

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
INTISARI	xv
ABSTRACT.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	5
1.3. Manfaat Penelitian	5
1.4. Keaslian Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
2.1. Tinjauan Pustaka.....	7
2.1.1.Karbon Berpori	7
2.1.2.Karbon Aktif	9
2.1.3.Karakteristik Kimia Permukaan Karbon.....	10
2.1.3.1. <i>Acidic Surfaces</i>	10
2.1.3.2. <i>Basic Surfaces</i>	11
2.1.4.Modifikasi Kimia Permukaan Karbon	11
2.1.4.1.Modifikasi dengan Asam	11
2.1.4.2.Modifikasi dengan Basa.....	12
2.1.4.3.Impregnasi secara Kimia.....	13
2.1.4.4.Modifikasi dengan Surfaktan.....	14
2.1.4.5.Fungsionalisasi Ligan	14
2.1.5.Karbon Kaya Oksigen : Preparasi dan Modifikasi	15
2.1.5.1.Modifikasi Karbon Berpori dengan Larutan Hidrogen Peroksida.....	16
2.1.5.2.Modifikasi Karbon Berpori dengan Ozonisasi	17

2.1.5.3.Modifikasi Karbon Berpori dengan Iradiasi Gamma.....	18
2.1.6.Radiasi Gamma.....	18
2.1.7.Superkapasitor.....	20
2.1.7.1.Mekanisme Penyimpanan Superkapasitor	20
2.1.7.2.Komponen Penyusun Superkapasitor	22
2.2. Landasan Teori.....	25
2.3. Hipotesis	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1. Alat dan Bahan Penelitian.....	35
3.2. Prosedur Penelitian	35
3.2.1.Preparasi dan Pembuatan Karbon Berpori	36
3.2.1.1.Karbon Berpori dari Tempurung kelapa	36
3.2.1.2.Pembuatan Karbon Berpori dari Polimer <i>Salicylic Acid-Phenol-Formaldehyde</i>	36
3.2.2.Pembuatan Karbon Kaya Oksigen	37
3.2.2.1.Modifikasi karbon dengan Iradiasi Gamma.....	37
3.2.2.2.Modifikasi Karbon dengan <i>Oksidator Agent</i> (Hidrogen Peroksida).....	38
3.2.2.3.Modifikasi Karbon dengan Ozonizer	38
3.2.3.Karakterisasi Material	39
3.2.3.1.Kandungan Gugus Fungsional Oksigen dan <i>Wettability</i> pada Permukaan Karbon.....	39
3.2.3.2.SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	41
3.2.3.3.Karakteristik Pori Karbon	42
3.2.3.4.Performa Elektrokimia Superkapasitor Berbasis Karbon Kaya Oksigen	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1. Pembuatan Material Karbon Kaya Oksigen	44
4.1.1.Pembuatan Material Karbon Berpori Polimer <i>Salicylic Acid-Phenol-Formaldehyde</i>	45
4.2. Karakteristik Material Karbon Kaya Oksigen	46
4.2.1.Morfologi Permukaan Karbon	46
4.2.2. <i>Nitrogen Adsorption-Desorption Isotherm</i>	50
4.2.3.Struktur Pori.....	54
4.2.4.Distribusi ukuran pori	56

4.2.5. Gugus Fungsional Oksigen dan <i>Wettability</i>	60
4.2.5.1. FTIR (<i>Fourier Transform Infrared</i>) Spectroscopy	60
4.2.5.2. Analisis Termogravimetri	64
4.2.6. Karakteristik Elektrokimia dari Karbon sebagai Material Elektroda <i>Electric Double Layer Capacitor</i> (EDLC)	68
4.2.6.1. Kapasitansi Spesifik dari EDLC menggunakan berbagai Metode Modifikasi	68
4.2.6.2. Energy density dan Power Density dari EDLC menggunakan berbagai Metode Modifikasi.....	75
4.2.7. Hubungan Karakteristik Pori Karbon terhadap Kapasitansi Spesifik EDLC menggunakan berbagai Metode Modifikasi	77
4.2.7.1. Hubungan Luas Permukaan Spesifik dengan Kapasitansi Spesifik.....	77
4.2.7.2. Hubungan Volum Pori dengan Kapasitansi Spesifik.....	80
4.2.8. Hubungan Gugus Fungsional Oksigen dan <i>Wettability</i> Karbon terhadap Kapasitansi Spesifik EDLC menggunakan berbagai Metode Modifikasi	82
BAB V PENUTUP.....	84
5.1. Kesimpulan	84
5.2. Saran	84
DAFTAR PUSTAKA	85
LAMPIRAN.....	96

