



KINERJA MEMBRAN KARAGENAN-PVA SEBAGAI ANODE BATERAI FLEKSIBEL

Bustami Ibrahim*, Heru Sumaryanto, Nailus Sriarsy, Zacky Arivaie Santosa

Departemen Teknologi Hasil Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University
Jalan Agatis, Kabupaten Bogor, Jawa Barat, Indonesia 16680

Diterima: 15 Juli 2024/Disetujui: 3 Desember 2024

*Korespondensi: bibrahim@apps.ipb.ac.id

Cara sitasi (APA Style 7th): Ibrahim, B., Sumaryanto, H., Sriarsy, N., & Santosa, Z. A. (2024). Kinerja membran karagenan-PVA sebagai anode baterai fleksibel. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 27(12), 1118-1133. <http://dx.doi.org/10.17844/jphphi.v27i12.57204>

Abstrak

Energi listrik berperan penting dalam kehidupan manusia dan telah menjadi kebutuhan utama dalam aktivitas sehari-hari. Sumber energi listrik yang umum digunakan salah satunya adalah baterai, yang dikenal sebagai sumber energi yang fleksibel karena dapat dimanfaatkan di berbagai tempat dan situasi. Baterai mengandung berbagai bahan kimia yang berbahaya misalnya merkuri, mangan, timbel, nikel, litium, dan kadmium. Kebutuhan akan energi terbarukan dan teknologi penyimpanan yang ramah lingkungan sangat dibutuhkan untuk mengurangi dampak lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan rasio karagenan dan PVA terbaik berdasarkan kinerja membran karagenan-PVA sebagai anode organik dalam aplikasi baterai kertas. Metode yang digunakan meliputi persiapan membran dengan variasi rasio karagenan dan PVA, karakteristik membran, daya serap air, analisis gugus fungsi, kuat tarik, konduktivitas proton dan elektrisitas baterai kertas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa membran dengan rasio 3:1 memberikan hasil terbaik dengan konduktivitas proton tertinggi sebesar $9,3 \times 10^{-6}$ S/cm, daya serap air sebesar 93,91%, arus listrik tertinggi sebesar $0,008 \pm 0,001$ mA, tegangan listrik tertinggi sebesar $0,24 \pm 0,02$ V dan daya listrik tertinggi sebesar $0,0019 \pm 0,0004$ mW. Hasil spektrum FTIR dari membran karagenan-PVA menunjukkan tidak terjadi reaksi kimia atau pembentukan gugus baru. Karagenan-PVA berpotensi menjadi bahan baterai fleksibel yang ramah lingkungan.

Kata kunci: anode organik, energi listrik, kekuatan tarik, proton, tegangan

Performance of Carrageenan-PVA Membrane as Anode in Flexible Battery

Abstract

Electrical energy plays an important role in human life and has become a major necessity for daily activities. One of the most commonly used sources of electrical energy is batteries, which are known as flexible energy sources because they can be utilized in various places and situations. However, batteries contain various hazardous chemicals, such as mercury, manganese, lead, nickel, lithium, and cadmium. Renewable energy and environmentally friendly storage technologies are urgently needed to reduce environmental impacts. This study aimed to determine the best ratio of carrageenan and PVA based on the performance of a carrageenan-PVA membrane as an organic anode in paper battery applications. The methods used included membrane preparation with varying ratios of carrageenan and PVA, membrane characteristics, air absorption, functional group analysis, tensile strength, proton conductivity, and electrical properties of paper batteries. The results of the study showed that the membrane with a ratio of 3:1 gave the best results, with the highest proton conductivity of 9.310×10^{-6} S/cm, air absorption of 93.91%, the highest electric current of 0.008 ± 0.001 mA, the highest electric voltage of 0.24 ± 0.02 V and the highest electric power of 0.0019 ± 0.0004 mW. The FTIR spectrum of the carrageenan-PVA membrane showed no chemical reaction or the formation of new groups. Carrageenan-PVA has the potential to be an environmentally friendly, flexible battery material.

Keywords: electrical energy, proton, organic anode, tensile strength, voltage

PENDAHULUAN

Energi listrik memainkan peran penting dalam kehidupan manusia dan telah menjadi kebutuhan utama dalam aktivitas sehari-hari. Sumber energi listrik yang umum digunakan salah satunya adalah baterai, yang dikenal sebagai sumber energi fleksibel karena dapat dimanfaatkan di berbagai tempat dan situasi. Baterai merupakan salah satu media penyimpanan energi yang paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, mulai dari perangkat portabel, jam, hingga perangkat elektronik lainnya. Baterai adalah perangkat yang dapat mengubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi listrik yang dapat digunakan (Nasution, 2021). Baterai terdiri atas terminal positif (katode) dan terminal negatif (anode) serta elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar.

Baterai secara umum terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer adalah jenis baterai yang tidak dapat diisi ulang dan hanya dapat digunakan sekali. Baterai sekunder dapat diisi ulang dan digunakan berulang kali. Baterai telah digunakan untuk penyimpanan energi, misalnya baterai alkalin, baterai asam timbel, dan baterai lithium-ion (Jin *et al.*, 2021). Baterai-baterai ini dikenal memiliki kepadatan daya dan energi yang tinggi sehingga kinerjanya cukup baik. Namun, baterai-baterai ini memiliki kelemahan, yaitu masalah keamanan, sumber daya yang terbatas, dampak ekologi, kurangnya fleksibilitas, dan biaya produksi yang mahal (Wentker *et al.*, 2019). Selain itu, baterai-baterai ini mengandung berbagai bahan kimia berbahaya misalnya merkuri, mangan, timbel, nikel, litium, dan kadmium (Nurannisa *et al.*, 2021). Juqu *et al.* (2022) menyatakan bahwa permintaan baterai yang murah, ramah lingkungan, fleksibel, dan dapat terurai secara hayati adalah baterai berbasis kertas.

Baterai kertas adalah perangkat penyimpanan dan produksi energi ultra-tipis yang serbaguna yang dibentuk menggunakan nanotube karbon pada lembaran kertas berbasis selulosa (Kadam *et al.*, 2016). Sifat struktural kertas, yaitu permukaannya yang kasar dan berpori akan memfasilitasi transportasi ion dan

elektron di seluruh strukturnya sehingga berkontribusi pada kinerja daya yang tinggi terutama pada elektrode (Hu & Cui, 2012). Baterai kertas memiliki keunggulan dalam hal biodegradabilitas, fleksibilitas, biaya rendah, dan pemrosesan yang sederhana (Oliveira *et al.*, 2018). Baterai kertas bertindak sebagai baterai berenergi tinggi dan superkapasitor dengan menggabungkan dua komponen terpisah dalam elektrolit (Shukla *et al.*, 2018). Meskipun baterai kertas sangat tipis, baterai ini lebih ramah lingkungan dan memungkinkan integrasi langsung ke dalam berbagai perangkat (Samaaiah *et al.*, 2020).

Schlemmer *et al.* (2019) menunjukkan jenis polisakarida yang memiliki sistem penyimpanan energi antara lain alginat, agarosa, amilopektin, amilosa, siklodekstrin, kitosan, dan karagenan. Nithya *et al.* (2020) menyatakan bahwa polisakarida karagenan mengandung elektrolit sebagai membran yang sangat cocok untuk aplikasi baterai. Campuran karagenan dan polivinil alkohol menunjukkan kristalinitas rendah, konduktivitas ionik tinggi, dan kinerja tahan api yang sangat baik (Ye *et al.*, 2020). Penelitian yang dilakukan oleh Ibrahim *et al.* (2020) menguji kitosan dan karagenan yang digabungkan dengan poli (vinil alkohol) sebagai bahan membran dalam sistem sel bahan bakar mikro (MFC) sel tunggal, mencapai nilai konduktivitas proton sebesar $1,15 \times 10^{-3}$ S/cm, sedangkan biolistrik *salt bridge* MFC variasi rasio karagenan: karboksimetil selulosa (0,5:1) (b/b) memiliki daya listrik $0,85 \pm 0,06$ mW, tegangan listrik $0,79 \pm 0,04$ V, dan nilai rata-rata kuat arus $1,22 \pm 0,13$ mA (Bustami *et al.*, 2022).

