

**PREPARASI HIDROCHAR MAKROALGA *Eucheuma cottonii* DAN UJI
SELEKTIVITASNYA SEBAGAI ADSORBEN ZAT WARNA ANIONIK**

TESIS

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Sains Bidang Studi Ilmu Material



**BUNGA INDAH PUTRI
20032682327002**

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU MATERIAL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

HALAMAN PENGESAHAN

PREPARASI HIDROCHAR MAKROALGA *Eucheuma cottonii*
DAN UJI SELEKTIVITASNYA SEBAGAI ADSORBEN ZAT
WARNA ANIONIK

TESIS

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Sains Bidang Studi Ilmu Material

OLEH:

Bunga Indah Putri
20032682327002

Palembang, Januari 2025

Pembimbing I

Prof. Aldes Lesbani, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 197408121998021001

Pembimbing II

Dr. Fitri Suryani Arsyad, M.Si.
NIP. 197010191995122001

Mengetahui,
Direktur Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc
NIP. 196108121987031003

HALAMAN PERSETUJUAN

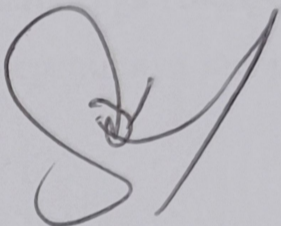
Tesis dengan judul “Preparasi Hidrochar Makroalga *Eucheuma cottonii* dan Uji Selektivitasnya Sebagai Adsorben Zat Warna Anionik” telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Sidang Tesis Program Studi Magister Ilmu Material pada tanggal 30 Desember 2024 dan telah diperiksa, diperbaiki dan disetujui dengan saran dan masukan yang diberikan.

Palembang, Januari 2025

Tim Penguji Karya Ilmiah berupa Tesis

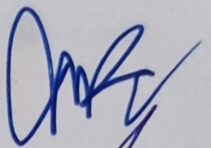
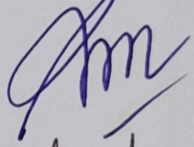
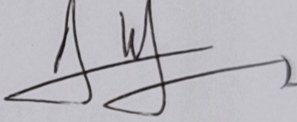
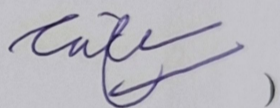
Ketua :

1. Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si
NIP. 197711272005011003

()

Anggota :

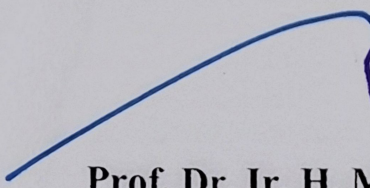
2. Prof. Aldes Lesbani, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 197408121998021001
3. Dr. Fitri Suryani Arsyad, M.Si.
NIP. 197010191995122001
4. Elda Melwita, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197505112000122001
5. Dr. rer. nat. Mardiyanto, M.Si., Apt
NIP. 197103101998021002

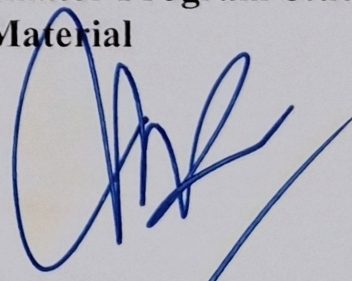
()
()
()
()

Mengetahui,

Direktur Pascasarjana

Koordinator Program Studi
Ilmu Material


Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc
NIP. 196108121987031003


Prof. Aldes Lesbani, M.Si., Ph.D
NIP. 197408121998021001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama mahasiswa : Bunga Indah Putri

NIM : 20032682327002

Fakultas/Jurusan : Program Pasca Sarjana/Ilmu Material

Menyatakan bahwa tesis ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar magister (S2) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain.

Semua informasi yang dimuat dalam tesis ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari tesis ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Palembang, Januari 2025

Penulis,



Handwritten signature of Bunga Indah Putri.

Bunga Indah Putri

NIM. 20032682327002

**HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Bunga Indah Putri
NIM : 20032682327002
Fakultas/Jurusan : Program Pasca Sarjana/Ilmu Material
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “Preparasi Hidrochar Makroalga *Eucheuma cottonii* dan Uji Selektivitasnya sebagai Adsorben Zat Warna Anionik”. Dengan hak bebas (*royalty non-eksklusive*) ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir atau tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Palembang, Januari 2025

Yang menyatakan,



Bunga Indah Putri

NIM. 20032682327002

HALAMAN PERSEMBAHAN

- ✚ *Dan Dia telah memberikan kepadamu segala apa yang kamu mohonkan kepada-Nya. Jika kamu menghitung nikmat Allah, niscaya kamu tidak akan mampu menghitungnya. Sesungguhnya manusia itu sangat zalim dan sangat mengingkari (nikmat Allah) (QS. Ibrahim: 34)*
- ✚ *Dan dia bersamamu dimanapun kamu berada (Q.S Al-Hadid: 4)*
- ✚ *Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan (QS Al-Insyirah: 5-6)*
- ✚ *Maka ingatlah Aku, niscaya Aku akan mengingatmu. Bersyukurlah kepada-Ku dan janganlah kamu ingkar kepada-Ku (QS Al-Baqarah: 152)*
- ✚ *Dan apabila hamba-hamba-Ku bertanya kepadamu tentang Aku, maka (jawablah), bahwa Aku dekat. Aku mengabulkan permohonan orang yang berdoa apabila dia berdoa kepada-Ku. Maka hendaklah mereka itu memenuhi (segala perintah)-Ku dan hendaklah mereka beriman kepada-Ku. Agar mereka selalu berada dalam kebenaran (QS. Al-Baqarah: 186)*
- ✚ *Saat kamu meminta untuk tumbuhnya bunga, jangan terkejut bila hujan akan turun (Ustadzah Halimah Alaydrus)*
- ✚ *Be patient. Sometimes the wait is longer because the blessing is bigger.*

Skripsi ini sebagai tanda syukurku kepada:

- ✓ Allah SWT
- ✓ Nabi Muhammad SAW

Dan kupersembahkan kepada:

- ✓ Mama (Ida Triswenti), Papa (Alm. Moch. Thoyib), adik-adik ku (Wahyu Habib Ramadhan dan Irfan Maulana)
- ✓ Seluruh keluarga besarku
- ✓ Pembimbingku (Bapak Prof. Aldes Lesbani, Ph.D dan Ibu Dr. Fitri Suryani Arsyad, M.Si)
- ✓ Teman-temanku yang selalu memberikan semangat, bantuan dan dukungan
- ✓ Almamaterku (Universitas Sriwijaya)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur hanyalah milik Allah SWT, kita memujinya, memohon ampunan dan meminta pertolongan kepada-Nya dan pada akhirnya penulis dapat menyelesaikan penulisan tesis yang berjudul: “Preparasi Hidrochar Makroalga *Eucheuma cottonii* dan Uji Selektivitasnya sebagai Adsorben Zat Warna Anionik”. Tesis ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister sains pada Fakultas Pascasarjana Program Studi Ilmu Material, Universitas Sriwijaya.

Proses penyusunan tesis ini tidak terlepas dari berbagai rintangan, mulai dari pengumpulan literatur, penelitian, pengumpulan data dan sampai pada pengolahan data maupun dalam tahap penulisan. Namun dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab selaku mahasiswa dan juga bantuan dari berbagai pihak, baik material maupun moril, akhirnya selesai sudah penulisan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak **Prof. Aldes Lesbani, Ph.D** dan juga Ibu **Dr. Fitri Suryani Arsyad, M.Si** yang telah banyak memberikan bimbingan, bantuan, motivasi, saran dan petunjuk kepada penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rezeki, nikmat, karunia dan anugerah-Nya hingga akhirnya penulis bisa menyelesaikan pendidikan magister ini dengan baik.
2. Bapak Prof. Dr. Taufiq Marwa, S.E., M.Si. selaku rektor Universitas Sriwijaya. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc selaku Direktur Pascasarjana Universitas Sriwijaya dan Bapak Prof. Aldes Lesbani, Ph.D selaku Koordinator Program Studi Ilmu Material Pascasarjana Universitas Sriwijaya.
3. Ibu Elda Melwita, S.T., M.T., Ph.D, Bapak Dr. rer. nat. Mardiyanto, M.Si., Apt dan Bapak Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si. selaku tim penguji tesis, terimakasih untuk masukan, saran dan dukungan yang diberikan.
4. Seluruh Dosen Program Studi Ilmu Material yang telah memberikan banyak ilmu, mendidik, dan membimbing selama proses perkuliahan.
5. Kepada Alm Papa, Mama, Wahyu dan Irfan. Terimakasih banyak untuk semua doa, dukungan motivasi, dan semua hal yang telah kalian berikan kepada

kakak. Untuk Papa, terimakasih untuk kepercayaan yang selalu Papa berikan kepada Bunga, terimakasih untuk semua sesi *deep talk* di setiap malam yang dulu selalu Papa hadirkan. Terimakasih untuk semua nasihat, didikan dan semua hal yang sudah Papa adakan untuk Bunga. Meskipun Papa sudah tidak disini, tapi Bunga tau, Papa bangga. Terimakasih untuk semua nya Papa. Untuk Mama, terimakasih banyak untuk semua doa yang selalu mama panjatkan untuk bunga, terimakasih untuk semua dukungan yang selalu mama berikan. Terimakasih sudah menjadi pendengar yang sangat baik untuk Bunga. Untuk adik-adik ku, terimakasih sudah selalu menjaga kakak, selalu menjadi pendengar yang baik untuk semua keluh-kesah yang kakak bagi. Terimakasih sudah berusaha menjaga kakak menggantikan Papa. Ayo kita ke Banda Naira di akhir tahun ini.