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Studi Literatur Penelitian Pembuatan Karbon Kaya Oksigen	6
Tabel 2.1. Perbandingan Karakteristik Elektrokimia Perangkat Penyimpan Energi (Ander González, 2016)	20
Tabel 4.1. Karakteristik struktur pori dari karbon berpori tempurung kelapa hasil modifikasi dengan berbagai metode	54
Tabel 4.2. Karakteristik struktur pori dari karbon berpori polimer APF hasil modifikasi dengan berbagai metode	55
Tabel 4.3. Persentase penambahan gugus fungsional oksigen pada karbon berpori tempurung kelapa setelah modifikasi	65
Tabel 4.4. Persentase penambahan gugus fungsional oksigen pada karbon berpori polimer APF setelah modifikasi	67
Tabel 4.5. Kapasitansi spesifik superkapasitor dari karbon berpori tempurung kelapa yang diperoleh dengan metode <i>cyclic voltammetry</i> pada rentang potensial -0,2 V - 0,7 V ..	69
Tabel 4.6. Kapasitansi spesifik superkapasitor dari karbon berpori polimer APF yang diperoleh dengan metode <i>cyclic voltammetry</i> pada rentang potensial -0,2 V - 0,7 V	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Ragone Plot dari Berbagai Alat Penyimpan Energi (Meng dkk., 2013)	2
Gambar 2.1. Struktur Molekul Formaldehid	8
Gambar 2.2. Struktur Molekul Fenol	8
Gambar 2.3. Struktur Molekul Asam Salisilat	8
Gambar 2.4. Gugus Fungsional Oksigen Asam dan Basa pada Permukaan Karbon (Montes-Morán dkk., 2004).....	10
Gambar 2.5. Jalur Reaksi Ozon dan Karbon Berpori (Chiang dkk., 2002).....	17
Gambar 2.6. Efek Compton pada Iradiasi Gamma dalam Kondisi Kering	18
Gambar 2.7. Perbandingan Mekanisme Penyimpanan Energi pada EDLC dan <i>Pseudo-Capacitor</i> (Jost dkk., 2014).....	21
Gambar 2.8. Mekanisme Penyimpanan Energi dalam EDLC pada (a) Tanpa Potensial dan (b) Saat Diberi Potensial (Sharma & Bhatti, 2010).....	21
Gambar 2.9. Skema Model Superkapasitor	23
Gambar 2.10. Voltammogram Siklik dari Elektroda <i>Glassy Activated Carbon</i> pada 10 mV/s dalam 3 M H ₂ SO ₄ (Aq) dan 1 M TEABF ₄ (Kötz & Carlen, 2000)	23
Gambar 2.11. Skema Superkapasitor dengan Elektroda Karbon Berpori dan Berbagai Jenis Elektrolit (Forse dkk., 2016).....	24
Gambar 2.12. Mekanisme Reaksi Ozon Air (Gunten, 2003)	26
Gambar 2.13. Disintegrasi Ozonide I (Gunten, 2003)	26
Gambar 2.14. Mekanisme Ozonisasi <i>Direct-Indirect Reaction</i> (dos Santos dkk., 2012)	29
Gambar 2.15. Skema Interaksi H ₂ O ₂ pada Permukaan Karbon (Razdyakonova dkk., 2015).....	29
Gambar 2.16. Skema Fungsionalisasi <i>Carbon Black</i> (Razdyakonova dkk., 2015).....	30
Gambar 2.17. Diagram Skematik Peran Wettability dalam Pemanfaatan Luas Permukaan Elektroda (Liu dkk., 2019).....	33
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	35
Gambar 3.2. Rangkaian Alat Proses Pembuatan Polimer	36
Gambar 3.3. Iradiator Gamma Co-60 Generasi I Tipe Ob-Servo Ignis	37
Gambar 3.4. Rangkaian Alat Oksidasi Karbon dengan <i>Oksidator Agent</i> (H ₂ O ₂ 15%).....	38
Gambar 3.5. Rangkaian Alat Oksidasi Karbon dengan Ozon Generator	39
Gambar 4.1. Struktur Jaring Polimer APF	44

