

***CO-BENEFITS* PEMANFAATAN LIMBAH
SPENT BLEACHING EARTH SEBAGAI ADSORBEN β -KAROTEN,
UPAYA PENGELOLAAN LIMBAH BAHAN BERBAHAYA DAN
BERACUN (B3) RAMAH LINGKUNGAN**

(Tesis)

Oleh

**OKTA TRI HANDOKO
NPM 2120011017**



**PROGRAM STRATA 2
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

CO-BENEFITS PEMANFAATAN LIMBAH SPENT BLEACHING EARTH SEBAGAI ADSORBEN β -KAROTEN, UPAYA PENGELOLAAN LIMBAH BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN (B3) RAMAH LINGKUNGAN

Oleh

OKTA TRI HANDOKO

Salah satu tahapan dalam *refinery* minyak sawit adalah *bleaching*, yang bertujuan untuk mengurangi zat warna (pigmen), getah, dan kandungan logam. *Bleaching* menghasilkan limbah padat *spent bleaching earth* (SBE) dalam jumlah besar. SBE biasanya diolah secara konvensional seperti ditimbun, dibakar, sebagai bahan baku kompos atau menggunakan jasa pihak ketiga. Penelitian ini menganalisis skema terbaik reaktivasi SBE berdasarkan aspek ekonomi, lingkungan dan sosial. Penelitian ini menggunakan *reactivated bleaching earth* (RBE) dengan proses ekstraksi minyak residu (*residual oil*) menggunakan n-heksana, aktivasi termal pada 600 °C selama 60 menit, aktivasi asam menggunakan HCl 10%, impregnasi BaCl₂ 5% (RBE-Ba) dan tanpa impregnasi (RBE). Hasil analisis BET RBE-Ba dan RBE diperoleh dengan luas permukaan pori 160 dan 150 m² g⁻¹, total volume pori 0,143 dan 0,11 cc g⁻¹, serta total ukuran pori 4,17 dan 6,14 nm. Efisiensi adsorpsi dan desorpsi pada RBE sebesar 33,61% dan 81,11%, sementara efisiensi adsorpsi dan desorpsi pada RBE-Ba sebesar 25,03% dan 69,19%. Reaktivasi SBE secara kimia dan fisika tanpa impregnasi memiliki potensi yang paling menguntungkan secara ekonomi jika dibandingkan dengan impregnasi, dengan potensi keuntungan USD 10.977.054 per tahun, ROI 500% dan PBP 0,2 tahun, karena tidak memerlukan biaya untuk zat aktif tambahan. Pemanfaatan SBE sebagai adsorben β -karoten merupakan pengolahan limbah B3 yang berpotensi memberikan manfaat terhadap lingkungan dan sosial seperti mengurangi emisi gas CO₂, mengurangi emisi NO_x, mengurangi emisi Cobalt-60, dan mengurangi pencemaran PM 2,5.

Kata kunci: *bleaching earth*, SBE, reaktivasi, *residual oil*, β -karoten

ABSTRACT

CO-BENEFITS OF UTILIZATION OF SPENT BLEACHING EARTH WASTE TO ADSORBENT OF β -CAROTENE, ENVIRONMENTALLY MANAGEMENT OF HAZARDOUS AND TOXIC WASTE

By

OKTA TRI HANDOKO

One of the stages in palm oil refinery is bleaching, which aims to reduce dyes (pigments), gum, and metal content. Bleaching produces large amounts of spent bleaching earth (SBE) solid waste. SBE is usually processed conventionally such as landfilling, burning, composting raw materials or using third party services. This research analyzes the best SBE reactivation scheme based on economic, environmental and social aspects. This research use reactivated bleaching earth (RBE) with a residual oil extraction process using n-hexane, thermal activation at 600 °C for 60 minutes, acid activation using 10% HCl, 5% BaCl₂ impregnation (RBE-Ba) and without impregnation (RBE). The results of BET analysis of RBE-Ba and RBE were obtained with pore surface areas of 160 and 150 m² g⁻¹, total pore volume of 0.143 and 0.11 cc g⁻¹, and total pore sizes of 4.17 and 6.14 nm. The adsorption and desorption efficiencies on RBE were 33.61% and 81.11%, while the adsorption and desorption efficiencies on RBE-Ba were 25.03% and 69.19%. Chemical and physical reactivation of SBE without impregnation has the most economically profitable potential while compared to impregnation, with a potential profit of USD 10.977.054 per year, ROI 500%, and PBP 0,2 year, because it does not require costs to additional active substances. The use of SBE as a β -carotene adsorbent is a B3 waste treatment that has the potential to provide environmental and social benefits such as reducing CO₂ gas emissions, reducing NO_x emissions, reducing Cobalt-60 emissions, and reducing PM 2.5 pollution.

Key words: bleaching earth, SBE, reactivation, residual oil, β -karoten

***CO-BENEFITS* PEMANFAATAN LIMBAH
SPENT BLEACHING EARTH SEBAGAI ADSORBEN β -KAROTEN,
UPAYA PENGELOLAAN LIMBAH BAHAN BERBAHAYA DAN
BERACUN (B3) RAMAH LINGKUNGAN**

Oleh

OKTA TRI HANDOKO

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER LINGKUNGAN

Pada

Program Studi Magister Ilmu Lingkungan
Fakultas Pascasarjana Multidisiplin Universitas Lampung



**PROGRAM STRATA 2
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Tesis : **CO-BENEFITS PEMANFAATAN LIMBAH SPENT BLEACHING EARTH SEBAGAI ADSORBEN β -KAROTEN, UPAYA PENGELOLAAN LIMBAH BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN (B3) RAMAH LINGKUNGAN**

Nama Mahasiswa : **Okta Tri Handoko**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2120011017**

Program Studi : **Magister Ilmu Lingkungan**

Fakultas : **Pascasarjana Multidisiplin**



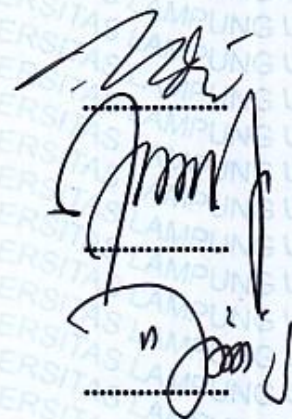
MENYETUJUI

1. **Komisi Pembimbing**

Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T.
NIP. 196401061988031002

Dr. Erdi Suroso, S.T.P., M.T.A.
NIP. 197210061998031005

Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T.
NIP. 197208252000032001



2. **Ketua Program Studi Magister Ilmu Lingkungan**
Universitas Lampung



Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si.
NIP 196105051987031002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

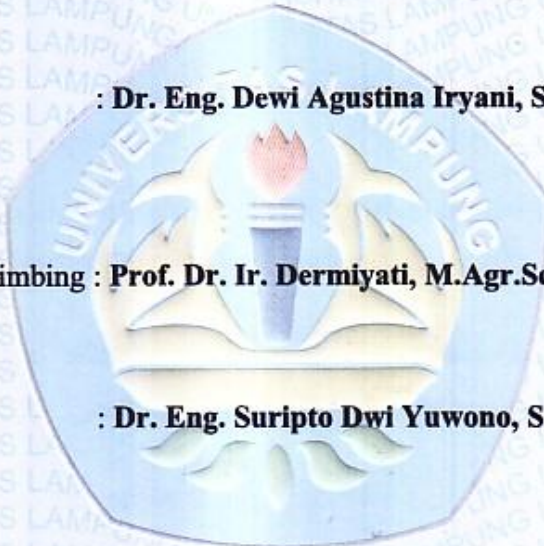
Ketua : Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T.

Sekretaris : Dr. Erdi Suroso, S.T.P., M.T.A


Anggota : Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T.

**Penguji
Bukan Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Dermiyati, M.Agr.Sc**

Anggota : Dr. Eng. Suripto Dwi Yuwono, S.Si., M.T.



2. Direktur Pascasarjana Universitas Lampung


Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 17 Januari 2024

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul: "**CO-BENEFITS PEMANFAATAN LIMBAH SPENT BLEACHING EARTH SEBAGAI ADSORBEN β -KAROTEN, UPAYA PENGELOLAAN LIMBAH BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN (B3) RAMAH LINGKUNGAN**" adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai dengan etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiarisme.
2. Hak intelektual atas karya ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya. Saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 17 Januari 2024
Yang membuat pernyataan,



Okta Tri Handoko
NPM 2120011017

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 05 Oktober 1992, sebagai anak ketiga dari empat bersaudara, dari Bapak Pawit Suradi dan Ibu Ita Nurhayati. Penulis memiliki riwayat pendidikan di TK Citra Melati Bandar Lampung, SD Negeri 1 Karang Anyar, SMP Negeri 2 Bandar Lampung, SMA Negeri 5 Bandar Lampung, dan S1 Teknik Kimia Universitas Lampung yang diselesaikan pada tahun 2016.

Semasa kuliah S1, penulis aktif berorganisasi seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia (HIMATEMIA) Unila sebagai Ketua Umum dan Badan Eksekutif Mahasiswa Universitas (BEM U KBM Unila) sebagai Menteri Pendidikan & Kepemudaan dan Menteri Dalam Negeri. Selain itu, penulis juga pernah memperoleh pendanaan untuk Program Mahasiswa Wirausaha (PMW) dan Beasiswa PGN & BUMN.

Penulis memulai karir profesional di PT Kurita Indonesia pada tahun 2017-2021 sebagai Staff *Engineer* di *Plant Division*. Penulis pernah mengikuti Pelatihan Ahli Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Umum yang tersertifikasi oleh Kementerian Ketenagakerjaan. Saat ini penulis bekerja di PT Fermentech Indonesia sebagai Kepala Seksi *Compressor-Chiller* dan *Water Treatment*. Pada tahun 2021, penulis diterima sebagai mahasiswa Magister Ilmu Lingkungan Universitas Lampung. Saat ini penulis memiliki seorang istri dengan dua orang putra dan satu orang putri. Penulis pernah berkontribusi dalam *International Oil Palm Conference 2022 (IOPC 2022)* yang diselenggarakan di Bali pada tanggal 14-16 Maret 2023 dan menerbitkan satu paper yang berjudul *Economic and Environmental Analysis of Spent Bleaching Earth Reactivation*.

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Teriring rasa tulus dan syukur
Kehadirat Allah SWT.

Kupersembahkan karya ini sebagai buktiku untuk
Bunda, Bapak, Mitha Istriku, dan anak-anakku Hamid, Hilmi, Hulya.

Dengan kesabaran dan kasih sayangnya
Selalu mendoakan dan mendukung di setiap langkahku,
Mengantarku ke jenjang pendidikan yang lebih tinggi,
Serta mengajariku arti perjuangan yang sesungguhnya.

Seluruh dosen, keluarga besar, dan sahabat-sahabatku
Almamater tercinta, Magister Ilmu Lingkungan
Fakultas Pascasarjana Multidisiplin
Universitas Lampung

MOTTO

إِنَّ الَّذِينَ آمَنُوا وَالَّذِينَ هَاجَرُوا وَجَاهَدُوا فِي سَبِيلِ اللَّهِ أُولَٰئِكَ يَرْجُونَ رَحْمَتَ اللَّهِ وَاللَّهُ غَفُورٌ رَّحِيمٌ

“Sesungguhnya orang-orang yang beriman, dan orang-orang yang berhijrah dan berjihad di jalan Allah, mereka itulah yang mengharapkan rahmat Allah. Allah Maha Pengampun, Maha Penyayang”

Q.S. Al Baqarah: 218

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warohmatullohi Wabarokatuh. Alhamdulillahirrabil 'alamiin, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT. karena berkat rahmat dan hidayat-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “*Co-Benefits Pemanfaatan Limbah Spent Bleaching Earth Sebagai Adsorben β -Karoten, Upaya Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) Ramah Lingkungan*” sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Magister Lingkungan (S-2) di Fakultas Pascasarjana Multidisiplin, Universitas Lampung.

Pada kesempatan kali ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat, karena telah memberikan bantuan, bimbingan, dukungan, dan motivasi dalam proses penyelesaian tesis ini. Berdasarkan hal tersebut, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung;
3. Ibu Dr. Candra Perbawati, S.H., M.H., selaku Wakil Direktur Bidang Akademik, Kemahasiswaan dan Alumni Universitas Lampung;
4. Bapak Dr. Fitra Dharma, S.E., M.Si., selaku Wakil Direktur Bidang Umum Universitas Lampung;
5. Bapak Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si., selaku Ketua Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Universitas Lampung;
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T., selaku pembimbing pertama atas ketersediaannya dalam memberikan motivasi, ilmu, gagasan, kritik, saran dan rela membagi waktu di tengah kesibukannya kepada penulis, penuh kesabaran dan keihlasan dalam menuntun penulis hingga menyelesaikan proses pembuatan

tesis.

7. Bapak Dr. Erdi Suroso, S.T.P, M.T.A., selaku pembimbing kedua atas ketersediaan waktunya dalam memberikan bimbingan, dukungan, ilmu, serta motivasi selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan MIL;
8. Ibu Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T., selaku pembimbing ketiga, atas kesempatan yang diberikan sehingga penulis dapat bergabung dalam proyek riset SBE, semua dukungan, kritik dan saran, nasihat, kesabaran, serta arahan yang telah diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan tesis;
9. Ibu Prof. Dr. Ir. Dermiyati, M.Agr.Sc selaku penguji utama yang telah mencurahkan waktu, pikiran, dan telah membantu serta mendorong penulis dalam menyelesaikan tesis dengan baik;
10. Bapak Dr. Eng. Suripto Dwi Yuwono, S.Si., M.T., selaku penguji kedua yang telah telah memberikan ilmu, kritik, saran, motivasi kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik;
11. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Magister Ilmu Lingkungan yang telah memberikan ilmu pengetahuan, wawasan, dan pengalaman selama penulis menuntut ilmu di Universitas Lampung;
12. Bapak Hernadi Susanto, S.H. dan Bapak Ardian Sanjaya, selaku tenaga kependidikan Jurusan Magister Ilmu Lingkungan yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan proses administrasi, serta banyak hal lainnya;
13. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) yang telah mendanai penelitian ini dengan nomor kontrak PRJ 26/DPKS/2021 atas nama Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T. ;
14. PT Fermentech Indonesia Lampung *factory* khususnya Ken Hasegawa san, Katsuhisa Onoyama san, Hiromitsu Umeno san, Kazunari Tasaki san dan Departemen *Utility* Pak Uzair, Pak Afrizal, Pak Asrip, Pak Suharno, Pak Mulyono, dan Rizal yang telah memberikan izin dan mendukung untuk menyelesaikan tesis;
15. Bunda dan bapak tercinta yang selalu memberikan kasih sayang, dukungan penuh baik material maupun non-material, serta semangat yang tiada hentinya sampai penulis menyelesaikan tesis ini dengan baik;
16. Istri dan anak-anakku (Hamid, Hillmi, dan Hulya), yang selalu memotivasi,

membantu dan selalu memberikan kegembiraan di kala penulis merasakan kejenuhan dalam proses mengerjakan tesis;

17. Tim Laboratorium Analisis dan Instrumentasi Teknik Kimia Unila, yakni Heru, Wildan, Enda, Valerie, Shilla, Kiki, dan Della yang telah memberikan waktu, tenaga, pikiran, dan bantuannya selama ini;
18. Teruntuk rekan MIL Tahun 2021, khususnya Afifah, Mia, Hera, Andrie, Latifah yang sudah banyak membantu dan berbagi pengalaman kepada penulis;
19. Eko Wahyu Saputra dan Fatullah yang sudah membantu penulis dalam pembuatan poster dan administrasi.

