

Pembuatan Kulit Biosintetis dari Nata De Banana menggunakan Polyurethane dan Anti Bakterial Chitosan

Nurmila*, Cut Aja Rahmawati, Elwina

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Lhokseumawe

*E-mail: nurmilasm@gmail.com

Abstract

Article history:

Received: 02-02-2025

Accepted: 18-03-2025

Published: 13-04-2025

Keywords:

biosynthetic leather,
polyurethane,
chitosan,
nata de banana.

Organic synthetic leather is engineered leather created with raw materials that can be found around the human environment in the form of fruits or fruit peels which have high fiber so that they can deal with organic waste, with organic synthetic leather the population of animals killed for their skins reduced so as to maintain the survival of animals. This study aims to determine the effect of the addition of polyurethane (PU) and chitosan on the characteristics of the resulting leather. With variation (Polyurethane A) 2 : 1 (Polyurethane B), namely 15 mL, 30 mL, 45 mL, 60 mL, 75 mL and chitosan 2 g, 4 g, 6 g, 8 g, 10 g. The addition of PU affects the elasticity and hardness of the final leather product and chitosan has the effect of inhibiting bacterial growth and fungus on synthetic leather. The organoleptic test for all synthetic leather does not meet SNI standards. Based on the results of anti-bacterial testing (colony counter) there were the highest bacteria in the lowest chitosan variation, namely 2 grams and the lowest bacteria in the highest chitosan variation, namely 10 grams. The result of the tensile strength test is that the highest tensile strength value is produced by PU (2:1) at 50:25 ml polyurethane volume of 3.432 MPa with 21.36% elongation and the lowest tensile strength value is produced by PU (2:1) at 15 volume : 8 mL of 16.181 MPa elongation 21.42%.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara tropis yang memiliki kekayaan hasil pertanian, termasuk pisang. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS), produksi pisang di Indonesia mencapai jumlah yang besar, dengan Provinsi Aceh sebagai salah satu wilayah penghasil utama yang mencatat produksi sebesar 108.643 ton pada tahun 2021[1]. Pisang menjadi buah yang paling dominan dalam komoditas pertanian Indonesia karena luasnya pertanaman dan tingginya permintaan pasar. Namun, pemanfaatan daging buah pisang untuk berbagai produk makanan seringkali menghasilkan limbah berupa kulit pisang yang jumlahnya melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal.

Kulit pisang merupakan limbah organik yang masih mengandung berbagai nutrisi, terutama karbohidrat dalam bentuk pati, serat kasar, dan gula reduksi dalam jumlah yang cukup tinggi [2]. Potensi kandungan ini memungkinkan kulit pisang untuk diolah menjadi produk bernilai tambah, salah satunya adalah nata de banana. Nata de banana adalah produk hasil fermentasi bakteri *Acetobacter xylinum* yang memiliki struktur serat berbentuk gel. Proses fermentasi ini membutuhkan sumber karbohidrat sebagai media pertumbuhan

bakteri, yang dapat diperoleh dari kandungan kulit pisang. Produk nata de banana ini tidak hanya berguna sebagai bahan makanan, tetapi juga memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai bahan dasar dalam pembuatan kulit biosintetis.

Kulit biosintetis adalah material rekayasa yang dibuat dari bahan-bahan organik seperti limbah buah dan serat alami. Penggunaan kulit biosintetis menjadi semakin relevan dalam industri fashion global, terutama karena meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dari kulit sintetis konvensional. Kulit sintetis umumnya terbuat dari bahan seperti *Polyvinyl Chloride (PVC)* atau *Polyurethane (PU)*, yang membutuhkan waktu lebih dari 1000 tahun untuk terurai serta berpotensi melepaskan zat berbahaya ke lingkungan [3]. Dengan mengolah limbah organik menjadi kulit biosintetis, dapat dikurangi ketergantungan terhadap kulit sintetis berbasis plastik sekaligus meminimalkan limbah organik yang terbuang.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa nata yang berasal dari berbagai sumber organik memiliki sifat mekanik yang baik dan berpotensi digunakan dalam aplikasi material. Sebagai contoh, penelitian telah menunjukkan bahwa nata berbasis limbah buah dapat dimodifikasi untuk meningkatkan kekuatan

