



Sifat Mekanik dan Densitas Ikatan Silang Hidrogel berbasis Tapioka Nanopartikel

Indah Puspita^{1,*}), Mersi Kurniati²

¹Jurusan Fisika, Universitas Bangka Belitung

Jl. Kampus Peradaban, Kampus Terpadu Balunijuk Gd. Dharma Penelitian Lt 1, Bangka 33172, Bangka Belitung, Indonesia

²Divisi Biofisika, Departemen Fisika, IPB University

Jl. Meranti Wing S Level 5, Kampus IPB Dramaga Bogor 16680, Jawa Barat, Indonesia

*E-mail korespondensi: indahpuspita@ubb.ac.id

Info Artikel: Abstract

Dikirim:
16 Desember 2022

Revisi:
18 Desember 2022

Diterima:
19 Desember 2022

Kata Kunci:

Hidrogel;
Tapioka;
Sifat Mekanik

Tapioca is a natural polymer that is widely used as a raw material for hydrogels. In order to improve the mechanical properties of tapioca-based hydrogels, this research modified tapioca by acid hydrolysis method for 2 hours and 24 hours and by ethanol precipitation method. This modified tapioca was further treated with epichlorohydrin with various concentrations of 0, 5, 10, and 20% to produce a three-dimensional cross-linked structure. The results showed that the increasing of epichlorohydrin concentration led to an increasing in the mechanical properties of the hydrogels consisting of hardness, stress, modulus of elasticity, and cross-linked density. The hydrogel from tapioca hydrolyzed for 24 hours and 20% epichlorohydrin was the sample with the best mechanical properties with a hardness of 19.78 mJ, a stress of 78.65 kPa, a modulus of elasticity of 233.84 mJ, and a cross-linked density of $57.61 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.

PENDAHULUAN

Hidrogel (*Super Water Absorbent Polymer* (SWA)) merupakan polimer yang memiliki kemampuan penyerapan air sangat tinggi, yaitu lebih dari 100 kali bobot keringnya [1]. Kemampuan ini disebabkan rantai utamanya yang bersifat hidrofilik dan memiliki daya osmosis yang sangat tinggi [2]. Hidrogel juga memiliki kemampuan untuk tidak terlarut dalam air karena memiliki struktur tiga dimensi yang saling berikatan silang. Karakteristik hidrogel yang unik menyebabkan hidrogel banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang, diantaranya pada bidang pertanian sebagai media tanam dan pembawa pupuk, dalam bidang medis sebagai pembalut luka dan penghantaran obat, dalam bidang industri sebagai diapers, serta banyak aplikasi lainnya [3], [4]. Luasnya penggunaan hidrogel dalam berbagai bidang menyebabkan hidrogel berbasis polimer alami banyak dikembangkan. Penggunaan polimer alami membawa dampak positif karena ketersediaannya melimpah di alam dan dapat diperbaharui. Hidrogel berbasis polimer alami juga banyak dikembangkan karena harganya lebih murah dan ramah lingkungan karena dapat terdegradasi secara alami. Salah satu bahan polimer alami yang jumlahnya melimpah di alam adalah pati yang dihasilkan oleh umbi singkong (tapioka).

Tapioka merupakan polisakarida yang tersusun dari dua polimer utama, yaitu amilosa dan amilopektin [5]. Penggunaan Tapioka sebagai bahan baku hidrogel banyak dikembangkan saat ini karena mudah untuk dimodifikasi melalui pencangkakan monomer. Selain itu, rantai utama polimer tapioka tersusun atas 83% amilopektin dan 17% amilosa [6]. Tingginya kandungan amilopektin yang ada pada tapioka menyebabkan tapioka bersifat hidrofilik karena mampu mengikat air dalam jumlah yang tinggi [7]. Akan tetapi, polimer alami memiliki keterbatasan dalam sifat mekaniknya, oleh sebab itu perlu dilakukan modifikasi agar sifat mekanik hidrogel yang dihasilkan menyerupai sifat mekanik hidrogel komersial. Modifikasi pada penelitian ini dilakukan melalui konversi ukuran partikel tapioka menjadi tapioka nanopartikel. Penggunaan tapioka nanopartikel menjanjikan sifat mekanik yang lebih baik karena area permukaan aktif relatif meningkat. Hal ini menyebabkan tapioka nanopartikel bersifat lebih reaktif dan lebih mudah untuk mengalami reaksi pengikatan silang [8]. Konversi ukuran partikel tapioka menjadi tapioka nanopartikel pada penelitian ini dilakukan melalui proses hidrolisis asam dan presipitasi etanol [5].

Selanjutnya, dilakukan proses pengikatan silang agar menghasilkan struktur tiga dimensi yang bertaut silang. Proses ini dilakukan dengan penambahan agen pengikat silang (*Crosslinking Agent*) [9]. Salah satu agen pengikat silang yang banyak digunakan dalam proses modifikasi tapioka adalah Epiklorohidrin (Ech). Reaksi yang dihasilkan oleh Ech dan Tapioka akan menghasilkan tapioka yang resisten terhadap perubahan pH, juga menghasilkan ikatan eter antar ikatan hidroksil tapioka. Proses pengikatan silang ini juga menyebabkan peningkatan sifat mekanik tapioka dan ketahanannya terhadap perubahan suhu. Oleh sebab itu, pada penelitian ini dilakukan pengkajian terhadap pengaruh waktu hidrolisis tapioka dan konsentrasi agen pengikat silang terhadap sifat mekanik dan kerapatan ikatan silang hidrogel yang dihasilkan.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah tapioka dari industri lokal di Bogor, Jawa Barat. Epiklorohidrin dari Sigma Aldrich, Jerman. Serta bahan lainnya yang terdiri dari aquades, etanol konsentrasi 95%, larutan Asam Klorida (HCl) 2.2 N (Merck), dan Natrium Hidroksida (NaOH) 5% (Merck). Pengujian sifat mekanik hidrogel dilakukan menggunakan instrumen Brookfield *Texture Analyzer* di Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pasca Panen Pertanian, Bogor, Jawa Barat.

