p-ISSN: 1907-8056
e-ISSN: 2527-5410
AGROINTEK
Jurnal Teknologi Industri Pertanian
journal homepage: journal.trunojoyo.ac.id/agrointek

Optimasi formula *plasticizer* gliserol dan *filler* carboxymethyl cellulose terhadap kekuatan mekanik pada *biodegradable film packaging* berbasis pati singkong

Siti Munfarida[1*], Amalia Nur Kumalaningrum[1], Nita Ariestiana Putri[2], Jefri Pandu Hidayat[2], Rizka Ayu Yuniar[2], Lasma Barbara Naibaho[2]

[1]*Teknologi Pangan, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia*
[2]*Teknik Kimia, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia*

Article history
Diterima:
13 Desember 2024
Diperbaiki:
5 Februari 2025
Disetujui:
11 Februari 2025

Keyword
Biodegradable film;
Carboxymethyl cellulose;
Gliserol;
Kekuatan mekanik;
Pati singkong

ABSTRACT

The use of conventional plastics, which are difficult to degrade, has caused serious environmental problems, necessitating alternatives in the form of biodegradable plastics (bioplastics). Biofilms are anticipated to address social issues in line with the 12th SDG goal, namely the management and reduction of packaging waste generated daily. By utilizing abundant local cassava starch, the produced biofilms are anticipated to possess good mechanical properties and low water absorption, making them a potential eco-friendly alternative for food packaging while supporting the use of local resources. This study aims to develop cassava starch-based biofilms as environmentally friendly packaging by optimizing the formulation of carboxymethyl cellulose (CMC) and glycerol. The research employs cassava starch as the primary matrix, CMC as a filler to enhance mechanical properties, and glycerol as a plasticizer to improve the flexibility of the biofilm. The research methods include cassava starch extraction, mixing of materials with stirring and heating, and drying the gel into a biofilm. The biofilm's characteristics were analyzed through tensile strength and elongation tests. The results showed that the formula with a cassava starch concentration of 15 grams, 1% CMC, and 6% glycerol yielded the highest tensile strength value of 1.56 MPa, meeting the Japanese Industrial Standard (JIS) for edible films (≥ 0.392 MPa). The best elongation value reached 199.6%, demonstrating excellent flexibility according to JIS and Indonesian National Standards (SNI). This study indicates that the appropriate combination and concentration of materials can produce biofilms with the potential to replace conventional plastics, support environmental sustainability, and optimally utilize local resources.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

[*] Penulis korespondensi
Email : siti.munfarida@lecturer.itk.ac.id
DOI 10.21107/agrointek.v20i1.28410

PENDAHULUAN

Plastik telah menjadi bahan utama dalam berbagai kebutuhan sehari-hari, terutama sebagai kemasan makanan, karena memiliki keunggulan yaitu ringan, murah, tahan lama dan mudah dibentuk (Pramiati 2016). Penggunaan yang terus-menerus ini menjadi permasalahan lingkungan di dunia pada umumnya dan di Indonesia khususnya yaitu limbah plastik. Selain Tiongkok, Indonesia adalah negara pembuang sampah plastik terbesar ke laut. Menurut data sistem informasi pengelolaan sampah nasional (SIPSN), timbulan sampah di Indonesia pada tahun 2023 sebesar 69,9 juta ton. Berdasarkan komposisi sampah yang ada di Indonesia, didominasi oleh sampah sisa makanan sebesar 41,60% dan sampah plastik sebesar 18,71%. Sampah plastik yang dibuang sembarangan dapat meyumbat saluran air dan bahkan menumpuk di pintu-pintu sungai sehingga mengakibatkan banjir. Plastik yang ditimbun di tanah juga sulit terdegradasi sehingga membutuhkan waktu puluhan bahkan ratusan tahun. Pembakaran limbah plastik meningkatkan risiko penyakit jantung, memperburuk gangguan pernapasan seperti asma dan emfisema, serta menyebabkan ruam, mual, atau sakit kepala, serta merusak sistem saraf. Oleh karena itu, langkah berkelanjutan menuju lingkungan yang lebih bersih dan sehat di masa depan memerlukan perhatian (Rinku et al. 2016)

Salah satu solusi pemecahan masalah ini adalah dengan mengganti bahan dasar plastik konvensional tersebut menjadi bahan yang mudah diuraikan oleh bakteri pengurai, yang disebut dengan plastik *biodegradable* (bioplastik). Keuntungan dari bioplastik ini sangat jelas, yaitu mengurangi limbah plastik yang semakin lama jumlahnya semakin bertambah. Bioplastik dirancang untuk memudahkan proses degradasi terhadap reaksi enzimatis mikroorganisme seperti bakteri dan jamur (Muhammad et al. 2018).

Salah satu bahan yang dapat digunakan sebagai bahan membuat bioplastik adalah pati. Pati adalah salah satu biopolimer *biodegradable* yang paling melimpah dari sumber daya terbarukan; pati juga memiliki sifat termoplastik yang dapat disesuaikan, cocok untuk berbagai aplikasi di bidang pertanian. Kinerja fungsional pati seperti sifat fisikomekanik, penghalang, dan kimia permukaan dapat diubah untuk aplikasi pertanian yang lebih luas (Ashoka et al. 2022).

Pati merupakan polisakarida tumbuhan yang paling populer untuk pembentukan bioplastik karena ketersediaannya yang melimpah, biaya yang terjangkau, dan kemampuan pembentukan film yang sangat baik (Rahul et al. 2019). Salah satu bahan untuk membuat bioplastik adalah pati yang berasal dari umbi-umbian. Jumlah umbi-umbian di Indonesia sangat melimpah sehingga pati cocok sebagai bahan baku alternatif pembuatan plastik (Agung et al. 2017). Pati singkong (tapioka) mengandung sekitar 17% amilosa dan 83% amilopektin (Irawan et al.2017). Kestabilan *edible film* dipengaruhi dengan adanya amilopektin, sedangkan amilosa mempengaruhi kekompakannya (Muin et al. 2017). Di samping itu, penelitian ini memilih pati yang berasal dari singkong karena ketersediaannya melimpah di Balikpapan dan sekitarnya sehingga tidak mengganggu ketersediaan pangan. Tercatat ketersediaan ubi kayu di Balikpapan sebanyak 435 ton pada tahun 2022 dan meningkat menjadi 16.192 ton pada tahun 2023, dengan persen pertumbuhan sebesar 362,2% (BPS, 2023). Berdasarkan data dari BPS Kota Balikpapan tersebut, singkong (ubi kayu) merupakan salah satu tanaman umbi-umbian yang memiliki potensi besar di sektor pertanian lokal. Singkong mudah dibudidayakan dan tersedia melimpah karena cocok dengan kondisi geografis dan iklim Balikpapan, menjadikannya sumber pati yang strategis untuk dimanfaatkan. Singkong telah lama dimanfaatkan sebagai sumber pangan, baik dalam bentuk tepung tapioka, pati, maupun produk olahan seperti kerupuk dan mi, namun belum sampai menjadi bahan pangan pokok. Dengan sifat biodegradabel dan ketersediaan yang melimpah, pati singkong dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi *biofilm* tanpa mengganggu pemanfaatannya sebagai bahan pangan utama.

