

Bioplastik dari Karagenan *Kappaphycus alvarezii* dengan Penambahan *Carboxymethyl Chitosan* dan Gliserol

Yulandaris Marsa, A.B. Susanto, Rini Pramesti*

Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia
Email: rinipramesti63@gmail.com

Abstrak

Plastik sintetis yang digunakan sebagai pembungkus makanan dapat menimbulkan masalah lingkungan, karena sulit terurai sehingga menjadi sampah. Bioplastik dapat menjadi alternatif plastik komersial karena terbuat dari bahan alami sehingga mudah terurai. Berbagai bahan dasar pembuatan bioplastik telah ditemukan, salah satunya berbahan dasar karagenan. Bioplastik memiliki kekurangan seperti teksturnya yang kaku dan rapuh, sehingga perlu ditambahkan gliserol sebagai pemlastis. Bioplastik dapat terdegradasi lebih cepat sehingga perlu ditambahkan pengawet alami. Karboksimetil kitosan adalah polimer alami yang digunakan sebagai pengawet karena memiliki aktivitas antibakteri. Penelitian ini bertujuan mengetahui penambahan karboksimetil kitosan terhadap waktu degradasi bioplastik. Metode yang digunakan dalam penelitian bersifat eksperimental labolatoris. Pembuatan bioplastik menggunakan karboksimetil kitosan dengan konsentrasi 2 g, 3 g, 4 g dan 5 g, karagenan 3 g dan gliserol 1,7 ml. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh nilai ketebalan sebesar 0,25 mm – 0,82 mm, nilai kuat tarik sebesar 1,04 MPa – 1,61 MPa, uji biodegradabilitas tercepat selama 116 menit dan terlama selama 373 menit. Pemberian karboksimetil kitosan dapat mempengaruhi waktu degradasi bioplastik dan pada konsentrasi karboksimetil kitosan 5 gram dapat terdegradasi lebih lama.

Kata kunci : Bioplastik, *Kappaphycus alvarezii*, karagenan, karboksimetil kitosan

Abstract

Bioplastic of Carrageenan Kappaphycus alvarezii with Carboxymethyl Chitosan and Glycerol

The use of food wrapping plastic (synthetic) becomes waste that pollutes the environment, because its difficult to decompose. Bioplastics can be an alternative to commercial plastics because is making from natural materials so they are easily biodegradable. Various basic materials for making bioplastics have been found, one of which is carrageenan. Bioplastics have drawbacks such as their rigid and brittle texture, so additional ingredients such as glycerol are needed to be added as plasticizers. Bioplastics can be degraded more quickly, so natural preservatives need to be added. Carboxymethyl chitosan is a natural polimer that is used as a preservative because it has antibacterial activity. This study aims to determine the bioplastic characteristics of carrageenan with the addition of glycerol and carboxymethyl chitosan and to determine the appropriate concentration of carboxymethyl chitosan so that bioplastics from carrageenan and glycerol can last a long time. The method used was experimental laboratory, making bioplastics using carboxymethyl chitosan with concentrations of 2 g, 3 g, 4 g and 5 g, carrageenan 3 g and glycerol 1.7 ml. Results of the research that has been carried out, the results of the bioplastic characteristics in the form of a thickness value of 0.25 mm - 0.82 mm, a tensile strength value of 1.04 MPa - 1.61 MPa, the fastest biodegradability test for 116 minutes and the longest for 373 minutes. Carboxymethyl chitosan affects the bioplastic degradation time of carrageenan.

Keywords : Bioplastic, carboxymethyl chitosan, carrageenan, *Kappaphycus alvarezii*.

PENDAHULUAN

Plastik berasal dari kata “plastikos” dari bahasa Yunani yang berarti dapat dibentuk menjadi berbagai bentuk. Plastik adalah polimer putih berkilau yang terdiri dari karbon dan hydrogen. Plastik adalah bahan polimer yang terbuat dari bahan sintesis organik atau semi-sintesis yang ada selama lebih dari satu abad (Zaheer dan Kuddus, 2017). Plastik membutuhkan waktu yang lama untuk terurai, bahkan beberapa plastik bertahan di alam selamanya. Masalah tersebut membuat tingginya minat konsumen mengenai pembungkus makanan berkualitas tinggi dan juga ramah lingkungan. Hal tersebut mendukung dibuatnya bioplastik (Gade *et al.*, 2013).