Prosedur Penelitian

Preparasi Hidrogel

Hidrogel pada penelitian ini disiapkan melalui dua metode, yaitu modifikasi ukuran partikel dan penambahan agen pengikat silang [9]. Ukuran partikel tapioka pada penelitian ini dimodifikasi melalui hidrolisis asam dan presipitasi etanol. Pada tahapan hidrolisis asam, tapioka yang diperoleh dari industri dilarutkan dalam larutan Asam Klorida (HCl) konsentrasi 2.2 N dengan perbandingan tapioka dan HCl adalah 1:2 (b/v). Suspensi ini selanjutnya direndam dalam variasi waktu 2 jam dan 24 jam pada suhu konstan 50 °C. Suspensi ini selanjutnya dinetralkan menggunakan NaOH konsentrasi 5% hingga pH 7 kemudian dibilas menggunakan akuades. Pati yang telah dibilas selanjutnya disaring dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 55 °C selama 24 jam hingga kadar air 10%. Tapioka yang dihasilkan dari proses ini adalah tapioka terhidrolisis.

Tapioka terhidrolisis selanjutnya diproses menggunakan metode presipitasi etanol. Proses ini diawali dengan melarutkan tapioka yang telah dihidrolisis selama 2 jam dan 24 jam dalam akuades dengan perbandingan 1:10 (b/v). Suspensi ini selanjutnya dipanaskan pada suhu 100 °C

hingga mengalami gelatinisasi. Suspensi yang tergelatinisasi selanjutnya didinginkan secara perlahan – lahan pada suhu ruang sambil ditambahkan etanol 95% dengan cara diteteskan hingga volume etanol yang ditambahkan sama dengan volume pelarut. Suspensi selanjutnya didiamkan hingga terbentuk endapan tapioka nanopartikel. Endapan selanjutnya dicuci menggunakan etanol konsentrasi 95% untuk menghilangkan kandungan air yang tersisa. Tapioka nanopartikel ini selanjutnya disaring dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 55 °C selama 24 jam hingga kadar air 10%.

Tapioka dari proses presipitasi etanol selanjutnya dilarutkan dalam akuades dengan perbandingan 1:4 (b/v) pada suhu 55 °C. Larutan selanjutnya ditambahkan agen pengikat silang berupa epiklorohidrin (Ech) dengan konsentrasi yang divariasikan menjadi 0% (tanpa Ech), 5%, 10%, dan 20% dari massa pati. Larutan selanjutnya diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 55 °C selama satu jam. Larutan selanjutnya didiamkan selama 4 jam hingga terbentuk endapan. Endapan yang dihasilkan selanjutnya disaring dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 55 °C selama 6 jam hingga kering dan dihasilkanlah hidrogel nanotapioka.

Pengujian Sifat Mekanik

Pengujian sifat mekanik dilakukan menggunakan instrumen *Texture Analyzer*. Data yang dihasilkan dari pengujian ini terdiri dari Kekerasan (*Hardness*), Regangan (*Strain*, ϵ), dan beban maksimum (m, gram). Berdasarkan data yang diperoleh dari instrumen *Texture Analyzer* tersebut dapat dihitung tegangan (*stress* σ , kPa) hidrogel menggunakan Persamaan (1) sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{m \times g}{A} \quad (1)$$

Berdasarkan nilai tegangan dan regangan, dapat ditentukan data modulus elastisitas menggunakan Persamaan (2). Densitas ikatan silang ditentukan berdasarkan nilai modulus elastisitas sesuai dengan Persamaan (2) sebagai berikut [10].

$$Y = \frac{\sigma}{\epsilon} = 3NkT \quad (2)$$

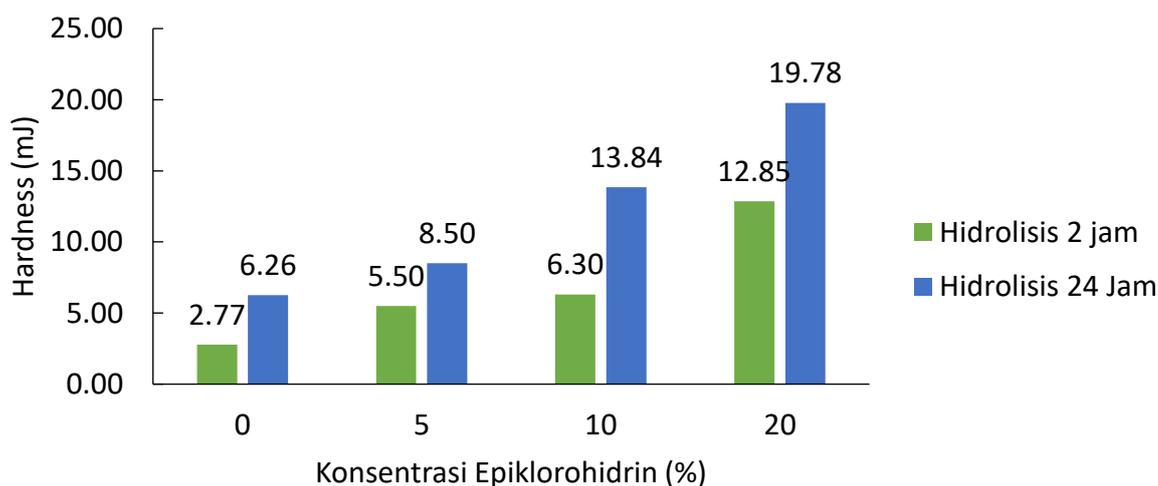
F merupakan gaya kompresi maksimum yang dibebankan pada sampel (N), A adalah Luas permukaan *probe* = $1.27 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, m adalah massa maksimum beban yang diberikan pada sampel (kg), g adalah percepatan gravitasi = 9.8 m/s, N adalah densitas ikatan silang (m^{-3}), k adalah konstanta Boltzmann = $1.38065 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, dan T adalah suhu pengujian sampel (K).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kekerasan (*Hardness*)