6. Kepada keluarga besar ku terimakasih untuk semua motivasi yang sudah diberikan hingga akhirnya Bunga bisa sampai di tahap ini.
7. Kepada sahabat-sahabat ku yang entah bagaimana jalan ceritanya, Allah pertemukan aku dengan kalian dan dengan izin Allah kalian bantu aku untuk keluar dari terpuruknya aku kala itu. Terimakasih banyak terkhusus kepada kak Sar, Yin (Syifa Lutfiyah) dan Kak Grace. Serta anak-anak GC Subot, terimakasih sudah menjadi penyembuh dikala itu.
8. Kepada bestie bar-bar ku, Alfan Wijaya dan Sahrul Wibiyana yang sudah banyak sekali membantu dan mewarnai masa-masa pendidikan magister ini dengan suka cita. Terimakasih banyak ya teman-teman, semoga apa yang kita inginkan dan cita-citakan, semuanya segera diijabah oleh Allah SWT.
9. Kepada member TSS yang sangat-sangat aku sayang, Ziah, Happy dan Aldi. Terimakasih banyak untuk semua pengertian, pemakluman dan dukungan yang kalian berikan. Untuk ziah, terimakasih banyak sudah selalu menjadi pendengar yang baik, yang selalu jadi tempat ternyaman untuk berbagi semua cerita.
10. Kepada adik ketemu gede ku, Attalya Mahezza, terimakasih banyak ya Cik Ya sayang, sudah menjadi teman dan adik perempuan yang sangat baik untuk kak Bunga.

11. Kepada teman-teman basecamp yang sudah sangat banyak sekali membantu, banyak berbagi cerita dan canda tawa. Terimakasih kepada Daeng Ahmad, Amri, Atul dan Yusuf.
12. Kepada teman-teman mahasiswa ilmu material, kak Zulkarnain, Sahrul, Jefri, Robiatul, Amanda, Rabel dan Icha. Terkhusus kak Zulkarnain, sebagai sesama alumni pertama, terimakasih banyak kakak sudah banyak membantu, dan menjadi teman seperjuangan bersama dengan 3 musketeers, semoga apa yang kita semogakan segera diijabah oleh Allah SWT.
13. Kepada adik-adik didik ku yang sangat aku sayang dan banggakan, Naila (kiyyak), Rizka, Rasyid, Aza, Jasmine, Salwa, Suci, Vatra, Rafly, Deren, Mikail, Aira, Atha, Iqbal, Arga, Akila, Fabian, Hilda, Caca, dll. Terimakasih banyak ya nak, sudah selalu menjadi teman sekaligus siswa terbaik untuk mbak/miss. Kepada Bapak Sumarlin dan Ibu Bebi, Ibu Reni, Ibu Murthi, Ibu Rainci Maliata, Pak Iwan, Bunda Atha, dan Ibu Milita terimakasih untuk semua dukungan dan kepercayaan yang selalu diberikan kepada saya.
14. Kepada semua sahabat-sahabat saya Luci, Intan, Andhika, Firmansyah, Bobby, Ilham, terimakasih untuk dukungannya.
15. Kepada kak Deddy selaku admin program studi ilmu material, terimakasih banyak kakak untuk semua bantuan, dukungan dan semua hal yang sudah kakak berikan.
16. Semua pihak tertentu yang telah membantu dan memberikan informasi baik secara langsung ataupun tidak sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini dengan baik.
17. Kepada diri saya sendiri, Bunga Indah Putri. Terimakasih sudah bertahan hingga akhirnya kita bisa sampai di titik ini.

Semoga bimbingan, ilmu, bantuan, dan masukan yang telah diberikan kepada penulis menjadi amal shaleh dan pahala yang setimpal dari Allah SWT. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih.

Palembang, Januari 2025

Penulis

SUMMARY

Preparation of Hydrochar from Macroalgae *Eucheuma cottonii* and Its Selectivity Test as an Adsorbent for Anionic Dye

Bunga Indah Putri : Supervised by Prof. Aldes Lesbani, P.hD and Dr. Fitri Suryani Arsyad, M.Si

Organic materials such as macroalgae have garnered attention as efficient adsorbent alternatives due to their ease of modification and abundant availability in nature. This study investigates the preparation of *Eucheuma cottonii* hydrochar using the hydrothermal carbonization (HTC) method at temperatures of 150°C, 200°C, and 250°C, characterized by BET, FT-IR, and pH pzc analyses. Adsorption selectivity tests were performed on anionic dyes (congo red, direct yellow, methyl orange, and direct green) to identify the material with the best adsorption capability. Further studies explored the effects of pH, kinetics, and thermodynamics of adsorption, including optimum conditions (pH, contact time, concentration, and temperature) and material regeneration ability.

The results revealed significant functional group changes confirmed by FT-IR analysis, while BET analysis identified the highest surface area at HC-250 (7.478 m²/g). SEM-EDS analysis confirmed that the hydrochar material had been successfully prepared. XRD analysis showed the appearance of peaks at 2θ angles between 20°-30° which are typical angles for carrageenan. Selectivity tests showed the highest preference for direct yellow across all materials, with increased selectivity at higher activation temperatures. Adsorption was endothermic and spontaneous at high temperatures, with positive ΔH, positive ΔS, and negative ΔG. HC-250 demonstrated the best regeneration performance over seven cycles. This study highlights the potential of *E. cottonii* hydrochar as an efficient adsorbent for anionic dyes, particularly direct yellow, with promising applications for textile wastewater treatment.

Keywords : Hydrochar, *Eucheuma cottonii*, Macroalgae, Hydrothermal, Selectivity

RINGKASAN

Preparasi Hidrochar Makroalga *Eucheuma cottonii* dan Uji Selektivitasnya Sebagai Adsorben Zat Warna Anionik

Bunga Indah Putri : Dibimbing oleh Prof. Aldes Lesbani, P.hD dan Dr. Fitri Suryani Arsyad, M.Si

Material organik seperti makroalga telah menarik perhatian sebagai alternatif material adsorben yang efisien, mengingat kemudahan modifikasi dan ketersediaannya yang melimpah di alam. Penelitian ini membahas preparasi hidrochar makroalga *Eucheuma cottonii* menggunakan metode hidrotermal (HTC) dengan variasi temperatur 150°C, 200°C, dan 250°C serta karakterisasi menggunakan analisis BET, FT-IR, dan pH pzc. Uji selektivitas adsorpsi dilakukan terhadap zat warna anionik (*congo red*, *direct yellow*, *methyl orange*, dan *direct green*) untuk menentukan material dengan kemampuan adsorpsi terbaik. Studi lanjut dilakukan untuk mempelajari pengaruh pH, kinetika, dan termodinamika adsorpsi, termasuk kondisi optimum (pH, waktu, konsentrasi, dan temperatur) serta kemampuan regenerasi material.

Hasil menunjukkan bahwa analisis FT-IR mengonfirmasi perubahan gugus fungsi pada hidrochar, sedangkan analisis BET menunjukkan luas permukaan terbesar pada HC-250 (7,478 m²/g). Analisis SEM-EDS mengkonfirmasi bahwa material hidrochar telah berhasil di preparasi. Analisis XRD menunjukkan munculnya puncak pada sudut 2 θ antara 20°-30° yang merupakan sudut khas untuk karagenan. Uji selektivitas menunjukkan preferensi tertinggi terhadap *direct yellow* pada semua material, dengan peningkatan selektivitas pada temperatur yang lebih tinggi. Adsorpsi bersifat endotermik dan spontan pada temperatur tinggi, dengan ΔH positif, ΔS positif, dan ΔG negatif. HC-250 menunjukkan kinerja regenerasi terbaik dalam tujuh siklus. Penelitian ini mengindikasikan bahwa hidrochar *E. cottonii* merupakan adsorben yang efisien untuk pewarna anionik, khususnya *direct yellow*, dengan potensi aplikasi yang menjanjikan untuk pengolahan limbah tekstil.

Kata Kunci : Hidrochar, *Eucheuma cottonii*, Makroalga, Hidrotermal, Selektivitas.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
SUMMARY	xi
RINGKASAN	xii
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	5
1.3. Tujuan Penelitian.....	6
1.4. Manfaat Penelitian.....	6
1.5. Hipotesis	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1. Hidrochar.....	9
2.2. Hidrotermal(HTC).....	12
2.3. <i>Eucheuma cottonii</i>	14
2.4. Adsorpsi.....	16
2.4.1. Teori Adsorpsi Kinetik	17
2.4.1.1. Model Kinetika Langmuir	17
2.4.1.2. Persamaan <i>Pseudo First Order</i>	18
2.4.1.3. Persamaan <i>Pseudo Second Order</i>	18
2.4.2. Teori Adsorpsi Termodinamika	19
2.4.2.1. Persamaan Isoterm Adsorpsi Langmuir	20
2.4.2.2. Persamaan Isoterm Adsorpsi Freundlich	20
2.4.3. Hubungan Homogenitas Struktur dengan Isoterm Adsorpsi.....	21
2.4.4. Adsorpsi Zat Warna dengan Hidrochar	22
2.5. Zat Warna Anionik dan Strukturnya.....	23
2.6. Karakterisasi Material.....	26
2.6.1. Analisis Luas Permukaan dengan Metode BET (<i>Brunauer, Emmet, dan Teller</i>)	26
2.6.2. Analisis Gugus Fungsi Material Menggunakan Spektroskopi FTIR (<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>).....	27
2.6.3. Analisis Struktur Morfologi Material Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray</i> (SEM-EDS).....	29