Karagenan adalah biopolimer berbasis polisakarida yang bersifat polianionik karena memiliki gugus sulfat dalam strukturnya (Eldin *et al.*, 2019). Karagenan diekstraksi dari rumput laut merah kelas Rhodophyceae yang mengandung 15-40% ester sulfat (Khalil *et al.*, 2017 dan Tarman *et al.*, 2024). Karagenan terdiri atas unit $\alpha(1,3)$ -D-galaktosa-4-sulfat dan $\beta(1-4)$ -3,6-anhidro-D-galaktosa dengan berat molekul di atas 100 kDa. Kandungan gugus sulfat dalam karagenan dapat meningkatkan konduktivitas proton pada membran pertukaran proton (Cabello *et al.*, 2014).



Polivinil alkohol (PVA) adalah salah satu polimer sintetis dengan keunggulan, yaitu stabilitas kimia yang baik, hidrofilik yang tinggi, dan kemampuan membentuk film (Warastuti *et al.*, 2015). PVA tidak beracun, biokompatibel, dan menunjukkan adhesi sel yang minimal. PVA termasuk dalam polimer sintetis yang larut dalam air, selain itu PVA juga tahan terhadap lemak, minyak, dan pelarut. PVA memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan kapasitas penyimpanan muatan yang sangat baik (Saini *et al.*, 2017). Selain itu, PVA mudah larut dalam air, dapat terurai secara hayati, dan digunakan dalam berbagai aplikasi (Dai *et al.*, 2014). Penelitian diharapkan meningkatkan konduktivitas proton dan stabilitas mekanik, sekaligus memanfaatkan sifat terbiodegradasi menggunakan membran komposit karagenan-PVA sebagai anode untuk baterai kertas. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan rasio karagenan dan PVA terbaik berdasarkan kinerja membran karagenan-PVA sebagai anode organik dalam aplikasi baterai kertas. Inovasi dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan baterai organik dengan sifat fleksibel.

BAHAN DAN METODE

Pembuatan Membran Karagenan-PVA

Membran Karagenan-PVA dibuat dengan memodifikasi prosedur Zhang *et al.* (2014). Membran karagenan-PVA dibuat dengan mencampurkan larutan karagenan 3% (b/v) dan larutan PVA 3% (b/v) dengan rasio 3:1, 1:1, dan 1:3 (v/v). Larutan tersebut diaduk menggunakan blender tangan dan dibiarkan hingga busa dalam campuran menghilang. Campuran polimer kemudian dituangkan ke dalam cetakan dan dikeringkan pada suhu 80°C selama 12 jam. Setelah kering, campuran polimer (membran) dikeluarkan dari cetakan dalam bentuk lapisan tipis dan membran dipotong sesuai dengan ukuran baterai kertas yang diinginkan. Membran kemudian direndam dalam larutan KOH 1% selama 10 menit. Setelah itu, membran dibilas dengan air distilasi dan dikeringkan.

Persiapan Elektrolit Gel

Elektrolit disiapkan menggunakan prosedur yang dimodifikasi dari Nair *et al.* (2013). Langkah pertama adalah pembuatan larutan natrium alginat dengan konsentrasi 20%. Larutan alginat kemudian ditambahkan ke dalam larutan NaCl 4% dengan rasio 1:1 (v/v) dan dipanaskan pada suhu 70°C hingga homogen. Larutan elektrolit kemudian didinginkan hingga sedikit mengental, menyerupai gel. Selanjutnya, gel elektrolit tersebut diaplikasikan pada anode.

Pembuatan Baterai Fleksibel

Baterai kertas dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu anode, katode, dan elektrolit. Lapisan pertama adalah membran karagenan-PVA sebagai anode, cat konduktif karbon sebagai katode, dan gel alginat-NaCl sebagai elektrolit. Langkah pertama dalam pembuatan baterai kertas adalah menyiapkan membran sebagai anode. Selanjutnya, anode dilapisi dengan gel elektrolit, kemudian lapisan cat konduktif karbon diterapkan di atas lapisan elektrolit. Posisi elektrolit berada di antara anode dan katode. Desain baterai kertas dapat dilihat pada *Figure 1*.

Analisis Konduktivitas Proton Membran

Konduktivitas proton membran karagenan-PVA diukur menggunakan spektrometer impedansi LCR-meter HIOKI 3532-50. Membran yang digunakan memiliki ukuran 2,52 cm. Membran dijepit di antara dua elektrode karbon dan nilai konduktivitas dapat dibaca (Handayani *et al.*, 2010). Selain itu, ketebalan membran diukur menggunakan mikrometer digital (ToKi, Indonesia). Konduktivitas proton (S/cm) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\delta = G \frac{L}{A}$$

Keterangan:

δ = konduktivitas proton (S/cm)

G = nilai konduktivitas (S)

L = jarak antara dua elektroda (cm)

A = luas permukaan (cm²)

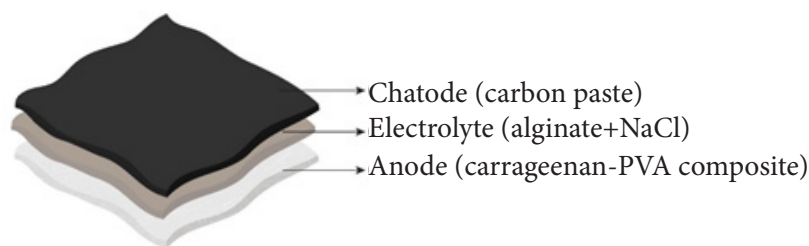


Figure 1 Design of paper battery

Gambar 1 Desain baterai kertas

Analisis Penyerapan Air

Penyerapan air adalah kapasitas membran dalam menyerap air, yang dapat diukur dengan mengeringkan sampel membran karagenan-PVA di dalam oven pada suhu 120°C selama 24 jam. Membran yang telah kering kemudian ditimbang untuk memperoleh berat kering (W_{dry}) (Handayani, 2008). Sampel membran karagenan-PVA kemudian direndam dalam air selama 24 jam pada suhu ruang. Membran yang basah kemudian ditimbang, dan diperoleh berat basah (W_{wet}). Penyerapan air dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Water uptake (\%)} = \frac{A-B}{B} \times 100$$

Keterangan:

A = berat basah

B = berat kering

Analisis Kelompok Fungsional Membran

Analisis kelompok fungsional membran karagenan-PVA dilakukan menggunakan Spektrofotometer *fourier transform infrared* (FTIR) Perkin Elmer Spectrum One. Analisis dilakukan sebagai berikut: sampel pertama-tama dicampur dengan KBr, dihancurkan, dan kemudian dibentuk menjadi pelet (Skoog *et al.*, 1996). Sinar inframerah yang ditembakkan pada membran karagenan-PVA direkam sebagai gelombang dengan spektrum yang digunakan antara 500-4.000 cm^{-1} .

Analisis Kekuatan Tarik Membran

Pengujian membran dilakukan menggunakan alat uji kekuatan tarik tipe Instron 2710-004. Membran yang akan diuji dipotong dengan panjang 8 cm dan lebar 2 cm, dan ketebalannya dihitung (ASTM D3039). Sampel dijepit pada setiap ujung

membran. Membran kemudian ditarik dan diamati hingga terputus. Hasil uji dicatat pada tegangan maksimum dan regangan. Kekuatan tarik membran dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Tensile strenght (MPa)} = \frac{F}{A}$$

Keterangan:

F = gaya tarik pada titik putus

A = luas

Analisis Listrik Baterai

Kinerja baterai diukur berdasarkan tegangan, kuat arus, dan daya. Pengukuran listrik dilakukan menggunakan multimeter. Elektrode dihubungkan ke kabel multimeter dengan ion yang sama, dan nilai tegangan, daya, dan arus diukur (Logan *et al.*, 2006). Kerapatan arus dihitung dengan membagi nilai arus per jam dengan luas permukaan anode. Resistansi internal dihitung menggunakan rumus berikut:

$$I = \frac{E}{R}$$

Keterangan:

I = arus listrik (mA)

E = tegangan (V)

R = resistansi internal (Ω)

Kepadatan daya dihitung dengan membagi daya yang dihasilkan dengan luas permukaan anode. Daya dihitung menggunakan rumus berikut:

$$P = I E$$

Keterangan:

P = daya listrik (W)

I = arus listrik (mA)

E = tegangan (V)

Analisis Data

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) dengan 1 faktor, yaitu



rasio karagenan-PVA (3:1, 1:1, dan 1:3 (v/v)) dengan 3 ulangan. Data yang diperoleh dalam penelitian ini terlebih dahulu dilakukan uji homogenitas selanjutnya dianalisis menggunakan *analysis of variance* (ANOVA) pada selang kepercayaan 95%. Hasil perlakuan yang berbeda nyata dilanjutkan dengan uji Duncan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Membran Karagenan-PVA

Karagenan dapat digunakan sebagai salah satu bahan untuk membran penukar proton karena memiliki gugus sulfat yang bermuatan negatif (Cabello *et al.*, 2014). Karagenan tersusun dari unit-unit galaktosa dan 3,6 anhidrogallaktosa (3,6-A-G) yang berulang dengan atau tanpa mengandung sulfat. PVA memiliki kemampuan untuk membentuk film yang baik, stabilitas kimia yang tinggi, permeabilitas yang selektif terhadap air, dan kemampuan membentuk area ikatan silang yang membantu menciptakan membran yang stabil dengan sifat kimia yang baik (Kakati *et al.*, 2015). Membran karagenan-PVA dapat dilihat pada *Figure 2*.