Biodegradable film yang berasal dari tanaman karbohidrat kompleks seperti pati memiliki sifat mekanik yang tidak terlalu bagus sehingga perlu ditambahkan bahan yang dapat memperbaiki sifat mekanik pada *biodegradable film* yang dibuat. Penambahan zat yang berfungsi sebagai *filler,* seperti *Carboxy Methyl Cellulose* (CMC), dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik. CMC, sebagai selulosa eter, mampu membentuk film yang sangat baik karena struktur rantai polimernya yang panjang dan berat molekulnya yang cukup tinggi (Putri et al. 2018). CMC memiliki beberapa sifat diantaranya yaitu *biodegradable*, tidak beracun, dan larut dalam air.

CMC dapat menunjukkan sifat gelasi yang artinya dapat berperan sebagai pengental, penstabil, pengikat serta pembentuk tekstur halus dengan tujuan untuk meningkatkan karakteristik mekanis dari *edible film* yang dibentuk serta mampu berikatan dengan air sehingga meminimalkan pengerutan pada plastik atau meningkatkan kemampuan pengikatan air (Warkoyo et al. 2021).

Selulosa memiliki nilai kuat tarik yang tinggi tetapi *biofilm* yang dihasilkan cenderung bersifat kaku (Yusuf et al. 2024). Penambahan *plasticizer* yang berfungsi untuk memberikan sifat elastis pada *biodegradable film*, mengurangi kerapuhan karena sifatnya yang kaku, meningkatkan fleksibilitas serta ketahanan *biofilm* yang dibuat terutama saat disimpan pada suhu yang relatif rendah. *Plasticizer* yang digunakan dalam penelitian ini adalah gliserol yang dipilih karena efektif dan memiliki kemampuan yang bagus untuk mengurangi ikatan hidrogen internal pada ikatan intermolekuler. *Plasticizer* memiliki volatilitas yang rendah, apabila ditambahkan akan memberikan sifat fleksibilitas dan elastisitas rantai polimer pada *edible film* yang dihasilkan (Kristiani 2015). Menurut Fahrullah et al. (2023) gliserol meningkatkan fleksibilitas dan kekuatan tarik *biofilm* berbasis pati dibandingkan dengan sorbitol atau *polyethyelene glycol* (PEG). Namun sampai saat ini, belum ada penelitian yang memberikan komposisi optimal penggunaan gliserol, CMC dan pati singkong untuk mendapakan *bioplastic* dengan sifat mekanik yang terbaik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan formula gliserol dan CMC dalam pembuatan *biodegradable film* berbasis pati singkong (plastik yang ramah lingkungan). *Biofilm* diharapkan menjawab masalah sosial yang sejalan dengan tujuan ke-12 SDGs yaitu penanganan dan pengurangan sampah kemasan yang terus dihasilkan setiap hari. Menggunakan pati singkong lokal yang melimpah, *biofilm* yang dihasilkan diharapkan memiliki sifat mekanik yang baik serta daya serap air yang rendah, sehingga dapat menjadi alternatif kemasan makanan yang ramah lingkungan sekaligus mendukung pemanfaatan sumber daya lokal.

METODE

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan adalah pati singkong yang diekstraksi dari singkong segar. Singkong yang digunakan yaitu yang sudah tua karena memiliki kadar pati tinggi. Gliserol digunakan sebagai *plasticizer* untuk memberikan fleksibilitas pada *edible film*, CMC sebagai *filler*, dan serta bahan tambahan lain seperti aquades juga diperlukan dalam proses pembuatan larutan film.

Tabel 1 Variabel Penelitian

Variable	Kombinasi Formula		
	Pati Singkong (g)	CMC (%)	Gliserol (ml)
1	5	1	6
2	5	2	6
3	5	3	6
4	5	1	9
5	5	2	9
6	5	3	9
7	5	1	12
8	5	2	12
9	5	3	12
10	10	1	6
11	10	2	6
12	10	3	6
13	10	1	9
14	10	2	9
15	10	3	9
16	10	1	12
17	10	2	12
18	10	3	12
19	15	1	6
20	15	2	6
21	15	3	6
22	15	1	9
23	15	2	9
24	15	3	9
25	15	1	12
26	15	2	12
27	15	3	12

Penelitian ini menggunakan peralatan antara lain parutan singkong manual dari *stainless steel*, kain saring katun, dan baskom plastik 10 liter untuk ekstraksi pati. Oven laboratorium (50 liter, suhu hingga 250°C) dan blender (kapasitas 2 l) digunakan untuk pengeringan dan pelumatan pati. Pembuatan *biofilm* menggunakan *beaker glass* (500 ml), *hot plate* (hingga 300°C), *magnetic stirrer* 3 cm, dan stirring rod kaca. Untuk analisis sifat mekanik, digunakan *tensile strength* Shimadzu.

Percobaan dalam penelitian ini disusun menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan tiga faktor perlakuan yakni jumlah pati singkong,

penambahan gliserol dan penambahan CMC. Faktor pertama yaitu jumlah pati singkong (A) dengan 3 taraf perlakuan yaitu A1 (5 g), A2 (10 g), A3 (15 g). Faktor kedua adalah penambahan gliserol (B) dengan 3 taraf perlakuan, yang terdiri atas B1 (6 ml), B2 (9 ml), dan B3 (12 ml). Sedangkan faktor ketiga yaitu penambahan CMC (C) dengan 3 taraf perlakuan, yang terdiri atas C1 (1%), C2 (2%), dan C3 (3%). Variabel tersebut disusun menjadi rancangan penelitian sebagaimana Tabel 1.

Prosedur Penelitian

Pembuatan pati singkong

Singkong dipisahkan dari kulitnya selanjutnya dicuci bersih dan dipotong kubus kurang lebih 2 cm, lalu dihaluskan menggunakan blender hingga halus. Bubur yang dihasilkan dikeringkan dengan cara dijemur di bawah sinar matahari selama 3 hari ditempat yang bersih dan terhindar dari kontaminasi. Pengeringan dilakukan hingga kadar air 8-10%. Jika sudah kering dihaluskan kembali menggunakan blender dan diayak menggunakan ayakan 80 mesh.

Pembuatan biodegradable film

Pati singkong sejumlah 3,5 g dilarutkan dalam *aquadest* 100 ml dan diaduk dengan *magnetic stirrer* sambil dipanaskan dengan *hot plate* pada 70 ºC dengan pengadukan tetap dilakukan. Setelah berbentuk gel, ditambahkan gliserol atau asam sitrat sejumlah 1,75 g. Gel dicetak pada cawan petri dan dikeringkan dalam oven pada suhu 60 ºC selama 23 jam. Kemudian didinginkan dalam eksikator selama 2-3 hari dan disimpan dalam wadah plastik berisi silica gel untuk selanjutnya dianalisa karakteristik fisik dan kimianya.

Uji Kuat Tarik

Kuat tarik merupakan tarikan maksimum yang dapat dicapai sampai film dapat tetap bertahan sebelum putus. Pengukuran *tensile strength* dilakukan untuk mengetahui besarnya gaya yang dicapai untuk mencapai tarikan maksimum pada setiap satuan luas area film untuk merenggang atau memanjang (Rozanna et al. 2021). Pengukuran dilakukan menggunakan alat *tensile strength* Shimadzu.