Bioplastik merupakan solusi yang layak untuk kelestarian lingkungan karena biodegradabilitasnya dan bahan baku yang digunakan ialah bahan biogenik (Folino *et al.*, 2020). Bioplastik dapat terurai secara aerob (dengan oksigen) di alam liar, secara anaerob (tanpa oksigen) di sedimen dan tempat pembuangan sampah dan sebagian secara aerob/anaerob di kompos dan tanah. Selain itu, bioplastik juga dapat terdegradasi dengan mikroorganisme seperti bakteri dan jamur (Siracusa, 2019).

K. alvarezii merupakan rumput laut yang banyak di budidayakan di Indonesia, karena memiliki masa panen yang cukup singkat (Maharany *et al.*, 2017). *K. alvarezii* banyak digunakan sebagai bahan makanan, sumber agar hidrokoloid pembentuk gel dan karagenan (Lim *et al.*, 2017). Karagenan adalah polimer yang larut dalam air dari rantai linear sebagai galaktan sulfat yang memiliki potensi tinggi sebagai pembentuk bioplastik, karena memiliki sifat yang sangat fleksibel (Kamal *et al.*, 2017).

Bioplastik dari rumput laut memiliki waktu degradasi singkat, sehingga perlu penambahan polimer alami yang memiliki sifat sebagai pengawet (Saleh *et al.*, 2017). Karboksimetil kitosan merupakan turunan dari kitosan yang mudah larut di air dan berpotensi sebagai pengawet karena memiliki aktivitas antibakteri (Shariatnia, 2018). Bioplastik juga memiliki kekurangan seperti teksturnya yang kaku dan rapuh, sehingga diperlukan bahan tambahan yang berfungsi sebagai pemlastis (Maran *et al.*, 2013). Gliserol berperan sebagai pemlastis dan konsentrasi yang terkandung dapat meningkatkan fleksibilitas film (Cerqueira *et al.*, 2012).

Berdasarkan permasalahan yang sudah dirumuskan, maka tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penambahan karboksimetil kitosan terhadap waktu degradasi bioplastik.

MATERI DAN METODE

Materi yang digunakan adalah tepung karagenan dari rumput *K. alvarezii* dan bahan tambahan berupa *Carboxymethyl chitosan*. Tepung karagenan diperoleh dari UMKM Suket Segoro, Semarang. *Carboxymethyl chitosan* diperoleh dari CV. ChiMultiguna, Kabupaten Cirebon. Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah uji ketebalan, uji kuat tarik, uji biodegradabilitas dan pengaplikasian pada buah apel.

Proses Pembuatan Bioplastik

Pembuatan bioplastik mengacu pada metode yang digunakan oleh Susilawati *et al.* (2019) dan Rusli *et al.* (2017), dengan modifikasi pada konsentrasi bahan dasar, konsentrasi pemlastis, suhu pencetakan, dan suhu pengeringan. Proses pembuatan bioplastik terdiri dari dua tahap yaitu pembuatan larutan karagenan dan larutan karboksimetil kitosan. Pembuatan larutan karagenan dengan cara melarutkan tepung karagenan dan gliserol kedalam akuades kemudian dipanaskan menggunakan *magnetic stirrer* selama 10 menit. Proses pembuatan larutan karboksimetil kitosan dengan cara melarutkan karboksimetil kitosan dan gliserol kedalam akuades kemudian dipanaskan dengan *magnetic stirrer* selama 10 menit. Larutan karagenan dan karboksimetil kitosan kemudian diaduk dan dipanaskan lagi menggunakan *magnetic stirrer* selama 20 menit. Setelah dipastikan tidak ada lagi gelembung udara dan pengotor, larutan dituang ke dalam cetakan dan dikeringkan dengan oven hingga diperoleh lapisan tipis. Lapisan tipis ini didinginkan dan dipisahkan dari cetakan

Uji Ketebalan Film

Uji ketebalan film mengikuti prosedur yang dilakukan oleh Rusli *et al.* (2017). Ketebalan film diukur dengan *thickness gauge* dengan ketelitian $\pm 0,1$ mm. Hal ini dilakukan dengan menempelkan alat *thickness gauge* pada sampel bioplastik dan muncul angka hasil pengukuran di layar display.