Penentuan kekerasan hidrogel dilakukan berdasarkan beban yang terukur oleh instrumen *texture analyzer*. Nilai *hardness* menunjukkan besaran gaya maksimum yang menyebabkan hidrogel terdeformasi [11]. Nilai ini ditentukan berdasarkan puncak beban yang diberikan kepada sampel pada saat siklus kompresi pertama. Nilai kekerasan hidrogel menunjukkan ketahanan hidrogel dalam menahan beban. Semakin tinggi nilai kekerasan hidrogel, maka kemampuan hidrogel tersebut dalam menahan beban juga semakin baik. Pada penelitian ini, terdapat dua parameter yang mempengaruhi nilai kekerasan hidrogel, yaitu waktu hidrolisis tapioka dan konsentrasi agen pengikat silang. Waktu hidrolisis tapioka akan mempengaruhi ukuran nanopartikel tapioka yang dihasilkan. Selama proses hidrolisis asam, akan terjadi pemutusan fraksi amilosa rantai panjang dan titik percabangan amilopektin, sehingga dihasilkan pati dengan jumlah amilosa rantai pendek yang lebih tinggi [12]. Proses hidrolisis asam juga menyerang bagian amorf granula pati secara cepat dan menyisakan bagian kristalin yang lebih lambat diserang [13]. Hal ini menyebabkan proses ini menghasilkan pati nanokristalin yang memiliki

kekuatan mekanik lebih tinggi dibandingkan material asalnya. Hasil pada Gambar 1 menunjukkan, pada sampel kontrol (tanpa penambahan Epiklorohidrin), hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 24 jam memiliki nilai kekerasan sebesar 6.26 mJ dan hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 2 jam memiliki nilai kekerasan sebesar 2.77 mJ. Hasil ini menunjukkan hidrogel dari tapioka terhidrolisis 24 jam memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan hidrogel dari tapioka terhidrolisis 2 jam. Hasil ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa semakin lama waktu hidrolisis asam, maka kemampuan hidrogel untuk menahan beban semakin meningkat [9].



Gambar 1. Kekerasan (*Hardness*) hidrogel nanotapioka

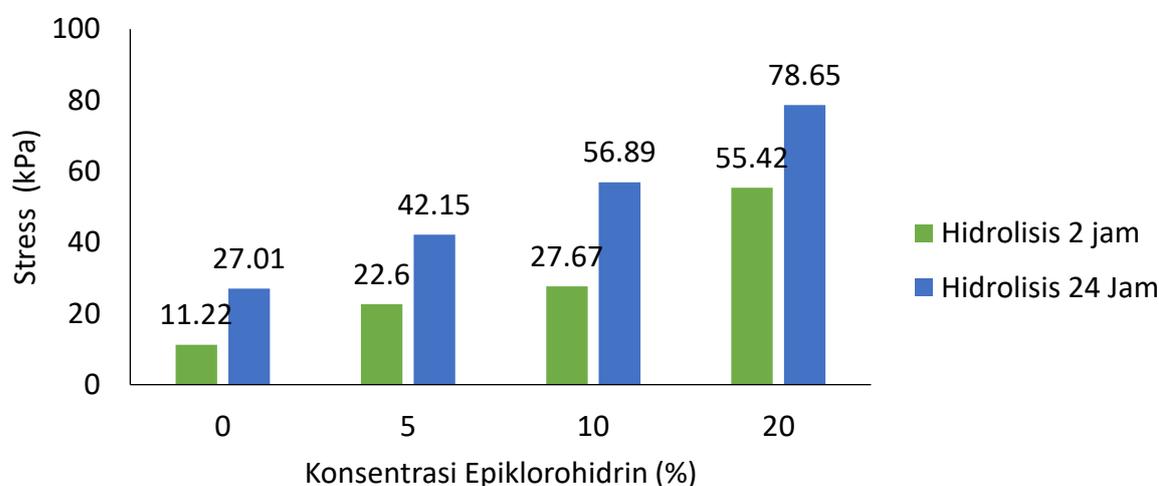
Nilai kekerasan hidrogel berbasis tapioka nanopartikel yang disajikan pada Gambar 1 juga menunjukkan pengaruh konsentrasi Epiklorohidrin sebagai agen pengikat silang terhadap nilai kekerasan (*hardness*) hidrogel. Hasil pada Gambar 1 menunjukkan pada hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 2 jam dan terhidrolisis 24 jam peningkatan konsentrasi Epiklorohidrin mampu meningkatkan kekerasan hidrogel secara signifikan. Pada hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 2 jam, sampel hidrogel kontrol (tanpa penambahan Epiklorohidrin) memiliki nilai *hardness* sebesar 2.77 mJ. Penambahan Epiklorohidrin sebagai agen pengikat silang dengan konsentrasi 5%, 10%, dan 20%, mampu meningkatkan kekerasan hidrogel berturut – turut menjadi 5.5 mJ, 6.3 mJ, dan 12.85 mJ. Pola serupa juga ditunjukkan oleh hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 24 jam. Pada Gambar 1 ditunjukkan bahwa pada hidrogel perlakuan kontrol (0% Epiklorohidrin), kekerasan hidrogel bernilai 6.26 mJ. Nilai kekerasan ini semakin meningkat dengan semakin tingginya konsentrasi Epiklorohidrin yang ditambahkan. Semakin tingginya konsentrasi agen pengikat silang, ikatan silang yang terbentuk dalam struktur hidrogel akan semakin rapat [14]. Hal ini menyebabkan struktur tiga dimensi polimer yang terbentuk semakin kuat dan kemampuan hidrogel dalam menahan beban juga semakin meningkat. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Sezer *et.al.* yang menyatakan bahwa peningkatan konsentrasi agen pengikat silang akan meningkatkan kekerasan hidrogel [15].