Membran karagenan-PVA yang dihasilkan memiliki karakteristik berupa lembaran tipis dengan tekstur yang halus berwarna transparan sedikit kecokelatan dengan ketebalan $0,02 \pm 0,003$ mm. Membran karagenan-PVA secara visual menunjukkan adanya perbedaan. Membran dengan rasio 1:3 berwarna lebih terang dibandingkan dengan rasio 1:1 dan 3:1. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi karagenan

yang digunakan, semakin pekat atau kecokelatan warna membran yang dihasilkan. Karakteristik ini serupa dengan membran yang dihasilkan dalam penelitian Ibrahim *et al.* (2020), membran komposit kitosan-karagenan memiliki warna transparan sedikit kecokelatan dan ketebalan sekitar 0,004 mm. Duan *et al.* (2012) menyebutkan bahwa membran nafion memiliki permukaan lebih kasar karena terbuat dari bahan sintetik tertrafluoroetilen tersulfonasi. Membran komposit karagenan-PVA ini memiliki fungsi yang sama dengan membran nafion yaitu sebagai penukar proton.

Konduktivitas Proton Membran Karagenan-PVA

Konduktivitas proton adalah salah satu faktor terpenting dalam penetapan dari sebuah elektrolit polimer. Konduktivitas proton juga dapat menunjukkan kemampuan suatu membran dalam menghasilkan proton yang berperan sebagai anode pada kinerja baterai kertas. Penelitian Kusumastuti *et al.* (2021) menyatakan bahwa makin besar nilai konduktivitas proton pada membran maka makin baik kinerja dari membran untuk diaplikasikan pada sel bahan bakar. Uji konduktivitas proton ditentukan menggunakan spektrometer impedans LCR-meter HIOKI 3532-50. Hasil uji konduktivitas proton membran karagenan-PVA dapat dilihat pada *Figure 3*.

Nilai konduktivitas proton pada membran karagenan-PVA yang ditunjukkan pada *Figure 3* dengan perlakuan rasio 3:1 memiliki nilai tertinggi yaitu $8,09 \times 10^{-6}$ S/cm sedangkan nilai konduktivitas proton



Figure 2 Appearance of carrageenan-PVA membranes with different ratios
Gambar 2 Ketampakan membran karagenan-PVA dengan rasio yang berbeda

pada perlakuan 1:1 dan 1:3 secara berturut-turut, yaitu $5,9310^{-6}$ S/cm dan $4,2610^{-6}$ S/cm. Uji statistik ANOVA menunjukkan bahwa perbedaan komposisi membran karagenan-PVA berpengaruh nyata terhadap konduktivitas proton yang dihasilkan. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa nilai konduktivitas proton yang dihasilkan pada perlakuan karagenan-PVA 3:1 berbeda secara signifikan dengan perlakuan karagenan-PVA 1:1 dan perlakuan karagenan-PVA 1:3. Hasil penelitian Ibrahim *et al.* (2020) menunjukkan bahwa nilai konduktivitas proton membran komposit kitosan-karagenan, yaitu $1,510^{-3}$ S/cm. Konduktivitas proton mengalami penurunan seiring dengan penambahan jumlah PVA, hal ini ditunjukkan pada perlakuan 1:1 dan 1:3.

Hasil penelitian ini cukup berbeda dengan hasil yang diperoleh Sari *et al.* (2024) yang juga menunjukkan bahwa nilai konduktivitas proton yang dihasilkan sebesar $1,5510^{-3}$ S/cm. PVA adalah zat hidrofilik yang menahan sejumlah besar air sehingga meningkatkan jumlah proton dalam membran. Namun, membran PVA dapat menyerap molekul air dengan sangat kuat sehingga gerakan proton tidak efisien (Danwanichakul & Sirikharjornnam, 2013). Penelitian Julian & Santoso (2016) melaporkan membran dengan komposisi PVA lebih banyak dapat mengalami *swelling* yang mengakibatkan konduktivitas membran menjadi tidak terbaca dengan baik.

Water Uptake Membran Karagenan-PVA

Pengujian *water uptake* dilakukan dengan menghitung selisih antara bobot basah dan bobot kering membran. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas penyerapan air oleh membran. *Water uptake* merupakan faktor penting dalam menentukan kinerja akhir membran penukar proton. Nilai konduktivitas proton meningkat seiring dengan tingginya *water uptake* karena peningkatan mobilitas ion fase basah menyebabkan kadar air pada membran menjadi lebih besar (Qiao *et al.*, 2012). Hasil uji *water uptake* pada membran karagenan-PVA dapat dilihat pada Figure 4.

Berdasarkan hasil uji ditunjukkan pada Figure 4 rata-rata *water uptake* tertinggi terdapat pada perlakuan karagenan-PVA 3:1, yaitu $93,91 \pm 0,05^b$, sedangkan nilai *water uptake* pada perlakuan 1:1 $77,27 \pm 0,09^a$ dan 1:3 adalah $76,50 \pm 0,07^a$. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa nilai *water uptake* yang dihasilkan pada perlakuan karagenan-PVA 3:1 berbeda secara signifikan menunjukkan bahwa perbedaan rasio membran karagenan-PVA berbeda nyata terhadap nilai perlakuan karagenan-PVA 1:1 dan perlakuan 1:3. Membran dengan kinerja yang baik umumnya mempunyai nilai konduktivitas proton yang tinggi dengan serapan air (*water uptake*) yang tinggi (Muliawati *et al.*, 2021). Hal ini disebabkan oleh banyaknya molekul

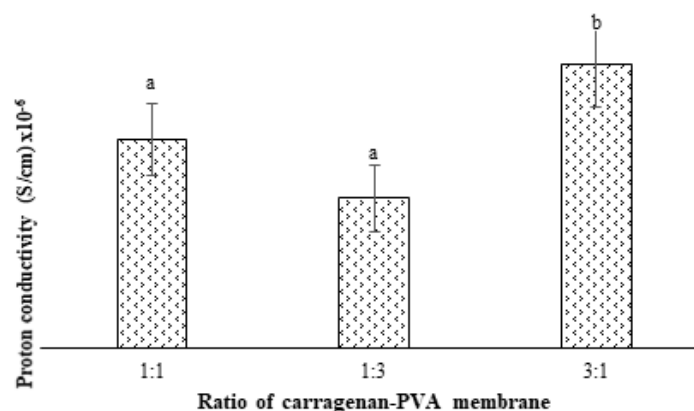


Figure 3 Effect of ratio carrageenan-PVA membrane on proton conductivity

Gambar 3 Pengaruh rasio karagenan-PVA terhadap konduktivitas proton



air dalam membran yang berfungsi sebagai media transfer proton. Kemampuan membran untuk menyerap air berkorelasi dengan konduktivitas ionik dan stabilitas mekaniknya (Hidayati *et al.*, 2017). Peningkatan nilai *water uptake* sejalan dengan peningkatan jumlah karagenan yang digunakan karena karagenan memiliki struktur hidrofilik yang fleksibel yang dapat menyesuaikan dengan tekanan arus dan gerakan gelombang dalam air (Prihastuti & Abdassah, 2019). Membran yang menyerap air dapat berfungsi sebagai media transpor proton, namun jika serapan air terlalu banyak dapat menyebabkan membran menjadi rapuh (Muliawati *et al.*, 2021). Jumlah karagenan yang digunakan juga memengaruhi penyerapan air karena karagenan bersifat hidrofilik sehingga memiliki konduktivitas proton yang tinggi. Proton tersebut bermigrasi melalui ikatan hidrogennya (Liew *et al.*, 2017).