2.6.4.	Analisis Kristalinitas Material Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		33
3.1.	Waktu dan Tempat.....	33
3.2.	Alat dan Bahan.....	33
3.2.1.	Alat	33
3.2.2.	Bahan.....	33
3.3.	Prosedur Penelitian.....	34
3.3.1.	Sampling Makroalga <i>E. cottonii</i>	34
3.3.2.	Preparasi Makroalga <i>E. cottonii</i>	34
3.3.3.	Preparasi Hidrochar Variasi Temperatur.....	34
3.3.4.	Penentuan Kondisi Optimum Adsorpsi Zat Warna.....	35
3.5.2.1.	Penentuan pH pzc	35
3.5.2.2.	Selektivitas Adsorben terhadap Zat Warna	35
3.5.2.3.	Penentuan pH Optimum Adsorpsi.....	35
3.5.2.4.	Penentuan Waktu Kontak Optimum Adsorpsi.....	36
3.5.2.5.	Penentuan Konsentrasi Optimum Adsorpsi.....	36
3.5.2.6.	Penentuan Temperatur Optimum Adsorpsi	36
3.5.2.7.	Regenerasi Adsorben.....	36
3.4.	Analisa Data.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		40
4.1.	Preparasi Material Hidrochar	40
4.2.	Karakterisasi Material	42
4.2.1.	Analisis <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FT-IR) dari Material	42
4.2.2.	Analisis <i>Brunauer, Emmet, dan Teller</i> (BET) dari Material.....	45
4.2.3.	Analisis <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray</i> (SEM-EDS) dari Material	48
4.2.4.	Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) dari Material	54
4.3.	Selektivitas Adsorpsi Zat Warna Anionik oleh Hidrochar <i>E. cottonii</i> ..	55
4.4.	Pengaruh pH _{pzc} dan pH Adsorpsi	58
4.5.	Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi	59
4.6.	Pengaruh Konsentrasi dan Temperatur Adsorpsi	61
4.7.	Regenerasi Material	67
5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		70
DAFTAR PUSTAKA.....		71
LAMPIRAN		82

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Beberapa Aplikasi Hidrochar	10
Gambar 2.2. Alur Reaksi Kimia pada Biomassa HTC	11
Gambar 2.3. Rumput Laut <i>E. cottonii</i>	14
Gambar 2.4. Contoh Mikrostruktur Material Homogen dan Heterogen	22
Gambar 2.5. Struktur Kimia Zat Warna	26
Gambar 2.6. Kurva BET Material <i>E. cottonii</i> dan Hidroksi Lapis Ganda- <i>E.cottonii</i>	27
Gambar 2.7. Spektrum FT-IR Material <i>E. cottonii</i> Murni dan Limbah	28
Gambar 2.8. SEM <i>image</i> dari <i>E. cottonii</i> Murni dan Hidrokarbonnya	30
Gambar 2.9. Difraktogram <i>E. cottonii</i> Murni dan Limbahnya	32
Gambar 4.1. Makrostruktur dari Material	41
Gambar 4.2. Spektrum FT-IR Material	43
Gambar 4.3. Spektrum FT-IR Gabungan Material	45
Gambar 4.4. Kurva BET Material	46
Gambar 4.5. Gambar SEM dari Material <i>E. cottoni</i>	48
Gambar 4.6. Gambar SEM dari Material HC-200	50
Gambar 4.7. Hasil Analisis EDS Material	51
Gambar 4.8. Difraktogram XRD Material	54
Gambar 4.9. Selektivitas Adsorpsi Material Terhadap Zat Warna Anionik	57
Gambar 4.10. Kurva pH _{pzc} dan pH Optimum Material	58
Gambar 4.11. Kurva Kinetika Adsorpsi Material	60
Gambar 4.12. Kurva Isoterm Adsorpsi Langmuir Material	63
Gambar 4.13. Kurva Isoterm Adsorpsi Freundlich Material	64
Gambar 4.14. Mekanisme Adsorpsi pada Material	67
Gambar 4.15. Siklus Regenerasi Adsorpsi dari Material	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan Kapasitas Adsorpsi (Q_m), Kondisi Optimum Adsorpsi dan Isoterm Adsorpsi Beberapa Material terhadap Zat Warna Anionik	24
Tabel 4.1. Persentase Berat <i>yield</i> Material Hasil Preparasi	40
Tabel 4.2. Luas Permukaan, Ukuran Pori dan Volume dari Material	47
Tabel 4.3. Hasil Analisis EDS Material	52
Tabel 4.4. Parameter Kinetik Model PFO dan PSO Material	59
Tabel 4.5. Isoterm Adsorpsi Langmuir dan Freundlich Material	62
Tabel 4.6. Parameter Termodinamika Adsorpsi Material	65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Perhitungan Berat <i>Yield</i> Material Hydrochar	82
Lampiran 2. Data Digital Analisis FT-IR	83
Lampiran 3. Data Digital Analisis BET	85
Lampiran 4. Data Digital Analisis SEM-EDS	92
Lampiran 5. Data Digital Analisis XRD	93
Lampiran 6. Data Analisis pH _{pzc}	94
Lampiran 7. Data Panjang Gelombang Direct Yellow	96
Lampiran 8. Kurva Kalibrasi Direct Yellow	96
Lampiran 9. Data Pengaruh pH Terhadap Adsorpsi Direct Yellow	97
Lampiran 10. Data Pengaruh Waktu Terhadap Adsorpsi Direct Yellow	99
Lampiran 11. Pengaruh Variasi Konsentrasi dan Temperatur Terhadap Adsorpsi Direct Yellow	103
Lampiran 12. Data Perhitungan Parameter Termodinamika Adsorpsi <i>Direct Yellow</i>	107
Lampiran 13. Data Regenerasi Adsorben	109

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat era perkembangan teknologi yang pesat, kebutuhan akan material inovatif semakin mendesak. Material inovatif memainkan peran krusial dalam memajukan berbagai sektor, dari teknologi informasi hingga energi, dan dari kedokteran hingga industri. Konsep material inovatif mengacu pada bahan-bahan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan fungsional dasar, tetapi juga menawarkan karakteristik unik, daya tahan tinggi, dan seringkali sifat-sifat yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan aplikasi spesifik.

Material inovatif dapat berasal dari berbagai sumber, mulai dari sintesis laboratorium hingga sumber daya alam yang terbarukan. Penerapan teknologi tinggi, seperti nanoteknologi, telah membuka pintu untuk menciptakan material dengan struktur pada tingkat atom, memungkinkan sifat-sifat yang luar biasa dan aplikasi yang lebih luas. Keunggulan material inovatif tidak hanya terletak pada performa teknisnya, tetapi juga pada dampaknya terhadap keberlanjutan dan lingkungan (Al-Nuaimy dkk., 2023).

Dalam upaya mencari solusi yang berkelanjutan, pemanfaatan sumber daya alam organik, khususnya makroalga, muncul sebagai alternatif menjanjikan. Makroalga, sebagai organisme laut yang melimpah, menawarkan sumber daya alam organik yang dapat diperbaharui, mengurangi tekanan pada sumber daya anorganik yang terbatas. Pengembangan material dari makroalga menjadi relevan dalam meningkatkan efisiensi teknologi modern, terutama karena material berbasis makroalga memiliki sifat unik yang dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang. Meskipun material anorganik telah dominan, hidrochar, sebagai contoh material organik, menawarkan keunggulan tertentu melalui proses pembuatan hidrochar dari makroalga. Dengan struktur yang kaya karbon dan potensi daya serap tinggi, hidrochar dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk pengelolaan limbah, katalisis, dan pemulihan sumber daya (Jalilian dkk., 2024; Gai dkk., 2023).

Penggunaan material organik dalam pembuatan hidrochar menawarkan potensi yang menarik dalam berbagai aplikasi, terutama dalam konteks pengolahan limbah. Material organik, seperti makroalga, memiliki sifat-sifat yang unik yang membedakannya dari material anorganik. Keunggulan material organik termasuk biodegradabilitas, ketersediaan yang melimpah, dan kemampuan untuk menyerap polutan (Cavali dkk., 2023).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa makroalga dapat menjadi sumber penghasil hidrochar, dengan menggunakan proses hidrotermal. Teknik hidrotermal menggunakan air panas yang dikompresi memungkinkan terjadinya serangkaian reaksi, termasuk dekomposisi biomassa dan depolimerisasi, menghasilkan hidrochar dengan kandungan karbon yang tinggi (hingga 73%) dan energi yang tinggi (15-30 MJ / kg). Sebuah studi oleh Brown dkk. pada tahun 2020 menunjukkan bahwa kandungan energi hidrochar dari makroalga *Saccharina latissima* dan *Fucus serratus* meningkat masing-masing sebesar 47% dan 172%, seiring dengan peningkatan proses hidrotermal.

Studi oleh Prakoso dkk (2018) yang meneliti tentang hidrochar aktif dari *Eucheuma cottonii* yang menunjukkan pembentukan alotrop karbon yang terdiri dari serat mikro karbon dan graphene. Porositas dan fungsionalitas tersebut memungkinkan hidrochar digunakan untuk berbagai aplikasi seperti perbaikan tanah, katalis, adsorben, dan bahan bakar padat (Brown dkk., 2020). *Eucheuma cottonii* merupakan salah satu makroalga yang paling banyak terdapat di Indonesia. Buton, Sulawesi Tenggara merupakan salah satu penghasil rumput laut jenis *Eucheuma cottonii* yang mencapai 70.313 ton pada tahun 2013 (Puspawati dkk., 2015).

