

BAB 1

USULAN GAGASAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan akan solusi penyimpanan energi yang ramah lingkungan semakin mendesak seiring dengan perkembangan teknologi yang mulai beralih ke sektor energi listrik yang rendah emisi. Berdasarkan dokumen Ankit et al.(2021) kapasitor termasuk dalam komponen limbah elektronik yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan dan kesehatan. Material penyusunnya, seperti polimer sintetis, logam berat, dan elektrolit, bersifat sulit terurai dan dapat melepaskan senyawa beracun ketika terdegradasi atau dibuang secara tidak tepat. Pelepasan senyawa tersebut dapat mencemari tanah dan air, yang pada akhirnya berdampak pada rantai makanan serta meningkatkan risiko gangguan kesehatan manusia, termasuk kerusakan sistem saraf, gangguan reproduksi, dan penyakit kardiovaskular. Hal ini menegaskan bahwa penggunaan bahan sintetis pada kapasitor konvensional memiliki implikasi jangka panjang terhadap keberlanjutan lingkungan dan kesehatan masyarakat.[1]

Oleh karena itu, pengembangan material elektroda berbasis mangan dengan bantuan bahan alami sebagai komponen utama superkapasitor menjadi alternatif yang menjanjikan untuk menciptakan perangkat penyimpanan energi yang lebih ramah lingkungan.

Indonesia menghasilkan limbah organik yang melimpah, seperti kulit jeruk, kulit pisang, dan kulit manggis, dengan total produksi mencapai lebih dari 2 juta ton pada tahun 2020[2]. Limbah ini sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal, meskipun mengandung senyawa bioaktif seperti flavonoid, tanin, dan lignin yang berpotensi digunakan sebagai prekursor karbon aktif untuk fabrikasi elektroda superkapasitor[3]. Selain itu, sebagai salah satu negara maritim terbesar di dunia, Indonesia juga menghasilkan 9,7 juta ton Alga pada tahun 2020 [2]. Di antara jenis Alga tersebut, produksi Alga coklat (*Sargassum sp.*) mencapai 500 ribu ton. Namun, pemanfaatan Alga di Indonesia masih belum optimal karena sebagian besar diarahkan untuk sektor pangan dan kosmetik, sementara potensinya dalam sektor energi belum dimanfaatkan secara maksimal.

Penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas bahan alami dalam meningkatkan performa elektroda superkapasitor. Penelitian yang dilakukan oleh Putri, R. R. T. (2022) menunjukkan bahwa elektroda superkapasitor berbahan dasar kulit manggis menghasilkan nilai kapasitansi spesifik sebesar 41,6 F/g[4]. Sementara itu, Dhelipan et al. (2016) menuliskan nilai kapasitansi yang dihasilkan dari elektroda dengan bahan dasar kulit