tarik dan elastisitasnya [4,5]. Selain itu, *polyurethane* telah lama digunakan dalam berbagai aplikasi material karena sifatnya yang fleksibel, tahan lama, dan kompatibel dengan biomaterial lain. Penggunaan *polyurethane* dalam formulasi kulit biosintetis dapat meningkatkan sifat mekanik, seperti kekuatan tarik dan ketahanan aus, sehingga menghasilkan produk dengan kualitas yang lebih baik [6,7].

Chitosan, sebagai salah satu bahan yang digunakan dalam penelitian ini, telah banyak dipelajari karena sifat antibakteri dan biokompatibilitasnya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *chitosan* dapat digunakan untuk meningkatkan sifat antibakteri pada berbagai material biopolimer, sehingga membuatnya lebih tahan terhadap kontaminasi mikroorganisme [8,9].

Kombinasi antara *nata de banana*, *polyurethane*, dan *chitosan* menawarkan potensi dalam pengembangan kulit biosintetis dengan sifat unggul, seperti ramah lingkungan, tahan terhadap mikroorganisme, serta memiliki performa mekanik yang baik [10-12].

Meskipun demikian, penelitian mengenai penggunaan *nata de banana* sebagai bahan dasar kulit biosintetis masih relatif baru. Sebagian besar studi sebelumnya lebih berfokus pada pemanfaatan *nata de banana* dari sumber lain seperti air kelapa atau limbah buah lainnya [13,14]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menjembatani gap tersebut dengan mengkaji potensi *nata de banana* yang dikombinasikan dengan *polyurethane* dan *chitosan* dalam menghasilkan kulit biosintetis yang inovatif.

Dengan latar belakang ini, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kulit biosintetis berbasis *nata de banana*, *polyurethane*, dan *chitosan* sebagai alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan kulit sintetis konvensional. Pengembangan ini diharapkan tidak hanya membantu mengurangi limbah kulit pisang yang terbuang, tetapi juga berkontribusi dalam menciptakan solusi material berkelanjutan yang sejalan dengan tren industri fashion global yang semakin mengedepankan prinsip daur ulang dan keberlanjutan

2. Metode

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bioteknologi dan Teknologi Pangan, Teknik Kimia, Politeknik Negeri Lhokseumawe.

2.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan beberapa alat seperti baskom plastik, panci, ember plastik, saringan, blender, pengaduk, corong, kertas koran/kain, cetakan kaca, gelas ukur, pisau, serta alat analisis seperti alat uji kuat tarik dan alat penghitungan aktivitas mikroba. Adapun bahan yang digunakan meliputi kulit pisang raja matang, air kelapa, gula pasir, pupuk ZA, asam asetat, pewarna tekstil, bakteri *Acetobacter xylinum*, *polyurethane*, dan *chitosan*.

2.2 Prosedur Penelitian

Kajian pembuatan kulit sintesis dari *nata de banana* dilakukan dengan variasi volume polyuretan dan berat *chitosan*. Volume *polyurethane* yang divariasikan adalah 15, 30, 45, 60, dan 75 mL. Sedangkan berat *chitosan* yang divariasikan adalah 2, 4, 6, 8, dan 10 gram. Kode sampel dalam penelitian ini ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kode sampel pemakaian polyurethane dan chitosan

No	Kode Sampel	Polyurethane(PU), mL	Chitosan, gram
1	PK1		2
2	PK2		4
3	PK3	15	6
4	PK4		8
5	PK5		10
6	PK6		2
7	PK7		4
8	PK8	30	6
9	PK9		8
10	PK10		10
11	PK11		2
12	PK12		4
13	PK13	45	6
14	PK14		8
15	PK15		10
16	PK16		2
17	PK17		4
18	PK18	60	6
19	PK19		8
20	PK20		10
21	PK21		2
22	PK22		4
23	PK23	75	6
24	PK24		8
25	PK25		10