Uji Persen Pemanjangan

Persen pemanjangan mempresentasikan kemampuan bioplastik untuk merenggang secara maksimum. Pengujian elongasi ini menggunakan alat uji tarik *Stress Analyzer* 1000. Pemanjangan putus dari bioplastik biasanya berbanding terbalik dengan hasil kuat tarik. Menurut Sri (2019), persen pemanjangan dinyatakan dalam presentase, dengan Persamaan 1.

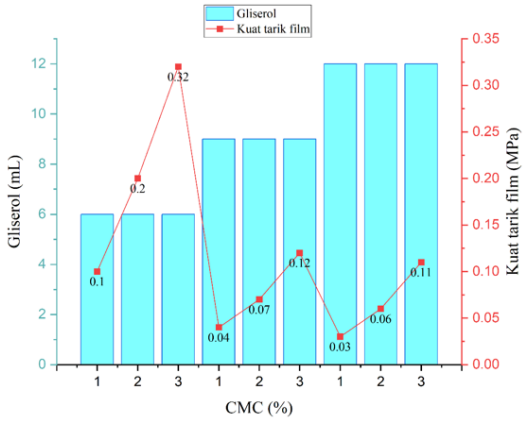
$$Persen\ pemanjangan(\%) = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:
l = Panjang akhir (mm)
l_0 = Panjang awal (mm)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kuat Tarik

Karakteristik mekanik menunjukkan respon plastik terhadap perlakuan mekanik seperti pemberian beban yang digambarkan dengan nilai kuat tarik dan elongasi (Intandiana et al. 2019). Nilai kuat tarik kemasan plastik menggambarkan beban maksimum yang dapat ditahan sehingga semakin tinggi nilai kuat tarik, maka semakin kuat kemasan plastik dalam menahan beban, sedangkan nilai elongasi menggambarkan perubahan panjang kemasan plastik setelah diberikan beban yang dinyatakan dalam persentase (Intandiana et al. 2019). Adapun hasil data penelitian pengaruh kombinasi formula pati singkong, CMC, dan gliserol terhadap kuat tarik yang disajikan dalam Gambar 1.



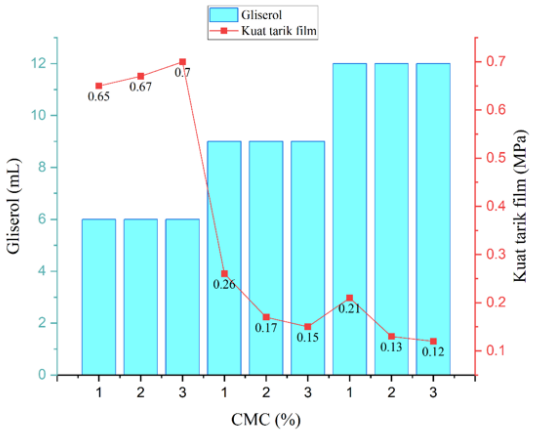
Gambar 1 Grafik pengaruh kombinasi formula CMC dan gliserol terhadap uji kuat tarik film dengan konsentrasi pati singkong 5 g

Berdasarkan hasil pada Gambar 1 menunjukkan bahwa pada pati singkong 5 g, uji kuat tarik menunjukkan nilai tertinggi sebesar 0,32 MPa untuk kombinasi 3% CMC dan 6 ml gliserol. Berdasarkan hasil data penelitian, peningkatan konsentrasi CMC memperkuat matriks film karena sifatnya yang mampu membentuk jaringan polimer yang kokoh. CMC adalah polimer hidrofilik dengan struktur molekul

panjang dan fleksibel. Saat ditambahkan ke *biofilm*, CMC berfungsi sebagai pendukung yang memperkuat jaringan polimer dalam matriks *biofilm*. Hal ini membantu meningkatkan keterikatan antar molekul, sehingga struktur film menjadi lebih kuat (Dewi et al. 2023). Penambahan CMC dapat memperkuat ikatan hidrogen antara molekul-molekul ekstraseluler dalam *biofilm* karena gugus hidroksil (-OH) pada CMC. CMC berinteraksi dengan rantai molekul pati melalui ikatan hidrogen, membentuk matriks polimer yang lebih terorganisir. Matriks yang terstruktur ini memiliki kemampuan untuk menahan beban lebih baik, sehingga meningkatkan nilai kuat tarik. CMC adalah polimer hidrofilik yang dapat memodifikasi viskositas matriks *biofilm*. Hal ini dapat memengaruhi interaksi molekuler, membuat *biofilm* lebih padat dengan meningkatkan jumlah ikatan hidrogen. Struktur yang lebih padat, film menjadi lebih kokoh dan tahan terhadap gaya tarik atau elastisitas menurun (Rozanna et al. 2021).

Penambahan gliserol lebih dari 6 mL cenderung menurunkan nilai kuat tarik secara signifikan. Gliserol sebagai *plasticizer* meningkatkan fleksibilitas film tetapi mengurangi kekuatan tariknya karena melemahkan ikatan antar molekul dalam matriks. Film dengan pati 5 g memiliki matriks yang kurang padat, sehingga lebih rentan terhadap penurunan kuat tarik dengan penambahan gliserol yang berlebihan. Pada film berbasis pati dengan kandungan *plasticizer* yang tinggi, kekuatan tarik cenderung menurun karena peningkatan elastisitas (Muhammed et al. 2015).

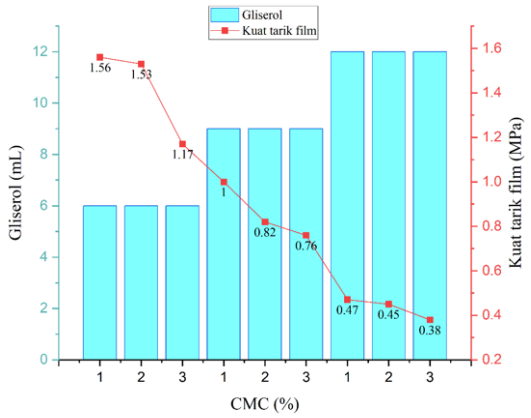
Berdasarkan grafik pada Gambar 2 menujukkan bahwa pada pati singkong 10 g, nilai kuat tarik tertinggi mencapai 0,7 MPa pada kombinasi 3% CMC dan 6 ml gliserol. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan pati 5 g karena konsentrasi pati yang lebih besar menghasilkan matriks film yang lebih padat. Pada pati 5 g, penambahan gliserol lebih dari 6 ml menurunkan kekuatan tarik yang besar hingga nilai terendah sebesar 0,12 MPa pada kombinasi 3% CMC dan 12 ml gliserol. Hal ini terjadi karena peningkatan gliserol melebihi tingkat optimal menciptakan matriks yang lebih fleksibel tetapi kurang kokoh.