Proses penyusunan tesis di tengah aktifitas penulis sebagai karyawan swasta hingga selesai yang penulis lalui, jelas berbeda dengan proses pada umumnya, namun penulis merasa sangat bahagia karena telah meraih gelar Magister di tahun ini dan membuat bangga orang tua, istri, dan keluarga serta orang-orang yang menyayangi penulis. Kondisi sulit ini akan menempa penulis menjadi manusia intelektual yang kuat. Percayalah bahwa Tuhan akan selalu menemani dan mempermudah segala urusan umat-Nya. Jika dalam penulisan tesis ini terdapat kekurangan, namun semoga karya ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca.

Bandar Lampung, Januari 2024

Okta Tri Handoko

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR ISTILAH	xi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan	4
1.4. Ruang Lingkup dan Kerangka Pemikiran	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Rafinasi Minyak Sawit Mentah.....	7
2.2. <i>Bleaching Earth</i>	9
2.3. <i>Spent Bleaching Earth</i>	11
2.4. Adsorpsi	12
2.5. Karotenoid	14
2.5.1. Jenis Karotenoid	15
2.5.2. Sifat Fungsional β -Karoten.....	17
2.6. Ekstraksi	19
2.6.1. Metode Ekstraksi	20
2.6.2. Bahan Pengekstrak (<i>Solvent</i>)	21
2.7. Reaktivasi Adsorben.....	23
2.8. Impregnasi	24
2.9. <i>Co-Benefits</i>	25
2.9.1. Ekonomi Sirkular	25
2.9.2. Investasi dan Evaluasi Ekonomi	26
2.9.3. Aspek Lingkungan	29
2.9.4. Aspek Sosial	30
III. METODE PENELITIAN	32
3.1. Tempat dan Waktu	32
3.2. Alat dan Bahan.....	32
3.3. Metode Penelitian	33
3.3.1. Metode Reaktivasi SBE Tanpa Impregnasi	36

3.3.2. Metode Reaktivasi SBE Dengan Impregnasi	37
3.3.3. Metode Adsorpsi β -Karoten	38
3.3.4. Metode Ekstraksi (Desorpsi) β -Karoten.....	38
3.3.5. Metode Pengukuran Kadar β -Karoten.....	39
3.4. Evaluasi Tekno-Ekonomi	41
3.5. Analisis Manfaat Lingkungan dan Sosial.....	42
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Hasil Uji Karakteristik RBE	43
4.1.1. Hasil Analisis <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	44
4.1.2. Hasil Analisis <i>Brunauer, Emmet and Teller</i> (BET).....	45
4.2. Hasil Analisis Minyak	46
4.3. Hasil Adsorpsi dan Desorpsi β -Karoten	49
4.4. Efisiensi Adsorpsi dan Desorpsi β -Karoten	50
4.5. Kapasitas Adsorpsi dan Desorpsi β -Karoten	53
4.6. Analisis Tekno-Ekonomi	55
4.6.1. Tekno-Ekonomi Reaktivasi Kimia Dengan Produk Sampung Minyak Residu.....	57
4.6.2. Tekno-Ekonomi Reaktivasi Kimia dan Fisika Dengan Produk Sampung Minyak Residu	66
4.6.3. Tekno-Ekonomi Reaktivasi Kimia dan Fisika Dengan Produk Sampung Minyak Residu dan β -Karoten.....	74
4.6.4. Tekno-Ekonomi Tekno-Ekonomi Reaktivasi Kimia, Fisika dan Impregnasi Dengan Produk Sampung Minyak Residu dan β - Karoten.....	85
4.7. Analisis Manfaat Lingkungan dan Sosial	95
4.8. <i>Co-Benefits</i> Pemanfaatan SBE Sebagai Adsorben β -Karoten	97
V. SIMPULAN DAN SARAN	99
5.1. Simpulan	99
5.2. Saran	99
DAFTAR PUSTAKA	101

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Syarat Mutu Minyak Goreng Sawit	9
2. Jumlah Limbah SBE di Indonesia	12
3. Jenis Karotenoid dan Karakter Warnanya	17
4. Sifat Fisika dan Kimia β -Karoten	19
5. Perbandingan Kelebihan dan Kekurangan Berbagai Metode Ekstraksi	21
6. Sifat Fisis dan Kimia Pelarut Heksana dan Diklorometana	23
7. Basis Perhitungan Jumlah BE, SBE, dan Minyak Terjerap	43
8. Hasil Analisis Proksimat BE, SBE, dan DOBE	46
9. Hasil Analisis BET SBE, RBE, dan RBE-Ba	46
10. Hasil Analisis Kualitas Minyak Sawit	47
11. Kandungan β -karoten pada berbagai proses	49
12. Karoten pada Proses adsorpsi-desorpsi	51
13. Neraca massa β -karoten proses adsorpsi (Adsorben RBE)	51
14. Neraca massa β -karoten proses desorpsi (Adsorben RBE)	51
15. Neraca massa β -karoten proses adsorpsi (Adsorben RBE-Ba)	52
16. Neraca massa β -karoten proses desorpsi (Adsorben RBE-Ba)	52
17. Efisiensi Adsorben pada proses adsorpsi dan desorpsi	53
18. Perbandingan kapasitas adsorpsi dan desorpsi β -karoten terhadap analisis BET.....	54
19. Basis perhitungan Tekno-Ekonomi berdasarkan Jumlah Refinery	56
20. Basis perhitungan Tekno-Ekonomi Skema 1	58
21. <i>Recovery</i> bahan kimia pada reaktivasi SBE per <i>batch</i>	60
22. Estimasi TCI pada Skema 1	61

23. Estimasi TPC pada Skema 1.....	62
24. Potensi <i>income</i> pada Skema 1.....	63
25. <i>Discounted cash flow</i> pada Skema 1	65
26. Tekno-Ekonomi Skema 1 pada berbagai Kapasitas.....	65
27. Basis Perhitungan Tekno-Ekonomi Skema 2	67
28. <i>Recovery</i> Bahan Kimia pada Skema 2	69
29. Estimasi TCI pada Skema 2.....	70
30. Estimasi TPC pada Skema 2.....	71
31. Potensi <i>income</i> pada Skema 2.....	72
32. <i>Discounted cash flow</i> pada Skema 2	73
33. Tekno-Ekonomi Skema 2 pada berbagai Kapasitas.....	74
34. Basis perhitungan Tekno-Ekonomi Skema 3	75
35. <i>Recovery</i> Bahan Kimia pada Skema 3	79
36. Estimasi TCI pada Skema 3	80
37. Estimasi TPC pada Skema 3	81
38. Potensi <i>income</i> pada Skema 3	82
39. <i>Discounted cash flow</i> pada Skema 3	84
40. Tekno-Ekonomi Skema 3 pada berbagai Kapasitas.....	85
41. Basis perhitungan Tekno-Ekonomi pada Skema 4.....	86
42. <i>Recovery</i> Bahan Kimia pada Skema 4	91
43. Estimasi TCI pada Skema 4	91
44. Estimasi TPC pada Skema 4	92
45. Potensi <i>income</i> pada Skema 4	93
46. <i>Discounted cash flow</i> pada Skema 4	94
47. Tekno-Ekonomi Skema 4 pada berbagai Kapasitas.....	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran penelitian.....	5
2. Proses pemurnian CPO secara fisika dan kimia	8
3. Struktur montmorillonit tampak samping dan tampak atas.....	10
4. <i>Fresh bleaching earth</i> dan <i>spent bleaching earth</i>	11
5. Perbedaan struktur kimia β -karoten (karoten) dan astaxanthin	16
6. Beberapa struktur grup ujung pada senyawa karotenoid	16
7. Sistem Ekonomi Sirkular <i>Bleaching Earth</i>	26
8. <i>Process Flow Diagram</i> (PFD) Reaktivasi <i>Bleaching Earth</i> (RBE)	34
9. Diagram alir reaktivasi SBE tanpa impregnasi.....	36
10. <i>Diagram alir reaktivasi SBE dengan impregnasi</i>	37
11. Diagram alir Adsorpsi β -Karoten	38
12. Diagram alir ekstraksi atau desorpsi β -karoten	38
13. Diagram Alir Pengukuran β -Karoten	39
14. Proses reaktivasi SBE dan Penjumpatan β -Karoten	40
15. Hasil analisis SEM pada BE, SBE, RBE, dan RBE-Ba	45
16. <i>Flowchart</i> proses adsorpsi dan desorpsi β -karorten	46
17. Skema interaksi antara β -karoten dan permukaan RBE	50
18. Tahapan transfer massa pada proses adsorpsi	54
19. Flowchart penjumpatan β -karoten pada CPO sebelum diolah di refinery	83
20. <i>Co-benefits</i> pengolahan limbah SBE	97

DAFTAR ISTILAH

<i>Bleaching</i>	: proses pemucatan minyak sawit mentah agar mendapatkan minyak yang lebih jernih dan stabil dengan menggunakan <i>bleaching earth</i> .
<i>Bleaching earth</i> (BE)	: tanah liat (<i>clay</i>) atau mineral lempung yang dalam kondisi alaminya atau setelah diaktivasi menggunakan asam maupun termal mampu menjerap zat-zat warna dari lemak dan minyak.
<i>Spent Bleaching Earth</i> (SBE)	: BE yang sudah jenuh dan mengandung minyak residu dan termasuk kedalam limbah B3.
<i>Reactivated Bleaching Earth</i> (RBE)	: SBE yang sudah diaktivasi baik secara kimiawi maupun termal atau kombinasi keduanya.
<i>Co-Benefits</i>	: keuntungan berganda pada beberapa aspek yang diperoleh dari sebuah proses pengolahan, kebijakan atau strategi.
Adsorben	: padatan yang digunakan sebagai penjerap.
Impregnasi	: metode penjenuhan zat tertentu secara total untuk mengisi pori-pori penyangga dalam larutan logam aktif melalui adsorpsi logam sehingga memiliki komponen aktif yang terdistribusi rata dan luas permukaan yang besar.
Ekstraksi	: proses pemisahan zat (<i>solute</i>) yang diinginkan atau tidak diinginkan dalam zat padat dengan menggunakan pelarut (<i>solution</i>).
Adsorpsi	: proses pemisahan atau pemekatan zat tertentu dari fluida (gas atau cair) ke permukaan padatan.

Desorpsi	: pelepasan zat yang teradsorpsi dari suatu permukaan.
<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	: mikroskop elektron yang digunakan untuk menghasilkan gambar permukaan sampel dengan resolusi tinggi dan detail yang sangat jelas.
<i>Brunauer, Emmet and Teller</i> (BET)	: pengujian karakterisasi adsorben yang bertujuan untuk mengetahui ukuran luas permukaan adsorben dan poriporinya.
<i>Reverse on Investment</i> (ROI)	: perkiraan keuntungan yang dapat diperoleh per tahun didasarkan pada kecepatan pengembalian modal tetap yang diinvestasikan.
<i>Payback Period</i> (PBP)	: waktu minimum teoritis yang dibutuhkan untuk pengembalian modal tetap yang diinvestasikan atas dasar keuntungan setiap tahun setelah ditambah dengan penyusutan dan dihitung dengan menggunakan metode linier.
<i>Net Present Value</i> (NPV)	: jumlah dari nilai <i>cash flow</i> pada tahun t dikurangi biaya pada tahun t .
<i>Internal Rate of Return</i> (IRR)	: nilai suku bunga saat nilai NPV sama dengan 0.
<i>Benefit Cost Ratio</i> (BCR)	: analisis perbandingan antara biaya yang dikeluarkan dan manfaat dari skenario pemanfaatan SBE sebagai adsorben.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Minyak sawit mentah (*crude palm oil*) akan mengalami proses *bleaching* atau pemucatan dalam proses penyulingan, hal ini bertujuan untuk mendapatkan minyak yang lebih jernih dan lebih stabil karena kontaminan yang terkandung seperti zat warna, getah, dan logam sudah dihilangkan. Proses pemucatan menggunakan bahan penjerap atau adsorben jenis *bleaching earth* (Low *et al.*, 2022). *Bleaching earth* yang digunakan berkisar 1%-3% dari berat minyak yang akan dipucatkan (Tang *et al.*, 2015). *Bleaching earth* (BE) merupakan sejenis tanah liat atau bentonit yang memiliki struktur utama monmorillonit dengan komposisi utamanya terdiri dari SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, dan K₂O (Loh *et al.*, 2017). *Bleaching earth* yang sudah jenuh akan menjadi limbah padat *spent bleaching earth* (SBE).

Selain menyerap zat warna dan pengotor lainnya, BE juga menyerap minyak ke dalam pori, hal ini mengakibatkan SBE mengandung 20-40% minyak residu. Minyak residu adalah minyak sawit yang terjebak di dalam SBE sehingga dapat teroksidasi secara cepat dan mencapai titik spontan pembakaran. Jika mencapai suhu tinggi atau terpapar di bawah sinar matahari dalam waktu yang cukup lama, SBE akan terbakar (Beshara *et al.*, 2014). SBE termasuk jenis limbah B3 pada Peraturan Pemerintah (PP) nomor 101 tahun 2014, namun pada Lampiran XIV PP nomor 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, SBE dapat menjadi limbah non B3 (N108) dengan syarat kandungan minyak setelah ekstraksi kurang dari atau sama dengan 3% (tiga persen), namun

syarat ini sangat sulit untuk dicapai. Berdasarkan peraturan tersebut, limbah B3 SBE harus diolah secara tepat, karena selama ini SBE diolah dengan cara dikubur atau disimpan di lahan terbuka, hal ini sangat beresiko karena kandungan SBE bersifat toksik dan dapat mencemari lingkungan jika tanpa pengolahan sebelumnya (Aberkane *et al.*, 2021).

Kebutuhan minyak goreng nabati yang semakin besar akan menyebabkan meningkatnya jumlah SBE yang dihasilkan. Jumlah SBE di Indonesia pada tahun 2021 mencapai 778.866 ton (Ditjen PSLB3, 2022). Di sisi lain, SBE memiliki kemampuan pertukaran ion yang tinggi, area permukaan pori yang luas, dan stabil secara kimia (Phey-phey *et al.*, 2022) sehingga SBE dapat diaktivasi kembali menjadi *reactivated bleaching earth* (RBE) dengan cara mengurangi kandungan minyak residu, menambah luas pori, dan meningkatkan kemampuan jerapnya. Reaktivasi dilakukan dengan metode fisika berupa pemanasan menggunakan tanur (*furnance*), metode kimia menggunakan asam kuat seperti HCl atau H₂SO₄ ataupun kombinasi keduanya. Selain itu, dapat juga dilakukan impregnasi, yakni proses penjenjuran menggunakan larutan logam aktif dengan mengisi pori-pori penyangga sehingga luas permukaan menjadi lebih besar dan terdistribusi merata (Rahayu dkk., 2021). Jumlah SBE yang banyak dan dapat direaktivasi adalah peluang untuk mengolah limbah secara *co-benefits* / manfaat berganda dimana limbah tidak hanya ditimbun, tetapi diolah menjadi sesuatu yang lebih bermanfaat secara sosio-ekonomi dan meminimalisir dampak buruk terhadap lingkungan.