Uji Kuat Tarik (ASTM D882)

Uji kuat tarik mengikuti prosedur yang dilakukan oleh Rusli *et al.* (2017). Kuat tarik diukur dengan *Tensile Strength*, kuat tarik

ditentukan berdasarkan beban maksimum. Nilai kuat tarik akan muncul dalam bentuk angka dan grafik pada komputer. Perhitungan secara manual dilakukan dengan perhitungan pada persamaan berikut:

$$\text{Kuat tarik } (T) = \frac{F_{max}}{A}$$

Uji Biodegradabilitas

Uji biodegradabilitas mengikuti prosedur yang dilakukan oleh Agustin dan Padmawijaya (2016), bioplastik dipotong menjadi 2 cm x 2 cm kemudian dimasukkan ke dalam cawan petri. Selanjutnya ditambahkan larutan mikroba (EM4) 20ml yang sebelumnya diencerkan sebanyak 5 kali. Proses degradasi seperti perubahan warna dan dimensi dimonitor setiap 60 menit.

Pengaplikasian Pada Buah Apel

Pengaplikasian pada buah apel mengikuti prosedur yang dilakukan oleh Safitri *et al.* (2016). Pengujian kualitas bioplastik dilakukan dengan mengaplikasikan pada buah, yaitu dengan cara membungkus sejenis buah-buahan yang bersifat mudah rusak atau perubahan secara mekanis. Apel merupakan salah satu buah yang mengalami perubahan saat masa penyimpanan, yaitu *browning* pada buah apel. Pengaplikasian bioplastik terhadap buah apel dilakukan pada ruang terkontrol selama

6 hari dan dilakukan pengamatan perubahan fisik buah apel setiap 2 hari.