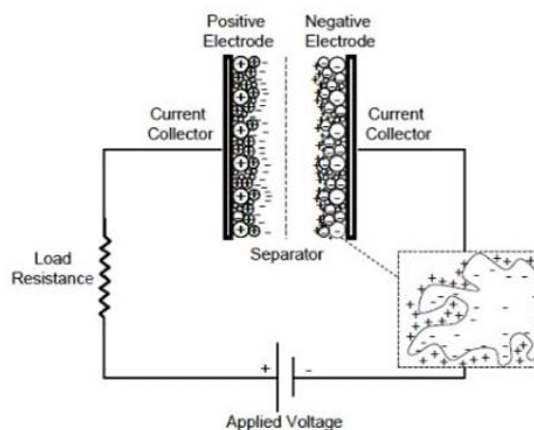
jeruk mencapai nilai kapasitansi 275 F/g [5]. Penelitian lain oleh Utami, A. S. G. (2020) mencatat bahwa elektroda berbasis mangan dengan penambahan bahan kulit pisang memiliki kapasitansi sebesar 43,1 F/g[6]. Ajeng et al (2020) melaporkan nilai 37,842 F/g dari elektroda jahe putih[7]. Selain itu, penelitian Sasongko, A. K. (2022) mengungkapkan bahwa elektroda berbasis mangan dengan bahan alami berupa Alga coklat *sargassum sp* menghasilkan nilai kapasitansi spesifik sebesar 20,86 F/g[8]. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ekstrak bahan alami dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan nilai kapasitansi spesifik elektroda superkapasitor yang dihasilkan. Penelitian mengenai pemanfaatan belimbing wuluh sebagai bahan bioaktif pendukung green synthesis elektroda superkapasitor belum ditemukan. Namun berdasarkan penelitian Wibowo et al. (2020) melaporkan bahwa sari buah belimbing wuluh mampu menghasilkan tegangan listrik melalui proses elektrokimia[9]. Pada penelitian ini, dilakukan eksplorasi potensi buah belimbing wuluh sebagai salah satu bahan bioaktif dalam proses *green synthesis* MnOx untuk aplikasi elektroda superkapasitor.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Zhu et al.(2006) ,superkapasitor telah diaplikasikan sebagai satu-satunya sistem penyimpanan energi pada bus listrik perkotaan dengan rute operasional sekitar 20 km. Sistem ini menggunakan 600 unit superkapasitor, masing-masing dengan kapasitansi sebesar 80.000 F, yang dirangkai secara seri-paralel hingga menghasilkan kapasitas energi total sebesar 14 kWh dengan rentang tegangan 160–320 V. Modul superkapasitor ditempatkan di dalam kotak khusus pada bus dan terhubung dengan *Power Management Unit* untuk mengatur suplai daya ke motor listrik serta memaksimalkan pemanfaatan energi dari pengereman regeneratif. Dengan sistem ini, proses pengisian penuh dapat dilakukan dalam waktu sekitar 15 menit, memungkinkan bus beroperasi sepanjang hari dengan pengisian ulang singkat di terminal atau halte.[10]

Selain itu, pada buku Burke (2015), superkapasitor juga umum digunakan pada kendaraan listrik dan hibrida sebagai pendukung baterai dalam sistem *start-stop* dan pengereman regeneratif. Dalam konfigurasi ini, superkapasitor diposisikan di jalur daya antara sistem *regenerative braking* dan motor listrik, sehingga energi kinetik yang dihasilkan saat pengereman dapat diserap dan disimpan untuk kemudian digunakan kembali saat akselerasi atau menyalakan mesin. Keunggulan utama penerapan superkapasitor pada skema ini adalah kemampuannya menyerap dan melepaskan energi dengan daya tinggi dalam waktu singkat, berbeda dengan baterai yang lebih cocok untuk penyimpanan energi jangka panjang namun memiliki laju pengisian dan pengosongan yang terbatas.[11]

1.2 Informasi Pendukung Masalah

Superkapasitor adalah perangkat penyimpan energi yang bekerja dengan memanfaatkan perpindahan muatan secara fisik pada permukaan elektroda. Perangkat ini dikenal memiliki siklus pakai yang sangat panjang, bahkan dapat digunakan lebih dari 100.000 kali pengisian dan pengosongan, dengan kerapatan daya tinggi, kapasitas simpan energi yang cukup besar, serta konstruksi yang sederhana[12]. Kinerja superkapasitor sangat bergantung pada jenis material elektroda yang digunakan. Karbon menjadi salah satu pilihan utama karena bobotnya ringan, memiliki luas permukaan spesifik yang besar, konduktivitas listrik yang baik, stabil secara kimia, dan biaya pembuatannya relatif rendah, sehingga mampu menunjang performa superkapasitor secara optimal.



Gambar 1. 1 Struktur Superkapasitor [13]

Superkapasitor merupakan teknologi yang dikembangkan dari kapasitor konvensional untuk memenuhi kebutuhan penyimpanan energi modern, dimana untuk struktur superkapasitor dapat dilihat di Gambar 1.1. Teknologi ini berpotensi besar dalam hal penyimpanan energi karena memiliki densitas yang tinggi, pengosongan daya yang cepat, masa pakai yang panjang, rentang suhu pengoperasian luas, ramah lingkungan, dan biaya rendah [13]. Superkapasitor ini memanfaatkan permukaan elektroda luas dan bahan dielektrik tipis untuk menghasilkan kapasitansi tinggi, memungkinkan rapat daya yang lebih besar dibandingkan kapasitor biasa dan bahkan pada baterai pada aplikasi tertentu[14].

