



Disertasi

**PEMANFAATAN LIMBAH BATERAI UNTUK ELEKTRODA
CARBON NANOPARTICLE PADA *REVERSE ELECTRODIALYSIS*
SEBAGAI SUMBER ENERGI RAMAH LINGKUNGAN**

**SUKA HANDAJA BUDI
30000216510004**

SEKOLAH PASCASARJANA

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU LINGKUNGAN
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2021**

HALAMAN PENGESAHAN

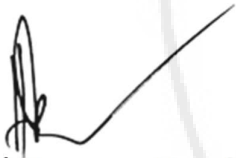
DISERTASI

**PEMANFAATAN LIMBAH BATERAI UNTUK ELEKTRODA
CARBON NANOPARTICLE PADA REVERSE ELECTRODIALYSIS
SEBAGAI SUMBER ENERGI RAMAH LINGKUNGAN**

**SUKA HANDAJA BUDI
NIM. 30000216510004**

Telah diuji dan dinyatakan lulus ujian pada tanggal 27 April 2021 oleh tim penguji
Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana
Universitas Diponegoro

Promotor



Prof. Dr. rer.nat Heru Susanto, S.T.,M.M.,M.T.
NIP. 1975 0529 199802 1 001

Co-Promotor



Dr. Ir. Hermawan, DEA
NIP. 1960 0223 198602 1 001

Mengetahui,
Dekan
Sekolah Pascasarjana
Universitas Diponegoro

Ketua Program Studi
Doktor Ilmu Lingkungan
Sekolah Pascasarjana
Universitas Diponegoro

Dr. R. B. Sularto, S.H., M.Hum
NIP. 1967 0101 199103 1 005

Dr. Hartuti Purnaweni, MPA
NIP. 1961 1202 198803 2 009

**PEMANFAATAN LIMBAH BATERAI UNTUK ELEKTRODA
CARBON NANOPARTICLE PADA REVERSE ELECTRODIALYSIS
SEBAGAI SUMBER ENERGI RAMAH LINGKUNGAN**

**Oleh :
SUKA HANDAJA BUDI
NIM. 30000216510004**

Telah disetujui oleh :

Pimpinan Sidang :

Dr. R.B. Sularto S.H., M.Hum.

Sekretaris Sidang :

Dr. Hartuti Purnaweni, MPA

Tim Penguji :

Dr. R.B. Sularto S.H., M.Hum.

Prof. Dr. Moh. Yasin, M.Si.

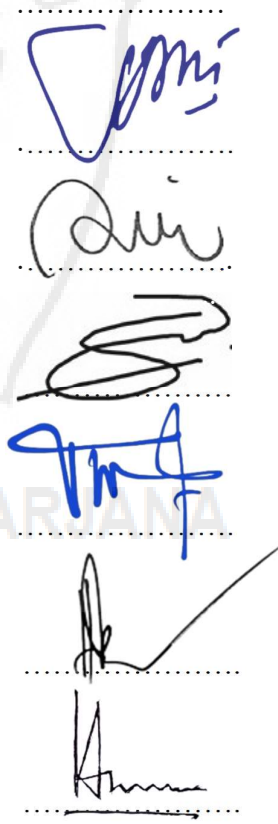
Moch. Arief Budihardjo, S.T., M.Eng.Sc,Env.Eng, Ph.D

Dr. Sudarno, S.T, M.Sc.

Prof. Dr. Widayat, S.T., M.T.

Prof. Dr. rer.nat. Heru Susanto, S.T., M.M., M.T.