Tegangan Maksimum (*Maximum Stress*)

Tegangan maksimum hidrogel ditentukan berdasarkan rasio beban maksimum yang diberikan kepada sampel (beban pada saat titik kekerasan maksimum) terhadap luas penampang *probe* yang digunakan. Nilai tegangan maksimum untuk hidrogel berbasis tapioka nanopartikel pada berbagai perlakuan disajikan pada Gambar 2. Hasil pada Gambar 2 menunjukkan peningkatan waktu hidrolisis tapioka pada tahapan preparasi dari 2 jam menjadi 24 jam mampu

meningkatkan nilai tegangan maksimum hidrogel secara signifikan dari 11.22 kPa menjadi 27.01 kPa. Hasil ini sesuai dengan hasil pengujian kekerasan yang menunjukkan bahwa hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 24 jam memiliki ketahanan mekanis yang lebih baik dibandingkan hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 2 jam. Proses hidrolisis yang dilakukan pada tapioka menyebabkan bagian amorf pada rantai polimer tapioka terdegradasi dan menyisakan bagian kristalin sehingga dihasilkan tapioka nanokristalin [9]. Selain itu, lamanya waktu hidrolisis menghasilkan nanotapioka dengan ukuran partikel yang semakin kecil. Semakin kecilnya ukuran partikel nanotapioka, luas permukaan aktif nanotapioka meningkat [8]. Meningkatnya luas permukaan aktif ini menyebabkan ikatan silang yang terbentuk semakin banyak. Peningkatan jumlah ikatan silang ini menyebabkan rantai polimer yang terbentuk semakin rapat, sehingga kekuatan mekanik hidrogel yang dihasilkan semakin meningkat.

Selain pengaruh waktu hidrolisis, hasil pada Gambar 2 menunjukkan pengaruh konsentrasi epiklorohidrin terhadap tegangan maksimum. Tegangan maksimum merupakan besarnya tegangan (*stress*) yang dialami oleh sampel ketika menerima beban maksimum. Hasil pada Gambar 2 menunjukkan sampel hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 2 jam dan 24 jam mengalami peningkatan nilai tegangan maksimum (*stress*) dengan peningkatan konsentrasi epiklorohidrin. Pada sampel hidrogel dari tapioka terhidrolisis 2 jam, tegangan sebelum perpatahan mengalami peningkatan secara signifikan dari nilai awalnya 11.22 kPa pada sampel tanpa epiklorohidrin menjadi 22.6 kPa, 27.67 kPa, dan 55.42 kPa pada hidrogel dengan penambahan epiklorohidrin dengan konsentrasi berturut – turut sebesar 5%, 10%, dan 20%. Peningkatan agen pengikat silang yang ditambahkan menyebabkan rantai polimer yang teraktivasi untuk melakukan reaksi pengikatan silang semakin bertambah [16]. Hal ini menghasilkan struktur terikat silang yang semakin rapat yang berdampak pada kemampuan bahan untuk menahan beban sebelum akhirnya pecah menjadi semakin meningkat [17].

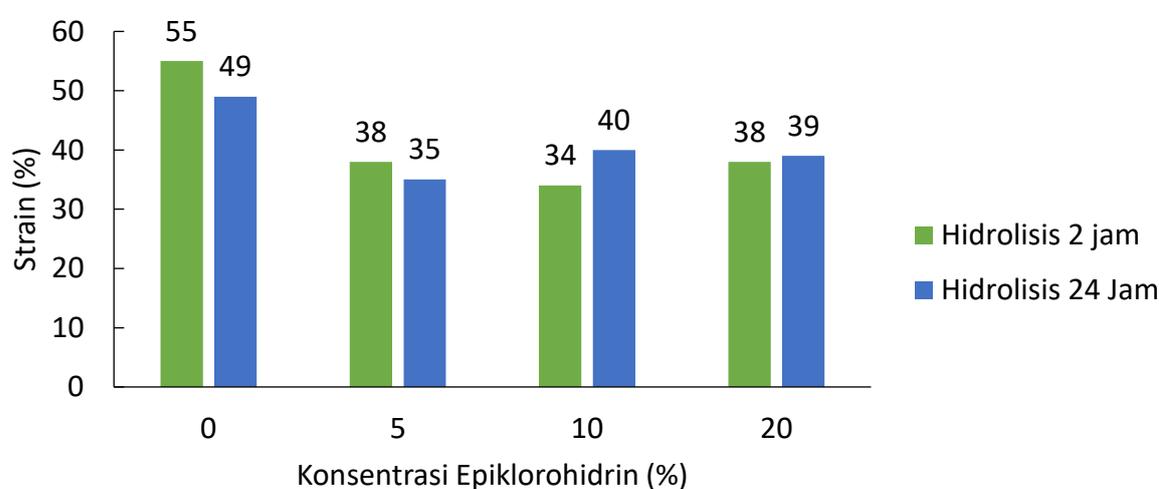


Gambar 2. Tegangan maksimum (*maximum stress*) hidrogel nanotapioka

Regangan Maksimum (*Maximum Strain*)

Regangan maksimum merupakan nilai peregangan yang dialami oleh sampel ketika mendapatkan beban maksimum. Nilai regangan ini diperoleh berdasarkan rasio perubahan ketinggian sampel ketika menerima beban kompresi maksimum terhadap ketinggian awal sampel. Persentase regangan hidrogel yang dihasilkan dari penelitian ini pada berbagai perlakuan disajikan pada Gambar 3. Berdasarkan hasil pada Gambar 3, nilai regangan maksimum sampel hidrogel mengalami fluktuasi dengan meningkatnya konsentrasi epiklorohidrin yang ditambahkan. Pada hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 2 jam, penambahan epiklorohidrin sebagai agen pengikat silang sebanyak 5% menyebabkan penurunan nilai