Prinsip kerja superkapasitor serupa dengan kapasitor konvensional, yaitu menyimpan energi dalam bentuk muatan listrik. Kapasitor memiliki kapasitansi (C) berbanding lurus dengan luas permukaan elektroda (A) dan berbanding terbalik dengan jarak antar elektroda (D), sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (1.2). Energi yang disimpan (E) berbanding lurus dengan kapasitansi yang dinyatakan dalam persamaan (1.3):

$$Q=CV \quad (1.1)$$

$$C= \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{D} \quad (1.2)$$

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1.3)$$

Q	=	muatan pada superkapasitor	(Coulomb)
C	=	kapasitansi kapasitor	(Farad)
V	=	tegangan kapasitor	(Volt)
D	=	jarak antar elektroda	(m)
A	=	luas permukaan elektroda	(m ²)
ϵ_r	=	permitivitas <i>relative</i> dielektrik	
ϵ_0	=	permitivitas ruang hampa	
W	=	energi yang tersimpan pada kapasitor	(Joule)

Berdasarkan persamaan diatas, kapasitas penyimpanan energi pada superkapasitor dapat ditingkatkan dengan cara:

- (1) menaikkan luas permukaan elektroda,
- (2) menaikkan permitivitas dielektrik yang memisahkan elektroda,
- (3) memperkecil jarak antar elektroda, atau
- (4) memperbesar beda potensial yang diberikan pada superkapasitor.

[8]

Material yang membentuk superkapasitor terdiri dari dua komponen utama, yaitu elektroda dan elektrolit. Material elektroda yang banyak dikembangkan adalah karbon aktif, yang memiliki keunggulan berupa luas permukaan spesifik yang besar, kemudahan dalam pembuatan. Secara umum, prinsip kerja superkapasitor mirip dengan kapasitor konvensional.

Elektroda berperan dalam menghantarkan potensial Listrik, sementara elektrolit berfungsi sebagai sumber ion-ion. Meskipun prinsip dasar superkapasitor serupa dengan kapasitor konvensional, pada superkapasitor luas permukaan elektroda diperbesar dan ketebalan bahan dielektrik diperkecil untuk mengurangi jarak antara elektroda. Hal ini memungkinkan superkapasitor memiliki nilai kapasitansi yang lebih besar dibandingkan dengan kapasitor konvensional.

Elektroda adalah salah satu material penyusun pada superkapasitor yang sangat penting dan memiliki kriteria agar superkapasitor yang dihasilkan bagus. Kriteria elektroda yang baik adalah memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, konduktivitas yang relatif tinggi, distribusi pori yang besar dan tahan terhadap kondisi asam/basa dan perubahan suhu.

Sehubungan dengan hal tersebut, penulis melakukan penelitian mengenai elektroda superkapasitor berbahan dasar mangan dengan pengkelat dan pereduksi berbahan alami yang metode fabrikasi elektroda superkapasitornya menggunakan metode sintesis hidrotermal. Diharapkan dengan menggunakan metode sintesis hidrotermal, kapasitansi spesifik dari elektroda superkapasitor mampu mencapai nilai kapasitansi spesifik yang maksimal.

Perbedaan dari segi penyimpanan energi antara kapasitor konvensional dengan superkapasitor dapat ditinjau pada kapasitor konvensional menyimpan energi sebagai muatan listrik (Q) pada dua plat konduktor yang dipisahkan oleh bahan dielektrik seperti keramik, udara, dan plastik. Prinsip kerjanya sepenuhnya bersifat fisik, yaitu medan listrik disimpan diantara plat konduktor tanpa melibatkan reaksi kimia. Proses penyimpanan energinya berdasarkan pembentukan lapisan ganda atau *double layer* pada sisi permukaan plat yang terkena bahan dielektrik. Struktur tersebut memiliki kelebihan terhadap pengisian dan pengosongan yang sangat cepat, namun memiliki kekurangan di kapasitas penyimpanan yang terbatas karena bergantung pada luas permukaan plat dan sifat dielektrik alami.