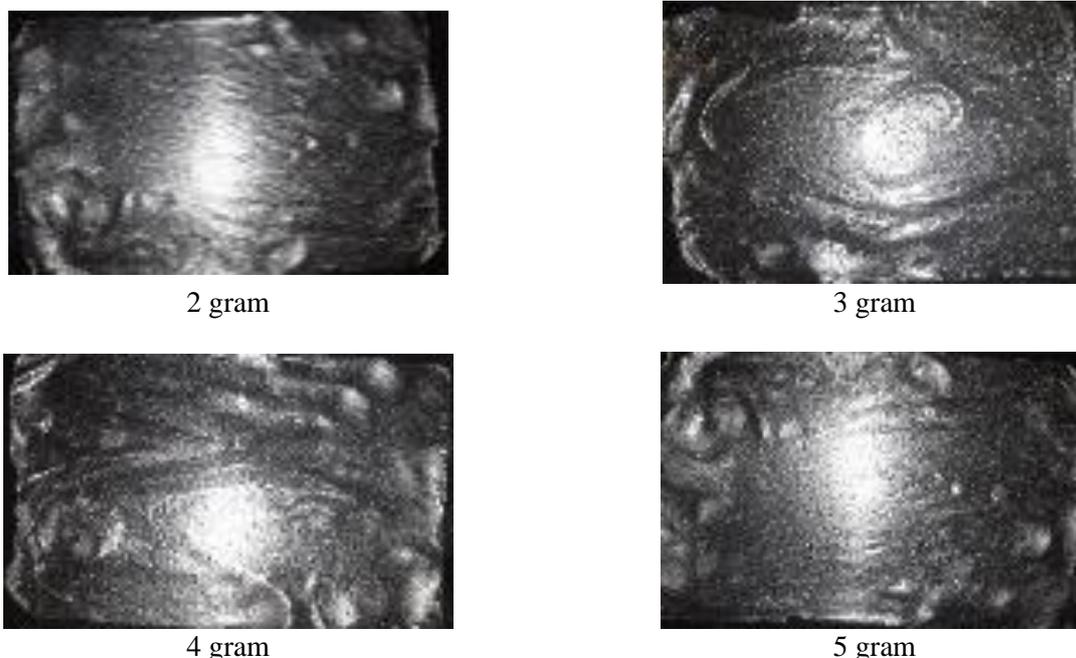
Analisis Data Bioplastik

Data yang diperoleh dari hasil uji ketebalan, uji kuat tarik, uji biodegradabilitas dianalisis dengan oneway anova yang selanjutnya diuji lanjut dengan uji polynomial orthogonal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bioplastik yang dihasilkan pada penelitian ini menunjukkan tidak terdapat perbedaan dari karakteristik bioplastik dengan variasi karboksimetil kitosan yang berbeda. Bioplastik memiliki karakteristik halus, agak kasat dan terdapat banyak gelembung. Hal ini diduga pada proses pengadukan dan pencampuran bahan baku pembuatan bioplastik. Bioplastik memiliki karakteristik yang sedikit berbeda dengan plastik pada umumnya dikarenakan adanya gelembung-gelembung kecil yang membuatnya tidak cukup transparan seperti plastik umumnya. Karakteristik bioplastik tersaji pada Gambar 1.

Setijawati (2017) menyatakan karakteristik bioplastik dipengaruhi oleh jenis dan warna bahan baku dalam pembuatan bioplastik. Penelitian ini menggunakan bahan baku tepung karagenan berwarna putih atau kekuningan, tidak berbau dan memiliki getah (*mucilaginous*).



Gambar 1. Karakteristik Bioplastik Setelah Dilakukan Penambahan *Carboxymethyl Chitosan*

Karboksimetil kitosan memiliki warna putih tulang dan ketika dipanaskan hingga terbentuk gelatin akan memiliki warna bening dengan tekstur lengket sehingga dihasilkan bioplastik yang transparan. Bioplastik yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki permukaan yang halus dan elastis sehingga dapat digunakan sebagai plastik pembungkus makanan.

Uji Ketebalan Film

Bioplastik yang dihasilkan dengan menggunakan konsentrasi karboksimetil kitosan yang berbeda memiliki nilai ketebalan yang berbeda. Semakin tinggi konsentrasi karagenan dapat meningkatkan nilai ketebalan seperti yang tersaji pada Gambar 2

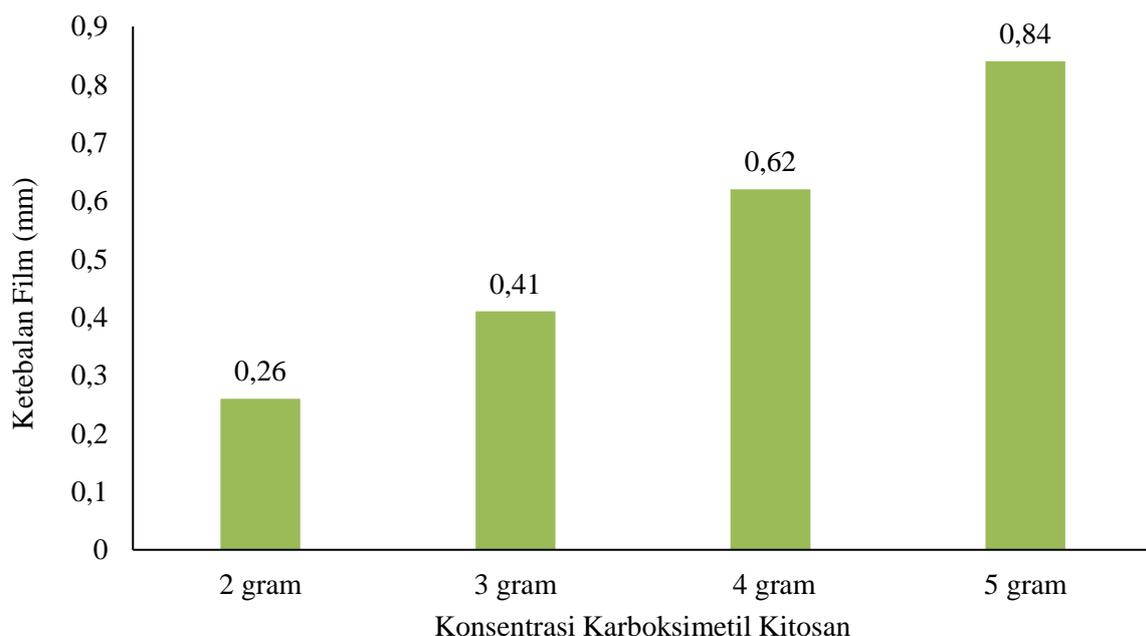
Ketebalan termasuk dalam sifat fisik yang dapat menentukan kualitas suatu bahan karakteristik bioplastik. Pengukuran ketebalan bioplastik perlu dilakukan untuk menentukan kesesuaian bioplastik yang dihasilkan dengan penggunaannya, selain itu ketebalan bioplastik juga akan mempengaruhi sifat mekanik bioplastik seperti kuat tarik (Budiman *et al.*, 2018). Nilai ketebalan bioplastik dengan konsentrasi karboksimetil kitosan 2g, 3g, 4g, dan 5g sebesar 0,25 mm; 0,43mm; 0,61mm; dan 0,82mm. Berpedoman pada JIS (*Japanese Industrial Standard*) *plastic film* untuk kemasan makanan mempunyai ketebalan maksimal 0,25 mm.