Gambar 2 Grafik pengaruh kombinasi formula CMC dan gliserol terhadap uji kuat tarik film dengan konsentrasi pati singkong 10 g

Berdasarkan data penelitian pada titik pertama sampai dengan ketiga (pati 10 g, gliserol 6 ml, CMC 1-3%) keberadaan CMC meningkatkan nilai uji kuat tarik. Hal ini dikarenakan pada konsentrasi pati yang rendah, CMC bertindak sebagai *filler* yang memperkuat jaringan polimer dengan membentuk ikatan hidrogen antara molekul CMC dan rantai amilosa dalam pati. CMC dapat meningkatkan kekuatan tarik dengan mengisi celah-celah dalam matriks polimer, sehingga menciptakan struktur yang lebih rapat dan kuat. Konsentrasi gliserol yang rendah (6%) menjaga jaringan polimer tetap kokoh karena tidak terjadi pelemahan berlebihan akibat sifat *plasticizer* gliserol. Hal ini memungkinkan CMC untuk memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan tarik. Pada titik ke 4-6 dan 7-9 terjadi sebaliknya, penambahan CMC justru menyebabkan penurunan kuat tarik. Hal ini dikarenakan oleh pengaruh gliserol dan CMC. Pada konsentrasi gliserol yang lebih tinggi, sifat plastis mulai mendominasi, menyebabkan pelemahan jaringan polimer karena meningkatnya mobilitas rantai polimer. Gliserol yang berlebihan juga dapat mengurangi efek penguatan CMC, dimana penambahan *plasticizer* dalam jumlah besar menyebabkan degradasi kekuatan mekanik film (Sanyang et al., 2016). Ketika pati singkong berada pada konsentrasi tinggi, matriks film menjadi lebih kaku karena dominasi jaringan amilosa. Penambahan CMC yang terlalu banyak pada kondisi ini dapat mengganggu homogenitas struktur, menciptakan area lemah yang menurunkan kekuatan tarik secara keseluruhan. Ini sejalan dengan penelitian Mali et al. (2005), yang menunjukkan bahwa konsentrasi *filler* yang

tinggi dalam matriks pati dapat menyebabkan fase tidak kompatibel, sehingga mengurangi sifat mekanik. Perbedaan hasil ini menunjukkan adanya batas optimal konsentrasi CMC yang tergantung pada proporsi pati singkong dan gliserol. Pada konsentrasi pati rendah dan gliserol rendah, CMC dapat memberikan penguatan tambahan tanpa mengganggu struktur. Pada kondisi pati dan gliserol yang lebih tinggi, CMC cenderung memperburuk kekompakan jaringan polimer.



Gambar 3 Grafik pengaruh kombinasi formula CMC dan gliserol terhadap uji kuat tarik film dengan konsentrasi pati singkong 15 g

Berdasarkan grafik pada Gambar 3 menujukkan bahwa ada pati singkong 15 g, nilai kuat tarik film mencapai puncaknya, yaitu 1,56 MPa pada kombinasi 1% CMC dan 6 ml gliserol. Film dengan konsentrasi pati tertinggi memiliki matriks yang paling padat dan stabil, memberikan kekuatan mekanik yang lebih baik. Penambahan gliserol melebihi 6 ml menurunkan kuat tarik secara signifikan, dengan nilai terendah sebesar 0,38 MPa pada kombinasi 3% CMC dan 12 ml gliserol. Penurunan ini disebabkan oleh efek *plasticizer* gliserol yang melemahkan jaringan polimer yang lebih rapat pada konsentrasi pati tinggi. Peningkatan densitas matriks akibat kandungan polimer yang tinggi meningkatkan kekuatan tarik, tetapi sifat ini dapat terganggu oleh *plasticizer* dalam jumlah berlebih (Ma et al. 2017). Selain itu, pada konsentrasi pati singkong yang tinggi, CMC bersifat menurunkan nilai kuat tarik hal ini dikarenakan ketika jumlah pati sangat tinggi, rantai polimer pati mendominasi matriks *biofilm*. Hal ini dapat membatasi ruang bagi molekul CMC untuk berinteraksi optimal dengan pati. Akibatnya, peran CMC sebagai penguat jaringan polimer menjadi kurang efektif. Sehingga ketika jumlah pati terlalu dominan, molekul CMC tidak lagi cukup untuk membentuk jaringan polimer yang terdistribusi secara merata. Hal ini menyebabkan lemahnya struktur *biofilm*.

Pada hasil penlitian, dapat diperoleh bahwa pengaruh pati dapat meningkatkan nilai kuat tarik *biodegradable film* karena jumlah pati yang lebih tinggi menghasilkan matriks yang lebih rapat dan lebih kuat secara mekanik. Pati singkong merupakan biopolimer yang memiliki kemampuan signifikan dalam meningkatkan nilai uji kuat tarik (*tensile strength*) pada biofilm (Elza, 2020). Hal ini terjadi karena struktur molekul pati kaya akan gugus hidroksil (-OH), yang mampu membentuk ikatan hidrogen kuat antara molekul pati itu sendiri serta dengan komponen lain seperti CMC dan gliserol (Dedin 2021). Ikatan hidrogen ini menghasilkan matriks polimer yang kokoh, memberikan ketahanan mekanik yang lebih baik pada *biofilm*. Peningkatan jumlah molekul pati dalam biofilm, seiring bertambahnya konsentrasi pati dari 5 g ke 10 g, lalu ke 15 g, memperkuat densitas matriks film. Struktur yang lebih rapat ini memberikan dukungan mekanik yang lebih besar dan meningkatkan kemampuan film untuk menahan tegangan tarik. Kontribusi amilosa dalam pati juga berperan penting dalam peningkatan nilai kuat tarik, karena sifat liniernya memungkinkan pembentukan gel yang kuat dan interaksi yang efektif dengan filler (CMC) dan *plasticizer* (gliserol). Pada konsentrasi pati 5 g, matriks biofilm masih relatif lemah karena jumlah molekul pati yang rendah. Namun, ketika konsentrasi pati meningkat menjadi 10 g, matriks biofilm menjadi lebih stabil, sehingga kuat tarik meningkat signifikan. Pada konsentrasi 15 g, matriks yang lebih padat mampu menghasilkan film dengan kekuatan tarik yang optimal, karena struktur film lebih terisi oleh molekul pati. Selain itu, interaksi pati dengan CMC membantu mengisi ruang kosong dalam matriks, sementara gliserol menjaga fleksibilitas film tanpa terlalu banyak mengorbankan kekuatan tarik.