Salah satu pemanfaatan *Eucheuma Cottonii* (*E. cottonii*) antara lain pengembangan film bioplastik menggunakan rumput laut *E. cottonii* yang digiling dan dicampur dengan polietilen glikol sehingga menghasilkan film dengan sifat fisik dan mekanik yang unggul (Sudhakar dkk., 2021). Penelitian juga mencatat bahwa biochar dari rumput laut *E. cottonii*, yang dihasilkan melalui proses pirolisis, mampu menyerap pewarna metilen biru dalam air limbah (Saeed dkk., 2020). Meskipun demikian, sebagian besar fokus penelitian terletak pada produksi bioetanol dari hidrolisat *E. cottonii* (Khambhaty dkk., 2012; Meinita dkk., 2012; Tan & Lee, 2016).

Penelitian lainnya terkait makroalga mengenai rasio densifikasi energi hidrochar yaitu dari makroalga *Gelidium sp.* diamati oleh Patel dkk. pada tahun 2021, yang berkisar antara 1,13-1,55 dan dapat dikategorikan sebagai produk yang sangat padat energi. Makroalga memiliki komposisi kimia yang unik, termasuk bahan bioaktif seperti gula, senyawa fenolik, dan antioksidan (Hartulistiyoso dkk., 2024). Bahan-bahan kimia tersebut dapat diperoleh dalam fraksi cair bersamaan dengan produksi hidrochar menggunakan proses hidrotermal. Strategi ini merupakan contoh kerangka kerja *biorefinery* untuk menghasilkan multiproduk yang akan meningkatkan profitabilitas (Hartulistiyo dkk., 2024). Meskipun demikian, penelitian teknis tentang konversi biomassa alga menjadi bahan bakar padat menggunakan Hidrotermal masih terbatas, dan hanya sedikit laporan yang telah dipublikasikan (Park dkk., 2018).

Hidrochar yang berasal dari makroalga umumnya mempunyai luas permukaan yang beragam, tergantung dari jenis makroalga dan kondisi lingkungan preparasi hidrochar nya. Penelitian oleh Roberts dkk, (2015) menunjukkan bahwa hidrochar makroalga spesies *Gracilaria* yang bersumber dari Sulawesi Selatan mempunyai luas permukaan 2,02 m²/g sedangkan yang bersumber dari laut Jawa mempunyai luas permukaan 3,55 m²/g. Begitupun dengan biochar makroalga spesies *Kappaphycus* yang mempunyai luas permukaan sekitar 2,24-2,84 m²/g. Luas permukaan yang cukup besar didapatkan dari biochar makroalga species *Eucheuma* dengan rentang luas permukaan material yang dihasilkan sekitar 30,03-34,82 m²/g.

Pemrosesan hidrotermal adalah suatu proses konversi termokimia yang penting, yang digunakan untuk mengubah biomassa menjadi produk bernilai atau biofuel (Ruiz dkk., 2013). Tidak hanya limbah biomassa yang dapat diolah atau diproses terlebih dahulu dengan HTC, tetapi juga limbah plastik (Baskoro Lokahita dkk., 2017; Triyono dkk., 2019). Teknik ini cocok untuk peningkatan biomassa dengan meningkatkan karakteristik transport, penyimpanan, dan bahan bakar (Sharma dkk., 2020). Dibandingkan dengan pirolisis, gasifikasi, torrefaksi, dan insinerasi, keuntungan utama dari HTC adalah memanfaatkan bahan baku basah tanpa pengeringan terlebih dahulu karena air bertindak sebagai reaktan, pelarut, dan katalis serta tanpa memerlukan input energi yang besar untuk menghilangkan air melalui penguapan. (Pavlovič dkk., 2013). Proses ini efektif terjadi dalam medium air, bersifat eksotermis, dan berlangsung secara

spontan, biasanya dilakukan dalam air pada temperatur antara 180 hingga 250°C, dengan tekanan yang tinggi (2-6 MPa) (Park dkk., 2018).

Dalam konteks pembuatan hidrochar dari makroalga, keunggulan metode hidrotermal ini dapat menjadi faktor penentu dalam menciptakan material inovatif yang efektif dalam pengolahan limbah. Sebagai perbandingan, material anorganik juga memiliki kelebihan tertentu, seperti kestabilan kimia dan kekuatan mekanik yang tinggi. Namun, keterbatasan dalam hal biodegradabilitas dan sumber daya alam yang terbatas membuat material organik semakin menarik untuk dieksplorasi.

Selain itu, sebagai adsorben, metode adsorpsi menggunakan material organik berupa karbon aktif seperti hidrochar telah terbukti menjadi salah satu metode yang efektif dan dapat diandalkan. Hidrochar memiliki sejumlah keunggulan yang mencakup luas permukaan yang besar, struktur berpori mikro, distribusi ukuran pori yang seragam, tingkat porositas yang tinggi, reaktivitas permukaan yang tinggi, kekuatan mekanik yang superior, dan kapasitas adsorpsi yang kuat (Dai dkk, 2018).

Kapasitas adsorpsi besar yang dimiliki oleh hidrochar ini dapat dimanfaatkan untuk pengolahan berbagai jenis limbah cair yang ada. Contohnya logam berat, pestisida, obat-obatan dan juga pewarna tekstil kationik maupun anionik. Pewarna tekstil mengandung senyawa-senyawa berbahaya bagi lingkungan, bahkan pada konsentrasi rendah, zat warna ini dapat menimbulkan ancaman serius termasuk tingkat toksisitas yang tinggi, karsinogenik dan efek *non-biodegradable* bagi semua bentuk kehidupan (Li dkk., 2019).

Dengan demikian, pengembangan material inovatif untuk mengatasi masalah ini menjadi sangat penting. Pembuatan hidrochar dari makroalga menawarkan potensi sebagai solusi inovatif dalam pengolahan limbah tekstil. Dengan sifat-sifat uniknya, hidrochar dari makroalga dapat digunakan untuk menyerap polutan-polutan berbahaya dalam limbah tekstil, sehingga membantu mengurangi dampak negatif limbah terhadap lingkungan. Selain itu, penggunaan material inovatif ini juga dapat membuka peluang baru dalam pengembangan teknologi hijau dan berkelanjutan dalam industri tekstil. Penelitian ini bertujuan untuk memahami proses pembuatan hidrochar dari makroalga dan mengevaluasi keunggulan material organik ini dibandingkan dengan material anorganik dalam konteks aplikasi praktis. Keterlibatan hidrochar dalam pengelolaan

limbah zat warna anionik menjadi fokus utama untuk mengoptimalkan manfaat material ini.

Pada penelitian ini dilakukan preparasi hidrochar makroalga *E. cottonii* dan uji selektivitasnya sebagai adsorben zat warna anionik. Preparasi hidrochar dilakukan dengan metode hidrotermal. Karakterisasi material dilakukan dengan menggunakan analisis FT-IR, BET, SEM-EDS, XRD dan pH pzc. Kemudian, dilakukan uji selektivitas adsorpsi material pada zat warna anionik antara lain *congo red*, *direct yellow*, *direct green*, dan *methyl orange* dan dilakukan penentuan kondisi optimum adsorpsi material dengan melihat pengaruh pH, waktu kontak, konsentrasi dan temperatur adsorpsi. Selanjutnya, dilakukan regenerasi material adsorben untuk menguji ketahanan hidrochar makroalga sebagai material adsorben zat warna.

1.2. Rumusan Masalah

Material anorganik memiliki keterbatasan dalam hal modifikasi karena struktur material anorganik yang kaku dan rigid. Keterbatasan ini menyebabkan aplikasi material anorganik dalam berbagai keperluan menjadi terbatas. Hal ini menyebabkan, material organik digunakan karena selain mudah di modifikasi juga ketersediaannya melimpah di alam. Salah satu material organik yang potensial yakni makroalga. Makroalga banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang seperti sebagai bioetanol, bioplastik dan sebagai adsorben. Dengan banyaknya pemanfaatan makroalga, salah satu yang menarik adalah kemampuan hidrochar makroalga sebagai adsorben polutan. Penelitian ini membahas mengenai preparasi hidrochar makroalga *E. cottonii* dan uji selektivitasnya sebagai adsorben zat warna anionik. Preparasi dilakukan menggunakan metode hidrotermal (HTC) dengan variasi temperatur 150°C, 200°C dan 250°C. Material yang telah di preparasi di karakterisasi menggunakan spektrofotometer FT-IR, analisis BET, SEM-EDS dan XRD. Diasumsikan bahwa semakin tinggi temperatur preparasi hidrotermal, maka ukuran pori rata-rata material akan semakin kecil sedangkan luas permukaan dan volume total pori akan semakin besar. Zat warna anionik yang digunakan merupakan zat warna yang umumnya menjadi limbah tekstil yang berbahaya bagi lingkungan diantaranya zat warna *congo red*, *direct yellow*, *methyl orange* dan *direct green*. Studi selektivitas dilakukan untuk melihat kemampuan adsorpsi terbaik material terhadap

beberapa zat warna anionik. Diasumsikan bahwa kemampuan adsorpsi material hidrochar yang di preparasi pada temperatur lebih tinggi, akan lebih besar dibandingkan dengan hidrochar yang di preparasi pada temperatur rendah dan kemampuan adsorpsi hidrochar lebih tinggi dibandingkan dengan makroalga murni. Kondisi optimum adsorpsi material dipelajari untuk mengetahui pH, waktu, konsentrasi dan temperatur optimum adsorpsi dan regenerasi adsorben dilakukan untuk melihat kemampuan material sebagai adsorben yang efisien untuk digunakan berulang.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang hendak dicapai pada penelitian ini antara lain :

1. Melakukan preparasi hidrochar makroalga *E.cottonii* menggunakan metode hidrotermal (HTC) serta karakterisasi material menggunakan analisis BET, FT-IR, dan pH pzc.
2. Melakukan uji selektivitas adsorpsi zat warna anionik pada material.
3. Mempelajari pengaruh pH, kinetika dan termodinamika reaksi terhadap kemampuan adsorpsi material dengan melihat kondisi optimum adsorpsi yaitu pH, waktu kontak, konsentrasi dan temperatur.
4. Mempelajari kemampuan regenerasi material sebagai adsorben zat warna anionik.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain :

1. Memberikan informasi mengenai material hidrochar *E.cottonii* hasil preparasi menggunakan metode hidrotermal beserta karakteristiknya.
2. Memberikan informasi mengenai kemampuan adsorpsi material serta selektivitasnya terhadap zat warna anionik.