Sedangkan pada superkapasitor menggabungkan prinsip *Electric Double Layer Capacitance* (EDCL) dan *pseudocitance* untuk menyimpan energi. Penggabungan kedua prinsip tersebut bertujuan untuk meningkatkan kapasitansi penyimpanan energi. Pada pseudocapacitance terjadi reaksi redoks pada permukaan elektroda selama proses pengisian dan pelepasan muatan. Ion-ion dalam elektrolit membantu dalam proses reaksi redoks dengan cara transfer elektron antara ion-ion elektrolit dengan permukaan elektroda yang menyebabkan penyimpanan energi tambahan.

1.3 Analisis Umum

1.3.1 Aspek Ekonomi

Secara aspek ekonomi perancangan elektroda berbasis mangan dengan memanfaatkan bahan alami yang digunakan untuk melakukan penelitian memiliki harga yang termasuk murah. Bahan alami yang digunakan merupakan limbah yang berasal dari kulit buah yang sebagian besar tidak dikonsumsi dan tumbuhan Alga yang melimpah di Indonesia, sehingga tidak menghabiskan banyak biaya untuk dapat dimanfaatkan dalam perancangan elektroda superkapasitor. Pada proses ekstraksi memerlukan bahan pelarut dan energi, namun biaya operasionalnya masih cukup terjangkau untuk lingkup penelitian. Selain itu, peralatan yang digunakan seperti *stirrer magnetic*, *hotplate*, *soxhlet*, dan *sentrifuge*, adalah peralatan standar laboratorium yang masih terjangkau dan dapat digunakan kembali. Untuk pengukuran membutuhkan perangkat *Potentiostat* yang cenderung mahal, sesuai dengan spesifikasi dan kelengkapan fitur pengukuran yang dibutuhkan untuk elektroda superkapasitor seperti CV. Meskipun biaya tersebut mahal, namun perangkat tersebut dapat dijadikan investasi penelitian jangka panjang.

1.3.2 Aspek Manufakturabilitas

Secara aspek manufakturabilitas, proses pembuatan elektroda ini memiliki aspek *manufacturability* yang baik karena dalam membuat elektroda menggunakan alat yang terjangkau dan bahan baku yang mudah diperoleh untuk diadaptasi di laboratorium standar. Proses ekstraksi bahan alami untuk dijadikan nanopartikel terhitung mudah, karena proses ekstraksi dengan menggunakan *soxhlet* bekerja secara otomatis, sehingga menjadi efisien dan sederhana dalam menghasilkan senyawa aktif. Tahap titrasi dengan *stirrer* magnetik dan *hotplate* memastikan kontrol reaksi kimia yang baik, sementara sentrifugasi efektif memisahkan endapan dengan akurasi yang tinggi. Pemanasan pada suhu 270 °C menggunakan *hotplate* memberikan kestabilan proses. Karakterisasi elektroda menggunakan CV memberikan data terkait performa elektroda yang dibuat. Proses tersebut menunjukkan bahwa pembuatan elektroda superkapasitor berbasis mangan dengan bahan alami memiliki manufakturabilitas yang tinggi dalam efisiensi dan adaptif dalam penelitian.

1.3.3 Aspek Lingkungan

Secara aspek lingkungan perancangan elektroda superkapasitor ini ramah lingkungan karena memanfaatkan bahan alami berupa limbah dari kulit buah dan Alga untuk dimanfaatkan sebagai elektroda superkapasitor yang bermanfaat. Selain itu, elektroda superkapasitor ini juga ramah lingkungan karena dapat mengurangi dampak limbah sintetik berbahaya, terutama

dengan meningkatnya produksi penyimpanan energi. Dengan menggunakan bahan alami, elektroda superkapasitor yang dibuat dapat lebih mudah terurai oleh mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur, menjadi senyawa yang lebih sederhana. Bahan alami dapat terurai secara alami tanpa meninggalkan residu yang berbahaya di lingkungan.