Namun, meskipun peningkatan konsentrasi pati umumnya memberikan efek positif pada kuat tarik, ada batasan tertentu. Konsentrasi pati yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kekakuan yang berlebihan, sehingga film menjadi rapuh dan kurang mampu menahan deformasi. Selain itu, pada kadar pati yang sangat tinggi, interaksi dengan *filler* dan *plasticizer* dapat terganggu, sehingga distribusi komponen dalam matriks menjadi tidak merata. Pada konsentrasi pati

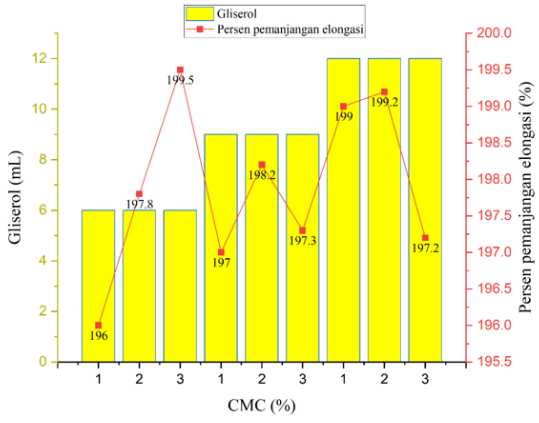
rendah penelitian (Gambar 1) keberadaan CMC meningkatkan nilai uji kuat tarik dikarenakan CMC bertindak sebagai *filler* yang memperkuat jaringan polimer dengan membentuk ikatan hidrogen antara molekul CMC dan rantai amilosa dalam pati. CMC dapat meningkatkan kekuatan tarik dengan mengisi celah-celah dalam matriks polimer, sehingga menciptakan struktur yang lebih rapat dan kuat. Konsentrasi gliserol yang rendah (6%) menjaga jaringan polimer tetap kokoh karena tidak terjadi pelemahan berlebihan akibat sifat *plasticizer* gliserol. Hal ini memungkinkan CMC untuk memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan tarik. Pada konsentrasi pati tinggi (Gambar 2 dan 3) di mana konsentrasi pati singkong meningkat menjadi 10% dan 15%, terjadi sebaliknya. Saat konsentrasi gliserol naik hingga 9% atau 12%, penambahan CMC justru menyebabkan penurunan kuat tarik. Hal ini dikarenakan oleh pengaruh gliserol dan CMC. Pada konsentrasi gliserol yang lebih tinggi, sifat *plasticizer*-nya mulai mendominasi, menyebabkan pelemahan jaringan polimer karena meningkatnya mobilitas rantai polimer. Gliserol yang berlebihan juga dapat mengurangi efek penguatan CMC (Sanyang et al. 2016), dimana penambahan *plasticizer* dalam jumlah besar menyebabkan degradasi kekuatan mekanik film. Serta ketika pati singkong berada pada konsentrasi tinggi, matriks film menjadi lebih kaku karena dominasi jaringan amilosa. Penambahan CMC yang terlalu banyak pada kondisi ini dapat mengganggu homogenitas struktur, menciptakan area lemah yang menurunkan kekuatan tarik secara keseluruhan. Ini sejalan dengan penelitian (Mali et al. 2005), yang menunjukkan bahwa konsentrasi *filler* yang tinggi dalam matriks pati dapat menyebabkan fase tidak kompatibel, sehingga mengurangi sifat mekanik. Perbedaan hasil ini menunjukkan adanya batas optimal konsentrasi CMC yang tergantung pada proporsi pati singkong dan gliserol. Pada konsentrasi pati rendah dan gliserol rendah, CMC dapat memberikan penguatan tambahan tanpa mengganggu struktur. Pada kondisi pati dan gliserol yang lebih tinggi, CMC cenderung memperburuk kekompakan jaringan polimer.

Penambahan konsentrasi gliserol justru menghasilkan nilai kuat tarik yang semakin rendah. Peningkatan konsentrasi gliserol sebagai *plasticizer* mengakibatkan adanya interaksi dengan membentuk ikatan hidrogen dalam rantai ikatan antara polimer sehingga menyebabkan ikatan antar molekul biopolimer menjadi semakin berkurang, hal ini menyebabkan berkurangnya kekuatan tarik *edible film* dengan adanya penambahan *plasticizer* yang terlalu tinggi (Yuli et al. 2017). Hal ini mengakibatkan elastisitas suatu *edible film* meningkat, sehingga gaya yang dibutuhkan untuk menarik *edible film* hingga putus semakin kecil. Cornelia et al. (2012) juga melaporkan bahwa pada peningkatan konsentrasi gliserol pada *edible film* berbasis pati singkong akan melemahkan struktur polimer pati sehingga interaksi antar molekul akan menurun.

Pada penambahan pati singkong 5 g, peningkatan kuat tarik disebabkan oleh kemampuan CMC untuk memperkuat struktur polimer tanpa gangguan dari *plasticizer* berlebihan. Sebaliknya, pada penambahan pati singkong 10 g dan 15 g, efek dominan gliserol yang melemahkan serta matriks pati yang lebih kaku menyebabkan penurunan kuat tarik meskipun ada penambahan CMC. Dengan demikian, formulasi optimal memerlukan keseimbangan antara *plasticizer*, *filler*, dan matriks pati untuk memaksimalkan sifat mekanik *biodegradable film*.

Analisis Persen Pemanjangan (Elongasi)

Pemanjangan didefinisikan sebagai persentase perubahan panjang film pada saat film ditarik sampai putus (Maruddin et al. 2020). Adapun hasil data penelitian pengaruh kombinasi formula pati singkong, CMC, dan gliserol terhadap persen pemanjangan (elongasi) yang disajikan dalam Gambar 4 berikut.

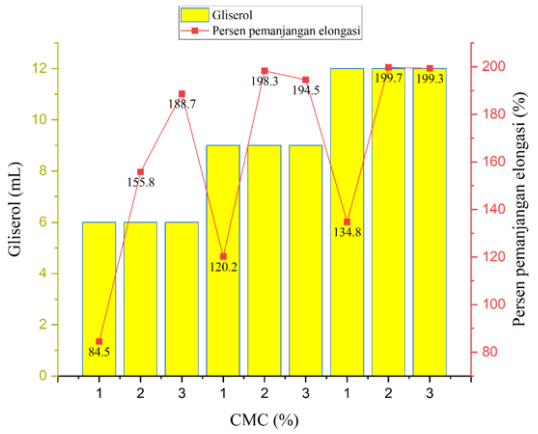


Gambar 4 Pengaruh kombinasi formula CMC dan gliserol terhadap uji persen pemanjangan film dengan konsentrasi pati singkong 5 g

Pada variabel pati singkong 5 g, peningkatan CMC dari 1% ke 3% meningkatkan nilai persen pemanjangan film dari 196% menjadi 199,5%. Hal ini disebabkan oleh kemampuan CMC dalam membentuk jaringan polimer yang lebih kuat dan stabil melalui ikatan hidrogen dengan molekul pati. Jaringan yang lebih terorganisasi mendistribusikan tegangan secara merata saat film ditarik, sehingga meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan pemanjangan. Pada variabel 6 dan 9, ketika konsentrasi CMC mencapai 3% dan gliserol masing-masing 9 ml dan 12 ml, persen pemanjangan justru menurun menjadi 197,3% dan 197,2%. Penurunan ini terjadi karena jumlah CMC yang berlebihan dapat menyebabkan kekakuan matriks, yang mengurangi fleksibilitas film. Katiany et al. (2020) menyebutkan bahwa peningkatan CMC yang terlalu tinggi dapat menghasilkan matriks yang terlalu rapat, sehingga mengurangi deformasi elastis film saat diberi tegangan.