1.5. Hipotesis

Material hidrochar yang di preparasi pada temperatur tinggi akan memiliki kandungan hasil rendemen yang lebih kecil dibandingkan dengan material yang di preparasi pada temperatur lebih rendah. Selain itu, luas permukaan dan volume pori total

meningkat seiring dengan peningkatan temperatur hidrotermal, sedangkan ukuran pori rata-rata menurun, yang menunjukkan peningkatan porositas material. Penelitian oleh Sathe dkk (2024) menyatakan bahwa peningkatan temperatur sintesis hidrochar dari 200 ke 250 °C menghasilkan peningkatan kandungan karbon dari 29,74% menjadi 37,21%; sedangkan peningkatan waktu reaksi dari 4 jam ke 8 jam tidak menyebabkan banyak perubahan pada kandungan karbon hidrochar. Penelitian oleh Park dkk. (2019) mengenai adsorpsi/desorpsi zat warna anionik dan kationik oleh biochar *switchgrass* yang di preparasi pada temperatur tinggi dan rendah menunjukkan bahwa biochar yang di preparasi pada temperatur tinggi mempunyai kadar rendemen yang lebih rendah dibandingkan dengan biochar yang di preparasi pada temperatur rendah. Biochar yang di preparasi pada temperatur rendah mempunyai kadar rendemen 21,8% sedangkan rendemen biochar temperatur tinggi adalah 14,8% hal ini sejalan dengan ukuran pori rata-rata biochar yang juga menurun seiring dengan kenaikan temperatur. Ukuran pori rata-rata biochar yang di preparasi pada temperatur tinggi dan temperatur rendah, masing-masing antara lain 2,162 nm dan 3,037 nm. Namun, disamping itu, luas permukaan dan volume total pori biochar yang disintesis pada temperatur tinggi jauh lebih besar dibandingkan dengan biochar temperatur rendah. Luas permukaan biochar temperatur tinggi mencapai 641,6 m²/g hampir tiga kali lebih besar daripada biochar temperatur rendah. Penelitian oleh Lian dkk (2020) juga menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pirolisis jerami padi dari 400°C ke 700°C menyebabkan penurunan ukuran partikel dari 403 ke 234 nm. Dengan menggunakan metode preparasi yang sama, peningkatan temperatur pirolisis dari 300 ke 600 °C untuk sekam padi menghasilkan penurunan ukuran partikel dari 190 ke 59 nm (Yue dkk., 2019). Pola yang sama juga terjadi pada penelitian oleh Shen dkk (2020) untuk preparasi biochar jerami gandum, jerami padi, dan jerami jagung ketika temperatur pirolisisnya dinaikkan dari 350 ke 650°C, dimana biochar dipreparasi menggunakan ball milling. Penelitian oleh Xiao dkk (2020) juga menunjukkan adanya peningkatan luas permukaan dan volume pori dari material biochar maupun biochar jerami gandum seiring dengan kenaikan temperatur pirolisis material.

Hipotesis 1 : *Diasumsikan bahwa semakin tinggi temperatur preparasi hidrotermal hidrochar maka ukuran pori rata-rata material akan semakin kecil sedangkan luas permukaan dan volume total pori akan semakin besar.*

Material hidrochar yang di hidrotermal pada temperatur yang lebih tinggi mempunyai luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan material hidrochar pada temperatur rendah. Perbedaan luas permukaan ini tentunya akan memberikan dampak yang berbeda terhadap hasil adsorpsi. Penelitian oleh Normah dkk (2022) menunjukkan bahwa biochar dari kulit rambutan mempunyai kemampuan untuk menyerap logam Fe dalam larutan hingga konsentrasi 25,126 mg/L. Penelitian oleh Yang dkk. (2023) mengenai studi adsorpsi Pb^{2+} pada material MgO hibridisasi magnetik biochar dari ampas kopi menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi biochar pada temperatur pirolisis 900 °C lebih tinggi dibandingkan dengan material biochar yang di pirolisis di temperatur rendah. Studi adsorpsi kinetik pada dua fase adsorpsi menunjukkan bahwa laju adsorpsi Pb^{2+} oleh biochar temperatur tinggi jauh lebih cepat dibandingkan dengan material biochar temperatur rendah. Penelitian oleh Le dkk (2023) juga menunjukkan bahwa material biochar temperatur tinggi mempunyai kemampuan adsorpsi lebih besar dibandingkan dengan material biochar temperatur rendah. Kapasitas adsorpsi ion NO_3^- dan PO_4^{3-} oleh biochar komposit ferrite magnetic kulit leci masing-masing meningkat hingga 75,5% dan 75,2% dibandingkan dengan biochar berukuran temperatur rendah. Penelitian oleh Lu dkk (2024) juga menunjukkan adanya peningkatan kapasitas adsorpsi hingga 99,55% dari material biochar termodifikasi besi zerovalen. Pola yang sama juga terlihat pada penelitian oleh Cao dkk (2023) dimana kapasitas adsorpsi material biochar terhadap logam Cd meningkat hingga 10,2% seiring dengan bertambahnya luas permukaan dari material biochar. Hidrochar yang dipreparasi pada temperatur tinggi menunjukkan kemampuan penyerapan yang besar untuk Cu dan Ni, mencapai kapasitas adsorpsi maksimum masing-masing 35,71 mg/g dan 31,06 mg/g untuk ion-ion ini.

Hipotesis 2 : *Diasumsikan bahwa kemampuan adsorpsi material hidrochar yang di preparasi pada temperatur tinggi lebih besar dibandingkan dengan hidrochar yang di preparasi pada temperatur rendah dan kemampuan adsorpsi hidrochar lebih besar dibandingkan makroalga murni.*

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, N. et al. (2023) 'Charcoal activated as template Mg/Al layered double hydroxide for selective adsorption of direct yellow on anionic dyes', *Results in Chemistry*, 5(December 2022), p. 100766.
- Ahmad, R., & Kumar, R. (2023). "Recent advancements in the removal of synthetic dyes from wastewater using algae-based adsorbents." *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103159.
- Akbari, A. et al. (2024) 'Synergistic adsorption of methylene blue with carrageenan/hydrochar-derived activated carbon hydrogel composites: Insights and optimization strategies', *International Journal of Biological Macromolecules*, 265(P1), p. 130750.
- Alabbad, Eman A., Sajid Bashir, and Jingbo Louise Liu. 2022. "Efficient Removal of Direct Yellow Dye Using Chitosan Crosslinked Isovanillin Derivative Biopolymer Utilizing Triboelectric Energy Produced from Homogeneous Catalysis." *Catalysis Today* 400–401(April 2021): 132–45.
- Alamsjah, M. A., Sulmartiwi, L., Pursetyo, K. T., Amin, M. N. G., Wardani, K. A. K., & Arifianto, M. D. (2017). Modifying bioproduct technology of medium density fibreboard from the seaweed waste *Kappaphycus alvarezii* and *Gracilaria verrucosa*. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 14(1), 32–45.
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. G., Elsamahy, T., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160.
- Anastopoulos, Ioannis, Muthanna J. Ahmed, Victor E. Ojukwu, Mohammed Danish, Marinos Stylianou, and Joshua O. Ighalo. 2024. "A Comprehensive Review on Adsorption of Reactive Red 120 Dye Using Various Adsorbents." *Journal of Molecular Liquids* 394(December 2023): 123719.
- Arinda, S. et al. (2022) 'Analisis Laju Korosi Dan Morfologi Permukaan Pada Baja Karbon Dengan Variasi Ketebalan dan Material Pelapisan Terhadap Laju Korosi dan Analisa Morfologi pada Baja Karbon', *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan X 2022*, pp. 103I1-103I6.
- Ariya, P., Mjalli, F.S., Ali, N., et al. (2023). "Chemical and structural properties of hydrochars from microwave-assisted hydrothermal carbonization of glucose", *International Journal of Industrial Chemistry*, 14(1), pp. 1-13.
- Basak, A., Hati, A., Mondal, A., Singh, U. P., & Taheruddin, S. K. (2018). Effect of substrate on the structural, optical and electrical properties of SnS thin films grown by thermal evaporation method. *Thin Solid Films*, 645, 97-101.

