeda jenis, yang memiliki kapasitas penyerapan air yang sangat tinggi. Kapasitas penyerapan air yang tinggi ini berkaitan dengan adanya gugus fungsional hidrofilik dalam struktur polimer, seperti amina ($-\text{NH}_2$), hidroksil ($-\text{OH}$), amida ($-\text{CONH}-$, $-\text{CONH}_2$), sulfat ($-\text{SO}_3\text{H}$) dan karboksil ($-\text{COOH}$) (Mitura et al., 2020) (Chamkouri, 2021).

Pengaruh penambahan asam sitrat sebagai agen *crosslinking* pada *chemical crosslinking* dianalisis dengan membandingkan spektrum FT-IR hidrogel standar dan sampel tanpa proses *freeze-thaw*.



Gambar 2. Pengaruh Asam Sitrat sebagai Agen *Chemical Crosslinking*

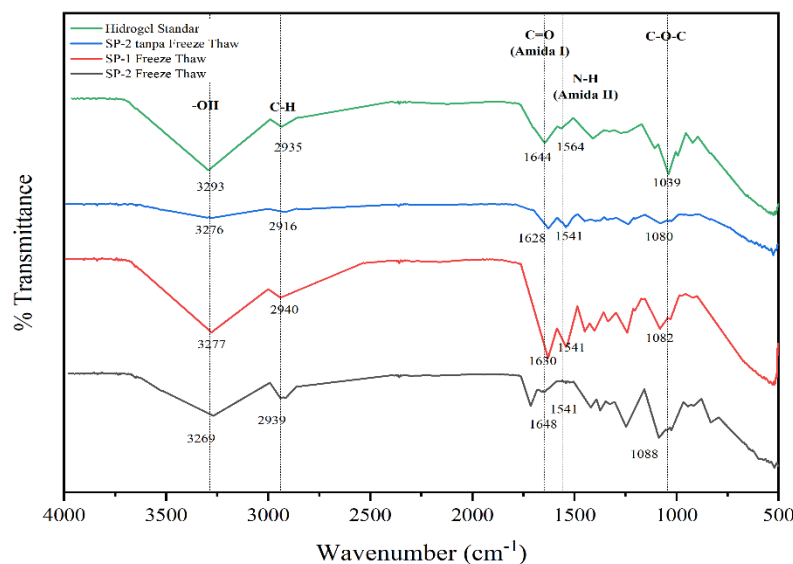
Hidrogel standar diperoleh dari hidrogel komersil yang digunakan untuk aplikasi biomedis *cooling pad*. Gambar 2. menunjukkan hidrogel standar memiliki gugus hidroksil (-OH) pada bilangan gelombang 3293 cm^{-1} , gugus C-H pada bilangan gelombang 2935 cm^{-1} , gugus amida 1 (C=O) pada bilangan gelombang 1644 cm^{-1} , gugus amida 2 (N-H) pada bilangan gelombang 1564 cm^{-1} dan gugus C-O-C pada panjang gelombang 1039 cm^{-1} . Hal ini sesuai dengan PVA yang memiliki ikatan gugus (-OH) pada bilangan gelombang 3550-3200 cm^{-1} , gugus alkil (C-H) pada bilangan gelombang 2840-3000 cm^{-1} , gugus (C=O) pada bilangan gelombang 1750-1735 cm^{-1} dan gugus C-O-C pada bilangan gelombang 1150-1085 cm^{-1} (Mansur et al., 2008).

Sampel Spektrum FT-IR menunjukkan bahwa sampel SP-2 (tanpa *freeze-thaw*) memiliki pola pita yang paling mirip dengan hidrogel standar, terlihat dari ketajaman puncak pada gugus fungsional utama. Pada sampel SP-1 (tanpa *freeze-thaw*) terdapat profil yang serupa namun intensitas puncak pada gugus -OH, C-H, C=O dan C-O-C kurang tajam. Kondisi tersebut kemungkinan berdampak pada sifat makroskopik hidrogel pada penurunan kapasitas swelling dan perubahan fleksibilitas jaringan.

3.3 Pengaruh *Freeze-Thaw* pada Physical Crosslinking

Freeze-thaw adalah proses pembekuan dan pencairan berulang. Pembekuan terjadi pada temperatur -20°C selama 24 jam dan pencairan pada temperatur 30°C selama 6 jam. Pada tahap pembekuan (*freezing*), pembentukan kristal es menyebabkan terjadinya pemisahan fase yang kaya PVA, di mana interaksi antarmolekul polimer memfasilitasi terbentuknya ikatan hidrogen dan kristalisasi. Kristalit PVA yang terbentuk inilah yang berfungsi sebagai titik sambung fisik (*physical junctions*) dalam jaringan polimer. Pada tahap pencairan (*thawing*), kristal es bertindak sebagai agen pembentuk pori dan menghasilkan struktur berpori pada jaringan hidrogel. Pengulangan siklus *freeze-thaw* secara bertahap menarik lebih banyak rantai PVA ke dalam struktur jaringan dan menghasilkan gel yang lebih kuat (Soto-Bustamante et al., 2023).