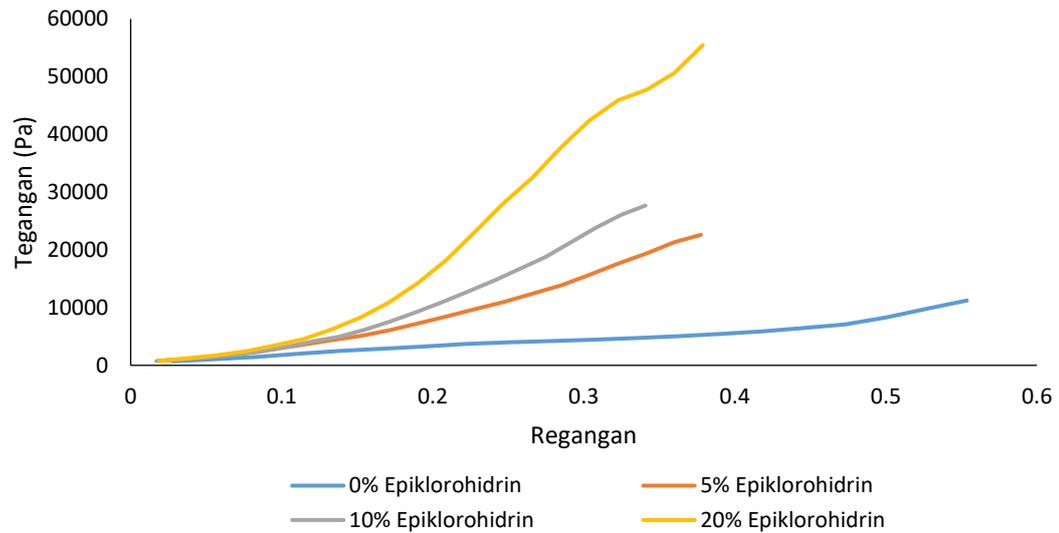
regangan maksimum dari 55% untuk hidrogel kontrol (tidak menerima penambahan Epiklorohidrin) menjadi 38%. Selanjutnya nilai regangan ini kembali mengalami penurunan menjadi sebanyak 4% ketika konsentrasi Epiklorohidrin yang ditambahkan meningkat menjadi 10% dan kemudian meningkat kembali menjadi 38% untuk hidrogel dengan 20% Epiklorohidrin. Pola hasil yang serupa juga ditunjukkan oleh hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 24 jam. Pada hidrogel ini, penambahan konsentrasi Epiklorohidrin dari 0 menjadi 5% menyebabkan nilai regangan maksimum mengalami penurunan dari 49% menjadi 35%. Selanjutnya, ketika konsentrasi Epiklorohidrin meningkat menjadi 10%, nilai regangan maksimum kembali mengalami peningkatan menjadi 40% dan bernilai tetap ketika konsentrasi Epiklorohidrin ditingkatkan menjadi 20%. Nilai regangan maksimum hidrogel menunjukkan kemampuan seberapa jauh hidrogel untuk mengalami perubahan bentuk sebagai respon terhadap beban yang diberikan. Menurut Grandhi *et. Al.*, penurunan nilai regangan maksimum hidrogel disebabkan karena ikatan silang yang terbentuk sampai pada batas yang menghambat gerakan ikatan silang yang reversibel [18].



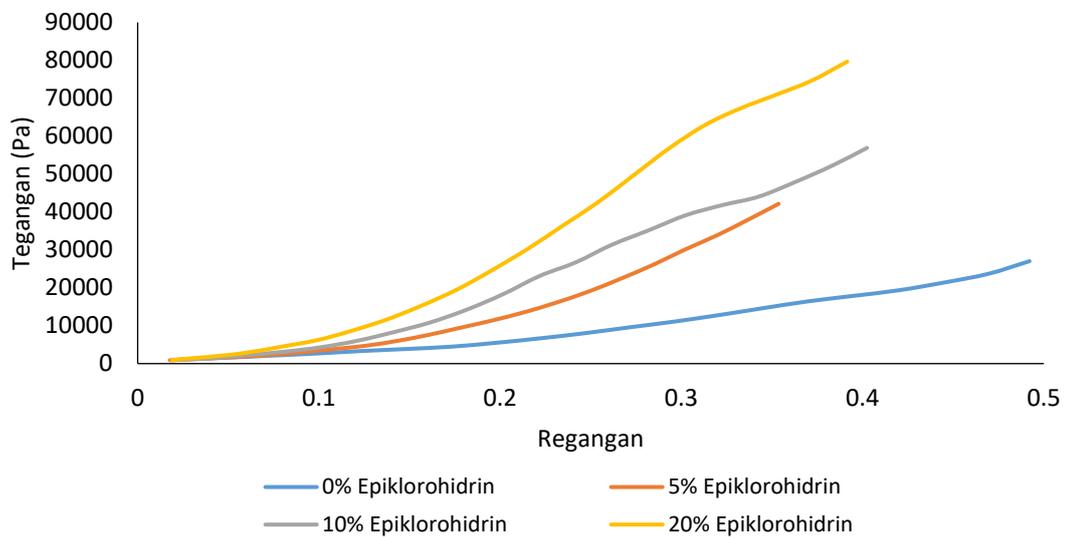
Gambar 3. Regangan maksimum hidrogel nanotapioka