Hasil analisis ragam menunjukkan perlakuan konsentrasi karboksimetil kitosan berpengaruh dan ini terlihat pada Gambar 2 yang menunjukkan ($p < 0,05$). Hal ini berarti konsentrasi karboksimetil kitosan yang digunakan berpengaruh terhadap nilai ketebalan film. Ketebalan bioplastik meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi karboksimetil kitosan yang digunakan. Hal ini diduga konsentrasi karboksimetil kitosan sebagai komponen penyusun dalam bioplastik akan meningkatkan total padatan yang ada dalam larutan bioplastik sehingga setelah dikeringkan bioplastik yang dihasilkan semakin tebal.

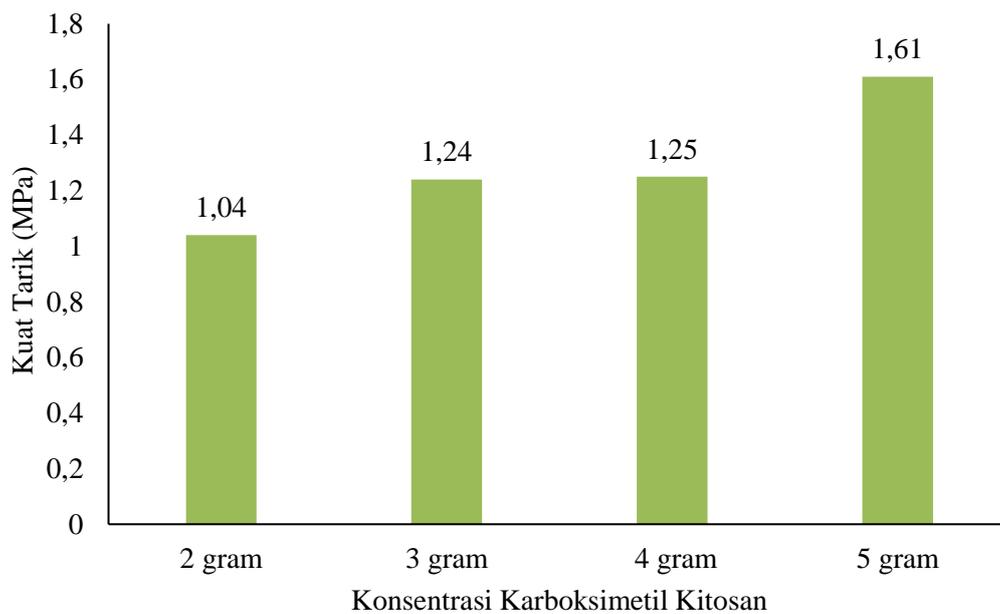
Uji Kuat Tarik

Uji ini untuk mengetahui kekuatan bioplastik dalam menahan beban dalam melindungi produk yang dibungkus bioplastik. Bioplastik yang dihasilkan dengan menggunakan konsentrasi karboksimetil kitosan yang berbeda menghasilkan nilai kuat tarik yang berbeda. Peningkatan konsentrasi karboksimetil kitosan yang digunakan menghasilkan peningkatan nilai kuat tarik pada bioplastik. Nilai kuat tarik bioplastik tersaji pada Gambar 3.