Beberapa penelitian terkait pemanfaatan SBE maupun minyak residu adalah pemanfaatan pembuatan briket (Suhartini dkk., 2011), *biofertilizer* (Loh *et al.*, 2013), katalis pada reaksi transesterifikasi (Hindryawati dkk., 2017), material pembuatan keramik (Srisang and Srisang, 2021), biodiesel (Naser *et al.*, 2021), material beton ringan (Prasetyo dan Sumarno, 2022), dan masih banyak lagi. Selain itu, penelitian yang memanfaatkan RBE sebagai adsorben juga sudah dilakukan seperti penjerapan logam berat (Tang *et al.*, 2015),

penjerapan pigmen pada CPO (Saputro dkk., 2020), penjerapan tetrasiklin hidroklorida (TCH) (Liu *et al.*, 2020), pemurnian gliserol (Yuliana dkk., 2021), adsorpsi gas CO₂ (Phey Phey *et al.*, 2022), dan adsorpsi diklofenak (DCF) (Zhang *et al.*, 2022). Impregnasi SBE menggunakan BaCl₂ pernah dilakukan oleh Tsai *et al.* (2011) dan menghasilkan lebar pori rata-rata 7,48 nm, lebih besar jika dibandingkan dengan lebar pori BE yakni 5,35 nm. Impregnasi RBE juga dilakukan oleh Hindrywati dkk (2017) menggunakan CaO, Saputra dkk (2020) menggunakan CeFeO₃, Sakr *et al.* (2021) menggunakan 3-amino-5-hydroxypyrazole (AHIBC), dan Zhang *et al.* (2022) menggunakan *zero-valent iron* (Fe⁰).

RBE memiliki sifat hidrofobik, sehingga dapat menjerap senyawa hidrofobik seperti senyawa β-karoten. β-karoten adalah salah satu jenis karotenoid yang terkandung dalam CPO namun hilang pada proses rafinasi, baik karena pemanasan pada proses diodorisasi atau terjerap pada proses *bleaching*. Saat ini belum ada teknologi yang mampu menggantikan *bleaching* dan diodorisasi, sehingga β-karoten sebaiknya dijerap lebih dulu sebelum proses rafinasi karena memiliki banyak manfaat. Beberapa manfaat β-karoten antara lain sebagai provitamin A yang dapat dikoversi menjadi vitamin A, hepatoprotektor (pelindung hati), anti obesitas, anti inflamasi, anti kanker, dan imunomodulator (Wang *et al.*, 2022). Penelitian terdahulu yang melakukan penjerapan β-karoten dari CPO sebelum proses rafinasi diantaranya Davarnejad *et al.* (2008) menggunakan superkritikal fluida, Ahmad *et al.* (2009) menggunakan adsorben berbasis silika, dan Vidoca *et al.* (2020) menggunakan resin polimer Diaion HP-20. Hal inilah yang melatar belakangi pemanfaatan adsorben RBE untuk menjerap β-karoten pada CPO sebelum proses rafinasi. Pada penelitian ini telah dilakukan analisis *co-benefits* (ekonomi, lingkungan, dan sosial) terhadap reaktivasi SBE sebagai adsorben β-karoten dengan metode impregnasi dan tanpa impregnasi. RBE dengan total ukuran pori yang lebih besar dan terdistribusi rata terbukti lebih banyak menjerap β-karoten.

1.2. Rumusan Masalah

SBE adalah bentonit dengan struktur utamanya montmorillonit yang dapat diregenerasi atau reaktivasi menjadi adsorben RBE. SBE termasuk limbah B3 yang harus diolah dengan izin dan metode khusus. Selama ini SBE yang dihasilkan diolah secara *dumping* atau dikirim ke vendor pengolahan limbah B3. Kedua metode ini memiliki kekurangan yakni beresiko terhadap lingkungan dan mengeluarkan biaya yang cukup tinggi.

β -karoten yang terkandung dalam CPO merupakan senyawa yang memiliki banyak manfaat sehingga perlu dilakukan penjerapan sebelum rafinasi menggunakan RBE. Pada penelitian ini sudah dikaji bagaimana pengaruh impregnasi BaCl_2 terhadap kemampuan menjerap (*power of bleaching*) β -karoten. RBE yang terbukti mampu menjerap β -karoten perlu dianalisis kelayakan secara ekonomi untuk menunjang manfaat lingkungan dan sosial. Pengelolaan limbah SBE secara *co-benefits* diharapkan berdampak luas pada berbagai aspek dan menjadi alternatif solusi permasalahan limbah B3 SBE di Indonesia.

1.3. Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah :

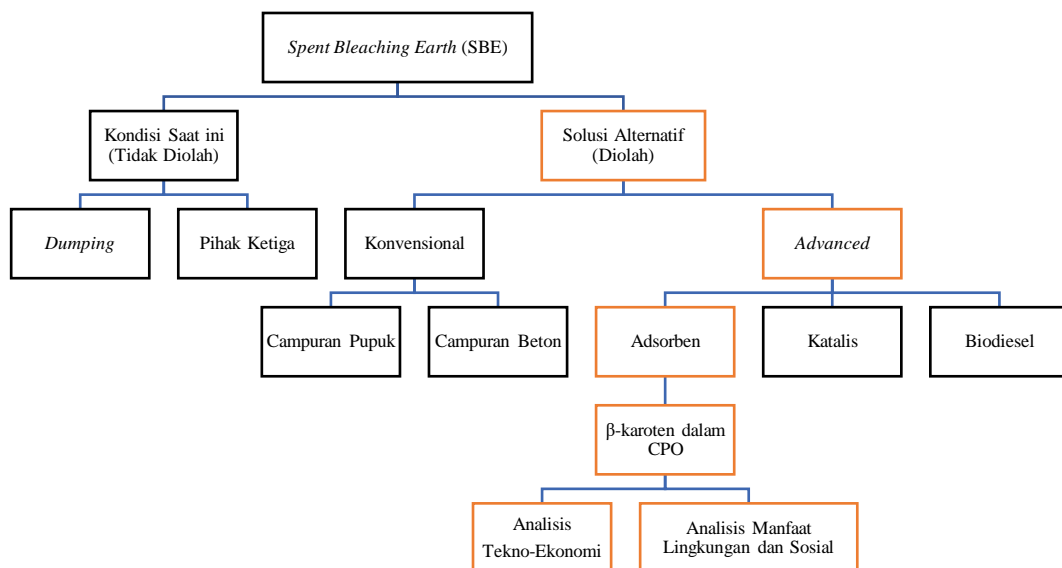
1. Mengetahui pengaruh impregnasi pada proses reaktivasi SBE terhadap hasil penjumlahan β -karoten.
2. Menganalisis *co-benefits* atau manfaat berganda dari pemanfaatan SBE sebagai adsorben β -karoten, yakni manfaat lingkungan, sosial, dan ekonomi.

1.4. Ruang Lingkup dan Kerangka Pemikiran

Penelitian ini menggunakan *reactivated bleaching earth* (RBE) yang sudah diaktivasi pada penelitian sebelumnya dengan menggunakan metode yang dilakukan oleh Naser *et al.* (2021) yakni ekstraksi minyak menggunakan

pelarut heksana, kalsinasi, dan dilanjutkan aktivasi menggunakan asam, dengan tambahan modifikasi impregnasi $BaCl_2$ dan tanpa impregnasi. Uji karakteristik RBE dilakukan untuk melihat morfologi permukaan dan karakteristik pori dengan menggunakan analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan analisis uji *Brunauer, Emmett, Teller* (BET).

Uji performansi dilakukan dengan mengevaluasi daya jerap (*power of bleaching*) β -karoten pada CPO. Setelah itu dilakukan evaluasi kelayakan skalabilitas secara tekno-ekonomi dan evaluasi dampak lingkungan-sosial. Jadi, ruang lingkup pada penelitian ini adalah menggunakan RBE yang sudah diaktivasi untuk menyerap β -karoten pada CPO dan menganalisis manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial. Manfaat penelitian ini adalah mendapatkan kajian pengalihan SBE secara *co-benefits* dengan menganalisis aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial.



Gambar 1. Kerangka pemikiran penelitian.

Pada Gambar 1, kerangka berfikir pada penelitian ini didasari oleh SBE yang termasuk limbah B3 dan wajib diolah sendiri atau menggunakan jasa pihak ketiga, namun SBE memiliki potensi menjadi sesuatu yang bernilai ekonomis. Pengolahan secara *co-benefits* adalah upaya untuk mendapatkan manfaat bersama jika dibandingkan hanya ditimbun atau menggunakan jasa

pihak ketiga. Salah satu pengolahan yang berpotensi adalah reaktivasi SBE menjadi adsorben. RBE dapat menjerap β -karoten pada CPO, yang akan rusak atau teroksidasi pada proses rafinasi. Jika β -karoten berhasil dijerap, maka akan mendapat keuntungan berganda seperti manfaat kesehatan sebagai provitamin A , mencegah pencemaran lingkungan, dan menurunkan biaya pengolahan limbah SBE. Tesis ini mengkaji kelayakan secara tekno-ekonomi serta analisis manfaat lingkungan dan sosial.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rafinasi Minyak Sawit Mentah

Tanaman kelapa sawit menghasilkan dua jenis minyak, yakni minyak sawit mentah atau *crude palm oil* (CPO) dan minyak inti sawit atau *palm kernel oil* (PKO). CPO dan beberapa produk turunan dari minyak sawit memiliki kandungan minor (mikronutrien) seperti karoten, vitamin E, dan sterol. CPO memiliki kandungan total karoten 500 – 700 ppm (Nabu *et al.*, 2021). Sementara minyak hasil pengepressan fiber mesokarp yang kedua (*second extracted oil*) mengandung total karoten sekitar 3800 – 7000 ppm dengan komposisi β -karoten 30,95%, α -karoten 19,45%, likopen 14,13%, dan *phytoene* 11,87% (Phoon *et al.*, 2018).

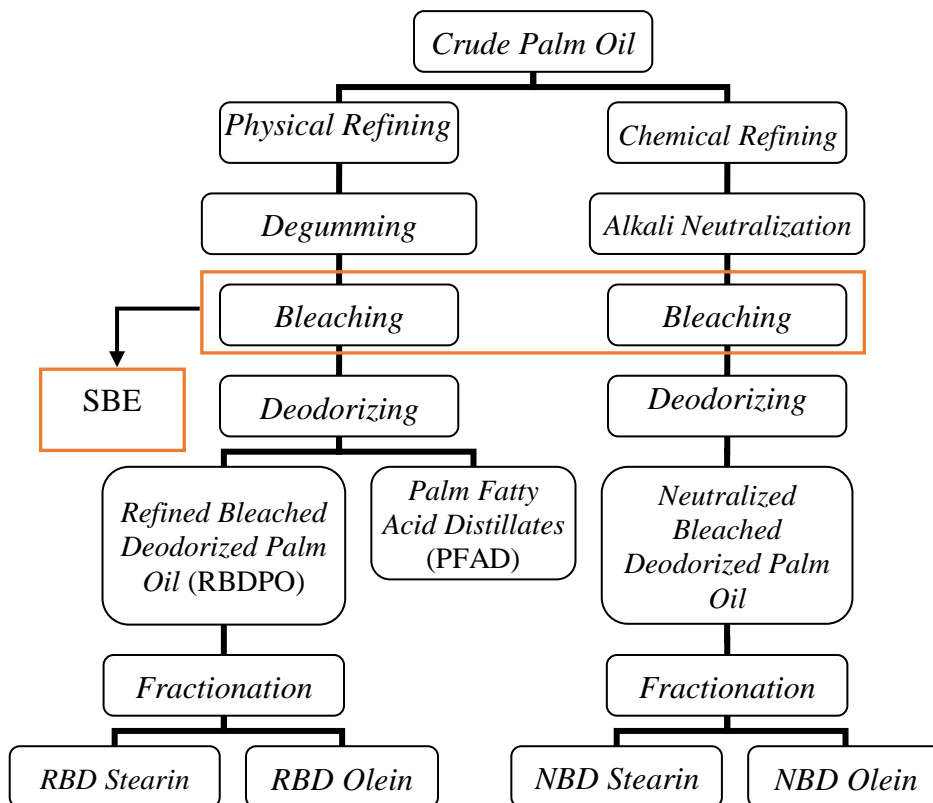
Pemurnian CPO dapat dilakukan secara fisika untuk menghasilkan RBDPO (*refined bleached deodorized palm oil*) dan secara kimia untuk menghasilkan NBDPO (*neutralized bleached deodorized palm oil*). Kedua proses tersebut akan melalui proses *bleaching* atau pemucatan untuk menjerap zat warna menggunakan adsorben tanah pemucat (*bleaching earth*). Perbedaan proses pemurnian secara fisika dan kimia tersaji pada Gambar 2.

Pemurnian minyak sawit mentah dilakukan dalam beberapa tahap (Ayustaningwarno, 2012) diantaranya :

1. Proses *degumming* bertujuan untuk memisahkan getah tanpa mereduksi asam lemak bebas (FFA) yang ada di minyak. Pemisahan ini dilakukan dengan pemberian asam fosfat (H_3PO_4). Asam fosfat mampu mengikat

fosfor yang merupakan komponen utama getah (*gum*), kemudian mengendapkannya. Pada proses dilakukan pemanasan hingga suhu 60 - 70°C (Liu *et al.*, 2019).

2. Deasidifikasi / Netralisasi adalah proses penambahan basa ke dalam minyak, karena masih mengandung asam lemak bebas. Basa yang digunakan adalah NaOH yang akan bereaksi dengan FFA dan membentuk sabun.
3. *Bleaching* bertujuan untuk menjerap *impurities* seperti logam, karotenoid, zat warna, mengurangi produk oksidasi, menjerap fosfolipid yang diendapkan oleh asam fosfat, dan memisahkan asam fosfat setelah proses *degumming*. Pada proses ini β -karoten terjerap oleh *bleaching earth* dan teroksidasi karena pemanasan hingga suhu 90°C.
4. Deodorisasi adalah proses penghilangan bau dan rasa (*flavour*) yang tak dikehendaki dengan cara memisahkan senyawa yang mudah menguap dan residu air. Pada tahap ini, semua β -karoten hilang atau rusak karena proses termal pada suhu 600-900°C.



Gambar 2. Proses pemurnian CPO secara fisika dan kimia (Mba *et al.*, 2015).

Dalam Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia nomor 46 tahun 2019 tentang pemberlakuan Standar Nasional Indonesia (SNI) minyak goreng sawit secara wajib, minyak goreng sawit wajib mengandung Parameter lain terkait mutu minyak goreng disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Syarat Mutu Minyak Goreng Sawit

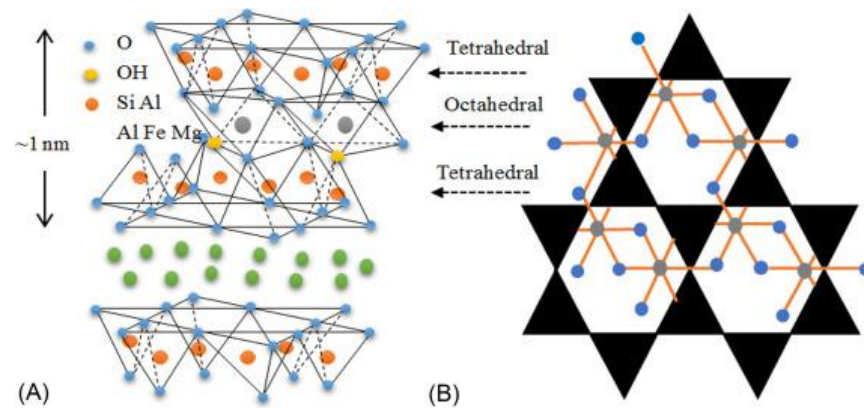
No	Kriteria Uji	Satuan	Persyaratan
1	Keadaan		
1.a	Bau	-	Normal
1.b	Rasa	-	Normal
2	Warna		kuning sampai jingga
3	Kadar Air dan Bahan Menguap	fraksi massa, %	maks. 0,1
4	Asam lemak bebas (dihitung sebagai asam palmitat)	fraksi massa, %	maks. 0,3
5	Bilangan peroksida	mek O ₂ /kg	maks 10
6	Vitamin A (total)	IU/g	min 45
7	Minyak Pelikan	-	Negatif
8	Cemaran logam berat		
8.a	Kadmium (Cd)	mg/kg	maks 0,1
8.b	Timbal (Pb)	mg/kg	maks 0,1
8.c	Timah (Sn)	mg/kg	maks 40/250
8.d	Merkuri (Hg)	mg/kg	maks 0,05
9	Cemaran Arsen (As)	mg/kg	maks 0,1

Sumber : SNI 7709:2019

2.2. *Bleaching Earth*

Bleaching earth (BE) adalah tanah liat (*clay*) atau mineral lempung yang dalam kondisi alaminya atau setelah diaktivasi menggunakan asam maupun termal mampu menjerap zat-zat warna dari lemak dan minyak. Ada dua kelompok utama tanah liat, yakni kalsium bentonit (montmorillonit) dan hormit (campuran montmorillonit dan attapulgit). Bentonit adalah bijih tanah

liat, sementara montmorillonit adalah mineral utama yang terkandung dalam bentonit (Taylor *et al.*, 2020). Struktur montmorillonit dapat dilihat pada Gambar 3. BE yang teraktivasi asam umumnya digunakan untuk menyerap pigmen (klorofil dan β -karoten) serta kontaminan lain seperti asam lemak bebas (*free fatty acid*), poliaromatik, fosfolipid, dan hasil oksidasi lainnya (Srisang and Srisang, 2021).