Gugus Fungsi Membran Karagenan-PVA

Fourier transform infrared (FTIR) adalah instrumen untuk mengetahui vibrasi molekul pada suatu sampel yang dapat digunakan untuk memprediksi struktur senyawa kimia (Sulistiyani & Huda, 2018). Membran karagenan-PVA dikarakterisasi gugus fungsinya pada bilangan gelombang antara 4000-400 cm^{-1} . Analisis gugus fungsi pada membran dilakukan untuk menentukan yang terjadi pada komposit karagenan, PVA dan karagenan-PVA. Hasil pengukuran FTIR pada Figure 5.

Hasil spektrum membran karagenan-PVA menunjukkan bahwa terdapat bilangan gelombang 936-931 cm^{-1} yang menunjukkan gugus fungsi dari 3,6-anhidro-D-galaktosa yang terdapat pada ketiga perlakuan. Hasil penelitian Nasution *et al.* (2019) menunjukkan bahwa bilangan gelombang 930 cm^{-1} menunjukkan gugus fungsi 3,6-anhidro-D-galaktosa. Penelitian Setiajawati (2017) juga melaporkan pada bilangan gelombang 928-933 cm^{-1} menunjukkan gugus anhidro galaktosa. Selain itu, penelitian dari Ibrahim *et al.* (2020) menunjukkan adanya gugus fungsi 3,6-anhidro-D-galaktosa pada bilangan gelombang 967 cm^{-1} dan 937 cm^{-1} . Bilangan gelombang tersebut biasanya ditemui pada karagenan jenis kappa-karagenan. Bilangan gelombang 3.637-3.659 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi OH. menunjukkan adanya ikatan hidroksil pada panjang gelombang 3.600-3.000 cm^{-1} . Bilangan gelombang 854-848 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi galaktosa-4-sulfat yang mengidentifikasi karagenan jenis kappa karagenan. Berdasarkan penelitian Utomo *et al.* (2016) menunjukkan bahwa bilangan gelombang 850-863 cm^{-1} merupakan gugus fungsi dari galaktosa-4-sulfat yang terdapat pada karagenan.

Ikatan glikosidik pada perlakuan 1:1, 1:3 dan 3:1 berturut-turut, yaitu 1.024 cm^{-1} , 1031 cm^{-1} dan 1.025 cm^{-1} . Bhernama (2019) melaporkan terdapat puncak serapan 1047,23 cm^{-1} yang memperlihatkan adanya ikatan glikosidik dan serapan 840-850 cm^{-1} dari

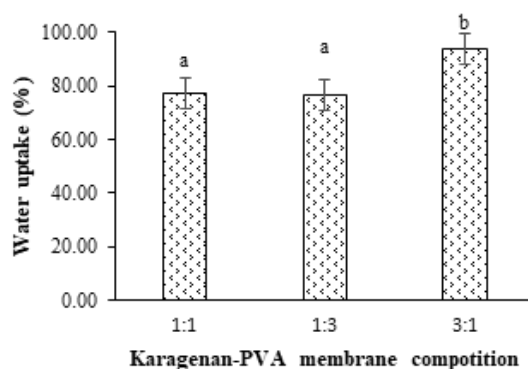


Figure 4 Effect of ratio carrageenan-PVA membrane on water uptake
Gambar 4 Pengaruh rasio karagenan-PVA terhadap daya serap air

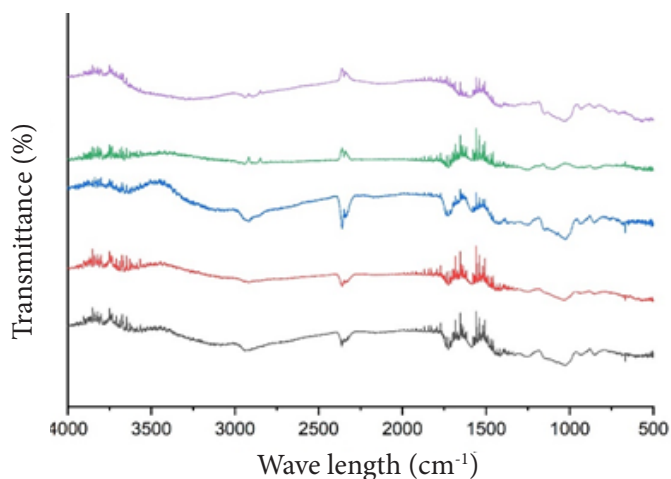


Figure 5 FTIR results of carrageenan, PVA, carrageenan-PVA membrane 1:1; (—), 1:3 (—), 3:1 (—), carrageenan (—), PVA (—)

Gambar 5 Hasil FTIR karagenan, PVA, karagenan-PVA membran 1:1; (—), 1:3 (—), 3:1 (—), karagenan (—), PVA (—)

ikatan galaktosa 4-fosfat dan serapan $925,83\text{ cm}^{-1}$ ikatan 3,6-anhidrogalaktosa (Hidayah *et al.*, 2013). Fardhyanti & Julianur (2015) menunjukkan adanya ikatan glikosidik pada spektrum $1067,17\text{ cm}^{-1}$ dan ikatan S=O gugus ester sulfat pada spektrum $1227,67\text{ cm}^{-1}$ jenis kappa karagenan.

Hasil spektrum FTIR dari senyawa polivinil alkohol terdapat pada *Figure 5* terlihat adanya daerah serapan pada 1.443 dan 1.727 cm^{-1} yang disebabkan oleh ikatan karbon tak jenuh dan gugus karbonil PVA. Pita serapan pada 1.452 dan 1.714 cm^{-1} disebabkan oleh ikatan karbon tak jenuh dan gugus karbonil yang terdapat di PVA (Meng *et al.*, 2018). Selain itu, terdapat bilangan gelombang 2.943 dan 2.875 cm^{-1} yang menunjukkan gugus CH. Penelitian Sukhlaaied & Riyajan (2013) melaporkan pada bilangan 2.924 cm dan 2.854 cm^{-1} menunjukkan adanya peregangan gugus CH. Penelitian Croitoru *et al.* (2020) juga terdapat bilangan gelombang 2.932 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus CH.

Berdasarkan hasil analisis FTIR membran karagenan-PVA senyawa yang terbentuk adalah senyawa asli dari bahan pembuatan membrannya, yaitu karagenan dan PVA. Bilangan gelombang pada membran karagenan-PVA dapat dilihat pada *Table 1*.

Kuat Tarik Membran Karagenan-PVA

Kuat tarik diukur menggunakan alat uji tarik jenis Instron 2710-004 dan berdasarkan ASTM 2002. Uji tersebut berfungsi untuk mengetahui ketahanan membran dari gaya luar yang diberikan (Julian dan Santoso 2016). Makin besar nilai kekuatan tarik, maka membran makin kuat untuk menahan kerusakan mekanik. Data hasil uji kuat tarik membran karagenan-PVA dapat dilihat pada *Figure 6*.

Hasil uji kuat tarik membran karagenan-PVA yang disajikan pada *Figure 7* perbandingan 3:1 menunjukkan bahwa nilai kuat tarik membran tertinggi, yaitu sebesar $2,3\pm0,59\text{ MPa}$. Sedangkan nilai kuat tarik pada perbandingan 1:1, yaitu $2,0\pm0,45\text{ MPa}$ dan nilai kuat tarik pada perbandingan 1:3 sebesar $1,39\pm0,28\text{ MPa}$. Hasil uji statistik ANOVA ($p<0,05$) menunjukkan bahwa perbedaan perbandingan komposisi membran tidak berpengaruh nyata terhadap hasil dari uji kuat tarik ($p>0,05$). Hasil uji kuat tarik yang didapat pada penelitian cukup berbeda dengan hasil penelitian Ibrahim *et al.* (2020) nilai tertinggi didapat pada membran komposit kitosan-karagenan $7,047\pm0,158\text{ MPa}$. Perbedaan ini disebabkan oleh bahan penyusun membran. Hal tersebut didukung dengan hasil penelitian



Table 1 FTIR functional groups of carrageenan-PVA

Tabel 1 Gugus fungsi FTIR karagenan-PVA

Functional groups	1:1 (cm ⁻¹)	1:3 (cm ⁻¹)	3:1 (cm ⁻¹)
OH	3,638	3,659	3,637
Ester sulphate	1,249	1,254	1,250
3,6-anhidro-D-galactose	931	931	963
Glycosidic bond	1,024	1,031	1,025
Galactose-4-sulphate	848	848	854