Prosedur penelitian dimulai dengan pembuatan *nata de banana*. Kulit pisang sebanyak 250 gram dibersihkan dan diblender

bersama sebagian air kelapa hingga halus. Filtrat hasil blender disaring untuk memisahkan ampas, kemudian dicampurkan dengan sisa air kelapa sebanyak 5 liter. Gula pasir seberat 158 gram, pupuk ZA sebanyak 38 gram, dan asam asetat sebanyak 20 ml ditambahkan ke dalam campuran, kemudian dididihkan hingga suhu mencapai 100°C. Setelah mendidih, larutan didiamkan selama 5 menit, dan lapisan yang naik ke atas dibuang.

Setelah larutan mendingin hingga suhu ruang, bakteri *Acetobacter xylinum* ditambahkan, dan larutan difermentasikan selama 8 hari dengan penutup kertas koran. Setelah fermentasi selesai, nata dibersihkan menggunakan kain kasar untuk menghilangkan lendir, kemudian dipotong menjadi ukuran 2 cm x 2 cm.

Nata yang telah dipotong ditimbang sebanyak 80 gram untuk dianalisis. Campuran *polyurethane* dan *chitosan* dengan konsentrasi tertentu sesuai rasio yang ditetapkan dicampur menggunakan blender hingga homogen. Campuran tersebut dituangkan ke dalam cetakan kaca dan didiamkan selama 2 hari dalam ruangan yang memiliki sirkulasi udara baik. Setelah kering, kulit biosintetis yang dihasilkan diberi pewarna tekstil sesuai kebutuhan.

2.3 Pengujian

Pengujian kuat tarik dilakukan dengan meletakkan sampel pada kedua ujung penjepit alat uji tarik. Mesin tarik dihidupkan bersamaan dengan pencatat grafik, dan data yang diperoleh mencatat hubungan antara gaya tarik dengan pertambahan panjang hingga sampel putus.

Sementara itu, pengujian aktivitas mikroba dilakukan dengan menghitung koloni bakteri pada cawan petri menggunakan alat penghitungan mikroba. Koloni yang terpisah dihitung dengan bantuan kaca pembesar untuk memastikan keakuratan hasil.

Pengujian organoleptik dilakukan dengan meletakkan kulit biosintetis pada bidang datar dan keras, kemudian diamati secara visual terhadap adanya cacat atau kerusakan seperti gelembung, keriput, retakan, lapisan terkelupas, sobekan, atau benda asing yang menempel. Data dari seluruh pengujian dianalisis untuk mengevaluasi kualitas kulit biosintetis yang dihasilkan dan hubungannya dengan variasi konsentrasi *polyurethane* dan *chitosan* yang digunakan.

3. Hasil dan Pembahasan

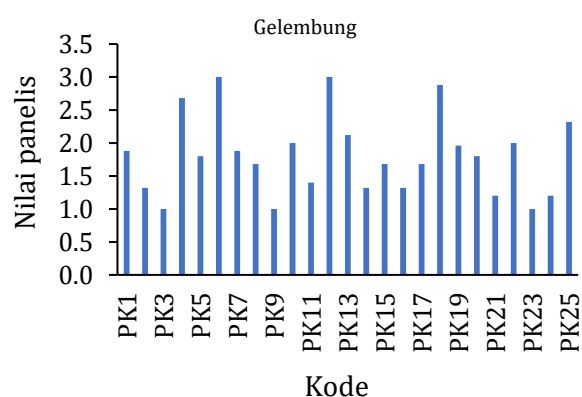
3.1 Uji Organoleptik Kulit Sintesis

Kulit sintetis merupakan bahan tiruan kulit yang umumnya terbuat dari polivinil klorida (PVC) atau *polyurethane (PU)*, dengan karakteristik yang menyerupai kulit asli serta harga yang lebih ekonomis dibandingkan kulit hewan. Dalam penelitian ini, kulit sintetis dikembangkan menggunakan *polyurethane (PU)*, *nata de banana*, serta tambahan *chitosan* yang berfungsi sebagai agen antibakteri dan antijamur.

Sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 1294:2009 tentang kulit sintetis, produk yang dihasilkan harus bebas dari cacat dan kerusakan. Oleh karena itu, diperlukan uji organoleptik untuk menilai tampilan dan kondisi fisik kulit sintetis, khususnya dalam mendeteksi cacat seperti gelembung, retak, lapisan yang terkelupas, sobekan, serta keberadaan benda asing yang menempel. Uji ini dilakukan dengan melibatkan 25 panelis yang dipilih berdasarkan variasi gender dan usia guna mengevaluasi karakteristik visual kulit sintetis.

3.1.1 Uji Organoleptik terhadap Gelembung

Pengujian organoleptik terhadap gelembung ditunjukkan pada Gambar 1. Kulit sintetis yang baik memiliki permukaan yang rata, akan tetapi kulit sintetis yang memiliki gelembung dapat disimpulkan bahwa hal tersebut dapat terjadi karena faktor pencampuran yang masih kurang homogen sehingga saat diratakan masih ada penggumpalan antara poliuretan, *chitosan* dan nata.



Gambar 1. Analisa organoleptik terhadap gelembung pada kulit sintetis

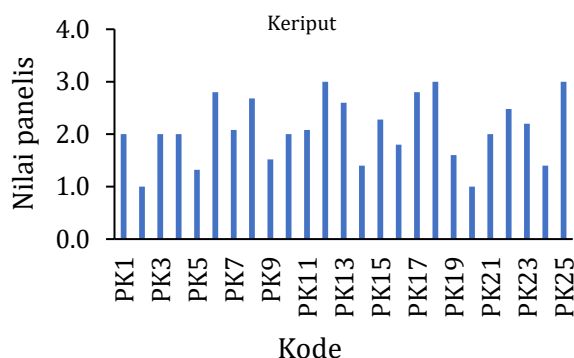
Dari Gambar 1 dapat dilihat hasil organoleptik terhadap gelembung pada kulit

sintetis memiliki rentang skala antara 1-3 dengan rincian nilai 1 untuk tidak ada gelembung, nilai 2 untuk sedikit gelembung dan nilai 3 untuk banyak gelembung. Hasil kajian menunjukkan bahwa kulit sintetis yang tidak bergelembung berdasarkan penilaian panelis adalah pada sampel dengan kode PK3 (campuran 15 mL *polyurethane* dan 6 gram *chitosan*), PK9 (campuran 30 mL *polyurethane* dan 8 gram *chitosan*), dan PK23 (campuran 75 mL *polyurethane* dan 6 gram *chitosan*).

3.1.2 Uji Organoleptik terhadap Keriput

Pengujian organoleptik terhadap keriput ditunjukkan pada Gambar 2. Keriput dapat menjadi permasalahan bagi kulit sintetis yang terjadi akibat pengeringan yang tidak merata selama proses produksi, pada bagian tertentu kulit menjadi lebih kering dari pada bagian lainnya, hal ini dapat menyebabkan kerutan atau keriput pada permukaan kulit sintetis.

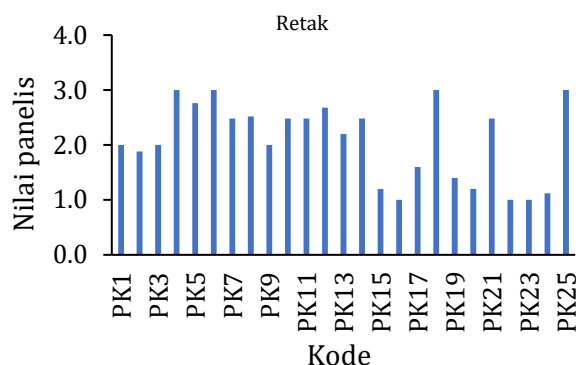
Dari Gambar 2 dapat dilihat hasil organoleptik terhadap keriput pada kulit sintetis memiliki rentang skala antara 1-3 dimana nilai skala 1 adalah tidak keriput, skala 2 sedikit keriput, dan skala 3 banyak keriput. Dari hasil penilaian panelis, kulit sintetis yang tidak berkeriput yang merupakan kulit yang baik diperoleh pada sampel dengan kode PK2 (campuran 15 mL *polyurethane* dan 4 gram *chitosan*), dan PK20 (campuran 60 mL *polyurethane* dan 10 gram *chitosan*).