Ketika gliserol ditambahkan pada konsentrasi CMC 1% dan 2%, mengakibatkan *elongasi* meningkat, seperti terlihat pada kombinasi gliserol 6 ml hingga 9 ml. Hal ini karena gliserol sebagai *plasticizer* meningkatkan mobilitas rantai molekul dalam matriks polimer, yang melunakkan struktur dan mempermudah pergeseran molekul selama pemanjangan. Pada konsentrasi CMC 3% (Gambar 4, titik 6 dan 9), penambahan gliserol malah menurunkan nilai persen pemanjangan. Penurunan ini disebabkan oleh ketidakseimbangan antara efek pelunakan gliserol dan penguatan jaringan yang berlebihan akibat CMC tinggi. Matriks yang terlalu kaku dari CMC 3% menjadi sulit untuk melentur meskipun terdapat gliserol, sehingga elongasi menurun. Menurut Warkoyo et al. (2021), semakin kuat *edible film* yang terbentuk maka akan semakin sulit bagi *edible film* untuk memanjang sehingga dapat memperkecil nilai presentase pemanjangan *edible film* tersebut karena efek pelunakannya menjadi terbatas.

Peran pati singkong pada variabel 5 g adalah sebagai bahan dasar pembentuk matriks polimer film. Dalam konsentrasi rendah seperti ini, pati menyediakan molekul amilosa yang membentuk jaringan polimer linier untuk kekuatan mekanik, sementara amilopektin yang bercabang memberikan fleksibilitas. Pada konsentrasi rendah ini, matriks film cenderung kurang padat, sehingga pengaruh dari CMC dan gliserol menjadi lebih dominan. Penelitian oleh Ma et al. (2017) menunjukkan bahwa pada konsentrasi pati rendah, aditif seperti CMC dan gliserol memiliki peran besar dalam menentukan sifat mekanik dan fleksibilitas film. Dengan demikian, matriks pati yang longgar pada 5 g memberikan dasar yang ideal bagi kombinasi CMC dan gliserol untuk memaksimalkan efek pelunakan dan penguatan, tetapi juga lebih rentan terhadap perubahan sifat mekanik jika salah satu komponen ditambahkan secara berlebihan.



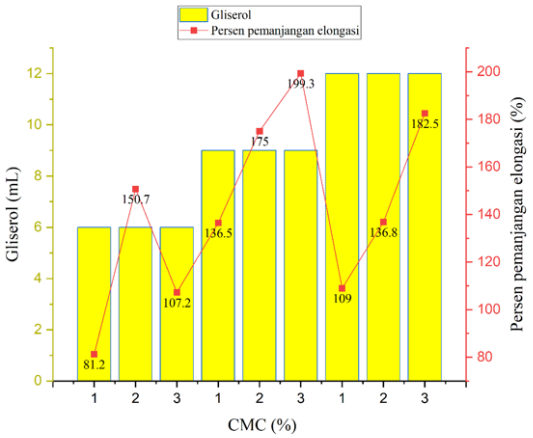
Gambar 5 Pengaruh kombinasi formula CMC dan gliserol terhadap uji persen pemanjangan film dengan konsentrasi pati singkong 10 g

Pada data pati singkong 10 g, penambahan gliserol selalu meningkatkan nilai persen pemanjangan tanpa menunjukkan penurunan di seluruh variabel. Hal ini berbeda dengan pola pada pati 5 g karena matriks film pada pati 10 g lebih padat dan terorganisasi. Konsentrasi pati yang lebih tinggi menyediakan molekul amilosa dan amilopektin dalam jumlah lebih banyak, sehingga film memiliki struktur yang lebih kuat dan fleksibel secara bersamaan. Dalam kondisi ini, gliserol sebagai *plasticizer* mampu melunakkan jaringan polimer tanpa menyebabkan kelemahan struktural yang signifikan. Penelitian oleh Deivy et al. (2024) menyebutkan bahwa Semakin banyak penambahan gliserol maka nilai kuat tariknya akan semakin rendah, sedangkan nilai elongasi semakin meningkat. Peningkatan perpanjangan atau elongasi terjadi karena adanya penambahan bahan aktif yang semakin besar dapat mengakibatkan peregangan ruang intermolekul bioplastik dan menurunkan jumlah ikatan hidrogen internal, sehingga mengurangi kerapuhan bioplastik dan meningkatkan persen pemanjangan.

Pada penambahan pati 10 g peningkatan konsentrasi CMC dari 1% ke 3% meningkatkan nilai elongasi dari 84,5% menjadi 188,7%. Hal ini disebabkan oleh kemampuan CMC untuk memperkuat jaringan polimer melalui ikatan hidrogen dengan molekul pati, sehingga menciptakan matriks yang fleksibel tetapi tetap stabil saat diberi tegangan. Pada variabel 13–15 (CMC 1–3% dengan gliserol 9 ml), nilai elongasi awalnya meningkat dari 120,2% ke 198,3% (CMC 1–2%), tetapi kemudian menurun menjadi 194,5% pada CMC 3%. Penurunan ini terjadi karena konsentrasi CMC yang terlalu tinggi menciptakan jaringan polimer yang terlalu rapat, sehingga fleksibilitas film menurun meskipun gliserol telah ditambahkan. Katiany et al. (2020) menjelaskan bahwa peningkatan konsentrasi CMC yang berlebihan dapat menghasilkan matriks yang kaku, mengurangi kemampuan deformasi elastis film.

Polanya serupa penambahan pati 10 g, CMC 1–3% dengan gliserol 12 ml, pada CMC 1% dan 2%, elongasi meningkat menjadi 199,7% (tertinggi pada kombinasi ini), karena efek sinergis antara gliserol dan CMC yang menciptakan matriks film yang optimal. Namun, pada CMC 3%, elongasi turun menjadi 199,3% karena kekakuan yang dihasilkan oleh matriks CMC yang rapat mengurangi kemampuan pelunakan dari gliserol. Penelitian oleh Sanyang et al. (2016) menyebutkan bahwa interaksi antara polimer dan *plasticizer* harus seimbang untuk mencapai elongasi optimal, terlalu banyak polimer seperti CMC dapat mengurangi efektivitas *plasticizer*.

Peran pati singkong pada penambahan 10 g sangat penting karena membentuk dasar matriks polimer yang lebih padat dibandingkan pada 5 g. Molekul amilosa memberikan kekuatan mekanik melalui pembentukan jaringan linier, sementara amilopektin memberikan fleksibilitas melalui struktur bercabang. Pada konsentrasi ini, pati memberikan keseimbangan ideal antara kekuatan dan fleksibilitas, sehingga efek kombinasi CMC dan gliserol dapat bekerja optimal. Penelitian oleh Ma et al. (2017) menunjukkan bahwa konsentrasi polimer yang cukup tinggi, seperti pada 10 g pati singkong, menciptakan matriks film yang lebih stabil secara mekanik, mendukung kinerja terbaik dari *plasticizer* dan *filler*. Oleh karena itu, pati singkong 10 g menjadi fondasi yang baik untuk menghasilkan film dengan elongasi tinggi yang stabil dan konsisten.



Gambar 6 Pengaruh kombinasi formula CMC dan gliserol terhadap uji persen pemanjangan film dengan konsentrasi pati singkong 15 g

Pada data pati singkong 15 g, gliserol dengan konsentrasi 6, 9, dan 12 ml selalu menurunkan nilai elongasi ketika dikombinasikan dengan CMC 3%, berbeda dengan pola pada CMC 1% dan 2% yang justru meningkatkan nilai elongasi. Penurunan elongasi ini disebabkan oleh konsentrasi CMC yang tinggi (3%) yang menciptakan matriks polimer yang terlalu rapat dan kaku. Dalam kondisi ini, efek pelunakan gliserol menjadi kurang signifikan karena jaringan matriks terlalu terikat erat, sehingga fleksibilitas film berkurang.