Pengaruh proses *freeze-thaw* pada *physical crosslinking* dianalisis dengan membandingkan spektrum FT-IR hidrogel standar dan sampel yang sudah melalui 3 siklus *freeze-thaw*.



Gambar 3. Pengaruh Proses *Freeze-Thaw* pada *Physical Crosslinking* Sampel spektrum FT-IR pada Gambar 3. menunjukkan bahwa sampel SP-2 *freeze-thaw* memiliki pola pita yang paling mirip dengan hidrogel standar, terlihat dari ketajaman puncak pada gugus fungsional utama hidroksil (-OH) pada bilangan gelombang 3269 cm^{-1} , gugus C-H pada bilangan gelombang 2939 cm^{-1} , gugus amida 1 (C=O) pada bilangan gelombang 1648 cm^{-1} , gugus amida 2 (N-H) pada bilangan gelombang 1541 cm^{-1} dan gugus C-O-C pada panjang gelombang 1088 cm^{-1} . Pada sampel SP-1 (tanpa *freeze-thaw*) terdapat profil yang serupa namun intensitas puncak pada gugus C=O berbeda 0,85%. Hal ini menunjukkan bahwa adanya asam sitrat sebagai agen *crosslinking* dan proses *freeze-thaw* sebagai *physical crosslinking* meningkatkan pembentukan ikatan hidrogel PVA-gelatin.

3.2 Pengaruh *Crosslinking* terhadap *Swelling Ratio*

Untuk mengetahui kemungkinan pengaruh porositas terhadap kemampuan penyerapan air dari konstruksi hidrogel, dilakukan pengukuran penyerapan air pada hidrogel PVA-Gelatin. *Swelling ratio* ditentukan melalui penimbangan massa hidrogel pada waktu $t=0$ dan $t=2$ menit untuk fluida air.

Tabel 2. *Swelling ratio* Hidrogel PVA-Gelatin

Sampel	<i>Swelling ratio</i>
Standar Hidrogel	11,19
SP-1 tanpa <i>freeze-thaw</i>	17,93
SP-2 tanpa <i>freeze-thaw</i>	8,59
SP-1 dengan <i>freeze-thaw</i>	14,65
SP-2 dengan <i>freeze-thaw</i>	9,47

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2., keempat sampel menunjukkan tren pembengkakan hidrogel SP-1 tanpa *freeze-thaw* dan dengan *freeze-thaw* lebih besar dibandingkan SP-2 dan standar hidrogel, karena puncak gugus fungsi -OH dan C-H yang rendah pada spektrum FT-IR SP-1. Rendahnya puncak gugus fungsi -OH dan C-H disebabkan karena lemahnya ikatan hidrogen atau tidak terbentuknya ikatan silang pada hidrogel. Sedangkan pada sampel SP-2 memiliki *swelling ratio* mendekati standar hidrogel karena puncak gugus fungsi -OH dan C-H pada sampel SP-2 mirip dengan standar hidrogel. Sampel hidrogel PVA-Gelatin menunjukkan perilaku *swelling* yang baik, dengan kapasitas penyerapan air mencapai sembilan kali lipat dari berat awalnya.

4. Simpulan dan Saran

PVA-Gelatin dapat digunakan untuk membuat hidrogel *hybrid* yang ramah lingkungan karena sifatnya yang mudah terurai. PVA dan gelatin akan berikatan silang dengan adanya agen kimia dan ikatan silang fisika. Ikatan silang (crosslinking) sangat penting dalam pembentukan dan performa hidrogel, karena ia menentukan struktur tiga dimensi, kekuatan mekanik, serta kemampuan hidrogel dalam menyerap dan menahan air. Untuk menambah kekuatan mekanik pada hidrogel PVA-Gelatin dilakukan penambahan 1% asam sitrat sebagai agen *chemical crosslinking* dan proses *freeze-thaw* sebagai *physical crosslinking*. Kondisi optimum terjadi pada sampel SP-2 dengan komposisi PVA 10% dan gelatin 10% yang ditambahkan asam sitrat 1% sebagai *chemical crosslinking* dan

perlakuan proses *freeze-thaw* selama 3 siklus menghasilkan puncak-puncak pada gugus fungsional utama hidroksil (-OH) pada bilangan gelombang 3269 cm^{-1} , gugus C-H pada bilangan gelombang 2939 cm^{-1} , gugus amida 1 (C=O) pada bilangan gelombang 1648 cm^{-1} , gugus amida 2 (N-H) pada bilangan gelombang 1541 cm^{-1} dan gugus C-O-C pada panjang gelombang 1088 cm^{-1} . *Swelling ratio* sampel SP-2 memiliki kapasitas penyerapan air 9,47 dari berat awalnya.

Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan mengamati proses penguraian hidrogel PVA-gelatin dan aplikasinya pada pembalut luka dengan penambahan senyawa fenolik sebagai antioksidan dan antiinflamasi.

5. Daftar Pustaka

1. Andrezza, R., Morales, A., Pieniz, S., & Labidi, J. (2023). Gelatin-Based Hydrogels: Potential Biomaterials for Remediation. *Polymers*, 15(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/polym15041026>
2. Chamkouri, H. (2021). A Review of Hydrogels, Their Properties and Applications in Medicine. *American Journal of Biomedical Science & Research*, 11(6), 485–493. <https://doi.org/10.34297/ajbsr.2021.11.001682>
3. Chen, Y., Li, J., Lu, J., Ding, M., & Chen, Y. (2022). Synthesis and properties of Poly(vinyl alcohol) hydrogels with high strength and toughness. *Polymer Testing*, 108(January). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107516>
4. Gartner Vargas, C. (2022). Flory-Huggins Interaction Parameter for Pva-Water in Hydrogels Prepared By Two Methods: Freezing/Thawing and Crosslinking With Citric Acid. *Revista Colombiana de Materiales*, 1(19), 64–74. <https://doi.org/10.17533/rm/udea.rcm.n19a06>
5. Hernandez Rivera, G., Valdez, H. A., Arango-Ospina, M., Delgado, J. F., Aguilar-Rabiela, A. E., Gorgojo, J. P., Zhang, H., Beltrán, A. M., Boccaccini, A. R., & Sánchez, M. L. (2024). PVA-gelatine based hydrogel loaded with astaxanthin and mesoporous bioactive glass nanoparticles for wound healing. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 101(September). <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.106235>
6. Kaur, H., Gogoi, B., Sharma, I., Das, D. K., Azad, M. A., Pramanik, D. Das, & Pramanik, A. (2024). Hydrogels as a Potential Biomaterial for Multimodal Therapeutic Applications. *Molecular Pharmaceutics*, 21(10), 4827–4848. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.4c00595>

7. Kundu, R., Mahada, P., Chhirang, B., & Das, B. (2022). Cellulose hydrogels: Green and sustainable soft biomaterials. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5(August 2021), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100252>
8. Maikovych, O., Nosova, N., Bukartyk, N., Fihurka, N., Ostapiv, D., Samaryk, V., Pasetto, P., & Varvarenko, S. (2023). Gelatin-based hydrogel with antiseptic properties: synthesis and properties. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 13(12), 7611–7623. <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02956-6>
9. Mansur, H. S., Sadahira, C. M., Souza, A. N., & Mansur, A. A. P. (2008). FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde. *Materials Science and Engineering C*, 28(4), 539–548. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.10.088>
10. Marrella, A., Lagazzo, A., Dellacasa, E., Pasquini, C., Finocchio, E., Barberis, F., Pastorino, L., Giannoni, P., & Scaglione, S. (2018). 3D porous gelatin/PVA hydrogel as meniscus substitute using alginate micro-particles as porogens. *Polymers*, 10(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/polym10040380>
11. Mitura, S., Sionkowska, A., & Jaiswal, A. (2020). Biopolymers for hydrogels in cosmetics: review. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 31(6). <https://doi.org/10.1007/s10856-020-06390-w>
12. Skopinska-Wisniewska, J., Tuszynska, M., Kaźmierski, Ł., Bartniak, M., & Bajek, A. (2024). Gelatin–Sodium Alginate Hydrogels Cross-Linked by Squaric Acid and Dialdehyde Starch as a Potential Bio-Ink. *Polymers*, 16(18). <https://doi.org/10.3390/polym16182560>
13. Soto-Bustamante, F., Bassu, G., Fratini, E., & Laurati, M. (2023). Effect of Composition and Freeze-Thaw on the Network Structure, Porosity and Mechanical Properties of Polyvinyl-Alcohol/Chitosan Hydrogels. *Gels*, 9(5), 1–15. <https://doi.org/10.3390/gels9050396>
14. Su, J., Li, J., Liang, J., Zhang, K., & Li, J. (2021). Hydrogel preparation methods and biomaterials for wound dressing. *Life*, 11(10), 1–22. <https://doi.org/10.3390/life11101016>