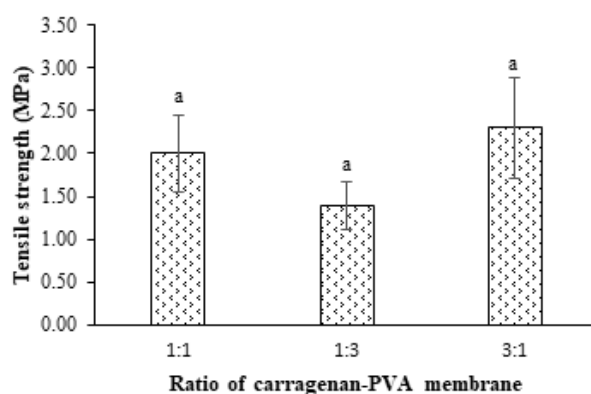


Figure 6 Effect of carrageenan-PVA ratio on tensile strength of membrane
 Gambar 6 Pengaruh rasio karagenan-PVA terhadap kekuatan tarik membran

dari Dwimayasanti & Kumayajanti (2018) bahwa perpaduan karagenan dan kitosan menghasilkan kuat tarik yang cukup baik dengan kekuatan biopolimer kitosan yang sudah ditambah *plasticizer*.

Rusli *et al.* (2017) melaporkan bahwa besar kuat tarik membran dapat dipengaruhi dari bahan penyusun membran. Nilai kuat tarik membran yang rendah lebih rentan terhadap kerusakan yang disebabkan dari luar, sedangkan nilai kuat tarik yang tinggi melindungi dari kerusakan fisik saat membran digunakan pada baterai. Kerusakan tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu perubahan suhu, kelembapan dan tekanan oleh air (Kusoglu *et al.*, 2007). Perlakuan rasio 1:3 memiliki nilai kuat tarik yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan perlakuan rasio lainnya. Hal ini dimungkinkan karena pengaruh penambahan *plasticizer*, yaitu polivinil alkohol. Molekul *plasticizer* yang masuk ke dalam matriks polimer melalui ikatan hidrogen kemungkinan mengganggu struktur

polimer dan mengubahnya menjadi sebuah struktur yang fleksibel yang tidak teratur yang dapat dilihat sebagai restrukturisasi dalam matriks polimer dengan peningkatan mobilitas rantai sehingga mengurangi resistansi terhadap tekanan yang diterima dan meningkatkan kemampuan regang (elongasi) film (Afifah *et al.*, 2018). Fransiska & Reynaldi (2019) menunjukkan dalam penelitiannya bahwa nilai kuat tarik tertinggi dengan konsentrasi karagenan 2,5% sebesar 2,688 kg/cm². Makin tinggi konsentrasi karagenan akan turut meningkatkan kemampuan mengikat air karena karagenan memiliki sifat higroskopis yang baik sehingga menghasilkan suatu matriks gel yang dapat menaikkan persentase perpanjangan dan kuat tarik dari membran (Abdou & Sorour, 2014).

Penambahan persentase komposisi karagenan pada pembuatan membran dapat menyebabkan ikatan antar molekul penyusun meningkat sehingga menghasilkan membran yang makin kompak (Rusli *et al.*, 2017).

Konsentrasi karagenan yang makin tinggi dapat meningkatkan nilai elongasi. Penelitian Sour & Abdou (2014), bahwa karagenan lebih bersifat higroskopis dibandingkan pati, pengikatan terhadap molekul air menjadi lebih baik, yang menyebabkan kenaikan nilai elongasi.

Elektrisitas Baterai Kertas

Nilai listrik dari sistem baterai fleksibel diukur selama 20 detik dengan menggunakan multimeter digital. Nilai tegangan, kuat arus, dan daya listrik yang dihasilkan dalam baterai kertas diukur dalam satuan volt, miliampere, dan miliwatt. Nilai-nilai listrik dari baterai kertas ditunjukkan pada *Figure 7*.

Arus listrik yang dihasilkan dalam baterai kertas berfluktuasi selama pengamatan. Nilai rata-rata arus listrik tertinggi diamati pada perlakuan membran dengan perbandingan 3:1, yaitu sebesar $0,004 \pm 0,0007$ mA. Nilai rata-rata tegangan tertinggi ($0,126 \pm 0,0157$ V) dihasilkan pada perlakuan membran karagenan-PVA dengan perbandingan 3:1. Nilai rata-rata daya

listrik tertinggi dihasilkan pada perlakuan membran dengan perbandingan 3:1, yaitu sebesar $0,00056 \pm 0,0001$ mW. Uji statistik ANOVA ($\alpha = 0,05$) menunjukkan bahwa perbedaan komposisi membran karagenan-PVA berpengaruh terhadap arus, tegangan, dan daya listrik.

Arus listrik pada baterai kertas dihasilkan melalui penggunaan membran karagenan-PVA dengan rasio komposisi yang bervariasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio 3:1 menghasilkan arus tertinggi, yang mengindikasikan peran dominan karagenan dalam meningkatkan efisiensi konduktivitas ionik dan kinerja elektrokimia. Sementara itu, rasio 1:1 dan 1:3 juga menghasilkan arus, tetapi dengan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan komposisi dengan konsentrasi karagenan yang lebih tinggi.

Nilai tegangan listrik yang dihasilkan baterai karagenan-PVA dapat dilihat pada *Figure 8*. Nilai rata-rata tegangan listrik yang tertinggi dihasilkan pada perlakuan membran perbandingan 3:1, yaitu sebesar $0,24 \pm 0,02$ V.

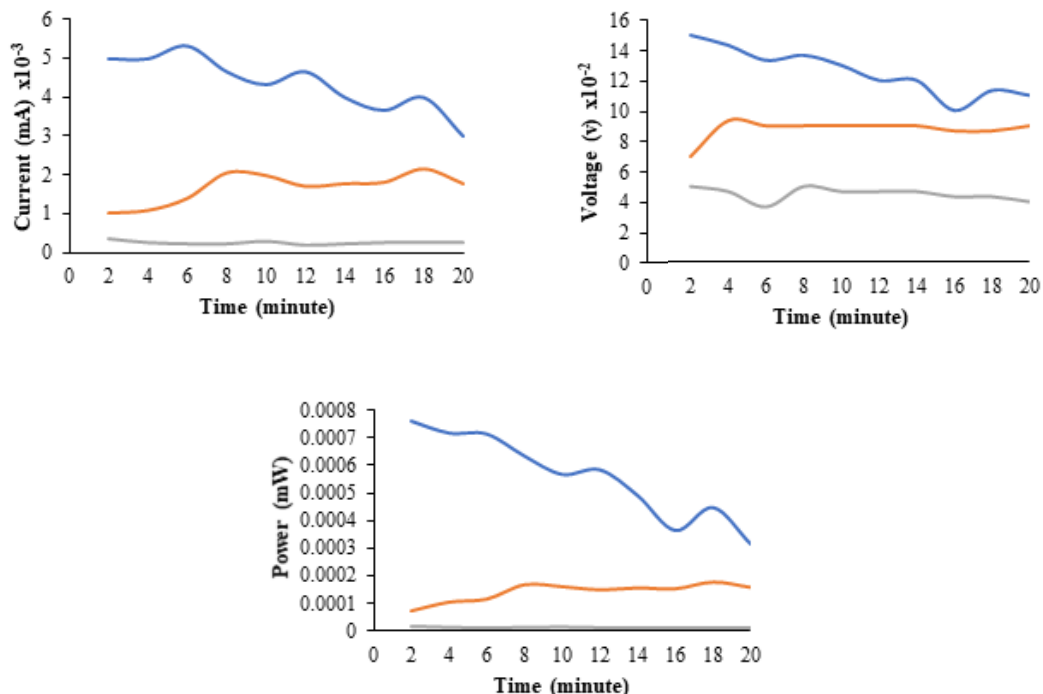


Figure 7 Effect of the ratio of the carrageenan-PVA membrane on the current, voltage, and electric power of the flexible battery 1:1 (—), 1:3 (—), 3:1 (—)

Gambar 7 Pengaruh rasio membran karagenan-PVA terhadap arus, tegangan, dan daya listrik baterai fleksibel 1:1 (—), 1:3 (—), 3:1 (—)



Nilai rata-rata tegangan listrik dengan rasio komposisi membran karagenan 1:1 sebesar $0,21 \pm 0,01$ V dan perlakuan 1:3 sebesar $0,18 \pm 0,01$ V. Hasil analisis statistik ANOVA ($p < 0,05$) menunjukkan bahwa perbandingan komposisi rasio membran karagenan-PVA memengaruhi nilai tegangan yang dihasilkan. Peningkatan konsentrasi karagenan akan meningkatkan konduktivitas ionik yang berkorelasi dengan peningkatan tegangan (Cabello *et al.*, 2014). Hasil uji Duncan menunjukkan bahwa perlakuan rasio 3:1 karagenan-PVA berpengaruh nyata terhadap perlakuan 1:3, tetapi tidak berpengaruh nyata terhadap perlakuan 1:1. Perlakuan rasio 1:1 tidak berpengaruh nyata terhadap perlakuan 1:3 dan 3:1.