Pada CMC 1% dan 2%, gliserol dalam jumlah 6, 9, dan 12 ml meningkatkan nilai elongasi. Pada konsentrasi CMC yang lebih rendah, matriks polimer memiliki fleksibilitas yang cukup untuk *plasticizer* melunakkan struktur, sehingga molekul dapat bergerak lebih bebas selama pemanjangan. Gliserol, sebagai *plasticizer*, mengurangi kekakuan molekul amilosa dan meningkatkan deformasi elastis matriks yang sekaligus menyebabkan peningkatan persen pemanjangan.

Penurunan elongasi pada titik 3 (CMC 3%, gliserol 6 ml) memiliki kecenderungan yang sama pada variabel sebelumnya yaitu pati singkong 5 g (CMC 3%, gliserol 9 ml dan 12 ml), dimana kombinasi ini menghasilkan nilai elongasi yang lebih rendah dibandingkan variabel lainnya dengan CMC 3%. Hal ini disebabkan oleh ketidakseimbangan antara konsentrasi CMC yang tinggi dan jumlah gliserol yang relatif rendah (6 ml), sehingga pelunakan matriks oleh gliserol tidak cukup untuk mengimbangi kekakuan yang disebabkan oleh matriks CMC yang rapat. Dalam

kombinasi lainnya dengan CMC 3% (gliserol 9 ml atau 12 ml), jumlah gliserol yang lebih besar berhasil mengurangi kekakuan, meskipun tidak secara signifikan meningkatkan elongasi karena efek penguatan matriks tetap mendominasi.

Peran pati singkong pada penambahan pati 15 g sangat signifikan dalam membentuk matriks yang lebih padat dibandingkan pada konsentrasi 10 g. Molekul amilosa dan amilopektin dalam jumlah besar menyediakan dasar untuk pembentukan jaringan polimer yang kuat tetapi tetap elastis. Pada konsentrasi ini, pati berkontribusi pada kekuatan mekanik film sekaligus menyediakan fleksibilitas alami, memungkinkan CMC dan gliserol untuk bekerja lebih efektif. Studi Ma et al. (2017) menegaskan bahwa peningkatan konsentrasi pati menciptakan matriks yang lebih stabil secara mekanik, yang mampu menahan deformasi elastis lebih baik dengan dukungan *plasticizer* seperti gliserol.

Berdasarkan hasil data penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik *elongation break biofilm* yang dihasilkan telah memenuhi standar *Japanese Industrial Standard* (JIS) untuk *edible film*, yang menyatakan bahwa nilai *elongation break* di bawah 10% tergolong "*very bad*" dan di atas 50% tergolong "*very good*". Berdasarkan hasil yang diperoleh, semua kombinasi formulasi dalam penelitian ini menunjukkan nilai *elongation break* yang jauh di atas 50%, dengan kisaran 81,2% hingga 199,6%. Serta telah memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI) dengan standar minimal persen pemanjangan 21-220%. Hal ini mengindikasikan bahwa *biofilm* yang dihasilkan memiliki fleksibilitas yang sangat baik sesuai dengan kriteria JIS dan SNI.

Pencapaian ini menunjukkan bahwa penggunaan pati singkong sebagai matriks utama, dengan kombinasi CMC dan gliserol yang tepat, mampu menghasilkan *biofilm* yang memenuhi standar internasional untuk kemasan makanan yang fleksibel. Standar ini penting untuk memastikan bahwa *biofilm* tidak hanya bersifat *biodegradable*, tetapi juga memiliki performa mekanik yang baik untuk diaplikasikan secara praktis sebagai bahan pengemas. Pada umumnya, film yang terbuat dari pati mudah sekali rusak. Peningkatan konsentrasi bahan, akan menyebabkan peningkatan pula matrik yang terbentuk, sehingga film akan menjadi kuat. Peningkatan konsentrasi bahan juga menyebabkan penurunan rasio gliserol sebagai *plasticizer* terhadap pati, sehingga mengakibatkan penurunan *elongation film* apabila terkena gaya, yang kemudian menyebabkan film mudah patah (Barus, 2002).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah pati singkong, kadar CMC, dan volume gliserol memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai *elongation break* (%) pada *biofilm*. Pati singkong 5 g menghasilkan nilai elongasi yang tinggi karena matriks film yang longgar, sehingga efek *plasticizer* gliserol dan penguatan dari CMC menjadi lebih dominan. Namun, pada CMC 3% dan gliserol tinggi (9–12 ml), elongasi menurun akibat kekakuan matriks yang dihasilkan oleh CMC yang berlebihan. Pada pati singkong 10 g, matriks yang lebih padat dan terorganisasi menciptakan keseimbangan optimal antara kekuatan dan fleksibilitas. Gliserol selalu meningkatkan elongasi tanpa menurunkan nilai, sementara CMC meningkatkan elongasi pada konsentrasi moderat (1–2%), tetapi menurunkannya pada konsentrasi tinggi (3%) karena menghasilkan kekakuan matriks yang mengurangi fleksibilitas. Pada pati singkong 15 g, nilai elongasi tetap dipengaruhi oleh kombinasi CMC dan gliserol. Gliserol secara konsisten meningkatkan elongasi, tetapi pengaruh CMC pada konsentrasi 3% menunjukkan penurunan pada beberapa variabel, seperti saat gliserol rendah (6 ml). Hal ini disebabkan oleh interaksi yang tidak seimbang antara penguatan CMC dan pelunakan gliserol pada matriks yang sangat padat.

Secara keseluruhan, gliserol berperan sebagai *plasticize*r yang dominan dalam meningkatkan elongasi dengan melunakkan matriks film, sedangkan CMC meningkatkan kekuatan film hingga batas tertentu tetapi dapat menyebabkan kekakuan pada konsentrasi tinggi. Peran pati singkong sebagai pembentuk matriks utama memberikan fondasi bagi interaksi optimal antara CMC dan gliserol, dengan hasil elongasi tertinggi dicapai pada kombinasi konsentrasi yang seimbang.

KESIMPULAN

Gliserol meningkatkan fleksibilitas film, namun juga mengurangi kekuatan tarik dan mempengaruhi persen pemanjangan (elongasi*)*. Konsentrasi pati 10 g menciptakan keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas, sementara pada pati 15 g, interaksi CMC dan gliserol memengaruhi elongasi.