Modulus Elastisitas

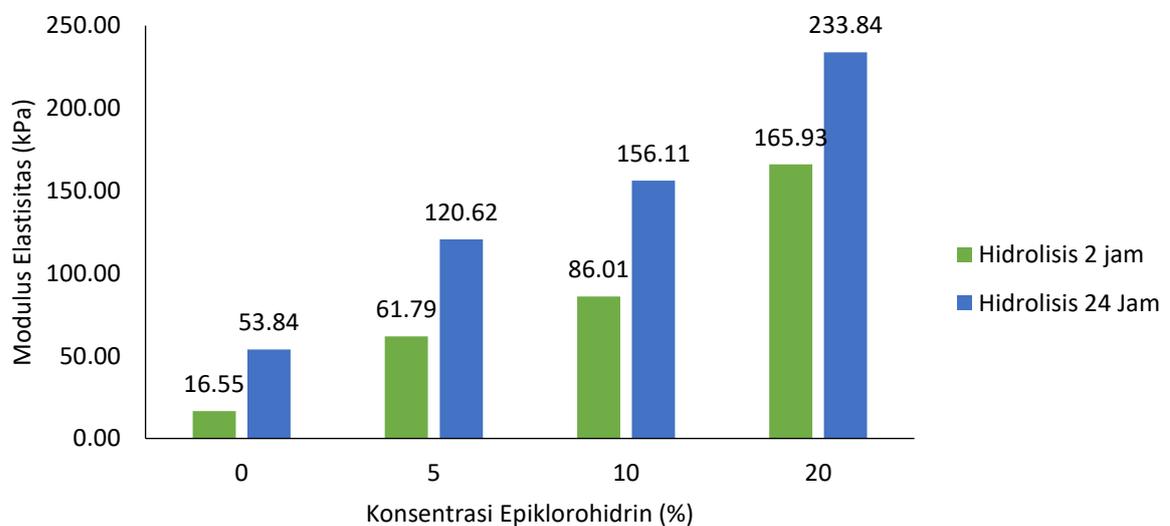
Gambar 4 menunjukkan kurva tegangan terhadap regangan hidrogel dari tapioka terhidrolisis 2 jam pada berbagai konsentrasi agen pengikat silang. Sementara itu, Gambar 5 menunjukkan kurva tegangan terhadap regangan hidrogel dari tapioka terhidrolisis 24 jam. Berdasarkan hasil pada Gambar 4, hidrogel dari tapioka terhidrolisis 2 jam mengalami peningkatan area kurva ketika konsentrasi Epiklorohidrin meningkat dari 0% menjadi 20%. Pola yang serupa juga ditunjukkan oleh Gambar 5 yang menunjukkan kurva regangan – tegangan untuk hidrogel berbasis tapioka terhidrolisis 24 jam. Hasil ini mengindikasikan hidrogel kontrol (0% Epiklorohidrin) bersifat lebih inelastis dibandingkan hidrogel dengan konsentrasi Epiklorohidrin 5%, 10%, dan 20% yang bersifat lebih elastis [19]. Berdasarkan indikasi tersebut, hidrogel yang memiliki elastisitas paling tinggi adalah hidrogel dengan konsentrasi epiklorohidrin 20%. Hasil ini juga didukung berdasarkan nilai modulus elastisitas hidrogel yang ditampilkan pada Gambar 6. Modulus elastisitas hidrogel pada gambar tersebut ditentukan berdasarkan kemiringan kurva tegangan terhadap regangan pada daerah elastis. Daerah elastis kurva tegangan regangan merupakan daerah kurva regangan – tegangan yang memiliki kemiringan bernilai linier.



Gambar 4. Kurva Tegangan – Regangan kompresi hidrogel berbasis tapioka terhidrolisis 2 jam



Gambar 5. Kurva Tegangan – Regangan kompresi hidrogel berbasis tapioka terhidrolisis 24 jam



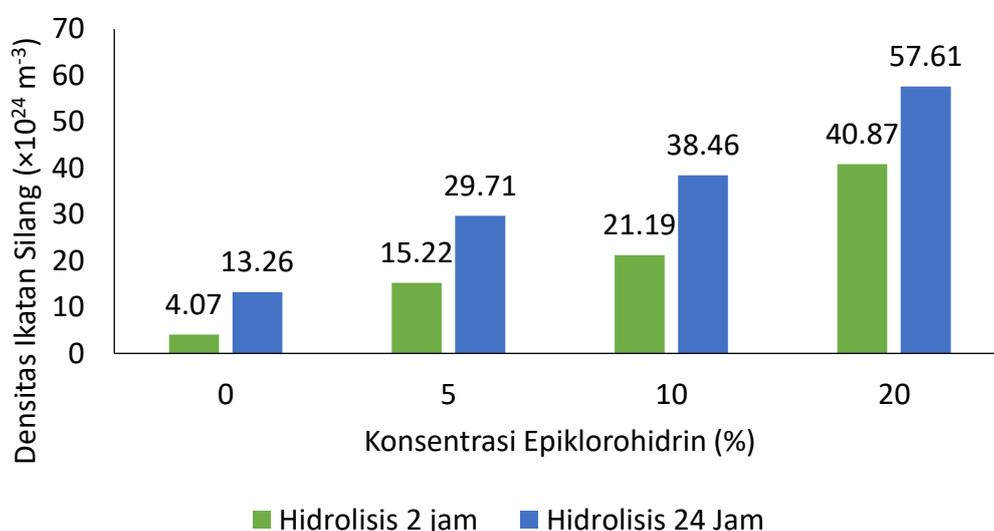
Gambar 6. Modulus elastisitas hidrogel nanotapioka

Hasil pada Gambar 6 menunjukkan peningkatan waktu hidrolisis tapioka dari 2 jam menjadi 24 jam mampu meningkatkan modulus elastisitas hidrogel pada semua variasi konsentrasi epiklorohidrin. Hasil ini sesuai dengan hasil pengujian kekerasan dan tegangan maksimum yang menunjukkan peningkatan waktu hidrolisis mampu meningkatkan sifat mekanik hidrogel. Sifat mekanik hidrogel pada penelitian ini dipengaruhi secara signifikan oleh waktu hidrolisis tapioka. Selama proses hidrolisis asam, asam klorida akan menyerang bagian amorf polimer pati dengan cepat dan menyisakan bagian kristalin yang terisolasi [20]. Hal ini menyebabkan kondisi rantai polimer pati semakin stabil dan sifat mekaniknya juga semakin baik.