Gambar 4.2. (a) Polimer dan (b) Karbon Polimer APF.....	45
Gambar 4.3. Morfologi Permukaan Karbon Berpori Tempurung Kelapa sebelum Modifikasi (a), Karbon Berpori Kaya Oksigen setelah Modifikasi dengan Hidrogen Peroksida (b), Ozonisasi Kondisi Kering (c) dan Ozonisasi Kondisi Basah (d).....	47
Gambar 4.4. Morfologi Permukaan Karbon Berpori Kaya Oksigen Tempurung Kelapa yang Diiradiasi Gamma pada Dosis 25 kGy Kondisi Kering (a), 25 kGy Kondisi Basah (b), 55 kGy Kondisi Kering (c) dan 55 kGy Kondisi Basah (d).....	48
Gambar 4.5. Morfologi Permukaan Karbon Berpori Polimer APF sebelum Modifikasi (a), Karbon Berpori Kaya Oksigen setelah Modifikasi dengan Hidrogen Peroksida (b), Ozonisasi Kondisi Kering (c), Ozonisasi Kondisi Basah (d), Iradiasi Gamma pada Dosis 25 kGy Kondisi Kering (e) dan 25 kGy Kondisi Basah (f)	49
Gambar 4.6. <i>N₂ Adsorption-Desorption Isotherm</i> dari Karbon Berpori Tempurung Kelapa Tanpa Modifikasi dan dengan Modifikasi	50
Gambar 4.7. <i>N₂ Adsorption-Desorption Isotherm</i> dari Karbon Berpori Polimer APF Tanpa Modifikasi dan dengan Modifikasi	51
Gambar 4.8. <i>N₂ Adsorption-Desorption Isotherm</i> dari Karbon Berpori Tempurung Kelapa yang Diiradiasi Gamma dengan Variasi Dosis pada Kondisi Basah (a), dan Kering (b)	53
Gambar 4.9. <i>N₂ Adsorption-Desorption Isotherm</i> dari Karbon Berpori Polimer APF yang Diiradiasi Gamma dengan Variasi Dosis pada Kondisi Basah (a), dan Kering (b)	53
Gambar 4.10. Distribusi Ukuran Pori Karbon Berpori Tempurung Kelapa dengan QSDFT N ₂ - Model (a) Tanpa Modifikasi dan Modifikasi dengan H ₂ O ₂ , (b) Ozonisasi, (c) Iradiasi Gamma dalam Kondisi Basah dan (d) dalam Kondisi Kering.....	57
Gambar 4.11. Distribusi Ukuran Pori Karbon Berpori Polimer APF dengan QSDFT N ₂ -Model (a) Tanpa Modifikasi dan Modifikasi dengan H ₂ O ₂ , (b) Ozonisasi, (c) Iradiasi Gamma dalam Kondisi Basah dan (d) dalam Kondisi Kering	59
Gambar 4.12. Spektrum FTIR Karbon Berpori Tempurung Kelapa setelah Modifikasi dengan Hidrogen Peroksida (a), Ozonisasi Kondisi Basah (b) dan Kering (c).	61
Gambar 4.13. Spektrum FTIR Karbon Berpori Tempurung Kelapa setelah Iradiasi Gamma dengan Berbagai Variasi Dosis dalam Kondisi Basah (a) dan Kering (b).	62