Gambar 2. Analisa organoleptik terhadap keriput pada kulit sintetis

3.1.3 Uji Organoleptik terhadap Retak

Pengujian organoleptik terhadap retak ditunjukkan pada Gambar 3. Kulit sintetis yang retak terjadi karena faktor produk yang kurang elastis, maka saat produk ingin dilepaskan dari cetakan terjadi penarikan dan tekukan yang membuat kulit sintetis retak.

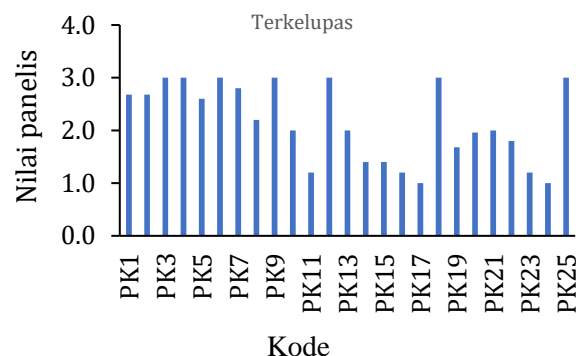


Gambar 3. Analisa organoleptik terhadap retak pada kulit sintetis

Dari Gambar 3 dapat dilihat hasil organoleptik terhadap retak pada kulit sintetis memiliki rentang skala antara 1-3, dimana nilai skala 1 menyatakan tidak retak, skala 2 sedikit retak, dan skala 3 banyak retak. Hasil penilaian panelis menunjukkan kulit yang baik merupakan yang tidak ada retak yang diperoleh pada sampel dengan kode PK16 (campuran 60 mL *polyurethane* dan 2 gram *chitosan*), PK22 (campuran 75 mL *polyurethane* dan 4 gram *chitosan*), dan PK23 (campuran 75 mL *polyurethane* dan 6 gram *chitosan*).

3.1.4 Uji Organoleptik terhadap Terkelupas

Pengujian organoleptik terhadap terkelupas ditunjukkan pada Gambar 4. Lapisan terkelupas pada penelitian ini disebabkan oleh ketebalan produk yang membuat kulit lebih lembab sehingga proses pengeringan yang belum sempurna pada bagian bawah produk sehingga pada saat produk di angkat dari cetakan bagian yang belum kering masih menempel pada cetakan.



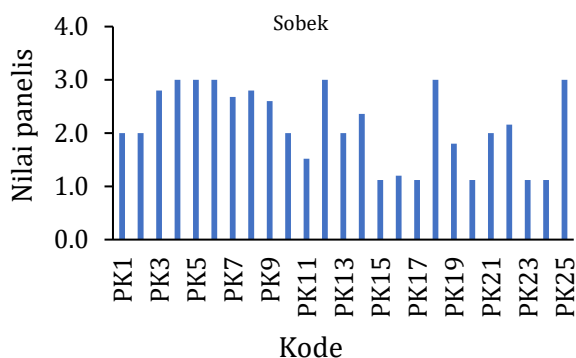
Gambar 4. Analisa organoleptik terhadap lapisan terkelupas pada kulit sintetis

Dari Gambar 4 dapat dilihat hasil organoleptik terhadap retak pada kulit sintetis

memiliki rentang skala antara 1-3, dimana nilai skala 1 menyatakan sampel tidak terkelupas, skala 2 menyatakan sampel sedikit terkelupas dan nilai 3 menyatakan banyak terkelupas. Hasil penilaian panelis menunjukkan bahwa sampel baik atau yang tidak terkelupas adalah sampel dengan kode PK17 (campuran 60 mL *polyurethane* dan 4 gram *chitosan*) dan PK24 (campuran 75 mL *polyurethane* dan 8 gram *chitosan*).