Nilai tegangan karagenan-kitosan pada penelitian Srinurfitri *et al.* (2022) dilaporkan sebesar 2,57 V. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Ghani *et al.* (2018) polimer karagenan sebagai elektrolit menghasilkan tegangan 2,1 V. Ibrahim *et al.* (2020) polimer karagenan-kitosan pada sistem

MFC menghasilkan tegangan listrik sebesar 0,97 V. Perbedaan dari temuan ini adalah polimer karagenan-PVA sebagai elektrolit, sedangkan membran karagenan-PVA yang dihasilkan sebagai anode baterai. Rendahnya nilai tegangan ini disebabkan karena proses pembuatan baterai masih dilakukan secara manual sehingga densitas baterai masih kurang baik. Menurut Linden (2002), desain baterai dapat memengaruhi hasil voltase namun baterai dengan polimer karagenan-PVA lebih ramah lingkungan dan lebih fleksibel.

Nilai arus listrik yang dihasilkan pada sistem baterai kertas dengan komposisi membran yang berbeda. Peningkatan tertinggi terdapat pada perlakuan rasio komposisi membran karagenan-PVA 3:1 yang diikuti dengan perlakuan 1:1 dan 1:3. Nilai rata-rata arus listrik tertinggi pada perlakuan membran 3:1 sebesar $0,008 \pm 0,001$ mA. Sedangkan perlakuan 1:1 sebesar $0,0057 \pm 0,0005$ mA dan perlakuan 1:3 sebesar $0,005 \pm 0,001$ mA. Hasil analisis statistik menunjukkan

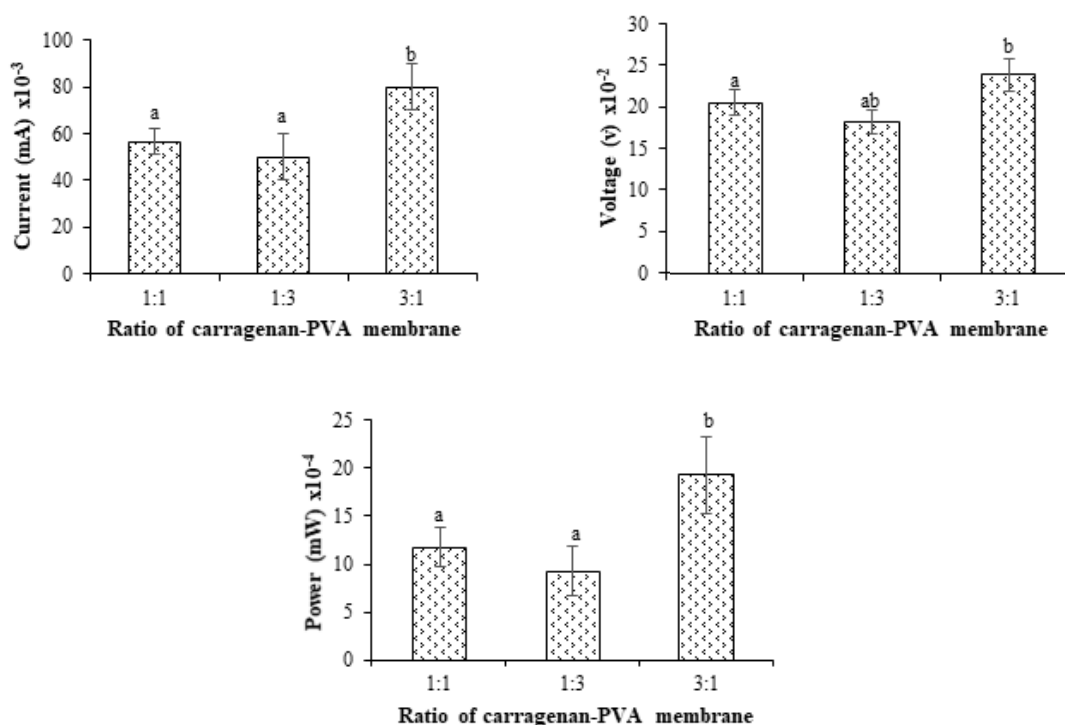


Figure 8 Effect of the ratio of the carrageenan-PVA membrane on the electric current, voltage, and electric power of the flexible battery

Gambar 8 Pengaruh rasio membran karagenan-PVA terhadap arus listrik, tegangan, dan daya listrik baterai fleksibel

bahwa perbandingan komposisi membran karagenan-PVA memengaruhi nilai arus listrik yang dihasilkan. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa nilai arus listrik yang dihasilkan pada perlakuan karagenan-PVA 3:1 berbeda secara signifikan menunjukkan bahwa perbedaan komposisi membran karagenan-PVA berpengaruh nyata terhadap nilai arus listrik pada perlakuan karagenan-PVA 1:1 dan perlakuan 1:3.

Nilai arus listrik pada penelitian Rudziah *et al.* (2015) menghasilkan kuat arus pada biopolimer elektrolit karagenan sebesar $0,42 \text{ mA/cm}^2$. Widyarningsih *et al.* (2024) melaporkan nilai arus yang dihasilkan pada elektrolit polimer karagenan sebesar 2,4 mA. Penelitian Ibrahim *et al.* (2020) menunjukkan bahwa nilai arus yang dihasilkan sistem MFC dengan menggunakan membran karagenan-kitosan, yaitu sebesar 7,02 mA. Namun dari hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa adanya arus listrik yang dihasilkan dari karagenan-PVA yang dibuat sebagai membran. Gugus sulfat dari karagenan dan gugus hidroksil (-OH) menyebabkan membran karagenan-PVA memiliki arus listrik (Eldin *et al.*, 2019).

Nilai daya rata-rata tertinggi dihasilkan pada perlakuan membran karagenan-PVA dengan perbandingan 3:1 sebesar $0,0019 \pm 0,0004 \text{ mW}$, diikuti dengan 1:1 sebesar $0,0012 \pm 0,0002 \text{ mW}$ dan 1:3 sebesar $0,0009 \pm 0,0003 \text{ mW}$. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa perbandingan komposisi membran karagenan-PVA memengaruhi nilai daya yang dihasilkan. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa nilai daya listrik yang dihasilkan pada perlakuan karagenan-PVA 3:1 berbeda nyata, hal ini menunjukkan bahwa perbedaan komposisi membran karagenan-PVA berpengaruh secara signifikan terhadap nilai daya listrik pada perlakuan karagenan-PVA 1:1 dan 1:3. Widyarningsih *et al.* (2024) menghasilkan daya tertinggi pada elektrolit padat karagenan sebesar 3,78 mW.

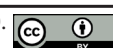
Pambudi *et al.* (2023) menunjukkan bahwa hasil pengukuran baterai lithium ion yang dihasilkan memiliki nilai tegangan 11 V, arus 2,41 A dan daya 26,5 W. Penelitian Perdana (2020) melaporkan perbandingan tegangan dari beberapa jenis baterai lithium

ion seperti lithium cobalt oxide (LiCoO_2), lithium mangan oxide (LiMn_2O_4) masing-masing sebesar 3,60 V dan 3,70 V. Perbedaan nilai listrik ini disebabkan oleh perbedaan kandungan komponen yang membentuk baterai. Kandungan komponen baterai lithium pada anode adalah grafit atau LiC_6 sedangkan katode terbuat dari mangan, kobalt, nikel dan lain-lain. Baterai lithium memiliki stabilitas penyimpanan energi yang sangat baik, kepadatan yang tinggi, tidak ada efek memori dan berat yang relatif lebih ringan dibandingkan dengan jenis baterai lainnya. Namun, bahannya memiliki stabilitas yang rendah dan harganya relatif mahal.