Dr. Ir. Hermawan, DEA



ABSTRAK

Sebagai konsekuensi dari peningkatan penggunaan baterai adalah peningkatan jumlah limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Limbah B3 sebaiknya dikendalikan dan dikelola dengan baik dan benar sesuai peraturan yang berlaku. Salah satu upaya pengendalian limbah batu baterai adalah dengan memanfaatkan *carbon rod* dan *electrolyte paste* limbah baterai menjadi elektroda *carbon nanoparticle* dan dipakai sebagai elektroda pada *reverse electrodialysis* (RED) untuk menghasilkan *renewable energy*. Disertasi ini memiliki tujuan untuk menganalisa karakteristik batu baterai, karakteristik elektroda *carbon nanoparticle* dari bahan limbah baterai, karakteristik RED dengan elektroda limbah baterai dan menganalisa potensi *recovery energy* dan *recovery CO₂* pada unit *sea water desalination* (SWD) dengan menggunakan RED. Metoda eksperimen dipergunakan pada penelitian ini, yaitu dengan pengambilan sampel limbah baterai dan membongkarnya untuk diuji karakteristiknya, elektroda dibuat dengan membuat serbuk *carbon rod* menjadi ukuran *nanoparticle* dan mencampurnya dengan *electrolyte paste* serta mencetak dan menguji karakteristiknya, elektroda yang dibuat dipakai untuk uji karakteristik RED dan hasilnya dipakai untuk menganalisa potensi *recovery energi* dan emisi *CO₂* pada SWD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah batu baterai ditemukan di TPA. Limbah baterai dapat dipergunakan sebagai elektroda RED yang merupakan pembangkit energi listrik yang ramah lingkungan. Elektroda yang dibuat memiliki nilai *electrical conductivity*, *porosity* dan *surface area* sebesar 2,75 S/cm, 0,019 cc/g dan 15,936 m²/g, dan dihasilkan *open circuit voltage* (OCV) 0,12 – 0,14 volt/sel, *power density* 0,212 W/m² serta efisiensi 45,7%. SWD dengan air *blowdown* sebanyak 3.161 m³/hari dapat menghemat energi listrik sebanyak 3.626 MWh/tahun dan menyelamatkan lingkungan dengan mengurangi produksi emisi *CO₂* sebanyak 2.955.915 kgCO₂/tahun.

Kata Kunci : Limbah Baterai, *Carbon rod*, *Electrolyte paste*, Elektroda Karbon, *Nanoparticle*, *Reverse electrodialysis*, *sea water desalination*, *renewable energy*, emisi *CO₂*

SEKOLAH PASCASARJANA

ABSTRACT

As a consequence of the increased use of batteries is an increase in hazardous and toxic waste (B3). Hazardous waste should be controlled and managed properly and correctly in accordance with the regulation.. One of the efforts to control spent battery waste is to use carbon rods and electrolyte paste of spent battery into a nanoparticle electrode and use it as an electrode for reverse electrodialysis (RED) to produce renewable energy. The experimental method is used in this dissertation, namely by taking a sample of spent battery and dismantling it to its characterization, the electrodes are made by making carbon rod powder into nanoparticle sizes and mixing it with electrolyte paste and printing and its characterization, the electrodes made are used to the RED characterization and the results used to analyze the potential for energy recovery and CO₂ emissions in SWD. This dissertation aims to analyze the characteristics of the spent battery, the characteristics of the nanoparticle electrode of the spent battery material, the RED characteristics with the spent battery electrode, and the potential for energy recovery and CO₂ recovery in the SWD unit using RED. The research shows that the spent battery is found in landfills. Spent battery can be used as RED electrode which is an environmentally friendly electrical energy generator. The electrodes made has electrical conductivity, porosity and surface area values of 2.75 S/cm, 0.019 cc/g and 15.936 m²/g, and resulting in an open circuit voltage (OCV) 0.12 - 0.14 volt/cell, power density 0.212 W/m² and efficiency of 45.7%. SWD with blowdown water of 3,161 m³/h can save electricity as much as 3,626 MWh/y and save the environment by reducing CO₂ emission production by 2,955,915 kgCO₂/y

Key Word : Spent battery, *Carbon rod*, *Electrolyte paste*, Carbon electrode, *Nanoparticle*, *Reverse electrodialysis*, *sea water desalination*, *renewable energy* CO₂ *emmission*

SEMARANG
SEKOLAH PASCASARJANA

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Suka Handaja Budi

NIM : 30000216510004

Judul Disertasi : **Pemanfaatan Limbah Baterai Untuk Elektroda *Carbon Nanoparticle* Pada *Reverse Electrodialysis* Sebagai Sumber Energi Ramah Lingkungan**

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya dan sebenar-benarnya bahwa disertasi ini adalah hasil karya yang saya persiapkan dan susun sendiri, dan di dalamnya sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya yang pernah ditulis dan diajukan untuk memperoleh gelar doktoral di suatu perguruan tinggi dan Lembaga Pendidikan lainnya, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka

Semarang, April 2021



Suka Handaja Budi

RIWAYAT HIDUP

Nama : Suka Handaja Budi
Tempat/tanggal lahir : Nganjuk, 17 Januari 1969
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Agama : Islam
Alamat : Jl. Dumai V/3 RT. 6 RW. 15 Balun, Komplek Migas Nglajo
Cepu – Blora - Jawa Tengah 58312