3.1.5 Uji Organoleptik terhadap Sobek

Pengujian organoleptik terhadap sobek ditunjukkan pada Gambar 5. Cacat sobek pada kulit sintetis terjadi pada saat produk yang di angkat sulit untuk lepas dari cetakan karena faktor kulit yang masih belum siap untuk dilepas atau belum kering sempurna, oleh karena bagian kulit yang di angkat secara paksa akan sobek.



Gambar 5. Analisa organoleptik sobek pada kulit sintetis

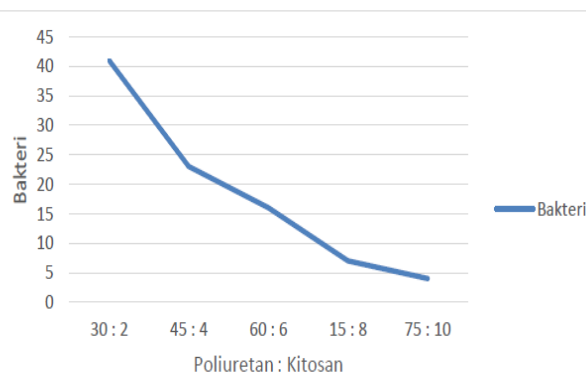
Dari Gambar 5 dapat dilihat hasil organoleptik terhadap sobek pada kulit sintetis memiliki rentang skala 1-3, dimana nilai skala 1 adalah kulit yang tidak sobek, nilai sjala 2 kulit yang sedikit sobek dan nilai skala 3 adalah kulit yang banyak sobek. Hasil penilaian penelis menunjukkan bahwa nilai terkecil dari skala yang diperoleh atau sampel yang tidak sobek adalah pada sample dengan kode PK15 (campuran 45 mL *polyurethane* dan 10 gram *chitosan*), PK17 (campuran 60 mL *polyurethane* dan 4 gram *chitosan*), PK20 (campuran 60 mL *polyurethane* dan 10 gram *chitosan*), PK23 (campuran 75 mL *polyurethane* dan 6 gram *chitosan*), dan PK24 (campuran 75 mL *polyurethane* dan 8 gram *chitosan*)

3.2 Hasil Uji Anti Bakteri

Hasil uji anti bakteri pada 5 sampel variasi *chitosan* diperlihatkan pada Gambar 6. Dari

Gambar 6 terlihat bahwa bertambahnya *chitosan* yang diberikan, maka jumlah bakteri ikut menurun yaitu pada sampel PK25 yaitu 4 bakteri.

Chitosan memiliki sifat antimikroba, karena dapat menghambat bakteri patogen dan mikroorganisme pembusuk, termasuk jamur, bakteri gram-positif, bakteri gram negatif. Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa semakin banyak *chitosan* yang ditambahkan maka semakin berkurang atau semakin menurun jumlah bakteri yang terdapat pada produk kulit sintetis. Sampel PK6 yang memakai *chitosan* 2 gram memiliki jumlah bakteri terbanyak yaitu mencapai 41 bakteri, lalu seiring dengan penambahan *chitosan* maka jumlah bakteri akan menurun.



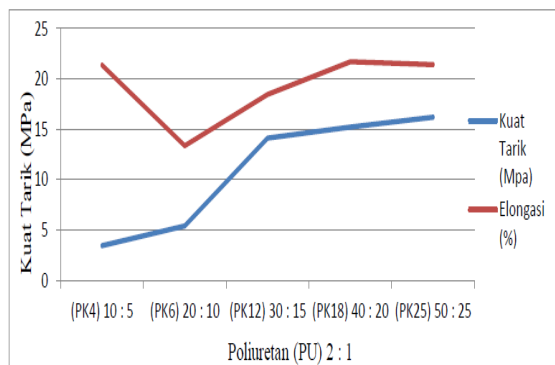
Gambar 6. Uji anti bakteri pada kulit sintetis

Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *chitosan* ampuh untuk menghilangkan bakteri yang terdapat pada kulit sintetis. Anti bakteri dari *chitosan* adalah gugus fungsional amina dan kemampuan menyerap dari *chitosan* yang mempunyai muatan positif. Sedangkan sel membran mikroba bermuatan negatif. Muatan positif dan negatif ini berinteraksi secara elektrostatis yang menyebabkan membran mengalami tekanan *permeable* yang menyebabkan tekanan osmotik di dalam sel tidak seimbang yang menghalangi pertumbuhan dari mikroba. Di dalam sel juga terjadi peristiwa hidrolisa dalam dinding sel yang menyebabkan keluarnya elektrolit sel yang menyebabkan sel mati.

3.3 Hasil Uji Kuat Tarik

Sifat mekanis *biodegradable foam* dapat dilihat dengan melakukan uji tarik. Hasil pengujian kuat tarik dapat dilihat pada Gambar 7. Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan kuat tarik seiring bertambahnya

volume PU, dari sampel PK4 dengan volume PU 10 mL dan 5 gram yaitu didapatkan hasil uji kuat tarik terendah sebesar 3,432 MPa dengan elongasi 21,36 % dan sampel PK25 dengan volume *polyurethane* 50:25 mL didapatkan hasil uji kuat tarik tertinggi yaitu sebesar 16,181 MPa dengan elongasi 21,42 %.



Gambar 7. Uji kuat tarik pada kulit sintesis

Tensile strength atau kuat tarik adalah kekuatan putus suatu bahan yang dihitung dari pembagian gaya maksimum yang mampu ditanggung bahan terhadap luas penampang bahan mula-mula. Tujuan melakukan uji tarik adalah untuk mengetahui kekuatan tarik biofoam sifat mekanis *biodegradable foam* dilihat dengan melakukan uji tarik.

Dalam SNI nilai kuat tarik kulit sintesis adalah minimum 60 MPa - 180 MPa dengan tipe A memakai lapisan penguat kain rajut. Lalu kuat tarik minimum 180 MPa - 230 MPa dengan tipe B memakai lapisan kain bukan rajut. Dengan demikian nilai kuat tarik yang didapatkan pada penelitian ini tidak dapat disesuaikan untuk syarat SNI karena tidak ada tambahan kain rajut maupun kain bukan rajut sebagai penguat tambahan. PU merupakan bahan hasil poliadisi digunakan sebagai busa keras maupun lunak, PU dibuat dengan mereaksikan *diisocyanate* dengan *diol* menghasilkan struktur blok yang terdiri atas bagian yang keras (*isocyanate* dan *diol* berantai pendek) dan bagian yang lunak (*diol* berantai panjang). *Phenyl-Isocyanate* (PU A) akan memberikan kekakuan atau segmen keras pada kulit. *Polypropylene Glycol* (PU B) akan memberikan fleksibilitas tinggi atau segmen lunak pada kulit.

PU berbeda dengan kebanyakan bahan plastik lain, hal ini karena pada proses sintesis PU memungkinkan untuk mengontrol sifat dari produk akhir. Bahan kimia reaktif dicampur secara bersamaan dan direaksikan untuk

menghasilkan polimer dengan sifat yang diharapkan. PU disintesis menjadi bentuk akhir selama reaksi polimerisasi berlangsung.

4. Kesimpulan

Pengaruh penambahan *polyurethane* (PU) terhadap karakteristik kulit yang dihasilkan yaitu sangat berpengaruh terhadap elastisitas dan kekerasan pada hasil akhir kulit, nilai kuat tarik terendah pada penelitian ini terdapat pada PK4 dengan volume *polyurethane* 10:5 mL yaitu 3,432 MPa dengan elongasi 21,36 % dan nilai kuat tarik tertinggi terdapat pada PK25 dengan volume *polyurethane* 50:25 mL yaitu 16,181 MPa dengan elongasi 21,42 %.