Gambar 4.14. Spektrum FTIR Karbon Berpori Polimer APF setelah Modifikasi dengan Hidrogen Peroksida (a), Ozonisasi Kondisi Basah dan (b) Kering (c).	63
Gambar 4.15. Spektrum FTIR Karbon Berpori Polimer APF setelah Iradiasi Gamma dengan Berbagai Variasi Dosis dalam Kondisi Basah (a) dan Kering (b).	64
Gambar 4.16. Kurva DTG untuk Karbon Berpori Tempurung Kelapa sebelum Modifikasi (A), setelah Modifikasi dengan H ₂ O ₂ (B), Ozonisasi (C) dan Iradiasi Gamma (D)	66
Gambar 4.17. Kurva DTG untuk Karbon Berpori Polimer APF sebelum Modifikasi (A), setelah Modifikasi dengan H ₂ O ₂ (B), Ozonisasi (C) dan Iradiasi Gamma (D).....	67
Gambar 4.18. Voltammogram Siklik Superkapasitor dari Elektroda Karbon Berpori Tempurung Kelapa (a) dan Polimer APF (b) dengan Berbagai Metode Modifikasi.....	70
Gambar 4.19. Voltamogram Siklik pada <i>Scan Rate</i> 5-500 mV/s untuk Elektroda Superkapasitor (a)KA15%, (b)KA2W, (c)KA25W, (d)KP-APF15%, (e)KP-APF2W, (f)KP-APF25W	73
Gambar 4.20. Kapasitansi Spesifik pada Kecepatan Pemindaian yang Berbeda-beda untuk Elektroda Superkapasitor dari Karbon Berpori Tempurung Kelapa dan Polimer APF yang Dimodifikasi dengan (a) dan (b): H ₂ O ₂ dan Ozon, (c) dan (e): Iradiasi Gamma Kondisi Basah, serta (d) dan (f): Iradiasi Gamma Kondisi Kering	75
Gambar 4.21. <i>Ragone Plot</i> dari Superkapasitor yang Menggunakan Karbon Berpori Tempurung Kelapa yang Dimodifikasi sebagai Material Elektroda	76
Gambar 4.22. <i>Ragone Plot</i> dari Superkapasitor yang Menggunakan Karbon Berpori Polimer APF yang Dimodifikasi sebagai Material Elektroda.....	77
Gambar 4.23. Hubungan Luas Permukaan Spesifik dan Kapasitansi Spesifik EDLC Menggunakan Berbagai Metode Modifikasi pada Karbon Berpori Tempurung Kelapa.....	78
Gambar 4.24. Hubungan Luas Permukaan Spesifik dan Kapasitansi Spesifik EDLC Menggunakan Berbagai Metode Modifikasi pada Karbon Berpori Polimer APF.....	79
Gambar 4.25. Hubungan Luas Permukaan Spesifik dan Kapasitansi Spesifik EDLC Menggunakan Berbagai Metode Modifikasi pada Karbon Berpori Tempurung Kelapa.....	80
Gambar 4.26. Hubungan Luas Permukaan Spesifik dan Kapasitansi Spesifik EDLC Menggunakan Berbagai Metode Modifikasi pada Karbon Berpori Polimer APF.....	81



Gambar 4.27. Hubungan Persentase Penambahan Gugus Fungsional Oksigen dan Kapasitansi Spesifik Menggunakan Berbagai Metode Modifikasi pada Karbon Berpori Tempurung Kelapa.....	82
Gambar 4.28. Hubungan Persentase Penambahan Gugus Fungsional Oksigen dan Kapasitansi Spesifik Menggunakan Berbagai Metode Modifikasi pada Karbon Berpori Polimer APF	83