Gambar 3. Struktur montmorillonit (a) tampak samping (b) tampak atas (Zhou *et al.*, 2019).

Bentonit adalah tanah liat yang terbentuk oleh proses devitrifikasi dan pelapukan abu vulkanik, bentonit terbentuk ketika abu vulkanik jatuh ke badan air seperti danau atau laut yang sedikit basa (Taylor *et al.*, 2020). Bentonit merupakan sumber daya alam yang melimpah di Indonesia, terkhusus Ca-bentonit. Ada dua tipe bentonite (Ruskandi dkk., 2020) yakni :

1. *Wyoming type*, disebut juga tipe "*swelling*" menyerap lebih banyak air dan dapat mengembang hingga 8-15 kali. Sodium Bentonit (*swelling bentonite*) digunakan sebagai lumpur pembilas pada kegiatan pengeboran, penyumbatan kebocoran bendungan, dan manufaktur pellet biji besi.
2. Meta atau Sub-bentonit atau *non-swelling type* menyerap lebih sedikit air. Ca Bentonit (*non-swelling type*) mengandung lebih banyak ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} dibandingkan ion Na^+ . Ca bentonite memiliki sifat menyerap yang baik dan tetap terdispersi dalam air, banyak digunakan sebagai bahan

pemucat warna pada proses pemurnian minyak goreng, katalis pada industri kimia, dan sebagai filter pada industri kertas dan polimer.

2.3. *Spent Bleaching Earth (SBE)*

Spent Bleaching Earth (SBE) adalah *bleaching earth* yang sudah jenuh dan tidak digunakan pada proses pemucatan kembali. Umumnya, SBE mengandung residu minyak yang cukup tinggi sekitar 20-50% (w/w) tergantung dari proses pemucatannya, namun tidak bisa dikonsumsi karena kualitas yang rendah dan mengandung kontaminan hasil adsorpsi (Sahafi *et al.*, 2016). Beberapa alternatif pemanfaatan SBE adalah digunakan kembali dalam rafinasi minyak goreng (Kilinççeker *et al.*, 2020), sumber bioenergi (Xu *et al.*, 2019), sorben untuk menangkap CO₂ (Su *et al.*, 2018) dan lain-lain.

SBE memiliki perbedaan warna dan bentuk jika dibandingkan dengan *fresh bleaching earth (FBE)*. Pada Gambar 4, SBE berwarna lebih hitam dan permukaannya lebih kasar jika dibandingkan dengan FBE. Hal ini mengindikasikan bahwa SBE mengandung minyak, zat pigmen, dan pengotor lainnya. Pada penelitian yang dilakukan oleh Naser *et al.* (2021), hasil analisis BET menunjukkan rata-rata diameter pori SBE hanya 9,7 Å, lebih rendah apabila dibandingkan rata-rata diameter pori *fresh bleaching earth* 11,8 Å, dan SBE hasil ekstraksi menggunakan n-heksana 12,5 Å.



Gambar 4. a. *Fresh bleaching earth* b. *Spent bleaching earth*
(Sumber : dokumentasi pribadi).

Peningkatan kebutuhan minyak goreng sawit akan memicu meningkatnya limbah SBE di Indonesia. SBE yang digunakan pada pemurnian minyak sawit

sekitar 2,5-3% pada proses rafinasi CPO (Yuliana dkk, 2019). Berikut data jumlah limbah SBE di Indonesia :

Tabel 2. Jumlah Limbah SBE di Indonesia

No	Tahun	Jumlah SBE (ton)
1	2017	184.162
2	2018	637.476
3	2019	778.894
4	2020	778.880
5	2021	778.866

Sumber : Ditjen PSLB3, 2022

SBE memiliki potensi menciptakan ekonomi sirkular jika diolah dengan tepat, tidak hanya menurunkan beban pencemaran lingkungan namun menghasilkan produk turunan baru dan meningkatkan nilai tambah SBE. Salah satu yang menjanjikan adalah pengolahan SBE sebagai adsorben, baik untuk pemurnian gliserol, penyerapan gas karbon dioksida, penyerapan warna, penyerapan logam berat, penyerapan karotenoid dan beberapa proses adsorpsi lainnya. Pengolahan kembali SBE, dapat membuat perusahaan menerapkan *zero waste*, dimana limbah yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kembali atau dapat menjadi produk samping yang bernilai ekonomi.

2.4. Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses pemisahan atau pemekatan zat tertentu dari fluida (gas atau cair) ke permukaan padatan. Adsorbat adalah zat atau kandungan yang ingin dijerap, sementara adsorben adalah padatan yang digunakan sebagai penjerap. Dengan mengkontakkan cairan atau gas ke adsorben, tujuan pemurnian atau pemisahan yang diinginkan dapat tercapai (Geankoplis *et al.*, 2018). Adsorpsi dipengaruhi oleh perpindahan massa (antara larutan dan permukaan adsorben) dan laju reaksi adsorpsi, sehingga adsorpsi akan

mencapai kesetimbangan antara adsorben dan adsorbat (larutan kontakannya) (Tien, 2019).

Proses penyerapan zat tertentu ke permukaan padatan tidak hanya adsorpsi, proses lainnya adalah *ion exchange* (pertukaran ion) dan kromatografi. Adsorpsi dan absorpsi adalah terminologi berbeda. Absorpsi adalah *bulk phenomenon*, jangkauan pemisahannya tergantung solubilitas gas yang terlibat, misal gas yang dikontakkan dengan zat cair untuk melarutkan satu, dua atau lebih komponen gas kedalam cairan. Sementara adsorpsi adalah *surface phenomenon*, jangkauan pemisahannya tergantung pada kesetimbangan adsorben dan adsorbat, misal penjerapan β -karoten dalam CPO pada *bleaching earth* (Tien, 2019).

Adsorpsi atau penjerapan dapat diaplikasikan untuk menjerap zat tertentu pada fase cair dan fase gas, berikut penerapan adsorpsi pada fase cair (Tien, 2019) :

- a. Penghilangan warna (*decoloring*), pengeringan (*drying*) atau penghilangan getah (*degumming*) pada produk minyak bumi
- b. Penghilangan zat organik terlarut pada air
- c. Penghilangan bau, warna, dan rasa pada air
- d. Penghilangan warna (*bleaching*) pada minyak sayur

Untuk mengetahui efisiensi adsorpsi (*power of bleaching*), dapat dihitung menggunakan persamaan 1 (Nga *et al.*, 2022) :

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Keterangan :

- R : Efisiensi adsorpsi (%)
 C₀ : Konsentrasi karoten awal dalam CPO (ppm)
 C_e : Konsentrasi karoten filtrat setelah adsorpsi (ppm)

Sifat dan karakteristik dari adsorben, berkaitan dengan penggunaannya pada pemisahan atau pemurnian. Berikut karakteristik adsorben (Tien, 2019) :

1. *Adsorbent size* (d_p), merupakan variabel yang penting karena laju penyerapan adsorbat bergantung pada ukuran adsorben dan menentukan *pressure drop* yang diperlukan pada sistem *fixed-bed*.
2. *Adsorbent density* (ρ_p), diperlukan dalam mendesain tinggi media pada sistem *fixed-bed*.
3. *Adsorbent porosity* (ϵ_p), indikasi struktur internal adsorben dan merupakan nilai fraksi ruang kosong pellet/granular adsorben. Asosiasi jumlah dari porositas adalah volume pori spesifik (V_{pore}) volume pori per satuan massa yang tersearap.
4. *Pore size dan size distribution*, ukuran pori umumnya diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yakni :
 - Mikropori : ($d_{\text{pore}} < 20 \text{ \AA}$) atau ($d_{\text{pore}} < 2 \text{ nm}$)
 - Mesopori : ($20 \text{ \AA} < d_{\text{pore}} < 500 \text{ \AA}$) atau ($2 \text{ nm} < d_{\text{pore}} < 50 \text{ nm}$)
 - Makropori : ($d_{\text{pore}} > 500 \text{ \AA}$) atau ($d_{\text{pore}} > 50 \text{ nm}$)

Catatan : 1 Angstrom (\AA) = 0,1 nanometer (nm)
5. *Specific surface area* (S_g), merupakan luas area permukaan per satuan massa adsorben. S_g termasuk variabel yang penting terhadap kapasitas penyerapan adsorben.

2.5. Karotenoid

Secara umum, karotenoid dikenal sebagai kelompok zat warna alami atau pigmen yang memiliki warna kuning, oranye sampai merah. Karotenoid bersifat lipofilik, memiliki bioaktivitas yang luas, dan sebagai prekursor pembentukan vitamin A. Karotenoid dapat ditemukan di semua organisme fotosintetik (termasuk alga dan *cyanobacteria*), beberapa bakteri nonfotosintetik, dan jamur. Karotenoid adalah pigmen tumbuhan yang larut dalam lemak dan merupakan komponen poliisoprena, yang terdiri dari monomer-monomer isoprena (Butnariu, 2016).

Senyawa karotenoid memiliki bentuk isomer *trans*, bentuk isomer *trans* lebih stabil jika dibandingkan dalam bentuk isomer *cis*. Dengan adanya

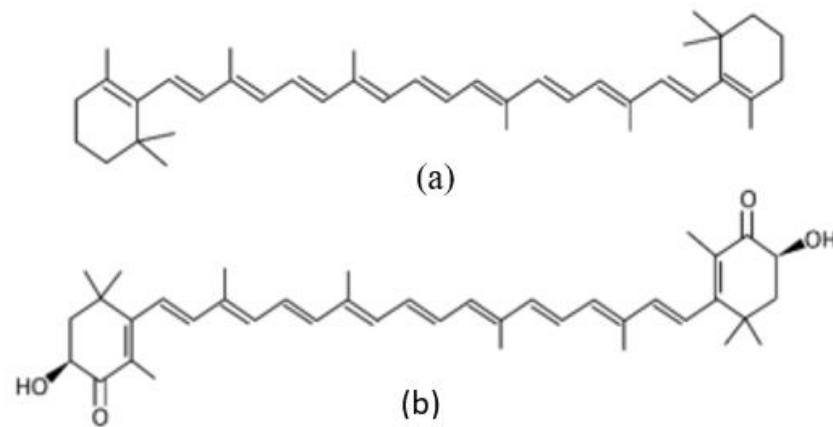
pengolahan, akan menyebabkan isomerisasi, yakni perubahan struktur geometris dari bentuk *trans* menjadi bentuk *cis*. Karotenoid dalam bentuk isomer *cis* akan lebih mudah mengalami oksidasi yang dapat merubah struktur senyawa karotenoid. Panas, cahaya, dan oksigen adalah faktor dominan yang dapat memicu proses isomerisasi, oksidasi, bahkan degradasi dari karotenoid, sementara faktor lainnya adalah keasaman, enzim, dan matriks produk (Syukri, 2021). Penyimpanan karotenoid harus dilakukan di ruang gelap, kondisi vakum dan pada suhu -20°C , selain itu pemanasan dengan suhu di atas 50°C mengakibatkan proses degradasi karotenoid (Butnariu, 2016). Penyimpanan terbaik adalah penyimpanan dalam bentuk kristal (serbuk), seperti yang dilakukan oleh Rifqi *et al.* (2019) melakukan enkapsulasi β -karoten menggunakan maltodextrin.

Karotenoid memiliki sifat yang dapat menyerap sinar uv-vis dan bersifat non polar, sehingga kelarutannya rendah di dalam pelarut air. Secara spektroskopi, karotenoid memiliki serapan sinar pada panjang gelombang 400-550 nm dan memberikan warna kuning sampai merah (Syukri, 2021). Karotenoid umumnya memiliki 40 atom karbon (C40 karotenoid). Namun ada sedikit karotenoid yang memiliki atom karbon antara 45 sampai 50 unit yang disebut karotenoid kelas tinggi (*higher carotenoid*) dan ada juga kelompok senyawa apokarotenoid yang memiliki jumlah atom kurang dari 40 unit, namun jumlah senyawa ini sangat sedikit.

2.5.1. Jenis Karotenoid

Karotenoid diklasifikasikan menjadi dua kelompok (Saini, 2018), yakni :

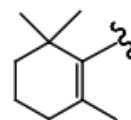
1. Karotenoid hidrokarbon (karoten), memiliki struktur yang murni hidrokarbon (hanya atom hidrogen dan atom karbon) seperti α -karoten, β -karoten, γ -karoten, dan likopen.
2. Karotenoid hidrokarbon teroksidasi, dikenal juga kelompok *xanthophylls*, seperti lutein dan asthaxanthin.



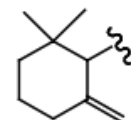
Gambar 5. Perbedaan struktur kimia (a) β -karoten (karoten) dan (b) astaxanthin (karotenoid teroksigenasi) (Mussagy *et al.*, 2022).

Struktur penyusun karotenoid terdiri dari struktur isoprene yang menjadi struktur dasar karoten dan kerangka dasar yang terdiri dari rantai poliena dan grup ujung penyusun karotenoid. Struktur senyawa kelompok karoten dan karotenoid teroksigenasi dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 5, kelompok karoten hanya terdiri dari susunan atom hidrogen dan karbon, sementara kelompok xantofil memiliki atom oksigen berjumlah satu, dua, dan bahkan tiga pada ujung grup yang melekat pada rantai poliena baik pada ujung grup 1 atau ujung grup 2.

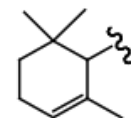
Struktur β (beta)



Struktur γ (gamma)



Struktur ϵ (epsilon)



Gambar 6. Beberapa struktur grup ujung pada senyawa karotenoid (Syukri, 2021).

Senyawa karotenoid memiliki dua buah grup setiap ujungnya, ada tujuh jenis grup ujung karotenoid yang umum dan akan memberikan karakter penamaan.

Sebagai contoh senyawa α -karotene memiliki ujung grup struktur β - dan struktur ϵ , sementara senyawa β -karoten memiliki struktur β - di kedua ujung grupnya. Karoten akan larut lebih baik di dalam pelarut organik seperti heksana dan etil asetat, sementara karotenoid teroksigenasi memiliki kelarutan cukup baik di pelarut organik aseton dan alkohol. Karakter kelarutan ini yang akan menentukan jenis pelarut yang akan digunakan saat proses ekstraksi.