1.3.4 Aspek Kinerja

Menganalisis permasalahan dari aspek kinerja, superkapasitor dapat menghasilkan performa yang baik dalam hal kapasitas penyimpanan energi dan siklus hidup yang panjang. Namun, terdapat beberapa tantangan seperti efisiensinya masih rendah dibandingkan dengan material logam, terutama dalam hal ketahanan di aplikasi yang bertegangan tinggi. Kapasitor konvensional memiliki kinerja yang lebih stabil dalam hal kapasitansi, tegangan kerja, dan daya tahannya.

1.3.5 Aspek Keberlanjutan

Menganalisis permasalahan dari aspek keberlanjutan. Secara aspek keberlanjutan, penggunaan material yang menggunakan bahan alami dari tumbuhan akan menjadi penting, karena ketersediaannya yang melimpah, ramah lingkungan, biaya produksi yang rendah serta terbarukan, hal ini dapat mengurangi ketergantungan pada material yang lebih berbahaya dan sulit untuk didaur ulang.

1.4 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Kebutuhan yang harus dipenuhi dalam *project* ini mencakup material, teknik pengukuran dan rangkaian listrik. Ada tiga kebutuhan utama pada penelitian ini, yang pertama meningkatkan nilai kapasitansi. Untuk meningkatkan nilai kapasitansi, beberapa pendekatan dapat diterapkan. Adapun pada *project* ini untuk meningkatkan nilai kapasitansi dilakukan dengan fabrikasi elektroda superkapasitor hingga mencapai ukuran nanopartikel, memanfaatkan struktur berpori pada elektroda yang dapat memudahkan difusi ion, serta meningkatkan luas permukaan kontak antara elektroda dan elektrolit dengan menggunakan cairan elektrolit yang berkapasitas tinggi.

Kedua, stabilitas siklus CV. Untuk menstabilkan siklus CV superkapasitor dapat dilihat dari pemilihan material menggunakan bahan alami dalam pembuatan elektroda superkapasitor dengan cara rekayasa material untuk meningkatkan struktur pori pada permukaan elektroda. Selain itu, pemilihan elektrolit yang netral yakni Natrium Sulfat (Na_2SO_4) dapat memberikan stabilitas siklus yang baik pada kinerja siklus CV superkapasitor dan dapat meningkatkan kecepatan pengisian dan pengosongan yang cepat dibandingkan kapasitor konvensional.

Ketiga, penggunaan bahan yang aman. Pada *project* ini dibutuhkan bahan yang aman, ramah lingkungan, dan tidak membuat korosi. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan bahan alami yang dapat mengurangi pencemaran lingkungan karena bahan alami dapat diuraikan tanpa meninggalkan residu berbahaya di lingkungan oleh mikroorganisme. Keempat, pembuatan nanopartikel dari ekstrak tumbuhan untuk menghasilkan elektroda superkapasitor dengan nilai kapasitansi yang tinggi dilakukan dengan metode hidrotermal untuk menghasilkan ekstrak tumbuhan yang berukuran nanopartikel yang berpengaruh terhadap hasil nilai kapasitansi yang tinggi.

1.5 Solusi Sistem yang Diusulkan

Dalam mengatasi kebutuhan mendesak akan solusi penyimpanan energi yang ramah lingkungan, khususnya penggunaan kapasitor konvensional yang terbuat dari bahan sintetis yang sulit terurai, penulis mengusulkan pembuatan elektroda superkapasitor dengan bahan dasar mangan dengan bantuan hasil *green synthesis* dari material alami seperti limbah kulit buah dan Alga. Dalam pembuatan elektroda superkapasitor yang diajukan, dibutuhkan material bahan alami dengan ukuran nanopartikel, yang diperoleh melalui ekstraksi bahan alami yang berfungsi sebagai pengkelat dan pereduksi, serta pembuatan elektroda berpori dengan menempelkan material pada *template* berpori

1.5.1 Karakteristik Produk

1.5.1.1 Pembuatan Nanopartikel

Pembuatan nanopartikel dalam penelitian ini menggunakan metode hidrotermal untuk menghasilkan ekstrak tumbuhan yang berukuran nanometer. Ekstraksi bahan alami dilakukan cara *green synthesis*, di mana bahan alami digunakan sebagai pengkelat dan pereduksi. Metode hidrotermal dilakukan untuk kontrol menghasilkan ukuran partikel dan struktur material yang baik, yang berkontribusi dalam peningkatan kapasitansi dan kinerja elektroda.