Pada konsentrasi CMC rendah (variabel 1-12), CMC bertindak sebagai *filler*, meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi dengan mengisi celah dalam matriks polimer. Namun, pada konsentrasi tinggi (variabel 13-18), kekuatan tarik dan elongasi menurun akibat dominasi sifat *plasticizer* gliserol, yang melemahkan jaringan polimer

Pada konsentrasi pati rendah, *biofilm* lebih fleksibel, dan CMC meningkatkan kekuatan tarik dengan memperkuat ikatan hidrogen. Namun, pada konsentrasi pati tinggi (10% dan 15%), matriks film menjadi lebih kaku karena dominasi amilosa, dan penambahan CMC justru menurunkan kekuatan tarik karena gangguan homogenitas

Semua kombinasi menunjukkan elongasi di atas 50%, dengan kisaran 81,2% hingga 199,6%, memenuhi kriteria fleksibilitas JIS dan SNI. Namun, kekuatan tarik *biofilm* masih di bawah standar SNI dan JIS, dengan nilai yang jauh lebih rendah dari 0,392 MPa untuk JIS dan rentang 24,7 hingga 302 MPa untuk SNI.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ITK yang telah mendanai secara penuh penelitian pada skema Riset Dosen Pemula (RDP) 2024.

DAFTAR PUSTAKA

Agung N.C.S, dan Arruum L.O., 2017. Sintesis Dan Karakterisasi Bioplastik Dari Kitosan-Pati Ganyong (Canna Edulis). Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia. Vol 2(1): 13-21. DOI : 10.20961/jkpk.v2i1.8526

Ashoka G., Anuradhi L., Asanga M., Chamila G., Sudhagar M., Othmane M., and Terrence M., 2022. Applications of Starch Biopolymers for a Sustainable Modern Agriculture. Sustainability. 14(10), 6085; https://doi.org/10.3390/su14106085

Deivy A.P., Yoni M. P, Sahadi D.I., 2024. Variasi Penambahan Gliserol Pada Pembuatan Bioplastik Limbah Cair Tahu. Jurnal Teknologi Pertanian Andalas Vol. 28, No.1, ISSN 1410-1920, EISSN 2579-4019

Dewi, S.R., Widyasanti, A. and Putri, S.H., 2023. Pengaruh Konsentrasi Pati Singkong terhadap Karakteristik Edible Film Berbahan Pati Singkong dengan Penambahan Ekstrak Daun Belimbing Wuluh. Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem, 11(2), pp. 158–167.

F Maruddin, R Malaka, S Baba, H Amqam, M Taufik and S Sabil, 2020. Brightness, elongation and thickness of edible film with caseinate sodium using a type of plasticizer. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 492 012043 DOI 10.1088/1755-1315/492/1/012043

Fahrullah F., Djoko K., Bulkaini B., Haryanto H., Baiq R.D.W., Wahid Y., Azhary N., Vebera M., 2023. The Effects of Plasticizer Types on Properties of Whey-Gelatin Films. Jurnal Biologi Tropis. 23 (3): 414 – 421. DOI: http://dx.doi.org/10.29303/jbt.v23i3.5283

Intandiana, S., Dawam, A.H., Denny, Y.R. & Septiyanto, R.F. 2019. 'Pengaruh Karakteristik Bioplastik Pati Singkong dan Selulosa Mikrokristalin Terhadap Sifat Mekanik dan Hidrofobisitas', EduChemia (Jurnal Kim. dan Pendidikan), 4(2), p. 185. doi: 10.30870/educhemia.v4i2.5953.

Irawan, Y., Wulandari, Y. W. & Karyantina, M., 2017. Kerupuk sayur dengan variasi konsentrasi bubur sawi hijau (Brassica rapa) dan rasio tepung terigu-tapioka. Jurnal Teknologi dan Industri Pangan 2(1), 1-7

Japanese Industrial Standard (JIS). 2019. General Rules of Plastic Film for Food Packaging. Tokyo: JSA.

Katiany M.T., Adriana d.C., Bruno R.L., Ana A.R., Juliano E.D.O., José M.M., 2020. Effect of carboxymethyl cellulose concentration on mechanical and water vapor barrier properties of corn starch films. Carbohydrate Polymers. Vol 246: 11652. Doi: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116521

Muhammad A., Nanik W., Sri M., 2018. Pembuatan dan Karakterisasi Bioplastik dari Pati Biji Alpukat-Kitosan dengan Plasticizer Sorbitol. Indo. J. Chem. Sci. 7 (2). doi: http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs

Muhammed L. S., Salit M. S., Mohammad J., Mohamad R. I., and Japar S., 2015. Effect of Plasticizer Type and Concentration on Tensile, Thermal and Barrier Properties of Biodegradable Films Based on Sugar Palm (Arenga pinnata) Starch. Polymers 7(6),

1106-1124; https://doi.org/10.3390/polym7061106

Muin, R., Anggraini, D., & Malau, F., 2017. Karakteristik Fisik dan Antimikroba Edible Film Dari Tepung Tapioka Dengan Penambahan Gliserol Dan Kunyit Putih‖, Jurnal Teknik Kimia, 23(3), 191–198.

Pramiati P., 2016. Upaya Mengurangi Timbulan Sampah Plastik Di Lingkungan. Indonesian Journal Of Urban And Environmental Technology, 8(2), 141-147. https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v8i2.1421

Putri, D. A., Setiawan, A., & Anggraini, P. D. 2018. Physical Properties of Edible Sorgum Starch Film Added with Carboxymethyl Cellulose. Journal Of Physical Science, 29, 185-194.

Rahul T., Penta P., Christopher J. S., Michael B., S.P. Singh., Quan V. V., 2019. Starch-based films: Major factors affecting their properties. International Journal of Biological Macromolecules. Vol. 132: 1079-1089. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190

Rinku V., Vinoda K.S., Papireddy M., Gowda A.N.S., 2016. Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review. Procedia Environmental Sciences. Volume 35: 701-708. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.069

Rozanna D., Rahmi, Nasrun, 2021. Perbaikan Sifat Mekanik Dan Laju Transmisi Uap Air Edible Film Bioplastik Menggunakan Minyak Sawit Dan Plasticizer Gliserol Berbasis Pati Sagu. Jurnal Teknologi Kimia Unimal 10 (1): 61-77

Sanyang, M.L., Sapuan, S.M., Jawaid, M., Ishak, M.R. & Sahari, J. 2016. Effect of Sugar Palm-derived Cellulose Reinforcement on the Mechanical and Water Barrier Properties of Sugar Palm Starch Biocomposite Films. BioResources, 11(2), pp. 4134-4145. doi: 10.15376/biores.11.2.4134-4145.

Sri A., 2019. Pemanjangan % Elongation Plastik Biodegradable. Fakultas Teknik Universitas Wahis Hasyim: Semarang.

Warkoyo, Ardiana D. A. T., Rista A., 2021. Karakteristik Edible Film Berbasis Gel Buah Okra (Abelmoschus Esculentus L) Dengan Penambahan Cmc (Carboxy Methyl Cellulose) Dan Gliserol. Agrointek Volume 15: 704-714

Yuli D., Ridho H., Lia L., Herti U., 2017. Pengaruh Konsentrasi Plasticizer Gliserol Terhadap Karakteristik Komposit Bioplastik Berbasis Pati Sorgum. Seminar Nasional Riset dan Industri 2016. 94-100

Yusuf E.P., Zulferiyenni, Fibra N., Susilawati, 2024. Karakteristik Biodegradable Film Berbasis Selulosa Kelobot Jagung (Zea Mays) Dengan Penambahan Gliserol Dan Carboxy Methyl Cellulose (CMC). Jurnal Agroindustri Berkelanjutan Vol. 3 (1)