Tabel 3. Jenis Karotenoid dan Karakter Warnanya

No	Jenis Karotenoid	Karakter Warna	Jenis Karotenoid
1	α -Karoten	Kuning	Karoten
2	β -Karoten	Oranye	Karoten
3	γ -Karoten	Merah-Oranye	Karoten
4	ζ -Karoten	Kuning Pucat	Karoten
5	Likopen	Merah	Karoten
6	Lutein	Kuning	Karoten Teroksigenasi
7	Zeaxanthin	Kuning oranye	Karoten Teroksigenasi
8	Astaxanthin	Merah	Karoten Teroksigenasi
9	Ficoxanthin	Coklat	Karoten Teroksigenasi

Sumber : Syukri, 2021

2.5.2. Sifat Fungsional β -Karoten

Bahan-bahan alam adalah sumber terbaik karotenoid, seperti wortel dengan kandungan β -karoten 49 – 65%, minyak sawit 54,4 %, ubi rambat 92 – 95 %, minyak buriti 79,2 % (Singh and Sambyal, 2022) mikroalga *Dunaliella salina* (49.600 mg/kg), dan jamur *Blakeslea trispora* (67.00 mg/kg) (Nabu et al., 2021). Saat ini senyawa β -karoten dapat dihasilkan dari tiga proses (Singh and Sambyal, 2022) :

1. Ekstraksi dari bahan-bahan alam seperti minyak sawit, wortel, dan ubi jalar menggunakan solven. Pada proses ini produk yang didapatkan (*yield*) lebih rendah jika dibandingkan proses lainnya.
2. Sintesis bahan kimia, metode ini menghasilkan *yield* β -karoten yang cukup tinggi apabila dibandingkan dengan dua metode lainnya. Metode ini dikembangkan oleh perusahaan Roche (metode *Grignard coupling*) dan BASF (reaksi Witting). *Yield* yang dihasilkan cukup tinggi, namun

membutuhkan biaya yang lebih mahal diantara ekstraksi bahan alam atau mikroba.

3. Biosintesis mikroba, menggunakan mikroalga, jamur atau bakteri. Biaya pada proses ini lebih murah, namun sumbernya terbatas.

Menurut Syukri (2021) sifat fungsional dari β -karoten adalah sebagai berikut :

1. Provitamin A

Tubuh manusia memiliki kemampuan dalam mengkonversi β -karoten menjadi vitamin A (retinol) dengan bantuan enzim 15, 15'- β -karotenoid oksigenase (Damayanti *et al.*, 2014). Ada tiga jenis karotenoid yang memiliki korelasi dengan pembentukan vitamin A (retinol) di dalam tubuh manusia yakni α -karoten, β -karoten, β -cryptoxanthin. Hanya β -Karoten senyawa yang karotenoid yang paling bagus sebagai provitamin A.

2. Antioksidan

Karotenoid bisa berfungsi sebagai antioksidan nonpolar karena terdiri dari rantai hidrokarbon yang terhubung dengan ikatan rangkap terkonjugasi.

3. Anti kanker

Mengonsumsi sayuran dan buah-buahan yang mengandung karotenoid, khususnya β -karotene dapat menurunkan resiko penyakit kanker hingga 20%. Kemampuan anti kanker dari senyawa karotenoid berkaitan dengan aktifitas antioksidan dari senyawa itu sendiri dan secara tidak langsung meningkatkan sistem imun tubuh.

4. Pewarna pangan

Pengolahan makanan dengan cara pemanasan dapat mengakibatkan perubahan warna dan menurunkan ketertarikan konsumen. Untuk menghasilkan produk yang memiliki nilai jual tinggi dan menarik, maka diberikan pewarna pangan, bahan aditif yang berfungsi untuk memberikan kesan warna yang lebih dominan atau mempertahankan suatu karakter warna pada makanan.

Tabel 4. Sifat Fisika dan Kimia β -Karoten

No	Parameter	Nilai
1	Nama	Beta-Karoten
2	Rumus Kimia	$C_{40}H_{56}$
3	Berat Molekul	536,9 g/mol
4	Bentuk Dasar	Padatan
5	Kelarutan dalam air	0,00039 g/L
6	Toksistas	$LD_{50} > 5000$ mg/kg

Sumber : Syukri, 2021

2.6. Ekstraksi

Ekstraksi atau *leaching* adalah proses pemisahan zat (*solute*) yang diinginkan atau tidak diinginkan dalam zat padat dengan menggunakan pelarut (*solution*) (Geankoplis, 2018). Karakteristik dari matriks sampel (kadar air, tingkat kekerasan dinding sel, dan komposisi karotenoid) dan parameter ekstraksi (solven, tekanan, dan suhu) merupakan faktor yang penting dalam menunjang hasil ekstraksi. Selain karakteristik tersebut, ada lima hal yang harus diperhatikan ketika akan melakukan ekstraksi karotenoid (Saini, 2018) yaitu :

1. *Neutralizer*, seperti kalsium karbonat ($CaCO_3$), sodium bikarbonat ($NaHCO_3$), atau magnesium karbonat ($MgCO_3$) sebaiknya ditambahkan selama ekstraksi untuk menetralkan asam yang berasal dari sampel tumbuhan, karena menyebabkan isomerisasi.
2. Antioksidan, seperti *tert-butylhydroquinone* (TBHQ), *butylated hydroxytoluene* (BHT), *pyrogallol* atau *ascorbyl palmitate*, sebaiknya ditambahkan ke dalam solven dengan konsentrasi 0,1% (w/v) untuk mencegah karotenoid teroksidasi (Paradiso *et al.*, 2020).
3. Minimalisasi jeda waktu antara maserasi dan ekstraksi untuk mencegah oksidasi enzimatis, serta mempersingkat waktu ekstraksi dengan suhu yang direkomendasikan.
4. Melindungi sampel dari paparan langsung sinar UV, karena dapat menyebabkan *trans-cis* fotoisomerisasi dan fotodestruksi.
5. Membilas (*flushing*) tabung sampel menggunakan N_2 selama ekstraksi untuk menghilangkan oksigen dan membuat kondisi inert.

Dinding sel yang keras pada tumbuhan, kandungan protein dan asam lemak merupakan penghambat masuknya pelarut ke dalam sel. Oleh karena itu, penghalang tersebut perlu dihilangkan dengan *pretreatment* secara fisika, kimia, dan enzimatis atau biologi. Saponifikasi dilakukan untuk menghilangkan xantofil terseterifikasi, klorofil, dan lipid menggunakan KOH dengan proses panas (56°C, 20 menit) ataupun proses dingin (25°C, 16 jam) (Inbaraj *et al.* (2008) dalam Saini, 2018). Proses panas dapat memicu isomerisasi, sementara proses dingin memakan waktu cukup lama. Saponifikasi tidak diperlukan untuk sampel yang sedikit mengandung lipid dan xantofil ester, karena saponifikasi menyebabkan degradasi dan berkurangnya jumlah karotenoid. Saponifikasi tidak memberikan hasil karotenoid yang signifikan dibandingkan tanpa saponifikasi (Watanabe *et al.*, 2011). Waktu pemanasan yang lama atau temperatur di atas 50°C menyebabkan degradasi lebih cepat dari isomerisasi (Butnariu, 2016).

2.6.1. Metode Ekstraksi

Ada banyak metode yang dapat digunakan untuk mengekstrak karotenoid, berikut beberapa metode ekstraksi yang umum digunakan (Saini *and* Keum, 2018) :

1. *Atmospheric liquid extraction with maceration* ; maserasi merupakan proses perendaman sampel menggunakan pelarut organik pada suhu ruang. Maserasi lebih mudah dibandingkan metode lain, karena tidak membutuhkan panas selama proses ekstraksi, sehingga degradasi termal karotenoid dapat dihindarkan dan meminimalisasi waktu kontak antara solven dan sampel.
2. *Soxhlet extraction* ; merupakan salah satu jenis *atmospheric liquid extraction*, biasanya digunakan untuk mengevaluasi kinerja metode lain. Ekstraksi soxhlet memanfaatkan pelarut pada suhu didih dan tekanan rendah (*ambient pressure*), namun membutuhkan waktu cukup lama dan solven lebih banyak. Temperatur yang tinggi dan waktu ekstraksi yang lama beresiko terjadi degradasi termal dan isomerisasi *trans-cis*.

3. *Microwave-assisted extraction (MAE)*; merupakan metode yang sederhana, cepat, dan ekonomis karena membutuhkan solven dan waktu yang lebih sedikit. MAE dapat lebih optimal dengan memperhatikan *power microwave*, volume solven, dan rasio intermiten radiasi.
4. *Ultrasound-assisted extraction (UAE)* dapat diaplikasikan di banyak pengolahan makanan, ekstraksi metabolit intraseluler, dan inaktivasi mikroba. UAE dapat dioptimasi dengan memperhatikan *power ultrasonic*, intensitas, suhu, dan densitas.
5. *Enzyme-assisted extraction (EAE)* menggunakan enzim hidrolitik untuk memecah struktural dinding sel sehingga bahan intraseluler terekspos. Umumnya menggunakan enzim selulase dan pektinase.

Tabel 5. Perbandingan kelebihan dan kekurangan berbagai metode ekstraksi

No	Metode ekstraksi	Kelebihan	Kekurangan
1	<i>Atmospheric liq extraction with maceration</i>	Hasil ekstraksi tinggi tanpa instrumen canggih	Membutuhkan banyak solven
2	<i>Soxhlet extraction</i>	Sederhana dan memiliki rekovery karotenoid tertinggi	Waktu yang lama dan solven yang cukup banyak
3	<i>Microwave-assisted extraction (MAE)</i>	Sederhana, cepat, dan ekonomis	Dapat menyebabkan termal degradasi dan isomerisasi
4	<i>Ultrasound-assisted extraction (UAE)</i>	Cepat, <i>non-thermal</i> , dan efisien	Ukuran partikel 50 μm untuk mencapai hasil yang optimal
5	<i>Enzyme-assisted extraction (EAE)</i>	Cepat dan efisien, jumlah solven sedikit	Biaya yang cukup mahal

Sumber : Saini and Keum, 2018

2.6.2. Bahan Pengekstrak (*Solvent*)

Secara konvensional, solven atau pelarut organik digunakan untuk ekstraksi karotenoid, seperti aseton, klorofom, hexan, isopropanol, methanol, metilen klorida, dan dietil eter. Saat ini telah banyak digunakan campuran solven yang memiliki efek positif pada proses ekstraksi, namun perlu dipertimbangkan

dengan baik seperti polaritas, panjang rantai karotenoid, matriks sampel, komponen penyusun, dan kandungan airnya.

β -karoten dan likopen (kelompok karoten) termasuk jenis karotenoid non-polar lipofilik, pelarut yang baik digunakan adalah pelarut non-polar seperti n-heksana, diklorometan, dan etilasetat sementara karotenoid polar (kelompok xantofil) sebaiknya menggunakan pelarut polar seperti aseton dan etanol. Ekstraksi karotenoid menggunakan solven campuran juga sudah banyak digunakan untuk berbagai riset seperti aseton/diklorometan, aseton/etanol, aseton/hexan, etanol/aseton/hexan/toluen (Amorim-Carrilho *et al.*, 2014). Pada penelitian yang dilakukan oleh Sun *et al.* (2011) tentang pengaruh berbagai pelarut pada ekstraksi β -karoten dari kulit jeruk, didapatkan bahwa pelarut diklorometan memiliki *yield* yang lebih tinggi pada proses ekstraksi konvensional jika dibandingkan pelarut lain seperti etanol, etilasetat, heksana, dan tetrahidrofur (THF).

Disisi lain, pelarut yang digunakan pada proses ekstraksi memiliki potensi bahaya (*hazard*) bagi lingkungan, kesehatan, dan keamanan, seperti ancaman pencemaran air, iritasi, keracunan akut, dan ledakan. Berdasarkan potensi bahaya tersebut, maka pelarut etanol dan aseton lebih direkomendasikan dibanding pelarut lain (Alfonsi *et al.*, 2008; Capello *et al.*, 2007 dalam Saini, 2018). Untuk menghasilkan senyawa karotenoid yang aman dari sisa pelarut, direkomendasikan untuk menggunakan pelarut *food grade* yakni etanol (Butnariu, 2016). Demi keberlanjutan lingkungan, pelarut hijau (*green solvent*) dan cairan ionik (*ionic liquids*) sebaiknya digunakan untuk ekstraksi karotenoid atau biokomponen lainnya.

Tabel 6. Sifat fisis dan kimia pelarut heksana dan diklorometana

	Heksana	Diklorometana
Rumus Kimia	C ₆ H ₁₄	CH ₂ Cl ₂
Berat Molekul (g mol ⁻¹)	86.18	84.39
Titik Didih (°C)	69	40
Titik Leleh (°C)	-95	-97
Relatif Densitas	0.7	1.33
Solubilitas (mg L ⁻¹)	9.5	13000
Tekanan uap (kPa)	17	47.4

Sumber : PubChem, 2023

2.7. Reaktivasi Adsorben

Aktivasi adalah proses pengaktifan struktur dan pori *bleaching earth*, sehingga memiliki kemampuan menyerap, sementara reaktivasi adalah proses pengaktifan kembali *spent bleaching earth* agar memiliki karakteristik yang menyerupai *fresh bleaching earth*. Aktivasi atau reaktivasi dapat dilakukan secara kimia dan secara fisika dengan pemanasan (kalsinasi). Agen aktivasi kimia yang biasa digunakan adalah HCl atau H₂SO₄. Aktivasi secara fisika dilakukan dengan pemanasan hingga suhu 500°C, tidak direkomendasikan pemanasan lebih dari 500°C karena dapat mengubah struktur dan mengakibatkan turunnya daya adsorpsi (Siddiqui, 1968). Penelitian yang dilakukan oleh Phey-phey *et al.* (2022), menghasilkan SBE yang direaktivasi secara fisika dengan pemanasan 500°C menghasilkan daya adsorpsi yang lebih besar dibandingkan dengan suhu 400°C, 650°C, dan 800°C selama 2 jam. Kalsinasi dengan suhu di bawah 500°C juga dilakukan oleh Soetaredjo *et al.* (2021), dengan variasi suhu 150°C, 250°C, dan 300°C sampai kandungan air hingga 12% menghasilkan daya serap yang cukup baik.

2.8. Impregnasi

Impregnasi adalah metode penjejutan zat tertentu secara total untuk mengisi pori-pori penyangga dalam larutan logam aktif melalui adsorpsi logam (merendam penyangga dalam larutan logam aktif) sehingga memiliki komponen aktif yang terdistribusi rata dan luas permukaan yang besar (Rahayu dkk, 2021). Aktivasi secara kimia bertujuan untuk menghilangkan logam-logam pengotor. Penelitian yang dilakukan Rahayu dkk (2021) menunjukkan hasil optimal sintesis adsorben karbon aktif yang diimpregnasi lebih baik daripada sampel yang tidak mengalami impregnasi. Agen aktivasi yang digunakan adalah KOH, ZnCl, dan H₃PO₄.

Penelitian yang dilakukan oleh Yu *et al.* (2012) terkait sintesis adsorben karbon aktif berbasis tembaga (Cu/AC) untuk menjerap *phosphine* (PH₃). Impregnasi karbon aktif dengan Cu²⁺ menggunakan berbagai prekursor seperti Cu(CH₃COO)₂, CuCl₂, Cu(NO₃)₂, CuSO₄ dan berhasil meningkatkan daya serap fosfin jika dibandingkan tanpa impregnasi. Impregnasi juga dilakukan oleh Phey phey *et al.* (2022) yang dilakukan setelah proses kalsinasi, hasilnya menunjukkan RSBE yang diaktivasi dengan kalsinasi dan diikuti impregnasi HNO₃ memiliki daya adsorpsi yang lebih tinggi terhadap gas CO₂ dibandingkan tanpa impregnasi.