Pengaruh penambahan *chitosan* terhadap karakteristik kulit yang dihasilkan yaitu dapat menghambat pertumbuhan bakteri maupun penjamuran pada kulit sintesis. Dengan demikian hasil uji anti bakteri yang didapatkan yaitu sesuai dengan yang diharapkan, karena pemakaian *chitosan* mulai dari 2 gram terdapat 41 bakteri dan terus mengalami pengurangan bakteri hingga *chitosan* yang paling banyak ditambahkan yaitu 10 gram terdapat 4 bakteri.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Laboratorium Jurusan Teknik Kimia di Politeknik Negeri Lhokseumawe yang telah memfasilitasi penggunaan fasilitas laboratorium untuk penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Badan Pusat Statistik, 2022. *Statistik Produksi Hortikultura 2021*. BPS. Retrieved from <https://www.bps.go.id>.
- [2] Wulandari, H. T., Pramono, A., & Setyowati, S., 2021. *Potensi kulit pisang sebagai bahan baku produk pangan*. Jurnal Teknologi Pangan dan Gizi, Vol. 10, No. 2, pp. 45-52.
- [3] Smith, J., & Brown, A., 2022. *Environmental impact of synthetic leather: Degradation and toxicity assessment*. Journal of Sustainable Materials, Vol. 15, No. 3, pp. 112-125.
- [4] Doe, J.M., & Smith, R., 2021. *Enhancing mechanical properties of bio-synthetic leather using polyurethane*. Journal of Polymer Science and Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 145-158, 2021.
- [5] Johnson, L. K., Brown, P. R., & Lee, M. T., 2022. *Wear resistance and tensile strength improvements in bio-based synthetic*

- leather with polyurethane integration. International Journal of Materials Research, Vol. 19, No. 3, pp. 87-102.
- [6] Chia, C. H., Ong, S. H., & Tan, L. Y., 2020. *Modification of fruit waste-based nata for enhanced tensile strength and elasticity*. Journal of Biopolymer Science, Vol. 28, No. 4, pp. 215-230.
- [7] Rahman, M. K. & Yusof, A. T., 2021. *Mechanical properties of nata de coco derived from different organic sources*. International Journal of Sustainable Materials Research, Vol. 12, No. 2, pp. 98-110.
- [8] Kaur, H., Singh R., & Sharma P., 2018. *Enhancing antimicrobial properties of biopolymers using chitosan*. Journal of Biopolymer Science, Vol. 25, No. 4, pp. 178-192.
- [9] Nguyen M. T., & Wang D. L., 2019. *Chitosan-based antimicrobial coatings for biodegradable polymers*. International Journal of Biomaterials Research, Vol. 14, No. 3, pp. 112-126.
- [10] Almeida, J. S., Costa L. F., & Santos M. R., 2021. *Development of bio-synthetic leather using nata de banana and polyurethane*. Journal of Sustainable Materials Research, Vol. 18, No. 2, pp. 134-150.
- [11] Kim, H., Lee Y. J., & Park S., 2020. *Enhanced mechanical and antimicrobial properties of bio-leather using chitosan and polyurethane composites*. International Journal of Biopolymer Science, Vol. 22, No. 3, pp. 89-104.
- [12] Gonzalez, P., Ramirez M. L., & Fernandez A. T., 2022. *Eco-friendly bio-leather from bacterial cellulose and biopolymers: Properties and applications*. Green Materials Journal, Vol. 10, No. 1, pp. 56-72.
- [13] Martinez, R. A., Gomez, L. P., & Silva, T. H., 2020. *Utilization of bacterial cellulose from coconut water for bio-leather applications*. Journal of Biopolymer Science, Vol. 20, No. 4, pp. 210-225.
- [14] Patel, D. K. & Mehta, S. R., 2021. *Bacterial cellulose derived from fruit waste: A potential material for sustainable leather alternatives*. International Journal of Green Materials, Vol. 15, No. 2, pp. 98-115.