- Bengtson, A., Hoffmann, V., Kasik, M., & Marshall, K. (2006). Analytical Glow Discharges: Fundamentals, Applications, and New Developments. *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation*, 1-40.
- Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2019). "Biomass-based materials for environmental applications." *Chemical Engineering Journal*, 366, 608-621.
- Bo, Z. et al. (2024) 'Optimization conversion of willow biomass derived from phytoremediation into value-added hydrochars: Effects of temperature and medium on Cd/Zn distribution and application potentials', *Energy Conversion and Management*: X, 24(June), p. 100698.
- Brown, A. E., Finnerty, G. L., Camargo-Valero, M. A., & Ross, A. B. (2020). Valorisation of macroalgae via the integration of hydrothermal carbonisation and anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 312(May), 123539.
- Cao, X., Meng, Z., Sheng, L., Hu, X., Wang, T., Sun, X., Yu, Y., & Liu, Z. (2023). Double-edged sword effect of nano-biochar for Cd²⁺ adsorption on zeolite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109901.
- Cavali, M., Libardi Junior, N., de Sena, J. D., Woiciechowski, A. L., Soccol, C. R., Belli Filho, P., Bayard, R., Benbelkacem, H., & de Castilhos Junior, A. B. (2023). A Review On Hydrothermal Carbonization Of Potential Biomass Wastes, Characterization And Environmental Applications Of Hydrochar, And Biorefinery Perspectives Of The Process. *Science of the Total Environment*, 857(October 2022), 159627.
- Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sudaryanto, Y., & Ismadji, S. J. C. E. J. (2007). Adsorption of basic dye onto activated carbon prepared from durian shell: Studies of adsorption equilibrium and kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 127(1-3), 121-129.
- Chen, Y. di et al. (2018) 'Highly efficient adsorption of dyes by biochar derived from pigments-extracted macroalgae pyrolyzed at different temperature', *Bioresource Technology*, 259(February), pp. 104–110.
- Chong, S. L., Tan, I. S., Foo, H. C. Y., Chan, Y. S., Lam, M. K., & Lee, K. T., 2023. Chemical and physicochemical properties of hydrochar from dilute acid hydrothermal treatment of *Eucheuma cottonii* residues. Multidisciplinary International Conference, Tenera Hotel, Bangi, Selangor, Malaysia, 6–7 March 2023, eISBN 978-629-98017-0-2, pp. III-222.
- da Rosa, A.L.D. et al. (2018) 'Biosorption of rhodamine B dye from dyeing stones effluents using the green microalgae *Chlorella pyrenoidosa*', *Journal of Cleaner Production*, 198, pp. 1302–1310.
- Dai, Y., Sun, Q., Wang, W., Lu, L., Liu, M., Li, J., Yang, S., Sun, Y., Zhang, K., Xu, J., Zheng, W., Hu, Z., Yang, Y., Gao, Y., Chen, Y., Zhang, X., Gao, F., & Zhang, Y. (2018). Utilizations of agricultural waste as adsorbent for the removal of contaminants: A review. *Chemosphere*, 211, 235–253.

- Daneshvar, E. et al. (2012) 'Acidic dye biosorption onto marine brown macroalgae: Isotherms, kinetic and thermodynamic studies', *Chemical Engineering Journal*, 204–205, pp. 225–234.
- Djandja, O. S., Kang, S., Huang, Z., Li, J., Feng, J., Tan, Z., & Lougou, B. G. (2023). Machine learning prediction of fuel properties of hydrochar from co-hydrothermal carbonization of sewage sludge and lignocellulosic biomass. *Energy*, 271, 126968.
- Esmaeli, A. et al. (2013) 'Acidic dye wastewater treatment onto a marine macroalga, *Nizamuddina zanardini* (Phylum: Ochrophyta)', *Chemical Engineering Journal*, 217, pp. 329–336.
- Farobie, O., Syaftika, N., Masfuri, I., Rini, T. P., Lanank Es, D. P. A., Bayu, A., Amrullah, A., Hartulistiyoso, E., Moheimani, N. R., Karnjanakom, S., & Matsumura, Y. (2022). Green algae to green fuels: Syngas and hydrochar production from *Ulva lactuca* via sub-critical water gasification. *Algal Research*, 67(1), 102834.
- Fathoni, D. A., & Arisandi, A. (2020). Kualitas karaginan rumput laut (*Eucheuma cottonii*) pada lahan yang berbeda di Kecamatan Bluto Kabupaten Sumenep. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 1(4), 548-557.
- Fitri, E.S. et al. (2024) 'Selective Removal of Anionic and Cationic Dyes Using Magnetic Composites', *Science and Technology Indonesia*, 9(1), pp. 129–136.
- Gai, C., Zhang, F., Guo, Y., & Liu, Z. (2023). A novel strategy for the fabrication of highly active and stable hydrochar-based catalysts for efficient dry reforming of methane. *Chemical Engineering Journal*, 475(October), 146437.
- Gokulan, R. et al. (2019) 'Remediation of remazol dyes by biochar derived from *Caulerpa scalpelliformis* - An eco-friendly approach', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), p. 103297.
- Guo, J., Shi, F., Sun, M., Ma, F., & Li, Y. (2022). Antioxidant and aflatoxin B1 adsorption properties of *Eucheuma cottonii* insoluble dietary fiber. *Food Bioscience*, 50(PA), 102043.
- Guo, Qicong, Erick R. Bandala, Ashantha Goonetilleke, Nian Hong, Yuqing Li, and An Liu. 2021. "Application of *Chlorella Pyrenoidosa* Embedded Biochar Beads for Water Treatment." *Journal of Water Process Engineering* 40(October 2020): 101892.
- Gupta, V. K., & Nayak, A. (2020). "Selective adsorption and removal of dyes from wastewater: A review." *Chemical Engineering Journal*, 387, 123903.
- Gürses, A., Açıkyıldız, M., Güneş, K., Gürses. (2016). Dyes and pigments: their structure and properties. *Dyes and pigments*, 13-29.
- Hakim, Y.M. et al. (2024) 'Organobentonite fabrication assisted by surfactant octadecylamine intercalation under hydrothermal/solvothermal condition for effective direct yellow dye removal', *Kuwait Journal of Science*, 51(4), p. 100292.

- Hamad, N. et al. (2024) 'Efficient adsorption of cationic and anionic dyes using hydrochar nanoparticles prepared from orange peel', *Journal of Molecular Liquids*, 409(March), p. 125349.
- Hamad, S. E., & Idrus, S. (2022). "Comparative study of dye removal from wastewater using various physicochemical methods." *Water Science and Technology*, 85(6), 1679-1687.
- Hartulistiyoso, E., Farobie, O., Anis, L. A., Syaftika, N., Bayu, A., Amrullah, A., Moheimani, N. R., Karnjanakom, S., & Matsumura, Y. (2024). Co-production of hydrochar and bioactive compounds from *Ulva lactuca* via a hydrothermal process. In *Carbon Resources Conversion* (Vol. 7, Issue 1). KeAi Communications Co. Ltd.
- Hasanah, M. et al. (2023) 'Preparation of C-based Magnetic Materials from Fruit Peel and Hydrochar using Snake Fruit (*Salacca zalacca*) Peel as Adsorbents for the Removal of Malachite Green Dye', *Environment and Natural Resources Journal*, 21(1), pp. 67–77.
- Huang, J., et al., 2015. Selective adsorption of anionic dyes on functionalized activated carbon materials. *Environmental Science & Technology*, 49(7), pp.4244–4252.
- Incan, N., Hawboldt, K.A. and MacQuarrie, S. (2024) 'Hydrothermal carbonization of snow crab processing by-product: Hydrochar characterization', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 183(April), p. 106767.
- Jais, F. M., Ibrahim, S., Chee, C. Y., & Ismail, Z. (2021). High removal of crystal violet dye and tetracycline by hydrochloric acid assisted hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse prepared at high yield. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 24, 100541.
- Jalilian, M., Bissessur, R., Ahmed, M., Hsiao, A., He, Q. S., & Hu, Y. (2024). A review: Hydrochar as potential adsorbents for wastewater treatment and CO₂ adsorption. *Science of the Total Environment*, 914(January), 169823.
- Jegatheesan, V., Pramanik, B. K., Chen, J., Navaratna, D., & Chang, C. Y. (2020). "Challenges in activated carbon adsorption systems for wastewater treatment." *Water Research*, 173, 115308.
- Jin, J., Fang, Y., Liu, C., Eltohamy, K. M., He, S., Li, F., Lu, Y., & Liang, X. (2023). Reduced colloidal phosphorus release from paddy soils: A synergistic effect of micro-/nano-sized biochars and intermittent anoxic condition. *Science of the Total Environment*, 905(September), 167104.
- Jumaidin, R. et al. (2017) 'Characteristics of *Eucheuma cottonii* waste from East Malaysia: physical, thermal and chemical composition', *European Journal of Phycology*, 52(2), pp. 200–207.
- Kang, O. L., Ramli, N., Said, M., Yasir, S., & Ariff, A. (2011). *Kappaphycus alvarezii* waste biomass: A potential biosorbent for chromium ions removal. *Journal of Environmental Sciences*, 23(6), 918–922.