Kuat tarik adalah gaya tarik maksimum yang dapat ditahan oleh film selama proses pengukuran berlangsung. Nilai kuat tarik dipengaruhi oleh bahan pemlastis yang digunakan dalam proses pembuatan film bioplastik (Rastini *et al.*, 2020).



Gambar 2. Perbedaan Konsentrasi Karboksimetil Kitosan Terhadap Ketebalan Bioplastik



Gambar 3. Perbedaan Konsentrasi Karboksimetil Kitosan Terhadap Kuat Tarik Bioplastik

Uji kuat tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan bioplastik dalam menahan beban untuk melindungi produk yang dibungkus dengan bioplastik. Nilai kuat tarik dengan konsentrasi karboksimetil kitosan sebesar 2 gram, 3 gram, 4 gram dan 5 gram sebesar 1,04 MPa; 1,24 MPa; 1,25 MPa; dan 1,61 MPa. Berpedoman pada JIS (*Japanese Industrial Standart*) nilai kuat tarik yang dapat dikategorikan sebagai *edible film* minimal 0,392266 MPa, ini berarti hasil penelitian memenuhi standar nilai kuat tarik JIS.

Hasil analisis ragam menunjukkan perlakuan konsentrasi karboksimetil kitosan berpengaruh terlihat pada Gambar 3. menunjukkan bahwa ($p < 0,05$), berarti konsentrasi karboksimetil kitosan yang digunakan berpengaruh terhadap nilai kuat tarik. Nilai kuat tarik mengalami peningkatan seiring bertambahnya konsentrasi karboksimetil kitosan yang digunakan. Hal ini dikarenakan semakin banyak konsentrasi karboksimetil kitosan yang digunakan maka semakin banyak ikatan hidrogen yang terdapat dalam plastik sehingga ikatan kimianya akan semakin kuat dan sulit untuk diputus karena diperlukan energi yang lebih besar untuk memutuskan ikatan tersebut.

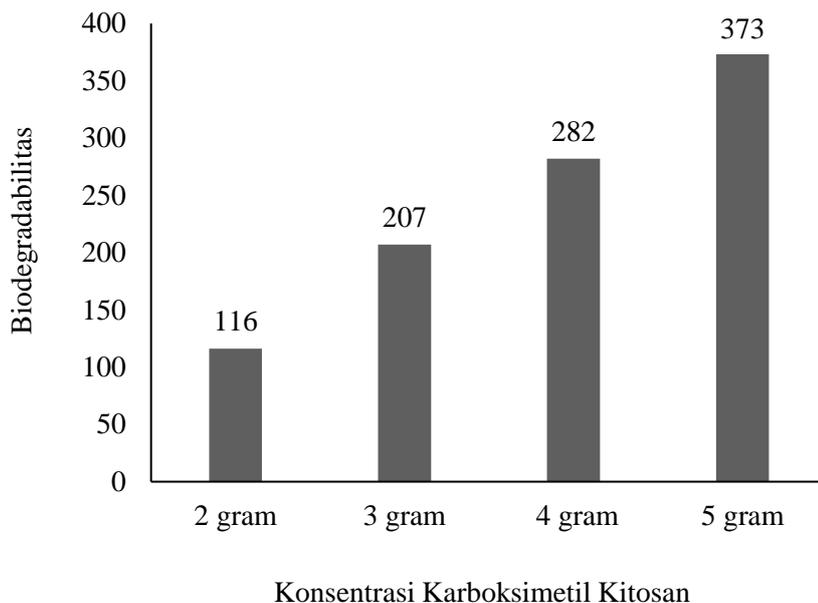
Uji Biodegradabilitas

Uji biodegradasi dilakukan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan bioplastik

dapat terdegradasi oleh mikroorganisme di suatu lingkungan. Uji biodegradabilitas yang dilakukan dengan cara menghitung waktu yang dibutuhkan bioplastik untuk terdegradasi dalam larutan *Effective Microorganism 4* (EM4). Hasil yang diperoleh mengalami peningkatan waktu degradasi seiring dengan meningkatnya jumlah karboksimetil kitosan yang digunakan. Uji biodegradabilitas tersaji pada Gambar 4.