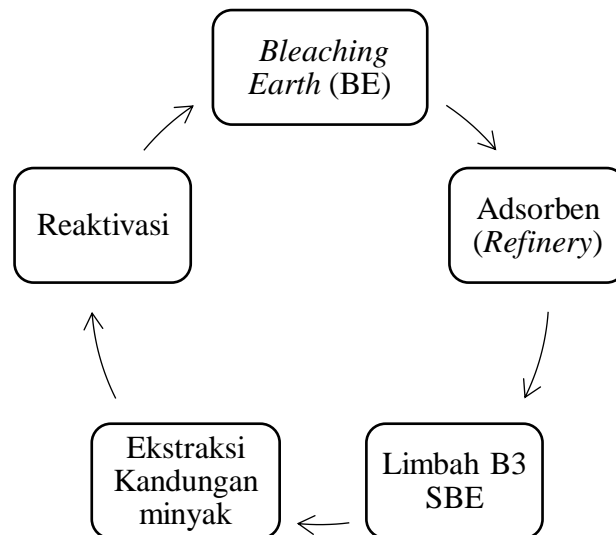
Selain itu, impregnasi BaCl₂ juga pernah dilakukan oleh Tsai *et al.* (2011), Tsai melaporkan bahwa berdasarkan hasil analisis BET pada penambahan BaCl₂ mampu memperbesar luas pori, volume pori total, dan diameter rata-rata pori. Impregnasi BaCl₂ diharapkan mampu memperluas pori SBE karena kation BaCl₂ dapat tertanam di ruang antar lapisan bentonit, meningkatkan jarak antar lapisan dan membentuk struktur pori yang lebih baik (Khenifi *et al.*, 2009).

2.9. *Co-Benefits*

Co-benefits adalah keuntungan berganda pada beberapa aspek yang diperoleh dari sebuah proses pengolahan, kebijakan atau strategi (Hernaningsih, 2010). Contoh keuntungan berganda pada reaktivasi adsorben β -karoten dari limbah SBE adalah mengurangi dampak pencemaran lingkungan, mendapatkan nilai tambah ekonomi, dan memiliki dampak sosial positif ke masyarakat sekitar. Jadi, *co-benefits* pada penelitian ini adalah upaya pengelolaan limbah B3 dengan tetap mendapatkan keuntungan ekonomi, lingkungan, dan sosial. Dengan mengolah kembali limbah SBE, secara tidak langsung sudah menjalankan prinsip tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) dan ekonomi sirkular.

2.9.1. Ekonomi Sirkular

Ekonomi sirkular adalah model atau pendekatan sistem ekonomi yang berupaya memperpanjang siklus hidup dari suatu produk, bahan baku, dan sumber daya yang ada agar dapat dipakai selama mungkin. Penerapan ekonomi sirkular mampu mendorong pertumbuhan ekonomi hijau yang lebih tinggi dibandingkan *business as usual* (Bappenas, 2021). Dalam penelitian ini, *bleaching earth* sebagai adsorben pada penyulingan minyak sawit akan diperpanjang siklus hidupnya dengan berbagai perlakuan, seperti aktivasi fisika, kima, impregnasi dan modifikasi lainnya yang mampu mengembalikan fungsi dan menghilangkan unsur bahaya dan toksik pada limbah SBE. Gambar 7 menjelaskan system ekonomi sirkular BE yang akan dikembangkan agar *co-benefits* yang optimal.



Gambar 7 .Sistem ekonomi sirkular *bleaching earth*.

Pembangunan berkelanjutan adalah konsep pembangunan yang memperhatikan tiga unsur, yakni ekonomi, lingkungan, dan sosial. Ekonomi sirkular adalah perkembangan dari konsep pembangunan berkelanjutan. Irisan antara lingkungan dan ekonomi menjadi lebih luas dengan menjalankan konsep ekonomi sirkular pada pengolahan limbah B3 SBE, dapat mengurangi dampak yang ditimbulkan. Melalui ekonomi sirkular, dapat mencapai lebih banyak dengan menggunakan lebih sedikit.

2.9.2. Investasi dan Analisis Kelayakan

Investasi merupakan dana atau modal yang dibutuhkan untuk membangun sebuah pabrik yang siap beroperasi hingga menghasilkan produk yang siap dipasarkan. Modal terdiri dari total investasi modal (*total capital investment*, TCI) dan total biaya produksi (*total production cost*, TPC). TCI terdiri dari *fixed capital investment* (FCI) dan *working capital investment* (WCI) (Kohler *et al.*, 2021). TPC adalah jumlah dari *manufacturing cost* (MC) dan *general expenses* (GE) (Ifa *et al.*, 2022). Sementara analisis kelayakan adalah instrumen untuk melakukan justifikasi apakah sebuah rencana bisnis menguntungkan atau tidak (Phichitsurathaworn *et al.*, 2021). Pada penelitian ini, analisis kelayakan pengolahan SBE menjadi adsorben β -karoten ditinjau menggunakan *reverse on investment* (ROI), *payback period* (PBP), *net*

present value (NPV), *internal rate of return* (IRR), dan *benefit cost ratio* (BCR).

1. *Fixed Capital Investment* (FCI)

FCI merupakan total biaya yang diperlukan untuk mendirikan fasilitas-fasilitas pabrik secara fisik (belum beroperasi), seperti instalasi peralatan proses, Gedung dan peralatan lainnya. FCI terdiri dari biaya langsung (*Direct Cost*) dan biaya tidak langsung (*Indirect Cost*) (Ifa *et al.*, 2022). Biaya langsung adalah biaya untuk pembangunan pabrik seperti lahan, bangunan, alat, instrument, perpipaan. Sementara biaya tidak langsung seperti biaya teknik dan supervisi, biaya kontraktor, dan biaya *start up* (Ifa *et al.*, 2020).

2. *Working Capital Investment* (WCI)

WCI adalah biaya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan suatu bisnis, yang meliputi inventori bahan baku, inventori proses, inventori produk, kredit, uang diterima (*account receivable*); uang tunai untuk pembayaran. Umumnya WCI adalah 10-15% dari TCI. TCI juga dapat diperoleh dengan cara FCI dibagi 0,85, jika WCI nya 15% TCI (Ifa *et al.*, 2022).

$$\text{WCI} = 15 \% \times \text{TCI}$$

$$\text{TCI} = \text{FCI} + \text{WCI}$$

$$\text{TCI} = \text{FCI} + (0,15 \times \text{TCI})$$

$$\text{TCI} = \text{FCI} / 0,85$$

3. *Manufacturing Cost* (MC)

MC adalah jumlah dari biaya produksi langsung atau *direct manufacturing cost* (DMC), biaya produksi tidak langsung atau *indirect manufacturing cost* (IMC), dan biaya produksi tetap atau *fixed manufacturing cost* (FMC). DMC adalah biaya yang digunakan untuk pembiayaan langsung suatu proses, seperti bahan baku, buruh dan *supervisor*, perawatan, utilitas dan lain-lain. IMC adalah biaya yang dikeluarkan untuk mendanai hal-hal yang secara tidak langsung membantu proses produksi, seperti depresiasi, *local taxes*, dan asuransi. FMC adalah biaya yang tetap dikeluarkan baik pada saat pabrik memproduksi maupun tidak, biaya ini meliputi depresiasi, pajak dan asuransi

(Phichitsurathaworn *et al.*, 2021). Nilai MC dapat diperoleh menggunakan persamaan Berikut (Ifa *et al.*, 2022) :

$$MC = DMC + IMC + FMC$$

4. *General Expenses (GE)*

Selain biaya produksi, ada juga biaya umum yang meliputi administrasi, biaya pemasaran, dan biaya R&D. Nilai GE dapat dihitung menggunakan persamaan Berikut (Ifa *et al.*, 2020) :

$$GE = \text{biaya adminitrasi (3\% MC)} + \text{biaya pemasaran (5\% MC)} + \text{R\&D (3.5\% MC)}$$

5. *Reverse on Investment (ROI)*

ROI merupakan perkiraan keuntungan yang dapat diperoleh per tahun didasarkan pada kecepatan pengembalian modal tetap yang diinvestasikan (Peters *and* Timmerhaus, 1991). ROI dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ini (Low *et al.*, 2022) :

$$ROI = \frac{\text{Profit}}{\text{FCI}} \times 100\%$$

6. *Payback Period (PBP)*

PBP merupakan waktu minimum teoritis yang dibutuhkan untuk pengembalian modal tetap yang diinvestasikan atas dasar keuntungan setiap tahun setelah ditambah dengan penyusutan dan dihitung dengan menggunakan metode linier (Peters *and* Timmerhaus, 1991). PBP dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ini (Low *et al.*, 2022) :

$$PBP = \frac{\text{FCI}}{\text{Profit} + (0,1 \times \text{FCI})}$$

7. *Net Present Value (NPV)*

Net Present Value atau NPV adalah jumlah dari nilai *cash flow* pada tahun t dikurangi biaya pada tahun t (Pasaribu dan Sukandar, 2017). NPV mempertimbangkan nilai uang terhadap waktu dan terdapat variasi pengeluaran dan pendapatan tahunan (Towler *and* Sinnott, 2013). NPV dapat dihitung menggunakan *spreadsheet* atau dengan persamaan (Kpalo *et al.*, 2022) :

$$NPV = \sum_{n=0}^{n=t} \frac{Cf_n}{(1+i)^n}$$

Keterangan :

Cf_n : *Cash flow* pada tahun ke n
 r : suku bunga (%)
 n : tahun ke

Nilai NPV positif menggambarkan bahwa proyek tersebut layak, namun jika nilai NPV nya negatif maka proyek tersebut ditolak atau tidak layak (Kpalo *et al.*, 2022).

8. *Internal Rate of Return (IRR)*

IRR adalah nilai suku bunga saat nilai NPV sama dengan 0 (Kpalo *et al.*, 2022). Nilai dapat diperoleh menggunakan spreadsheet atau persamaan di bawah ini :

$$\sum_{n=0}^{n=t} \frac{Cf_n}{(1 + irr)^n} = 0$$

9. *Benefit Cost Ratio (BCR)*

BCR adalah analisis perbandingan antara biaya yang dikeluarkan dan manfaat dari skenario pemanfaatan SBE sebagai adsorben (Pasaribu dan Sukandar, 2017). Analisis ini dilakukan dengan persamaan BCR sebagai berikut :

$$B/C = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1 + i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1 + i)^t}}$$

Keterrangan :

B_t : nilai manfaat hingga tahun ke t

C_t : nilai biaya hingga tahun ke t

i : *discount rate* (tingkat diskonto)

Sebuah investasi dilakukan layak apabila nilai BCR nya lebih dari 1 (Kpalo *et al.*, 2022).

2.9.3. Aspek Lingkungan

Spent bleaching earth (SBE) merupakan limbah B3 yang dihasilkan dari industri pengolahan minyak kelapa sawit. Selama ini pengolahan SBE hanya

disimpan di dalam tanah tanpa ada pengolahan terlebih dahulu. Menurut Yung *et al.* (2020) dampak buruk terhadap lingkungan dari SBE apabila tidak diolah secara benar adalah sebagai berikut :

1. Meningkatkan emisi gas rumah kaca
2. Meningkatkan pencemaran PM 2,5
3. Meningkatkan emisi Cobalt-60 ke udara
4. Meningkatkan emisi NO_x
5. Meningkatkan emisi SO₂
6. Beresiko pencemaran tanah dan air

2.9.4. Aspek Sosial

Aspek sosial adalah aspek yang ditinjau dalam konsep pembangunan. Dimensi sosial merupakan pilar utama dalam menjalankan pembangunan yang berkelanjutan. Dampak sosial dari pengolahan limbah B3 SBE menjadi adsorben mampu meningkatkan rasa *trust* masyarakat kepada perusahaan, meningkatkan kesejahteraan dengan adanya lapangan pekerjaan baru, melindungi kesehatan masyarakat dari ancaman bahaya limbah B3, dan memanfaatkan β-karoten yang berhasil dijerap sebagai sumber vitamin A bagi masyarakat sekitar dalam bentuk CSR. Selain itu, aspek kelembagaan juga memiliki peran yang sangat penting karena terkait kebijakan yang akan mengatur pengolahan SBE dari hulu ke hilir. Kerjasama antar kelembagaan, dapat mempercepat tercapainya pembangunan berkelanjutan melalui sirkular ekonomi. Beberapa lembaga yang terlibat dalam perumusan rencana strategis pengolahan limbah B3 SBE adalah :

1. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melalui Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah, dan B3 (DITJEN PSLB3) sebagai regulator.
2. Kementerian Keuangan melalui Badan Pengelolaan Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) sebagai sumber pendanaan pengembangan riset.
3. Industri melalui Asosiasi Pengusaha Indonesia (APINDO) dan Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI), Gabungan

Industri Minyak Nabati Indonesia (GIMNI), Asosiasi Industri Minyak Makan Indonesia (AIMMI), dan Asosiasi Produsen Oleochemical Indonesia (APOLIN)

4. Lembaga pendidikan dan penelitian, seperti universitas, lembaga penelitian atau badan riset lainnya.
5. Pemerintah Kabupaten/Kota dan Provinsi dan masyarakat sekitar perkebunan dan atau industri pengolahan minyak sawit.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu

Penelitian ini sudah dilakukan di Laboratorium Analisis dan Instrumentasi, Kimia Terapan Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknis, Universitas Lampung pada bulan Mei 2023.

3.2. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini meliputi satu set CDR *palm oil tester*, *soxhlet*, *rotary evaporator*, *hot plate & stirrer*, oven, timbangan digital, gelas kimia, gelas ukur berbagai ukuran. CDR *palm oil tester* digunakan untuk mengukur parameter kualitas CPO dan minyak yang dihasilkan seperti β -karoten, FFA, DOBI, *peroxide value*, *iodine value*, dan *anisidine value*. Ekstraksi β -karoten dari RBE menggunakan *soxhlet*, sementara pemisahan antara *dichlorometane* (DCM) dan β -karoten menggunakan *rotary evaporator*. *Hot plate & stirrer* digunakan untuk mencampur sekaligus memanskan RBE dan CPO, oven digunakan pada saat proses filtrasi campuran RBE dan CPO. Timbangan digital digunakan untuk mengukur massa sampel, sementara gelas kimia dan gelas ukur masing-masing digunakan untuk penampungan sampel dan pengukuran volume larutan.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah RBE, CPO, DCM, dan kertas Whatman. RBE yang digunakan pada penelitian ini dihasilkan dari proses reaktivasi SBE dengan proses impregnasi (RBE-Ba) dan tanpa impregnasi (RBE). CPO sebagai sumber β -karoten diperoleh dari PT PN VII

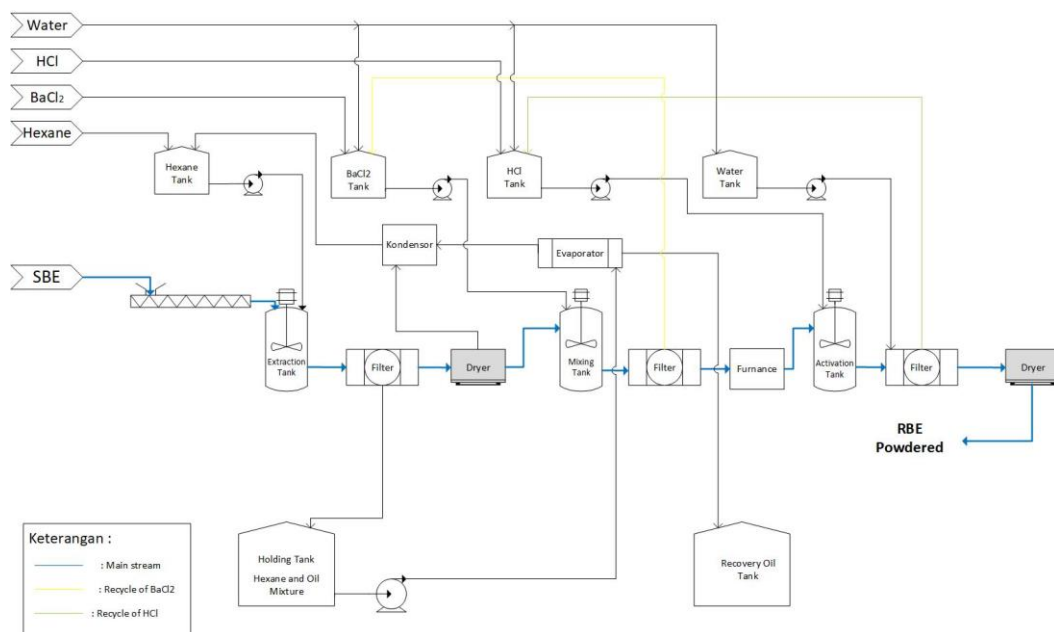
Unit Bekri, sementara DCM adalah pelarut organik untuk mengekstraksi β -karoten. Kertas whatman digunakan untuk menyaring campuran RBE dan CPO dari proses adsorpsi.