- Khaled, A. et al. (2009) 'Treatment of artificial textile dye effluent containing Direct Yellow 12 by orange peel carbon', *Desalination*, 238(1–3), pp. 210–232.
- Khambhaty, Y., Mody, K., Gandhi, M. R., Thampy, S., Maiti, P., Brahmabhatt, H., Eswaran, K., & Ghosh, P. K. (2012). *Kappaphycus alvarezii* as a source of bioethanol. *Bioresource Technology*, 103, 180–185.
- Khanzada, A.K. et al. (2023) 'Removal of Arsenic from Wastewater Using Hydrochar Prepared from Red Macroalgae: Investigating Its Adsorption Efficiency and Mechanism', *Water (Switzerland)*, 15(21).
- Le, M. T., Nguyen, X. H., Nguyen, T. P., Tran, T. H., Cuong, D. X., Van, N. T., ... & Nguyen, L. H. (2023). Lychee peels-derived biochar-supported CaFe₂O₄ magnetic nanocomposite as an excellent adsorbent for effective removal of nitrate and phosphate from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110991.
- Ledesma, B., Fernández, M., Román, S., et al. (2021). 'Development and characterization of activated hydrochars from orange peels as potential adsorbents for emerging organic contaminants', *Bioresource Technology*, 319, 124374.
- Lee, Xin Jiat, Hwai Chyuan Ong, Jecksin Ooi, Kai Ling Yu, Thing Chai Tham, Wei Hsin Chen, and Yong Sik Ok. 2022. "Engineered Macroalgal and Microalgal Adsorbents: Synthesis Routes and Adsorptive Performance on Hazardous Water Contaminants." *Journal of Hazardous Materials* 423(PA): 126921.
- Li, B., Lv, J. Q., Guo, J. Z., Fu, S. Y., Guo, M., & Yang, P. (2019). The polyaminocarboxylated modified hydrochar for efficient capturing methylene blue and Cu(II) from water. *Bioresource Technology*, 275(October 2018), 360–367.
- Li, R., Zhang, Y., Deng, H., Zhang, Z., Wang, J. J., Shaheen, S. M., Xiao, R., Rinklebe, J., Xi, B., He, X., & Du, J. (2020). Removing tetracycline and Hg(II) with ball-milled magnetic nanobiochar and its potential on polluted irrigation water reclamation. *Journal of Hazardous Materials*, 384(August 2019), 121095.
- Lin, H., Liu, Y., Chang, Z., & Yan, S. (2022). "Valorization of *Eucheuma* seaweed waste into hydrochar: Effect of hydrothermal temperature on physicochemical properties and potential applications." *Bioresource Technology*, 344, 126253.
- Lin, Y., Xu, H., Gao, Y., and Zhang, X. (2021). 'Preparation and characterization of hydrochar-derived activated carbon from glucose by hydrothermal carbonization', *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(5), pp. 1-12.
- Liu, C., Balasubramanian, P., Li, F. & Huang, H., 2024. Machine learning prediction of dye adsorption by hydrochar: Parameter optimization and experimental validation. *Journal of Hazardous Materials*, 480, p.135853.

- Liu, J. L., Qian, W. C., Guo, J. Z., Shen, Y., & Li, B. (2021). Selective removal of anionic and cationic dyes by magnetic Fe₃O₄-loaded amine-modified hydrochar. *Bioresource Technology*, 320, 124374.
- Liu, Yan Ning, and Li Yuan He. 2021. "Effects of Alkali-Activated Algae Biochar on Soil Improvement after Phosphorus Absorption: Efficiency and Mechanism." *Sustainability (Switzerland)* 13(21).
- Lokahita, Baskoro, Aziz, Muhammad, Yoshikawa, K., Takahashi, F. (2017). Energy and resource recovery from Tetra Pak waste using hydrothermal treatment. *Appl. Energy* 207, 107–113.
- Lu, Y., Feng, M., & Wang, Y. (2024). Enhancing the heterogeneous electro-Fenton degradation of methylene blue using sludge-derived biochar-loaded nano zero-valent iron. *Journal of Water Process Engineering*, 59(January), 104980.
- Lu, Y., He, D., Lei, H., Hu, J., Huang, H., & Ren, H. (2018). Adsorption of Cu (II) and Ni (II) from aqueous solutions by taro stalks chemically modified with diethylenetriamine. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(18), 17425–17433.
- Lv, P., Liu, B., Bai, Y., Wang, J., Wei, J., Song, X., & Xu, G. (2023). Residual carbon from coal gasification fine slag for inducing rice straw hydrothermal carbonization to achieve improved reactivity and wastewater decontamination. *Fuel*, 349, 128649.
- Mahata, S., Periyavaram, S. R., Akkupalli, N. K., Srivastava, S., & Matli, C. (2023). A review on Co-Hydrothermal carbonization of sludge: Effect of process parameters, reaction path way, and pollutant transport. *Journal of the Energy Institute*, 101340.
- Mahmood Al-Nuaimy, M. N., Azizi, N., Nural, Y., & Yabalak, E. (2023). Recent advances in environmental and agricultural applications of hydrochars: A review. *Environmental Research*, 117923.
- Majhi, K. C., & Yadav, M. (2021). *Synthesis of inorganic nanomaterials using carbohydrates. In Green sustainable process for chemical and environmental engineering and science* (pp. 109-135). Elsevier.
- Marzbali, M.H. et al. (2017) 'Removal of direct yellow 12 from aqueous solution by adsorption onto *spirulina* algae as a high-efficiency adsorbent', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), pp. 1946–1956.
- Meinita, M. D. N., Kang, J. Y., Jeong, G. T., Koo, H. M., Park, S. M., & Hong, Y. K. (2012). Bioethanol production from the acid hydrolysate of the carrageenophyte *Kappaphycus alvarezii (cottonii)*. *Journal of Applied Phycology*, 24, 857–862.
- Michalak, I. et al. (2019) 'Biochar from a freshwater macroalga as a potential biosorbent for wastewater treatment', *Water (Switzerland)*, 11(7), pp. 4–6..
- Micheletti, D.H. et al. (2023) 'A review of adsorbents for removal of yellow tartrazine dye from water and wastewater', *Bioresource Technology Reports*, 24(February).

- Mishra, R.K., Kumar, P., & Mohanty, K., 2022. Hydrothermal liquefaction of biomass for bio-crude production: A review on feedstocks, chemical compositions, operating parameters, reaction kinetics, techno-economic study, and life cycle assessment. *Fuel*, 316, p.123377.
- Morales-Contreras, B.E. et al. (2022) ‘Hydrothermal systems to obtain high value-added compounds from macroalgae for bioeconomy and biorefineries’, *Bioresource Technology*, 343(September 2021).
- Morbitzer, P.C. et al. (2023) ‘In-situ SEM investigation on the damage behavior of an interpenetrating metal ceramic composite’, *Composite Structures*, 321(January).
- Musthofa, A. A., Bahtiar, M. Z. A., Ibrahim, F. M., & Abdillah, A. A. (2020). Utilization of by product *Kappaphycus alvarezii* as earthquake resistant material lightweight concrete. *Earth and Environmental Science*, 441, Article
- Muttakin, M., Mitra, S., Thu, K., Ito, K., & Saha, B. B. (2018). Theoretical framework to evaluate minimum desorption temperature for IUPAC classified adsorption isotherms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 795-805.
- Naga Babu, A, D Srinivasa Reddy, G V Krishna Mohan, G Suresh Kumar, and T K Dora. 2023. “Mathematical Investigation into the Sequential Adsorption of Silver Ions and Brilliant Green Dye Using Biochar Derived from *Gracilaria Rhodophyta* Algae.” *Biomass Conversion and Biorefinery* 13(11): 10065–84.
- Nicolae, S.A. et al. (2020) ‘Recent advances in hydrothermal carbonisation: From tailored carbon materials and biochemicals to applications and bioenergy’, *Green Chemistry*, 22(15), pp. 4747–4800.
- Normah, N., Juleanti, N., Palapa, N. R., Taher, T., Siregar, P. M. S. B. N., Wijaya, A., & Lesbani, A. (2022). Hydrothermal carbonization of rambutan peel (*Nephelium lappaceum* L.) as a Green and low-cost adsorbent for Fe (II) removal from aqueous solutions. *Chemistry and Ecology*, 38(3), 284-300.
- Palapa, N. R., Rahayu, B. R., Taher, T., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2019). Kinetic Adsorption of Direct Yellow Onto Zn/Al and Zn/Fe Layered Double Hydroxides. *Science and Technology Indonesia*, 4(4), 101–104.
- Palapa, N. R., Taher, T., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2019). Removal of Anionic Direct Dye Using Zn/Al , Zn/Fe and Zn/Cr Layered Double. *Science and Technology Indonesia*, 4(3), 70–76.
- Park, K. Y., Lee, K., & Kim, D. (2023). Characterized hydrochar of algal biomass for producing solid fuel through hydrothermal carbonization. *Bioresource Technology*, 258(March), 119–124.
- Parshetti, G. K., Chowdhury, S., & Balasubramanian, R. (2014). Hydrothermal conversion of urban food waste to chars for removal of textile dyes from contaminated waters. *Bioresource technology*, 161, 310-319.
- Pavithra, S., Thandapani, G., Sugashini, S., Sudha, P. N., Alkhamis, H. H., Alrefaei, A. F., & Almutairi, M. H. (2021). Batch adsorption studies on surface tailored

- chitosan/orange peel hydrogel composite for the removal of Cr (VI) and Cu (II) ions from synthetic wastewater. *Chemosphere*, 271, 129415.
- Pavlovič, I., Knez, Ž., Škerget, M. (2013). Hydrothermal reactions of agricultural and food processing wastes in sub- and supercritical water: a review of fundamentals, mechanisms, and state of research. *J. Agric. Food Chem.* 61, 8003–8025.
- Peng, X., Yan, Z., Cheng, X., Li, Y., Wang, A., & Chen, L. (2019). Quaternary ammonium-functionalized rice straw hydrochar as efficient adsorbents for methyl orange removal from aqueous solution. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1269-1279.
- Prakoso, T., Nurastuti, R., Hendriansyah, R., Rizkiana, J., Suantika, G., & Guan, G. (2018). Hydrothermal Carbonization of Seaweed for Advanced Biochar Production. *MATEC Web of Conferences*, 156, 1–5.
- Puspawati, S., Wagiman, Ainuri, M., Nugraha, D. A., & Haslianti. (2015). The Production of Bioethanol Fermentation Substrate from *Eucheuma cottonii* Seaweed through Hydrolysis by Cellulose Enzyme. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 200–205.
- Putra, R. P., Juliastuti, E., Suyatmo, R. N., & Kurniawan, H. (2020). "Synthesis and characterization of biochar from *Eucheuma cottonii* seaweed through hydrothermal carbonization process." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 823(1), 012025.
- Rafiq, M. K., Bachmann, R. T., Rafiq, M. T., Shang, Z., Joseph, S., & Long, R. L. (2016). "Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of corn stover (*Zea mays L.*) biochar and feasibility for carbon capture and energy balance." PloS one, 11(6), e0156894.
- Roberts, D.A. et al. (2015) 'Biochar from commercially cultivated seaweed for soil amelioration', Scientific Reports, 5, pp. 1–6.
- Ruiz, H. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Fernandes, B. D., Vicente, A. A., & Teixeira, J. A. (2013). Hydrothermal processing, as an alternative for upgrading agriculture residues and marine biomass according to the biorefinery concept: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 35–51.
- S. Ismadji, F.E. Soetaredjo, S.P. Santoso, J.N. Putro, M. Yuliana, W. Irawaty, S.B. Hartono, V.B. Lunardi. (2021). *Adsorpsi Pada Fase Cair: Kesetimbangan, Kinetika, dan Termodinamika*. Seri Buku Teknik Kimia: Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
- Saeed, A. A. H., Harun, N. Y., Sufian, S., Siyal, A. A., Zulfiqar, M., Bilad, M. R., Vaganathan, A., Al-Fakih, A., Ghaleb, A. A. S., & Almahbashi, N. (2020). *Eucheuma cottonii* seaweed-based biochar for adsorption of methylene blue dye. *Sustainability*, 12, Article 10318.
- Sarwar, A. et al. (2021) 'Synthesis and characterization of biomass-derived surface-modified activated carbon for enhanced CO₂adsorption', Journal of CO₂ Utilization, 46(February), p. 101476.