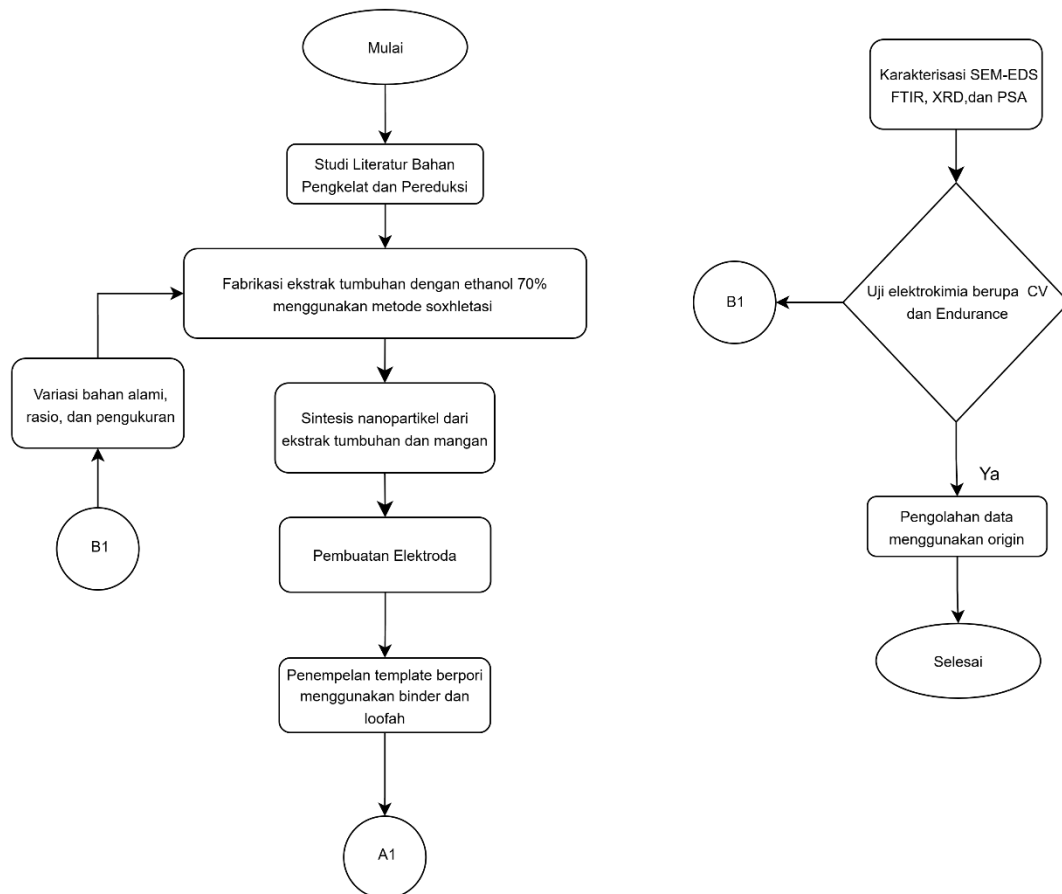
1.5.1.2 Pembuatan *Template* Struktur Berpori

Untuk pembuatan elektroda berpori dengan memanfaatkan bahan biokimia yang berasal dari tumbuhan, dilakukan dengan teknik menempelkan pada *template* berpori. Teknik ini dilakukan dengan menempelkan bahan elektroda pada *template* berpori melalui metode binder. Penggunaan *template* berpori berpengaruh pada peningkatan nilai kapasitansi dan mendukung proses difusi ion yang lebih efisien, serta meningkatkan stabilitas siklus pengukuran CV .