Elektrolit adalah bagian yang berfungsi sebagai penghantar ion litium dari anode ke katode atau sebaliknya. Karakteristik elektrolit yang penting untuk dipertimbangkan antara lain konduktivitas, keamanan (tidak beracun) dan harga yang murah. Bahan yang dapat digunakan sebagai elektrolit cair antara lain LiNO_3 , LiClO_4 , Li_2SO_4 , garam LiNO_3 , garam Li_2SO_4 , LiPF_6 . Penelitian ini, digunakan elektrolit alami yaitu alginat karena memiliki stabilitas termal yang cukup baik sebagai host polimer untuk elektrolit gel (Soeda *et al.*, 2015). Baterai berbasis polimer alami masih menghadapi beberapa masalah yaitu ikatan antar muka yang lemah dan potensi kehilangan kinerja elektrokimia karena tekanan mekanis. Meskipun nilai yang dihasilkan lebih kecil daripada baterai komersial, bahan organik tersebut memiliki potensi untuk menjadi bahan baterai yang ramah lingkungan dan berguna di masa depan.

KESIMPULAN

Anode untuk baterai kertas dapat dibuat dari karagenan dan polivinil alkohol (PVA). Perbedaan rasio campuran karagenan-PVA memiliki pengaruh terhadap sifat mekanik membran, serapan air, kekuatan tarik, konduktivitas proton dan nilai listrik. Perlakuan terbaik untuk baterai kertas yang dihasilkan adalah pada perbandingan karagenan-PVA dengan rasio 3:1, konduktivitas proton tertinggi, yaitu $8,09 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$, kuat tarik tertinggi, yaitu $2,3 \pm 0,59 \text{ MPa}$, *water uptake* 93,91%, kuat arus tertinggi yaitu 0,008 mW, voltase tertinggi, yaitu

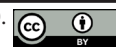


0,24 V dan daya listrik tertinggi, yaitu 0,002 mW. Hasil spektrum FTIR dari membran karagenan-PVA menunjukkan tidak terjadi reaksi kimia atau pembentukan gugus baru. Karagenan-PVA berpotensi menjadi bahan baterai fleksibel yang ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdou, E. S., & Sorour, M. A. (2014). Preparation and characterization of starch/carrageenan edible films. *International food research journal*, 21(1), 189-193.
- Afifah, N., Sholichah, E., Indriati, N., & Darmajana, D. A. (2018). Pengaruh kombinasi *plasticizer* terhadap karakteristik *edible film* dari karagenan dan lilin lebah. *Biopropal Industri*, 9(1), 49-60. <https://doi.org/10.36974/jbi.v9i1.3765>.
- Balqis, A. I., Khaizura, M. N., Russly, A. R., & Hanani, Z. N. (2019). Effects of plasticizers on the physicochemical properties of kappa-carrageenan films extracted from *Eucheuma cottonii*. *International journal of biological macromolecules*, 103, 721-732. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.105>.
- Bhernama, B. G. (2019). Analisis karakteristik karagenan *Eucheuma cottonii* asal Aceh Jaya menggunakan pelarut alkali (KOH dan NaOH). *Amina*, 1(2), 59-66.
- Cabello, S. D. P., Molla, S., Ochoa, N. A., Marchese, J., Gimenez, E., & Compan, V. (2014). New bio-polymeric membranes composed of alginate-carrageenan to be applied as polymer electrolyte membranes for DMFC. *Journal of Power Sources*, 265, 345-355.
- Croitoru, C., Pop, M. A., Bedo, T., Cosnita, M., Roata, I. C., & Hulka, I. (2020). Physically crosslinked poly (vinyl alcohol)/kappa-carrageenan hydrogels: Structure and applications. *Polymers*, 12(3), 560.
- Dai, L., Long, Z., Ren, X. H., Deng, H. B., He, H., & Liu W. (2014). Electrospun polyvinyl alcohol/waterborne polyurethane composite nanofibers involving cellulose nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(22), 37.
- Danwanichakul, P., & Sirikhajornnam, P. (2013). an investigation of chitosan-grafted-poly(vinylalcohol) as an electrolyte membrane. *Journal of Chemistry*, 1-9.
- Duan, Q., Wang, H., & Benziger, J. (2012). Transport of liquid water through nafion membranes. *Journal of Membrane science*, 392-393, 88-94.
- Dwimayasanti, R., & Kumayanjati, B. (2019). Karakterisasi *edible film* dari karagenan dan kitosan dengan metode *layer by layer*. *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, 14(2), 141-150.
- Eldin, M. S. M., Farag, H. A., Tamer, T. M., Konsowa, A. H., & Gouda, M. H. (2019). Development of novel iota carrageenan-g-polyvinyl alcohol polyelectrolyte membrane for direct methanol fuel cell application. *Polymer Bulletin*, 1, 1-19.
- Fardhyanti, D. S., & Julianur, S. S. (2015). Karakterisasi *edible film* berbahan dasar ekstrak karagenan dari rumput laut (*Eucheuma cottonii*). *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 4(2), 68-73. <https://doi.org/10.15294/jbat.v4i2.4127>.
- Ghani, N. A. A., Othaman, R., Ahmad, A., Anuar, F. H., & Hassan, N. H. (2018). Impact of purification on iota carrageenan as solid polymer electrolyte. *Arabian Journal of Chemistry*, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.06.008>
- Handayani, S., Hardi, J., & Dewi, E. L. (2010). Membran elektolit nano silika dengan polieter-eter keton tersulfonasi untuk *methanol fuel cell*. *Jurnal Nanoteknologi Indonesia*, 1(1), 34-39.
- Hidayah, R., Harlia, G., & Safar, A. (2013). Optimasi konsentrasi kalium hidroksida pada ekstraksi karagenan dari alga merah (*Kappaphycus alvarezii*) asal Pulau Lemukutan. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 2(2), 78-83.
- Hidayati, N., Mujiburohman, M., Abdillah, H., Harmoko, T., & Arimurti, R. D. (2017). Sintesis dan karakteristik membran komposit akrilonitril butadiene stirena (ABS)-kitosan tersulfonasi untuk *direct metanol fuel cell* (DMFC). *Jurnal Matematika dan Sains*, 22, 20-23. <https://doi.org/10.5614/jms.2017.22.1.6>.
- Hu, L., & Cui, Y. (2012). Energy and

- environmental nanotechnology in conductive paper and textiles. *Energy & Environmental Science*, 5(4), 6423. <https://doi.org/10.1039/c2ee02414d>
- Ibrahim, B., Uju., & Soleh, A. M. (2020). Kinerja membran komposit kitosan-karagenan pada sistem *microbial fuel cell* dalam menghasilkan biolistrik dari limbah pemindangan ikan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 23(1), 137-146.
- Jin, Y., Zhao, Z., Miao, S., Wang, Q., Sun, L., & Lu, H. (2021). Explosion hazards study of grid-scale lithium-ion battery energy storage station. *Journal of Energy Storage*, 42, 102987. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102987>.
- Julian, J., & Santoso, E. (2016). Pengaruh komposisi PVA/kitosan terhadap perilaku membran komposit PVA/kitosan/grafin oksida yang terikat silang asam sulfat. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 5(1), C37-C43.
- Juqu, T., Willenberg, C. S., Pokpas, K., & Natasha, R. (2022). Advances in paper-based battery research for biodegradable energy storage. *Advanced Sensor and Energy Materials*, 100037, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.asems.2022.100037>
- Kadam, T., Shinde, P. C., & Patkar, P. U. C. (2016). Paper battery the solution for traditional battery. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 1485-1488.
- Kakati, N., Maiti, J., Das, G., Lee, S. H., & Yoon, Y. S. (2015). An approach of balancing the ionic conductivity and mechanical properties of PVA based nanocomposite membrane for DMFC by various crosslinking agents with ionic liquid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1-10. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.04.004.
- Khalil, H. A., Saurabh, C. K., Tye, Y. Y., Lai, T. K., Easa, A. M., Rosamah, E., & Banerjee, A. (2017). Seaweed based sustainable films and composites for food and pharmaceutical applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.025>.
- Krochta, J., & De Mulder-Johnston, C. (1997). Edible and biodegradable polymer films: Challenger and opportunities. *Food Technology*, 51(2), 61-74.
- Kushwah, H., & Sethi, A. (2014). Paper battery – a malleable energy storage solution. *International Research journal of Management Science and Technology*, 5, 16-23.
- Kusumastuti, E., Susilaningih, E., Sulistyani, M., MuTazam, M., Fadzillah, A. M., & Atmaja, L. (2021). Karakteristik material hibrida kitosan-geopolimer dan potensinya dalam aplikasi membran polimer elektrolit. *Pemanfaatan sumber daya alam Indonesia: Ketahanan pangan, Energi dan Material Maju.*, 65-94, <https://doi.org/10.15294/pemanfaatansdaindonesia.v0i0.3>.
- Liew, J. W. Y., Loh, K. S., Ahmad, A., Lim, K. L., & Daud, W. R. W. (2017). Synthesis and characterization of modified k-carrageenan for enhanced proton conductivity as polymer electrolyte membrane. *Plos One*, 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185313>.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schronder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181-5192.
- Meng, F., Zhang, Y., Xiong, Z., Wang, G., Li, F., Zhang, L. (2018). Mechanical, hydrophobic and thermal properties of an organic-inorganic hybrid carrageenan-polyvinyl alcohol composite film. *Composites Part B: Engineering*, 143, 1-8.
- Muliawati, EC., Mirzayanti, YW. (2021). Membran polieugenol tersulfonasi (PET) sebagai potensi sel bahan bakar metanol langsung. *Journal of Research and Technology*, 7(2), 247-256. <https://doi.org/10.55732/jrt.v7i2.478>.
- Nair, R., Renganathan, K., Barathi, S., Venkatraman, K. (2013). Performance of saltbridge microbial fuel cell at various agarose concentrations using hostel sewage waste as substrate. *International Journal of Advancements in Research &*