- Sathe, S. M., Chakraborty, I., Dubey, B. K., & Ghangrekar, M. M. (2024). Wastewater sludge-derived hydrochar: Effect of operating conditions, activation, and potential use as adsorbent. *Process Safety and Environmental Protection*, 184(November 2023), 1400–1410.
- Senthilkumar, R., D. M. Reddy Prasad, L. Govindarajan, K. Saravanakumar, and B. S. Naveen Prasad. 2019. “Synthesis of Green Marine Algal-Based Biochar for Remediation of Arsenic(V) from Contaminated Waters in Batch and Column Mode of Operation.” *International Journal of Phytoremediation* 22 (3): 279–86.
- Sharma, H.B., Sarmah, A.K., Dubey, B. (2020). Hydrothermal carbonization of renewable waste biomass for solid biofuel production: A discussion on process mechanism, the influence of process parameters, environmental performance and fuel properties of hydrochar. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 123.
- Shen, Y., Tang, H., Wu, W., Shang, H., Zhang, D., Zhan, X., & Xing, B. (2020). Role of nano-biochar in attenuating the allelopathic effect from *Imperata cylindrica* on rice seedlings. *Environmental Science: Nano*, 7(1), 116-126.
- Shoaib, Amany G.M., Huu Tap Van, Dinh Trinh Tran, Amany El Sikaily, Mohamed A. Hassaan, and Ahmed El Nemr. 2024. “Green Algae *Ulva Lactuca*-Derived Biochar-Sulfur Improves the Adsorption of Methylene Blue from Water.” *Scientific Reports* 14(1): 1–24.
- Sivaranjane, R., Kumar, P. S., & Rangasamy, G. (2023). A recent advancement on hydrothermal carbonization of biomass to produce hydrochar for pollution control. *Carbon Letters*, 33(7), 1909-1933.
- Song, B., Chen, M., Zhao, L., Qiu, H., & Cao, X. (2019). Physicochemical property and colloidal stability of micron- and nano-particle biochar derived from a variety of feedstock sources. *Science of the Total Environment*, 661, 685–695.
- Srivastav, Arun Lal, Lata Rani, Prakriti Sharda, Akansha Patel, Naveen Patel, and Vinod Kumar Chaudhary. 2024. “Sustainable Biochar Adsorbents for Dye Removal from Water: Present State of Art and Future Directions.” *Adsorption* 30(7): 1791–1804.
- Sudhakar, M. P., Peter, D. M., & Dharani, G. (2021). Studies on the development and characterization of bioplastic film from the red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*). *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 33899–33913.
- Sztancs, Greta, Lilla Juhasz, Balazs Jozsef Nagy, Aron Nemeth, Asmaa Selim, Anita Andre, Andras Jozsef Toth, Peter Mizsey, and Daniel Fozzer. 2020. “Co-Hydrothermal Gasification of *Chlorella Vulgaris* and Hydrochar: The Effects of Waste-to-Solid Biofuel Production and Blending Concentration on Biogas Generation.” *Bioresource Technology* 302(November 2019): 122793.
- Tan, I. S., & Lee, K. T. (2016). Comparison of different process strategies for bioethanol production from *Eucheuma cottonii*: An economic study. *Bioresource Technology*, 199, 336–346.

- Tran, T.H. et al. (2020) 'Adsorption isotherms and kinetic modeling of methylene blue dye onto a carbonaceous hydrochar adsorbent derived from coffee husk waste', *Science of the Total Environment*, 725, p. 138325.
- Triyono, B., Prawisudha, P., Aziz, M., Mardiyati, Pasek, A.D., Yoshikawa, K. (2019). Utilization of mixed organic-plastic municipal solid waste as renewable solid fuel employing wet torrefaction. *Waste Management* 95, 1–9.
- Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2022). "A comprehensive review on textile dyeing effluent characterization and advanced treatment technologies." *Journal of Environmental Management*, 312, 114911.
- Wang L, Chang Y, Li A (2019) Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 108:423–440
- Wang, J. et al. (2023) 'Preparation of reed straw hydrochar adsorbent and its environmental impact assessment', *City and Built Environment*, 1(1), pp. 1–13.
- Wang, W., Chen, W. H., & Jang, M. F. (2020). Characterization of hydrochar produced by hydrothermal carbonization of organic sludge. *Future Cities and Environment*, 6, 13-13.
- Wang, Yan, Chi Ma, Dexin Kong, Liqun Lian, and Yangxian Liu. 2023. "Review on Application of Algae-Based Biochars in Environmental Remediation: Progress, Challenge and Perspectives." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11(6): 111263.
- Wijaya, A. and Yuliasari, N. (2023) 'Biochar Derived from Rice Husk as Effective Adsorbent for the Removal Congo Red and Procion Red MX-5B Dyes', *Indonesian Journal of Material Research*, 1(1), pp. 1–7.
- Wu, S., Wang, Q., Cui, D., Wang, X., Wu, D., Bai, J., Xu, F., Wang, Z., & Zhang, J. (2023). Analysis of fuel properties of hydrochar derived from food waste and biomass: Evaluating varied mixing techniques pre/post-hydrothermal carbonization. *Journal of Cleaner Production*, 430(November), 139660.
- Xiao, J., Hu, R., & Chen, G. (2020). Micro-nano-engineered nitrogenous bone biochar developed with a ball-milling technique for high-efficiency removal of aquatic Cd (II), Cu (II) and Pb (II). *Journal of hazardous materials*, 387, 121980.
- Yang, S., Wang, C., Li, B., Chen, H., & Wang, J. (2023). Removal of Pb²⁺ from aqueous solution using an MgO nano-hybridized magnetic biochar from spent coffee grounds. *Chemical Physics Letters*, 833(January), 140894.
- Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). "Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: A critical review." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1193-1226.

- Yermak, I.M. et al. (2020) ‘Mucoadhesive properties of sulphated polysaccharides carrageenans from red seaweed families *Gigartinaceae* and *Tichocarpaceae*’, *International Journal of Biological Macromolecules*, 142, pp. 634–642.
- Yu, S. et al. (2022) ‘From biomass to hydrochar: Evolution on elemental composition, morphology, and chemical structure’, *Journal of the Energy Institute*, 101(December 2021), pp. 194–200.
- Yudha, S. P., Tekasakul, S., Phoungthong, K., & Chuenchom, L. (2019). Green synthesis of low-cost and eco-friendly adsorbent for dye and pharmaceutical adsorption: Kinetic, isotherm, thermodynamic and regeneration studies. *Materials Research Express*, 6(12), 125526.
- Yue, L., Lian, F., Han, Y., Bao, Q., Wang, Z., & Xing, B. (2019). The effect of biochar nanoparticles on rice plant growth and the uptake of heavy metals: Implications for agronomic benefits and potential risk. *Science of the Total Environment*, 656, 9–18.
- Zhang, H., Zhang, F., & Huang, Q. (2017). Highly effective removal of malachite green from aqueous solution by hydrochar derived from phycocyanin-extracted algal bloom residues through hydrothermal carbonization. *RSC advances*, 7(10), 5790-5799.
- Zhang, L., Wang, Y., Zhao, X., & Chen, W. (2023). "Hydrothermal carbonization of seaweed biomass for sustainable carbon materials: A comprehensive review of process optimization, product characteristics and applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113314.
- Zhang, Zhiming, Yong Zhao, and Tengfei Wang. 2020. “*Spirulina* Hydrothermal Carbonization: Effect on Hydrochar Properties and Sulfur Transformation.” *Bioresource Technology* 306(March).
- Zhou, A. (2012). *Methods of MAX-phase synthesis and densification–II. In Advances in science and technology of Mn+ 1AXn phases* (pp. 21-46). Woodhead Publishing.
- Zhou, S., Hu, A., Jiang, J., Tang, J., Zhou, G., Zhu, L., & Wang, S. (2023). Low-temperature synthesized hierarchical porous carbon from waste hydrochar with super capacity for dye adsorption. *Biomass and Bioenergy*, 177, 106938.
- Zhu, K., Liu, Q., Dang, C., Li, A., & Zhang, L. (2021). Valorization of hydrothermal carbonization products by anaerobic digestion: Inhibitor identification, biomethanization potential and process intensification. *Bioresource Technology*, 341, 125752.