Riwayat Pendidikan

1. SD Negeri Ds. Kemlokolegi, Kec. Baron, Kab. Nganjuk lulus tahun 1980
2. SMPN 1 Kertosono, Kab. Nganjuk lulus tahun 1983
3. SMAN 1 Kertosono, Kab. Nganjuk lulus tahun 1986
4. S1 Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Airlangga Surabaya lulus tahun 1992
5. S2 Program Studi Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya lulus tahun 2003

Riwayat Pekerjaan

1. Staf teknik program pengembangan diklat migas, Pusat Pengembangan Tenaga Migas Cepu 1994 – 2004
2. Fungsional Dosen Akademi Minyak dan Gas Bumi (Akamigas) 2004 – 2010
3. Kaprodi Teknik Listrik Perminyakan Akademi Minyak dan Gas Bumi Akamigas 2008 – 2010
4. Fungsional Dosen Sekolah Tinggi Energi dan Mineral Akamigas 2010 – 2015
5. Kaprodi Teknik Listrik Perminyakan Sekolah Tinggi Energi dan Mineral 2010 – 2011
6. Wakil Direktur II Sekolah Tinggi Energi dan Mineral Akamigas 2011 - 2015
7. Fungsional Dosen Politeknik Energi dan Mineral Akamigas 2015 – Sekarang

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Puji syukur senantiasa dipanjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga disertasi dengan judul **Pemanfaatan Limbah Baterai Untuk Elektroda *Carbon Nanoparticle* Pada *Reverse Electrodialysis* Sebagai Sumber Energi Ramah Lingkungan** dapat diselesaikan. Penulis menyadari keberhasilan penyusunan disertasi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan dan do'a dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis dengan rasa hormat dan kerendahan hati mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada :

1. Dr. RB. Sularto, selaku Dekan Sekolah Pasca Sarjana Universitas Diponegoro Semarang yang senantiasa memberikan fasilitasnya untuk kelancaran studi di Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan
2. Prof. Dr. RY. Perry Burhan, selaku Direktur Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, yang telah memberikan ijin belajar sehingga program belajar kami dapat dilaksanakan
3. Prof. Dr. rer.nat Heru Susanto, ST.,MT.,MM, selaku promotor yang telah memberikan bimbingan, arahan dan fasilitasnya sehingga disertasi dan program doktoral ini dapat diselesaikan
4. Dr. Hermawan, DEA, selaku copromotor yang dengan sabar membimbing kami sehingga disertasi ini dapat diselesaikan
5. Prof. Dr. Hadiyanto, MT selaku Wakil Direktur Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro dan dosen pada Program Doktor Ilmu Lingkungan yang senantiasa memberikan bantuan dan dorongan untuk selesainya program ini
6. Dr. Hartuti Purnaweni, MPh., selaku Kaprodi Program Doktor Ilmu Lingkungan yang senantiasa mendorong dan mendukung kami untuk menyelesaikan disertasi dan program ini.

7. Prof. Dr. Moch. Yasin, MSc selaku penguji eksternal dari FST Unair Surabaya, Prof. Dr. Widayat, MT, Dr. Ing Sudarno MSc, dan Mochamad Arief Budihardjo, S.T., M.Eng.Sc, Env.Eng, Ph.D selaku penguji internal pada Program Doktor Ilmu Lingkungan yang dengan sabar memberikan arahan, dorongan dan dukungan untuk selesainya program ini
8. Bapak Gondo Pramono, dari bagian Utilities Pertamina RU IV Cilacap, yang berkenan membantu pengumpulan data untuk penulisan disertasi
9. Istriku Vira Dwi Cahyani, S.Kep., Ners., M.Kes dan anak-anakku tersayang Paxia, Chiara, Queen yang melalui memberikan dukungan, semangat, cinta, kasih sayang dan do'anya sehingga program ini dapat diselesaikan, serta tak lupa kedua Ibunda tersayang yang selalu memberikan restu dan do'a dalam setiap langkahku.
10. Rekan-rekan Program Doktor Ilmu lingkungan, khususnya DIL-10 yang telah memberi motivasi dalam menyelesaikan program ini
11. Pengelola dan rekan-rekan pada Laboratorium Mer-C UPT Lab. Terpadu Undip yang telah memberikan bantuan dan layanan sehingga program ini dapat diselesaikan
12. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu-persatu yang telah membantu kelancaran penelitian dan penyelesaian program ini

Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan yang telah diberikan semua pihak. Akhir kata penulis mohon maaf apabila ada kurang sempurnanya disertasi ini. Semoga Disertasi ini dapat bermanfaat bagi almamater dan segenap pembaca.