- Technology*, 2(5), 326-330.
- Nasution, R. S., Yahya, H., & Harahap, MR. (2019). Pengaruh karagenan dari rumput laut merah (*Eucheuma cottonii*) asal Provinsi Aceh sebagai *edible coating* terhadap ketahanan buah. *Al-Kimia*, 7(2), 100-112.
- Nurannisa, A., Asfar, AMIT., Dewi, SS. (2021). Diseminasi Ibu PKK Dusun Kallimpo dalam mengolah limbah kulit pisang menjadi bio-baterai energi masa depan. *E-Amal: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(3), 389-398.
- Oliveira, J., Costa, CM., Lanceros-Méndez, S. (2018). Printed batteries: an overview. *Printed Batteries: Materials, Technologies and Applications*, 1-20. <https://doi.org/10.1002/9781119287902.ch1>.
- Pambudi, W. S., Firmansyah, R. A., Suheta, T., & Wicaksono, N. K. (2023). Analisis penggunaan baterai *lead acid* dan lithium ion dengan sumber solar panel. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*. 11(2): 392. doi: 10.26760/elkomika.v11i2.392.
- Perdana, F. A. (2020). Baterai Lithium. *INKURI: Jurnal Pendidikan IPA*. 9(2): 103-109. doi: 10.20961/inkuiri.v9i2.50082.
- Perera, F. (2018). Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist. *International journal of environmental research and public health*, 15(1), 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010016>
- Prihastuti, D., & Abdassah, M. (2019). Karagenan dan aplikasinya di bidang farmasetik. *Majalah Farmasetika*, 4(5), 146-154.
- Qiao, J., Fu, J., Liu, L., & Liu, Y. S. (2012). Highly stable hydroxyl anion conducting membranes poly(vinylalcohol)/poly(acrylamide-co-diallyldimethylammonium chloride) (PVA/PAADDA) for alkaline fuel cells: effect of cross-linking. *Journal of Hydrogen Energy*, 4580-4589. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.038>.
- Rudhzhiah, S., Ahmad, A., Ahmad, I., & Mohamed, N. S. (2015). Biopolymer electrolytes based on blend of kappa-carrageenan and cellulose derivatives for potential application in dye sensitized solar cell. *Electrochimica Acta*, 175, 162-168. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015>
- Rusli, A., Metusalach., Salengke., & Tahir, M. M. (2017). Karakterisasi *edible film* karagenan dengan pemlastis gliserol. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20(2), 219-229. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v20i2.17499>.
- Saini, I., Sharma, A., Dhiman, R., Aggarwal, S., Ram, S., & Sharma, P. K. (2017). Grafted SiC nanocrystals: for enhanced optical, electrical and mechanical properties of polyvinyl alcohol. *Journal of Alloys and Compounds*, 714, 172-180.
- Samaaiah, P., Baba, M. Y., Devi, P., & Reddy, R. (2020). Experimental study of the nano- based paper battery. *ICRAEM*, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/4/042017>.
- Sari, V. K., Turnip, M. A. F., Wulandari, P., & Rudati, P. S. (2024). Physical and chemical characterization of commercial kappa-carrageenan with ammonium chloride as electrolyte in organic battery application. *In Journal of Physics: Conference Series*, 2734(1), 1-9.
- Schlemmer, W., Selinger, J., Hobisch, M. A., & Spirk, S. (2021). Polysaccharides for sustainable energy storage—A review. *Carbohydrate Polymers*, 265, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118063>.
- Setiajawati, D. 2017. Penggunaan *Eucheuma* sp. dan *chitosan* sebagai bahan *edible film* terhadap kualitasnya. *Journal of Fisheries and Marine Science*. 1(1), 6-14.
- Shukla, V., Tripathi, R., & Trivedi, S. K. (2018). The application of carbon nanotubes-the paper battery. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 6(12), 960-964.
- Srinurfitri, F., Supriyanto, A., Pauzi, G. A., & Junaidi, J. (2022). Electrical characteristics of chitosan-carrageenan membrane implementation and salt

- bridge in microbial fuel cell using yeast fermented cassava waste substrate. *Journal of energy, Material, and Instrumentation Technology*, 3(3), 105-114. <https://doi.org/10.23960/jemit.v3i3.116>
- Soeda, K., Yamagata, M., & Ishikawa, M. (2015). Outstanding features of alginate-based gel electrolyte with ionic liquid for electric double layer capacitors. *Journal of Power Sources*, 280, 565-572.
- Sukhlaiied, W., & Riyajan, S. A. (2013). Synthesis and properties of carrageenan grafted copolymer with poly (vinyl alcohol). *Carbohydrate polymers*, 98(1), 677-685.
- Sulistiyani, M., & Huda, N. (2018). Perbandingan metode transmisi dan reflektansi pada pengukuran polistirena menggunakan instrumentasi spektroskopi fourier transform infrared. *Indo J Chem.Sc*, 7(2), 195-198.
- Utomo, B. S. B., Fransiska, D., & Darmawan, M. (2016). Formulasi hidrogel dari polivinil pirolidon dan k/i-karagenan untuk bahan pembalut luka. *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, 11(1), 55-66.
- Warastuti, Y., Budianto, E., & Darmawan, D. (2018). Sintesis dan karakterisasi membran komposit hidroksiapatit tulang sapi-khitosan-poli (vinilalkohol) untuk aplikasi biomaterial. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 16(2), 83-90.
- Wentker, M., Greenwood, M., & Leker, J. (2019). A bottom-up approach to lithium-ion battery cost modeling with a focus on cathode active materials. *Energies*, 12(3), 504. <https://doi.org/10.3390/en12030504>.
- Widyaningsih, M., Abidin, M., Hafidh, A. F., Murniati, A., Ragadhita, R., Rizky, K. M., & Mudzakir, A. (2024). Innovation of environmentally friendly solid electrolyte biobattery based on carrageenan and rotten tomatoes. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 4(1), 1-14.
- Winarno, F. G. (1996). *Teknologi Pengolahan Rumput Laut*. Jakarta: Pustaka Sinar Harapan.
- Ya, T., Zou, Y., Xu, W., Zhan, T., Sun, J., Xia, Y., & Yang, D. (2020). Poorly-crystallized poly(vinyl alcohol)/carrageenan matrix: Highly ionic conductive and flame-retardant gel polymer electrolytes for safe and flexible solid-state supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 475, 228688. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228688>.
- Zhang, F., Ahn, Y., & Logan, B. E. (2014). Treating refinery wastewaters in microbial fuel cell using electrode assembly or spaced electrode configuration. *Bioresource Technology*, 152, 46-52