1.5.1.3 Pemilihan Elektrolit

Pemilihan elektrolit berbasis cairan berupa Na_2SO_4 . Hal ini dilakukan karena bahan yang berukuran nanopartikel memiliki luas permukaan yang tinggi, difusi ion yang cepat dan konduktivitas yang baik, selain itu *template* berpori juga dapat meningkatkan nilai kapasitansi yang tinggi dan stabilitas jangka panjang, dan dengan pemilihan elektrolit menghasilkan sistem yang saling kompatibel dan kinerja yang lebih baik antara elektroda dan elektrolitnya.

1.5.2 Skenario Penggunaan



Gambar 1. 4 Diagram alir penelitian elektroda berbasis mangan dengan bantuan tumbuhan untuk superkapasitor

Gambar 1.4 menunjukkan diagram alir penelitian pembuatan elektroda berbasis mangan berbahan dasar alami ekstrak kulit buah. Penelitian ini dimulai dengan mengkaji bahan alami sebagai pengkelat dan pereduksi. Bahan pengkelat alami yang memiliki sifat antioksidan yang tinggi dan memiliki kandungan logam berat yang banyak. Pengkajian bahan alami dilakukan dengan mencari referensi sebagai studi literatur untuk dipelajari sifat, kandungan, karakteristik dan proses pembuatan ekstrak bahan alami tersebut. Setelah dilakukan pengkajian studi literatur mengenai bahan pengkelat dari ekstrak kulit buah, dilakukan pengekstrakan dengan soxhlet untuk menghasilkan filtrat dari ekstrak kulit buah yang dijadikan sebagai bahan pengkelat dan pereduksi elektroda superkapasitor. Setelah dilakukan ekstraksi, kemudian

dilakukan fabrikasi elektroda superkapasitor dengan bahan dasar alami menggunakan metode sintesis hidrotermal. Hidrotermal merupakan metode mengkristalkan zat dari larutan berair bersuhu tinggi pada tekanan uap tinggi, biasanya dilakukan dalam sistem tertutup di atas suhu ruangan. Proses hidrotermal ini dilakukan dengan pengadukan (*stirring*) agar larutan tetap bercampur selama proses berlangsung. Hasil dari fabrikasi elektroda superkapasitor berupa sampel berbentuk padatan kecil berukuran nanopartikel yang merupakan bahan utama pembuatan elektroda superkapasitor.

1.6 Kesimpulan dan Ringkasan CD-1

Superkapasitor berbahan dasar alami menjadi salah satu solusi untuk mengatasi meningkatnya kebutuhan akan penyimpanan energi yang ramah lingkungan. Pengembangan superkapasitor berbahan alami berupa kulit jeruk, kulit pisang, kulit manggis, serta Alga coklat dapat mengurangi ketergantungan pada kapasitor konvensional yang terbuat dari bahan sintesis, yang berdampak negatif bagi lingkungan. Berdasarkan kajian dari berbagai aspek yang sudah dijabarkan sebelumnya, superkapasitor berbahan dasar alami memiliki potensi lebih unggul dibandingkan kapasitor konvensional. Namun, untuk mengoptimalkan kinerja superkapasitor ini perlu memenuhi beberapa kebutuhan, diantaranya meningkatkan nilai kapasitansi dengan pembuatan nanopartikel, peningkatan siklus CV yang stabil, serta pemilihan bahan elektroda yang aman dan ramah lingkungan. Untuk mengatasi kebutuhan tersebut, penulis mengusulkan beberapa solusi, antara lain pembuatan nanopartikel menggunakan metode hidrotermal, pembuatan *template* berpori, serta pembuatan elektroda dan pemilihan elektrolit yang kompatibel. Dengan solusi tersebut, diharapkan penelitian ini dapat mencapai tujuan untuk menghasilkan elektroda superkapasitor menggunakan bahan material yang baik dengan nilai kapasitansi 50-200 F/g. Elektroda superkapasitor dengan nilai kapasitansi 50-200 F/g bisa diaplikasikan pada sistem start-stop dan pengganti baterai