SEKOLAH PASCASARJANA

Semarang, April 2021


Suka Handaja Budi
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PERSETUJUAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PERNYATAAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Perumusan Masalah	7
C. Orisinalitas	8
D. Tujuan Penelitian	15
E. Manfaat Penelitian	16
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	17
A. Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)	17
A.1. Limbah Baterai.....	19
B. <i>Reverse Electrodialysis</i> (RED)	22
B.1. Salinitas	26
B.2. Energi Perbedaan Salinitas.....	27
B.3. <i>Electromotive Force</i> dan <i>Permelectivity</i>	29

B.4.	Proses <i>Reverse Electrodialysis</i> (RED).....	30
B.5.	Profil Potensial Listrik	31
B.6.	Keluaran Daya Listrik	33
B.7.	Efisiensi.....	35
B.8.	Sistem Elektroda	36
C.	Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i>	39
C.1.	Unsur <i>Carbon</i>	39
C.2.	<i>Carbon Nanoparticle</i>	40
C.3.	Sintesa <i>Carbon Nanoparticle</i>	42
D.	Pembangunan Berkelanjutan dan Energi Ramah Lingkungan	44
E.	<i>Sea Water Desalination</i> (SWD).....	48
BAB 3. KERANGKA TEORI DAN KONSEP		51
A.	Kerangka Teori	51
B.	Kerangka Konsep.....	54
BAB 4. METODOLOGI PENELITIAN		55
A.	Tempat Penelitian	55
B.	Desain Penelitian	55
B.1.	Bahan dan Alat Penelitian	57
B.1.1.	Bahan Penelitian.....	57
B.1.2.	Alat Alat Penelitian	57
B.2.	Studi Karakteristik Limbah Baterai	58
B.3.	Studi Karakteristik Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i> Limbah Baterai.....	60
B.4.	Studi Karakteristik <i>Reverse Electrodialysis Power Generation</i> Dengan Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i> Limbah Baterai.....	62
B.5.	Analisis <i>Recovery</i> Energi dan <i>Recovery</i> Emisi CO ₂ Pada Unit <i>Sea Water Desalination</i> di PT. Pertamina Refinery Unit (RU) IV Cilacap	63
BAB 5. HASIL PENELITIAN.....		68
A.	Karakteristik Limbah Baterai.....	68
A.1.	Gambaran Umum	68
A.2.	Identifikasi Struktur Baterai.....	71

A.3.	Karakteristik <i>Carbon Rod</i>	75
A.4.	Karakteristik <i>Electrolyte Paste</i>	76
B.	Karakteristik Elektroda <i>Carbon Nanomaterial</i> Limbah Baterai.....	79
B.1.	Distribusi Ukuran Partikel Elektroda <i>Carbon Nanomaterial</i>	79
B.2.	Analisa XRD Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i>	80
B.3.	Morfologi Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i>	83
B.4.	<i>Surface Area</i> dan <i>Porosity</i> Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i>	84
B.5.	<i>Electrical Conductivity</i> Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i>	85
C.	Karakteristik RED dengan Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i> Limbah Baterai	87
C.1.	RED dengan Elektroda <i>Carbon Nanoparticle</i>	87
C.2.	<i>Open Circuit Voltage (OCV)</i>	88
C.3.	<i>Power Density</i>	91
C.4.	Efisiensi.....	95
D.	Potensi Recovery Energi dan CO ₂ Pada Sea Water Desalination	96
D.1.	<i>Sea Water Desalination (SWD)</i>	96
D.2.	Emisi CO ₂ Terproduksi pada <i>Combined Heat and Power Generation (CHP)</i>	99
D.3.	Emisi CO ₂ Terproduksi pada SWD.....	104
D.4.	<i>Recovery</i> Energi dan CO ₂ pada SWD dengan RED <i>Power Generation</i>	105
BAB 6. PENUTUP		110
A.	Kesimpulan	110
B.	Saran.....	112
DAFTAR PUSTAKA		114
LAMPIRAN		127