Biodegradasi adalah proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme seperti bakteri dan jamur yang hidup di dalam tanah. Menurut Apriyani dan Sedyadi (2015), uji biodegradasi dilakukan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan bioplastik dapat terdegradasi oleh mikroorganisme di suatu lingkungan. Media yang digunakan penelitian ini adalah EM4. Media ini merupakan kultur campuran berbagai jenis mikroorganisme yang dapat meningkatkan keragaman mikroba dalam tanah.

Hasil uji biodegradabilitas mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya karboksimetil kitosan yang digunakan. Hal ini dikarenakan karboksimetil kitosan mengandung zat aditif yang dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme sehingga bioplastik yang dibuat dengan karboksimetil kitosan dapat terdegradasi lebih lama di alam. Penambahan bahan berupa gliserol yang berfungsi sebagai pemlastis dapat meningkatkan proses biodegradabilitas bioplastik



Gambar 4. Perbedaan Konsentrasi Karboksimetil Kitosan Terhadap Biodegradabilitas Bioplastik

Tabel 1. Pengaruh Konsentrasi Karboksimetil Kitosan dalam Pengaplikasian Pada Buah Apel

Perlakuan	Waktu (Hari ke-)			
	0	2	4	6
Karboksimetil Kitosan 2 gram				
Karboksimetil Kitosan 3 gram				
Karboksimetil Kitosan 4 gram				
Karboksimetil Kitosan 5 gram				
Kontrol Lingkungan				

Pengaplikasian Pada Buah Apel

Pengaplikasian langsung pada buah apel dilakukan untuk melihat kemampuan bioplastik dalam melindungi produk. Buah apel yang disimpan dengan dilapisi bioplastik mengalami perubahan warna mulai dari hari ke-2 hingga hari ke-8. Penyimpanan buah apel tanpa dilapisi bioplastik (kontrol lingkungan) membuat warna buah apel lebih cokelat dibandingkan dengan yang

dilapisi dengan bioplastik. Hasil yang diperoleh dapat dilihat (Tabel 1). Pada Tabel 1, apel yang disimpan tanpa pembungkus bioplastik mengalami penyusutan ukuran dan perubahan warna menjadi cokelat setiap harinya hingga hari ke-6. Hari ke-6 warna apel menjadi cokelat dan ukurannya menyusut dan kehilangan aroma khas dari apel. Apel yang dibungkus dengan bioplastik mengalami perubahan warna yang signifikan pada

penyimpanan hari ke-4 hingga hari ke-6 tetapi tidak mengurangi aroma khas dari apel. Hal ini sesuai Safitri *et al.* (2016), bioplastik yang mengandung komponen kitosan memiliki bahan aditif yang dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme yang tidak diinginkan sehingga dapat memperpanjang masa penyimpanan suatu produk.