Hasil pada Gambar 6 juga menunjukkan pengaruh konsentrasi agen pengikat silang (Epiklorohidrin) terhadap modulus elastisitas hidrogel. Pada hidrogel dari tapioka terhidrolisis 2 jam, modulus elastisitas hidrogel meningkat dari 16.55 kPa pada sampel hidrogel tanpa epiklorohidrin menjadi 61.79 kPa, 86.01 kPa, dan 165.93 kPa pada hidrogel dengan konsentrasi epiklorohidrin 5%, 10%, dan 20%. Pola yang serupa juga ditunjukkan oleh hidrogel yang disintesis dari tapioka terhidrolisis 24 jam. Hasil pada Gambar 6 tersebut menunjukkan, hidrogel yang memiliki elastisitas paling balik adalah hidrogel dari tapioka terhidrolisis 24 jam dengan konsentrasi epiklorohidrin 20%.

Densitas Ikatan Silang (N)

Densitas ikatan silang ditentukan menggunakan teori elastisitas karet yang menghubungkan modulus elastisitas hidrogel dengan densitas ikatan silang. Densitas ikatan silang dihitung berdasarkan hasil pembagian antara modulus elastisitas dengan konstanta Boltzmann dan suhu absolut (298 K) [10]. Oleh sebab itu, nilai densitas ikatan silang akan selalu berbanding lurus dengan nilai modulus elastisitas. Densitas ikatan silang hidrogel berbasis tapioka nanopartikel pada penelitian ini disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Densitas ikatan silang hidrogel nanotapioka

Nilai modulus elastisitas tapioka yang disampaikan pada Gambar 7 menguatkan hasil pengujian kekerasan, tegangan maksimum dan modulus elastisitas yang telah dibahas pada bagian sebelumnya. Nilai densitas ikatan silang meningkat dengan meningkatnya waktu hidrolisis tapioka dan konsentrasi agen pengikat silang. Waktu hidrolisis yang semakin lama akan menyebabkan bagian amorf rantai polimer tapioka semakin mengalami degradasi. Hal ini menyisakan bagian kristalin tapioka yang terisolasi dan memiliki ukuran partikel yang semakin kecil. Ukuran partikel yang semakin kecil menyebabkan sisi aktif partikel tapioka menjadi semakin besar dan tapioka nanopartikel menjadi lebih reaktif dibandingkan dengan struktur *bulk*

nya [12]. Hal ini menyebabkan ikatan silang yang dapat terpropagasi semakin bertambah dan kekuatan mekanik hidrogel semakin baik. Hasil ini sesuai untuk hidrogel pada seluruh variasi konsentrasi agen pengikat silang.

Selanjutnya, nilai modulus elastisitas hidrogel juga dipengaruhi oleh konsentrasi epiklorohidrin sebagai agen pengikat silang. Pada hidrogel dari tapioka terhidrolisis 2 jam, densitas ikatan silang pada sampel yang tidak menerima penambahan epiklorohidrin adalah $4.07 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$. Nilai ini terus mengalami peningkatan dengan semakin meningkatnya konsentrasi agen pengikat silang. Nilai densitas ikatan silang terbesar untuk hidrogel dari tapioka terhidrolisis 2 jam adalah $40.87 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ untuk sampel hidrogel dengan konsentrasi epiklorohidrin 20%. Hidrogel yang dihasilkan dari tapioka terhidrolisis 24 jam juga menunjukkan hasil yang serupa dengan densitas ikatan silang tertinggi pada sampel hidrogel dengan konsentrasi epiklorohidrin 20% dengan nilai densitas ikatan silang $57.61 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.

Dalam proses pembentukan hidrogel, agen pengikat silang (*crosslinker*) bertugas untuk mengaktivasi permukaan polimer utama tapioka sehingga siap untuk membentuk ikatan [21]. Selain itu, agen pengikat silang (*crosslinker*) juga berperan sebagai jembatan untuk menghubungkan antar rantai polimer sehingga terbentuk struktur tiga dimensi yang saling bertaut silang [22]. Semakin tinggi konsentrasi epiklorohidrin yang ditambahkan, sisi aktif polimer yang diaktivasi untuk membentuk ikatan juga akan semakin banyak. Hal ini juga didukung dengan semakin banyaknya jembatan penghubung antar rantai – rantai polimer induk. Hal ini menyebabkan semakin tingginya konsentrasi agen pengikat silang, ikatan silang yang terbentuk semakin banyak sehingga densitas ikatan silang yang terbentuk juga semakin besar. Hasil ini akan menyebabkan sifat mekanik hidrogel semakin baik dan berimplikasi pada semakin besarnya nilai kekerasan hidrogel.