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 2 : Prinsip dasar RED, dimana percampuran larutan garam berkonsentrasi tinggi (<i>High</i>) dan rendah (<i>Low</i>) menghasilkan aliran ion pada suatu membran dan menghasilkan arus listrik yang mengalir ke beban melalui elektroda (Veerman & Vermaas, 2012).....	25
Gambar 2. 3 : Skematik rangkaian listrik <i>stack RED</i> dengan <i>external load</i> dan rangkaian <i>equivalen stack RED</i> (Veerman & Vermaas, 2012)	31
Gambar 2. 4 : Profile potensial stack RED satu cell pada kondisi Open Circuit, Maximum Power dan Short Circuit (Veerman & Vermaas, 2012)....	32
Gambar 2. 5 : Struktur Single Walled CNT (a), Double Walled CNT (b), Multi Walled CNT (c) (Ibrahim, 2013).....	42
Gambar 3. 1 : Kerangka Teori	53
Gambar 3. 2 : Kerangka Konsep.....	54
Gambar 4. 1 : Alur penelitian.....	56
Gambar 4. 2 : Alur Eksperimen Studi Karakteristik Limbah Baterai	59
Gambar 4. 3 : Alur Eksperimen pembuatan Elektroda Carbon Nanoparticle.....	61
Gambar 4. 4 : Stack RED 2 Cell (Veerman & Vermaas, 2012).....	62
Gambar 4. 5 : Rangkaian Pengujian Elektroda Pada RED	63
Gambar 4. 6 : Sea Water Desalination tipe Multi Stage Flash (Sasakura Engineering, 1998).....	64
Gambar 4. 7 : Typical Combined Heat and Power Generation (CHP) - Steam Boiler with Steam Turbine (GHGProtocol, 2006)	65
Gambar 5. 1 : Sampel Limbah Baterai dari TPA Jatibarang Semarang.....	69
Gambar 5. 2 : Struktur Komponen Baterai Zinc Carbon	72
Gambar 5. 3 : Pola grafik XRD dari Carbon Electrode dari campuran Carbon Rod dan Electrolyte Paste dengan perbandingan berat (a) 9: 0, (b) 8: 1, (c) 7: 2	81
Gambar 5. 4 : Morfologi Elektroda Carbon menggunakan SEM, morfologi serbuk carbon rod (a), morfologi electrolyte paste (b), morfologi elektroda	

carbon dengan perbandingan campuran 8:1 (c), dan morfologi elektroda carbon dengan campuran 7:2 (d).	83
Gambar 5. 5 : Trend grafik besar OCV RED terhadap waktu pada larutan encer NaCl 1 g/L dan berbagai macam kecepatan aliran pada larutan pekat (a) 30 g/L, (b) 35 g/L, (c) 40 g/L dan (d) trend OCV terhadap konsentrasi larutan pekat.	89
Gambar 5. 6 : Hasil pengukuran daya dan power density RED dengan elektroda carbon nanoparticle	92
Gambar 5. 7 : Typically SWD dengan 24 Stage Flash (Sasakura Engineering, 1998)	96



SEKOLAH PASCASARJANA

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 : Hasil Kesimpulan Beberapa Penelitian Terkait RED	9
Tabel 1. 2 : Status Penelitian terkait Limbah Baterai, Elektroda Karbon dan Teknologi RED	13
Tabel 5. 1 : Perbandingan berat rata rata komponen baterai baru dan bekas.....	72
Tabel 5. 2 : Analisa elemen carbon rod dari baterai bekas dengan EDX.....	76
Tabel 5. 3 : Karakteristik elemen electrolyte paste dari baterai bekas dengan EDX.	77
Tabel 5. 4 : Distribusi partikel serbuk carbon rod baterai bekas yang ditumbuk dengan HEM (high energy milling)	80
Tabel 5. 5 : Surface area dan porosity dari campuran carbon rod dan electrolyte paste	85
Tabel 5. 6 : Nilai electrical conductivity elektroda carbon dari campuran carbon rod dan electrolyte paste	86
Tabel 5. 7 : Spesifikasi Membrane Selective Ion Selemion TM	88
Tabel 5. 8 : Daya maksimum, power density dan resistansi internal sistem RED menggunakan elektroda carbon nanoparticle dengan larutan encer NaCl 1 g/L	92
Tabel 5. 9 : Efisiensi maksimum sistem RED menggunakan elektroda carbon nanoparticle dengan larutan encer NaCl 1 g/L.....	95
Tabel 5. 10 : Total produksi SWD	97
Tabel 5. 11 : Komposisi air blowdown SWD	98
Tabel 5. 12 : Pemakaian daya listrik operasi pompa pada SWD	99
Tabel 5. 13 : Pemakaian daya steam pada unit SWD	99
Tabel 5. 14 : Kapasitas dan kondisi operasi boiler pada CHP	100
Tabel 5. 15 : Kapasitas dan kondisi operasi steam turbine generator pada CHP	100
Tabel 5. 16 : Perhitungan konsumsi energi boiler pada sistem CHP	101
Tabel 5. 17 : Perhitungan daya yang diproduksi pada sistem CHP	102
Tabel 5. 18 : Perhitungan daya yang diproduksi pada sistem CHP	102