3.3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan SBE yang didapatkan dari PT Wahana Citra Nabati dan PT Tunas Baru. Metode reaktivasi yang digunakan adalah metode kombinasi antara aktivasi fisika dan kimia untuk mendapatkan permukaan pori yang lebih luas dan meningkatkan daya jerap. Tahapan proses reaktivasi adalah ekstraksi minyak residu dalam SBE menggunakan pelarut heksana, impregnasi, aktivasi fisika dengan kalsinasi pada suhu 600°C selama 60 menit, dan aktivasi kimia menggunakan larutan asam klorida (HCl) 10% sebagai aktivatornya (Iryani *et al.*, 2022).

Sebelum diekstraksi, SBE dipanaskan dalam oven selama 150 menit pada suhu 105°C , kemudian diayak menggunakan filter berukuran 100 mesh. Pemanasan dan penyaringan SBE sebelum reaktivasi juga dilakukan oleh Ke *et al.* (2023), yang memanaskan SBE pada suhu 105°C sebelum pirolisis. Kandungan minyak residu (*residual oil*) dalam SBE diekstrak menggunakan pelarut non polar heksana, dengan rasio SBE dan pelarut 1 : 2 (massa / volume). Proses ekstraksi menggunakan *ultrasonic cleaner* selama 45 menit pada suhu $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Hasil ekstraksi kemudian difiltrasi untuk mendapatkan minyak residu sebagai filtrat, yakni cairan yang lolos melalui filter dan *deoiled spent bleaching earth* (DOBE) sebagai residu yang tertahan di atas filter. DOBE dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam. Selanjutnya larutan Barium Diklorida (BaCl_2) 5% digunakan sebagai media impregnasi dengan rasio DOBE dan BaCl_2 5% adalah 1 : 5 (g mL^{-1}). Tujuan impregnasi adalah mendapatkan diameter pori yang besar dan permukaan yang luas. Impregnasi dilakukan menggunakan refluks pada suhu 70°C selama 30 menit. Hasil dari impregnasi kemudian dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam dan disebut Ba-DOBE, sementara tanpa impregnasi tetap disebut DOBE.

DOBE dan Ba-DOBE kemudian dipanaskan menggunakan tanur (*furnance*) hingga suhu 600°C selama 60 menit dan diikuti aktivasi secara kimia menggunakan larutan HCl 10% dengan rasio DOBE dan HCl 1 : 5 (g mL^{-1}). Produk dari proses reaktivasi ini disebut sebagai *reactivated bleaching earth* (RBE) dan *reactivated bleaching earth-barium impregnated* (RBE-Ba). Pada tahap akhir, RBE dan RBE-Ba dibilas menggunakan aquades hingga pH nya netral dan dikeringkan kembali menggunakan oven pada suhu 105°C selama 24 jam. *Process Flow Diagram* reaktivasi SBE menjadi RBE pada skala industri tersaji pada Gambar 8. Setelah mendapatkan RBE, uji karakteristik dilakukan untuk membandingkan sifat fisis dan sifat kimia antara BE, SBE, RBE, dan RBE-Ba. RBE yang terbaik berdasarkan sifat fisis dan kimia dipilih sebagai adsorben untuk menyerap β -karoten.



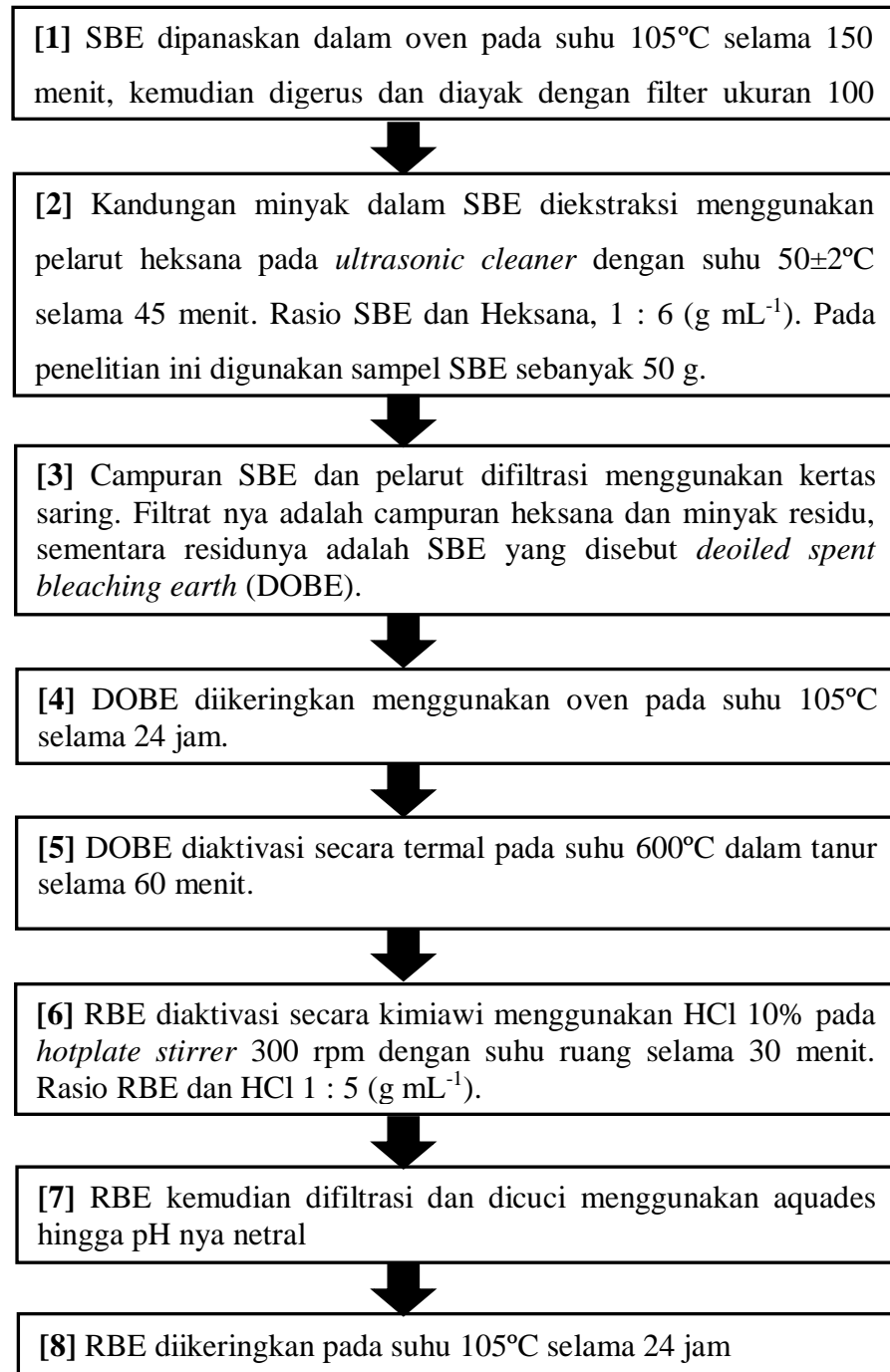
Gambar 8. *Process flow diagram* reaktivasi *bleaching earth* (RBE)

Setelah mendapatkan RBE yang terbaik, selanjutnya adalah proses adsorpsi atau penjerapan β -karoten dari CPO menggunakan RBE dan desorpsi atau ekstraksi β -karoten dari RBE menggunakan pelarut *dichloro methane* (DCM). RBE yang digunakan pada proses adsorpsi adalah 3% dari massa CPO, kemudian RBE dan CPO diaduk menggunakan *hotplate* dengan *stirrer*

120 rpm pada suhu 45°C selama 60 menit (Nga *et al.*, 2022). Desorpsi β -karoten dari RBE menggunakan pelarut DCM dengan rasio RBE dan DCM adalah 1 : 6 (g mL^{-1}), proses desorpsi menggunakan *Soxhlet* selama 8 jam pada suhu 50°C. Campuran antara DCM dan β -karoten yang diperoleh dari proses soxhletasi kemudian dipisahkan menggunakan *rotary evaporator* pada suhu 45°C selama 30 menit. Sebelum adsorpsi β -karoten, dilakukan pengukuran awal konsentrasi *free fatty acid* (FFA), DOBI, karoten, *iodine value* (IV), *peroxide value* (PV), dan *anisidine value* (AV) pada CPO, kemudian dilakukan pengukuran kembali parameter yang sama pada filtrat CPO dan rendemen minyak (karotenoid) yang didapatkan. Filtrat CPO adalah minyak CPO yang lolos melewati filter atau kertas saring, sementara rendemen minyak adalah minyak yang diperoleh dari hasil ekstraksi RBE menggunakan DCM. Tahap akhir adalah menganalisis tekno-ekonomi, manfaat lingkungan, dan manfaat sosial dari penelitian ini.

3.3.1. Metode Reaktivasi SBE Tanpa Impregnasi

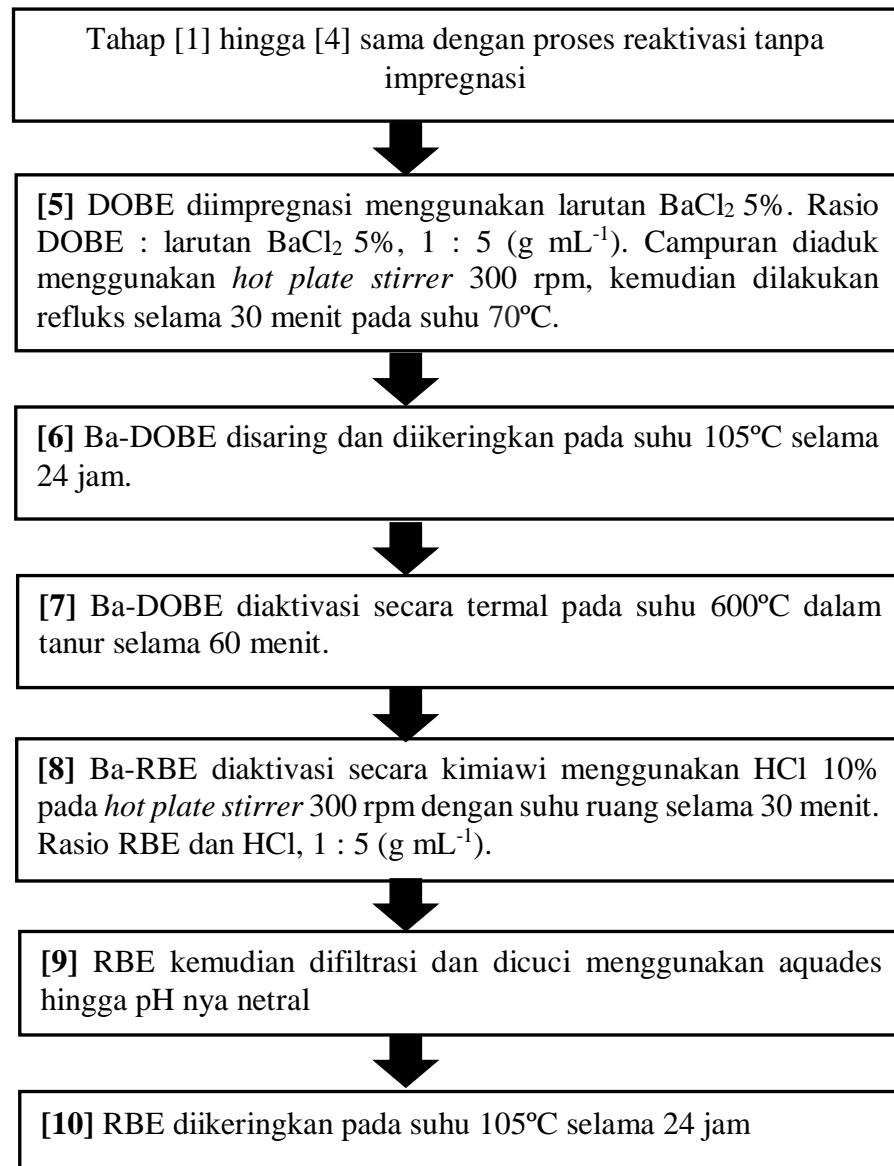
Proses reaktivasi SBE secara fisika menggunakan tanur dan secara kimia menggunakan HCl tersaji pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram alir reaktivasi SBE tanpa impregnasi

3.3.2. Metode Reaktivasi SBE Dengan Impregnasi

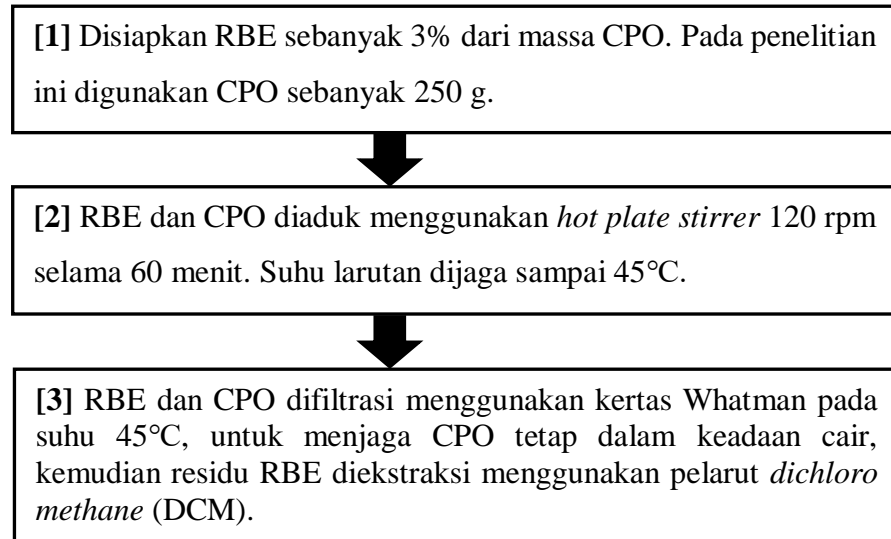
Proses impregnasi BaCl₂, dan reaktivasi SBE menjadi RBE tersaji pada Gambar 10. Pada proses ini, tahap 1 hingga tahap 4 pada Gambar 9.