KESIMPULAN

Bioplastik dapat dibuat dari karagenan *Kappaphycus alvarezii* dengan penambahan *carboxymethyl chitosan* dan pemlastis gliserol. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan nilai karakteristik bioplastik memiliki ketebalan sebesar 0,25 mm – 0,82 mm, nilai kuat tarik sebesar 1,04 MPa – 1,61 MPa, uji biodegradabilitas tercepat selama 116 menit dan terlama selama 373 menit. Karboksimetil kitosan dapat mempengaruhi waktu degradasi bioplastik dari bahan baku karagenan dan pada konsentrasi karboksimetil kitosan 5 gram bioplastik dapat terdegradasi lebih lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriyani, M. & Sedyadi, E. 2015. Sintesis dan Karakteristik Plastik Biodegradable dari Pati Onggok Singkong dan Ekstrak Lidah Buaya (*Aloe vera*) dengan Plasticizer Gliserol. *Jurnal Sains Dasar*, 4(2):145-152.
- Cerqueira, M.A., Souza, B.W., Teixeira, J.A. & Veicente, A.A. 2012. Effect of Glycerol and Corn Oil on Physicochemical Properties of Polysaccharide Films—A Comparative Study. *Food Hydrocolloids*, 27(1):175-184. doi: 10.1016/j.foodhyd.2011.07.007
- Folino, A., Karageorgiou, A., Calabrò, P.S. & Komilis, D. 2020. Biodegradation of Wasted Bioplastics in Natural and Industrial Environments: A Review. *Sustainability*, 12(15):1-37. doi: 10.3390/su12156030
- Gade R., Tulasi, M.S. & Bhai, V.A. 2013. Seaweeds: A Novel Biomaterial. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 5(2):40-44.
- Kamal, S., Rehman, M., Saima, R., Nazli, Z.H., Yaqoob, N., Noreen, R., Ikram, S. & Min, H.S. 2017. Chapter 10 – Blends of Algae With Natural Polymers. *Algae Based Polymers, Lends, and Composites*. pages371–413. doi : 10.1016/B978-0-12-812360-7.00010-0
- Lim, P., Yang, L., Tan, J., Maggs, C.A. & Brodie, J. 2017. Advancing the Taxonomy of Economically Important Red Seaweeds (Rhodophyta). *European Journal of Phycology*, 52(4):438-451. doi: 10.1080/09670262.2017.1365174
- Maharany, F., Nurjanah, R. Suwandi, E. Anwar & Hidayat, T. 2017. Kandungan Senyawa Bioaktif Rumput Laut *Padina australis* dan *Eucheuma cottonii* Sebagai Bahan Baku Krim Tabir Surya. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20(1):10-17.
- Maran, J.P, Sivakumar, V., Sridhar, R. & Immanuel, V.P. 2013. Development of Model for Mechanical Properties of Tapioca Starch Based Edible Films. *Industrial Crops and Products*, 42:159-168.
- Rastini, E.K., Astuti, S., Handoko, F. & Vitasari, P., 2020. Pelatihan Pembuatan Bioplastik untuk Peningkatan Kreativitas Siswa di SMA Nasional Malang. *Jurnal Aplikasi Sains Teknologi Nasional*, 1(1): 7-13.
- Rusli, A., Metusalach, Salengke & Tahir, M.M. 2017. Karakteristik Edible Film Karagenan dengan Pemlastis Gliserol. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20(2):219-229.
- Safitri, I., Riza, M. & Syaubari. 2016. Uji Mekanik Plastik Biodegradable dari Pati Sagu dan Grafting poly(nipam)-kitosan dengan Penambahan Minyak Kayu Manis (*Cinnamon burmannii*) Sebagai Antioksidan. *Jurnal Litbang Industri*, 6(2):107-116.
- Saleh, F.H.M., Nugroho, A.Y. & Juliantama, M.R. 2017. Pembuatan Edible Film dari Pati Singkong Sebagai Pengemas Makanan. *Teknoin*, 23(1):43-48.
- Setijawati, D. 2017. Penggunaan *Eucheuma* Sp dan Chitosan Sebagai Edible Film

- Terhadap Kualitasnya. *Journal of Fisheries dan Marine Science*, 1(1):6-14.
- Shariatinia, Z. 2018. Carboxymethyl Chitosan: Properties and Biomedical Application. *International Journal of Biological Macromolecules*. 120:1406-1419. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.09. 131
- Siracusa, V. 2019. Microbial Degradation of Synthetic Biopolymers Waste. *Polymers*, 11(6):1-18. doi: 10.3390/polym11061066
- Susilawati, Rostini, I., Pratama, R.I. & E. Rchima. 2019. Characterization of Bioplastic Packaging from Tapioca Flour Modified With the Addition of Chitosan and Fish Bone Gelatin. *World Scientific News*, 135:85-98.
- Zaheer, M.R. & M. Kuddus. 2017. PHB (poly- β -hydroxybutyrate) and Its Enzymatic Degradation. *Polymers Advanced Technologies*, 29(1):30-40. doi: 10.1002/pat.4126.