KESIMPULAN

Waktu hidrolisis tapioka dan konsentrasi epiklorohidrin sebagai agen pengikat silang berpengaruh terhadap sifat mekanik dan densitas ikatan silang hidrogel yang dihasilkan pada penelitian ini. Parameter sifat mekanik yang diuji terdiri dari kekerasan, tegangan, regangan, dan modulus elastisitas. Nilai seluruh parameter dalam pengujian sifat mekanik dan densitas pengikatan silang memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan waktu hidrolisis tapioka dan konsentrasi agen pengikat silang. Semakin tinggi konsentrasi epiklorohidrin sebagai agen pengikat silang, karakteristik mekanik hidrogel semakin baik yang ditunjukkan dengan semakin tingginya nilai kekerasan, tegangan maksimum, modulus elastisitas, dan densitas ikatan silang. .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Kalhapure, R. Kumar, V. Singh and D. Pandey, "Hydrogels: A boon for increasing agricultural productivity in water - stressed environment," *General Articles*, vol. 111, no. 11, pp. 1773-1779, 2016.
- [2] Erizal, S. Dewi and A. Sudrajat, "Sintesis hidrogel polietilen oksida berikatan silang dan immobilisasi antibiotik dengan cara induksi radiasi gamma untuk aplikasi pembalut luka," *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isoton dan Radiasi*, vol. 5, no. 2, pp. 177-193, 2009.
- [3] G. D. Cha, W. H. Lee, C. Lim, M. K. Choi and D. H. Kim, "Materials engineering, processing, and device application of hydrogel nanocomposites," *Nanoscale*, vol. 12, no. 19, pp. 10456 - 10473, 2020.

- [4] T. Neethu, P. Dubey and A. Kaswala, "Prospect and application of hydrogel technology in agriculture," *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, vol. 7, no. 5, pp. 3155 - 3162, 2018.
- [5] C. Winarti, T. Sunarti and N. Richana, "Produksi dan aplikasi pati nanopartikel," *Buletin Teknologi Pascapanen Pertanian*, vol. 7, no. 2, pp. 104-114, 2011.
- [6] E. Syamsir, P. Hariyadi, D. Fardiaz, N. Andarwulan and F. Kusnandar, "Pengaruh proses heat-moisture treatment (TMT) terhadap karakteristik fisikokimia pati," *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, vol. 11, no. 1, pp. 1139-1153, 2012.
- [7] M. Apriyani and E. Setyadi, "Sintesis dan karakterisasi plastik biodegradable dari pati onggok singkong dan ekstrak lidah buaya (Aloe vera) dengan plasticizer gliserol," *Jurnal Sains Dasar*, vol. 4, no. 2, pp. 145 - 152, 2015.
- [8] R. Suwarda and M. Maarif, "Pengembangan inovasi teknologi nanopartikel berbasis pati untuk menciptakan produk yang berdaya saing," *Jurnal Teknik Industri*, vol. 3, no. 2, pp. 104 - 122, 2013.
- [9] M. Kurniati, C. Winarti, F. Syamani and I. Puspita, "Nanohidrogel tapioka menggunakan epiklorohidrin sebagai agen pengikat silang," *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, vol. 29, no. 2, pp. 213-221, 2019.
- [10] Y. C. B. Piao, "One-pot synthesis and characterization of reduced graphene oxide–gelatin nanocomposite hydrogels," *RSC Advances*, vol. 6, no. 8, pp. 6171-6181., 2016.
- [11] J. Hurler, A. Engesland, B. Kermay and N. Basnet, "Improved texture analysis for hydrogel characterization: Gel cohesiveness, adhesiveness, and hardness," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 125, pp. 180-188, 2012.
- [12] I. Puspita, C. Winarti, A. Maddu and M. Kurniati, "Synthesis of cassava starch based nano-hydrogels using gamma irradiation," in *The 5th International Seminar on Sciences*, Bogor, 2019.
- [13] D. Corre, J. Bras and A. Dufresne, "Starch nanoparticles: A review," *Biomacromolecules*, vol. 11, no. 1, pp. 1139 - 1153, 2010.
- [14] Y. Chen, K. Zheng, L. Niu, Y. Zhang, Y. Liu, C. Wang and F. Chu, "Highly mechanical properties nanocomposite hydrogels with biorenewable lignin nanoparticles," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 128, pp. 414-420, 2019.
- [15] A. Sezer, E. Cehver, F. Hatipoglu, A. Bas and J. Akbuga, "Preparation of fucoidan-chitosan hydrogel and its application as burn healing accelerator of rabbits," *Biol. Pharm. Bull.*, vol. 31, no. 12, pp. 2326-2333, 2008.
- [16] K. Anseth, C. Bowman and L. Peppas, "Mechanical properties of hydrogels and their experimental determination," *Biomaterials*, vol. 17, pp. 1647-1657, 1996.
- [17] B. Ghanbarzadeh, H. Almasi and A. Entezami, "Improving the barrier and mechanical properties of corn starch - based edible films: effect of citrid acid and carboxymethyl cellulose," *Industrial Crops and Products*, vol. 33, pp. 229-235, 2011.
- [18] T. Grandhi, N. Zaman, A. Banda, V. Dhamankar, C. Chu, E. Perotta and I. Kadilaya, "Mechanical characterization of extracellular matrix hydrogels: Comparison of properties measured by rheometer and texture analyzer," *Asian Journal of Pharmaceutical Technology and Innovation*, vol. 6, no. 28, pp. 6-21, 2018.
- [19] E. Kim, M. Kim, J. Song, C. Kang and W. Park, "Dual crosslinked alginate hydrogels by riboflavin as photoinitiator," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 154, pp. 989-998, 2020.

- [20] I. Yunita, W. Prendika and R. Mutia, "Modifikasi pati umbut batang kelapa sawit dengan hidrolisis asam," *Jurnal Teknologi Pangan dan Gizi*, vol. 21, no. 1, pp. 37-42, 2022.
- [21] A. Abidin, G. Susanto and T. Puspasari, "Sintesis dan karakterisasi polimer superabsorben dari akrilamida," *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, vol. 11, no. 2, pp. 87-93, 2012.
- [22] E. Kalhapure, E. Kamoun, M. Eldin and M. El-Meligy, "Hydrogels: A boon for increasing agricultural productivity in water-stressed environment," *General Articles*, vol. 111, no. 11, pp. 1773-1779, 2016.