Gambar 10. Diagram alir reaktuiisasi SBE dengan impregnasi

3.3.3. Metode Adsorpsi β -Karoten

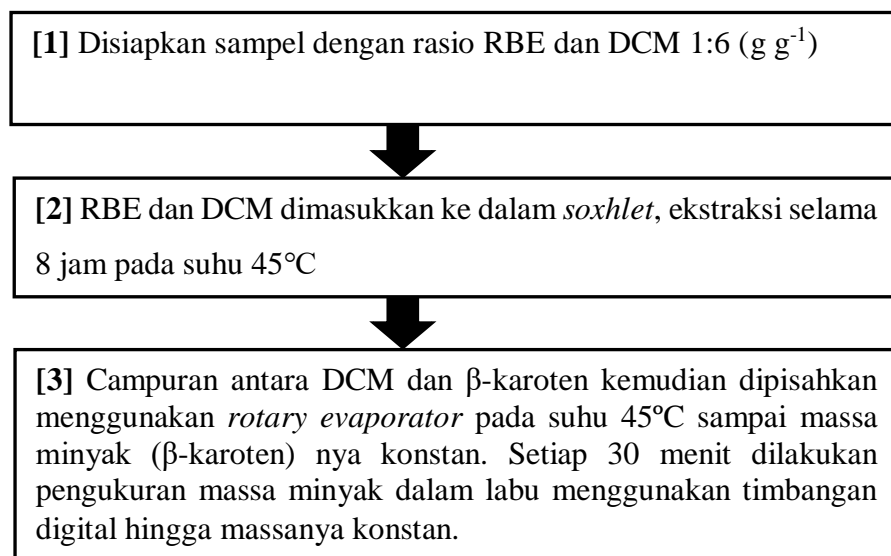
Proses adsorpsi β -karoten menggunakan RBE dan RBE-Ba tersaji pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram alir Adsorpsi β -Karoten

3.3.4. Metode Ekstraksi (Desorpsi) β -Karoten

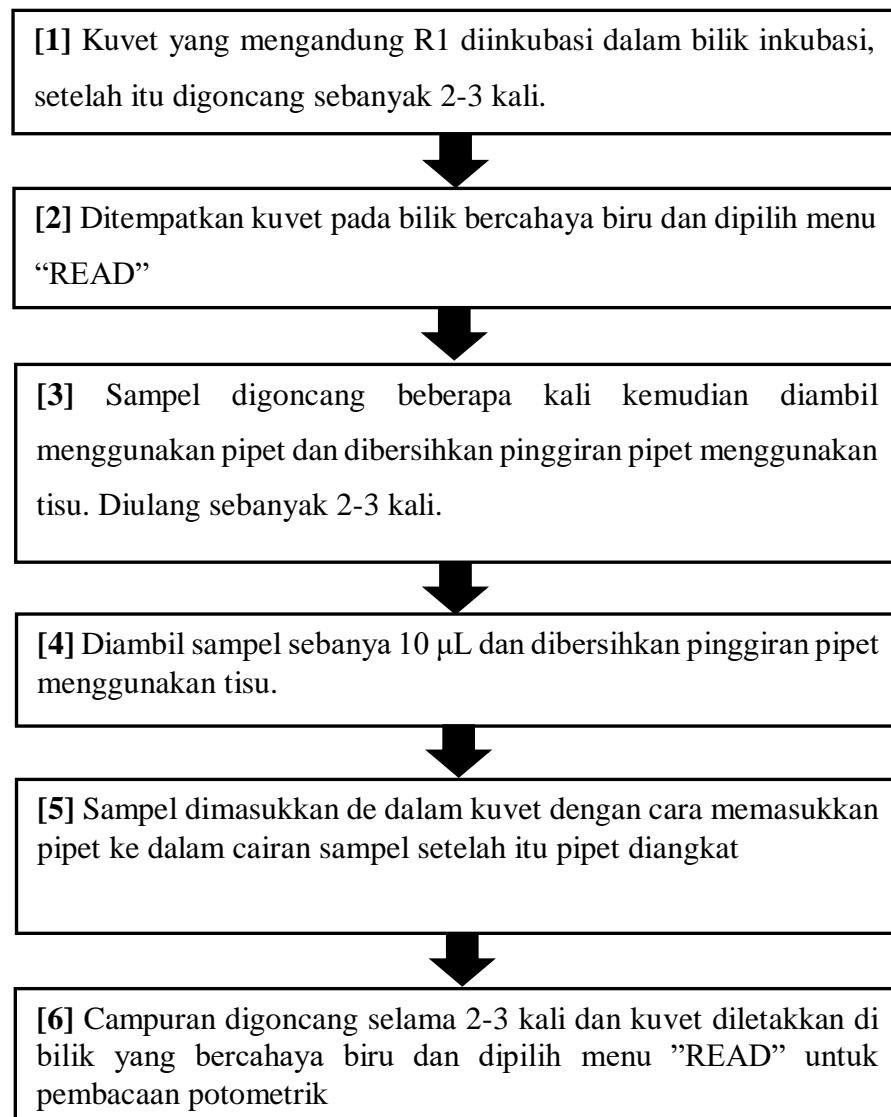
Proses ekstraksi atau desorpsi β -karoten menggunakan pelarut DCM tersaji pada Gambar 12.



Gambar 12. Diagram alir ekstraksi atau desorpsi β -karoten

3.3.5. Metode Pengukuran Kadar β -karoten

Pengukuran β -karoten menggunakan alat *CDR Palm Oil tester*. Berikut adalah prosedur pengukuran kadar β -karoten dan DOBI menggunakan alat *CDR Palm Oil Tester* berdasarkan buku panduan alat :



Gambar 13. Diagram alir pengukuran β -karoten



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Gambar 14. Proses reaktivasi SBE dan Penjumlahan β -Karoten
 (a) Pengovenan sampel, (b) Ekstraksi minyak menggunakan heksana (c) Filtrasi sampel (d) Aktivasi termal menggunakan tanur
 (e) Pengukuran pH setelah aktivasi asam (f) impregnasi BaCl_2 (g) Penimbangan sampel (h) pencampuran RBE dan CPO (i) Penyaringan β -karoten (j) Desorpsi β -Karoten menggunakan Soxhlet (k) Ekstarksi larutan DCM menggunakan evaporator (l) Pengukuran kadar karoten (Sumber : dokumentasi pribadi)

3.4. Analisis Tekno Ekonomi

Analisis tekno ekonomi dilakukan dengan dua tahap, yakni melakukan perhitungan modal kemudian analisis kelayakan. Nilai modal yang dihitung adalah sebagai berikut:

- 1 *Total capital investment* (TCI)
- 2 *Total production cost* (TPC)

Sementara analisis kelayakan dilakukan dengan melakukan perhitungan parameter berikut ini :

- 1 *Rate of investment* (ROI)
- 2 *Payback period* (PBP)
- 3 *Net present value* (NPV)
- 4 *Internal rate of return* (IRR)
- 5 *Benefit to cost* (B/C) *ratio*

Data pemakaian BE, SBE yang dihasilkan, dan jumlah minyak yang terperap ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Basis perhitungan jumlah BE, SBE, dan minyak yang terperap

	Nilai	Satuan
Kapasitas <i>refinery</i> CPO	2.000	ton/hari
Konsentrasi BE	1,5	% massa CPO
Jumlah BE yang digunakan	30	ton/hari
Minyak yang terperap pada SBE	30	% massa BE
Jumlah minyak yang terperap	9	ton/hari
Jumlah SBE & Minyak yang terperap	39	ton/hari
Konversi BE menjadi SBE	95	%
Jumlah SBE & minyak yang dihasilkan	37	ton/hari
Operasional hari	300	hari/tahun
Kebutuhan BE	9.000	ton/tahun
Jumlah SBE yang dihasilkan	11.115	ton/tahun
Harga SBE / kg	0	USD
Harga Transportasi SBE/kg	0,08	USD
Harga BE / kg	0,33	USD
Harga Heksana / liter	1,80	USD
Harga HCl 32% / liter	1,20	USD
Harga BaCl ₂ / kg	10	USD
Harga DCM/ liter	1,33	USD
Kurs 1 USD	15.000	IDR

3.5. Analisis Manfaat Lingkungan dan Sosial

Analisis manfaat lingkungan ditinjau dari dampak selama produksi BE dan pencemaran SBE, dengan rincian sebagai berikut :

1. Kuantifikasi emisi gas rumah kaca
2. Kuantifikasi pencemaran PM 2,5
3. Kuantifikasi emisi Cobalt-60 ke udara
4. Kuantifikasi emisi NO_x
5. Kuantifikasi emisi SO₂

Sementara analisis manfaat sosial ditinjau dari :

1. Kuantifikasi kebermanfaatan β -karoten sebagai prekursor vitamin A
2. Kuantifikasi pembukaan lapangan pekerjaan baru

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data, dapat disimpulkan :

1. Reaktivasi SBE dengan impregnasi BaCl_2 5% memberikan pengaruh terhadap luas permukaan pori, RBE-Ba memiliki luas permukaan pori $160,159 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, sementara luas permukaan RBE adalah $150 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$.
2. Penjumpatan β -karoten telah berhasil dilakukan menggunakan RBE dan RBE-Ba, dengan efisiensi adsorpsi dan desorpsi pada RBE sebesar 33,61% dan 81,11%, sementara efisiensi adsorpsi dan desorpsi pada RBE-Ba sebesar 25,03% dan 69,19%.
3. Reaktivasi SBE secara kimia dan fisika tanpa impregnasi memiliki potensi yang paling menguntungkan secara ekonomi jika dibandingkan dengan impregnasi, dengan potensi keuntungan USD 10.977.054 per tahun, ROI 500% dan PBP 0,2 tahun, karena tidak memerlukan biaya untuk zat aktif tambahan.
4. Pemanfaatan SBE sebagai adsorben β -karoten merupakan pengolahan limbah B3 yang berpotensi memberikan manfaat terhadap lingkungan dan sosial seperti mengurangi emisi gas CO_2 15.166 – 75.830 kg CO_2 eq/t per ton CPO, mengurangi pencemaran PM 2,5 sebesar 0,02 kg PM 2,5 eq/t per ton CPO, dan mengurangi penambangan bentonit serta membuka lapangan pekerjaan baru bagi masyarakat sekitar.

5.2. Saran

Berdasarkan pengamatan pada hasil penelitian dan analisis data, dapat disarankan :

1. Perlu didorong pemanfaatan SBE menjadi RBE seperti dengan mengkaji kembali status SBE sebagai limbah B3, jika SBE termasuk limbah non B3 maka akan semakin mudah perizinan pengolahannya.
2. Secara tekno-ekonomi, proses impregnasi kurang menguntungkan, sehingga tidak perlu dilakukan.
3. Perlunya membuat prarancangan pabrik reaktivasi SBE secara komprehensif dengan menghitung neraca massa dan energi, menghitung detail konsumsi utilitas, dan menilai manfaat lingkungan-sosial menggunakan *software* LCA.

DAFTAR PUSTAKA

- Abelha, P. and Kiel, J. 2020. Techno-economic assessment of biomass upgrading by washing and torrefaction. *Biomass and Bioenergy*. 142 (105751). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105751>
- Aberkane, D., Meziti, C., Ihaddaden, S., Boukerroui, A. and Cagnon, B. 2021. Calcium alginate-regenerated spent bleaching earth composite beads for efficient removal of methylene blue. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.
- Ahmad, A. L., Chan, C. Y., Abd Sukhor, S. R. and Mashitah, M. D. 2009. Adsorption kinetics and thermodynamics of β -carotene on silica-based adsorbent. *Chemical Engineering Journal*. 148, 378-384.
- Alfonsi, K., Colberg, J., Dunn, P. J., Fevig, T., Jennings, S., Johnson, T. A. and Stefaniak, M. 2008. Green chemistry tools to influence a medicinal chemistry and research chemistry based organisation. *Green Chemistry*. 10(1) : 31–36.
- Amorim-Carrilho, K.T., Cepeda, A., Fente, C. and Regal, P. 2014. Review of methods for analysis of carotenoids. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 56 : 49-73.
- Ayustaningwarno, F. 2012. Proses Pengolahan dan Aplikasi Minyak Sawit Merah pada Industri Pangan. *Vitasphere*. Volume II : 1-11.
- Badan Standardisasi Nasional. 2000. Bentonit untuk Pemucat Minyak Nabati. SNI 13-6336-2000. Jakarta : BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. 2019 Minyak Goreng Sawit. SNI 7709. Jakarta : BSN.
- Bappenas. 2021. *Manfaat Ekonomi, Sosial, dan Lingkungan Dari Ekonomi Sirkular di Indonesia*, Jakarta. 23 hlm.
- Beeshara, A., Cheeseman. and Christopher, R. 2014. Reuse of spent bleaching earth by polymerization of residual organics. *Waste Management*. 0956-053X.

- Boukerroui, A., Belhocine, L. and Ferroudj S. 2017. Regeneration and reuse waste from an edible oil refinery. *Environ Sci Pollut Res.* DOI 10.1007/s11356-017-9971-8
- Butnariu, M. 2016. Methods of Analysis (Extraction, Separation, Identification, and Quantification) of Carotenoids from Natural Products. *Journal of Ecosystem & Ecography.* Volume 6, Issue 2. 1000193.
- Capello, C., Fischer, U. and Hungerbühler, K. 2007. What is a green solvent? A comprehensive framework for the environmental assessment of solvents. *Green Chemistry.* 9(9), 927–934.
- Damayanti, S., Andry, S., Khairurrijal. and Kartasasmita, R. E. 2014. Isolation of β -carotene from Palm (*Elaeis guineensis Jacq.*) Oil Using Transesterification-adsorption-desorption Method and its Characterization. *Journal of Applied Sciences.* 14 (20), 2615-2621. DOI: 10.3923/jas.2014.2615.2621
- Davarnejad, R., Kassim, K. M., Zainal, A., and Sata, S. A. 2008. Supercritical fluid extraction of β -carotene from crude palm oil using CO₂. *Journal of Food Engineering.* 89 (4), 472-478.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2021. Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2020-2022. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan, Jakarta. 1106 hlm.
- Ditjen PSLB3, KLHK. 2022. Siraja Limbah. <https://plb3.menlhk.go.id/siraja-2022/login/index/app/siraja>. Diakses pada 21 Oktober 2022.
- Geankoplis, C. J., Hersel, A. Allen. and Lepek, Daniel H. 2018. *Transport Process and Separation Process Principles Fifth Edition.* Prentice Hall, US. 1836 hlm.
- Gureva, M. A. and Deviatkova, Y. S. 2019. Formation of the Concept of a Circular Economy. *Religacion. Revista De Ciencias Sociales Y Humanidades.* Vol 4, No 21, 23-34.
- Hasibuan, H. A. 2020. Penentuan Rendemen, Mutu dan Komposisi Kimia Minyak Sawit dan Minyak Inti Sawit Tandan Buah Segar Bervariasi Kematangan Sebagai Dasar Untuk Penetapan Standar Kematangan Panen. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit.* 28(3):123-132
- Hasibuan, H.A., Afriana, L. Dan Tamba, D. Pengaruh Dosis Bleaching Earth dan Waktu Pemucatan Crude Palm Oil yang Bervariasi Deterioration of Bleachability Index (DOBI) Terhadap Mutu Produk. 2017. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian.* 27 (1) : 69-75
- Hernaningsih, Taty. 2010. Analisis Co-Benefit di Sentra Industri Tahu Adiwerna, Kabupaten Tegal. *JAI Vol 6. No. 2* : 159-167.

- Hindryawati, N., Daniel. Erwin. dan Maniam, Gaanty Pragas. 2017. Preparation of spent bleaching earth-supported calcium from limestone as catalyst in transesterification of waste frying oil. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*. 6 (1): 68-75.
- Ifa, L., Yani, S., Nurjannah, N., Darnengsih, D., Rusnaenah, Andi., Mei, M., Mahfud, M. and Kusuma, H. S. 2020. Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste. *Heliyon*. 6 e05009. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05009.
- Ifa, L., Syarif, T., Sartia, S., Juliani, J. and Nurdjannah, N. 2022. Techno-economics of coconout coir bioadsorbent utilization on free fatty acid level reduction in crude palm oil. *Heliyon*. 8, e09146. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09146>.
- Inbaraj, B. S., Lu, H., Hung, C. F., Wu, W. B., Lin, C. L. and Chen, B. H. 2008. Determination of carotenoids and their esters in fruits of *Lycium barbarum* Linnaeus by HPLC-DAD-APCI-MS. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 47, (4–5).
- Iryani, D.A., Oktavia, R., Lisandi, D. M., Ginting S. B., Sugiharto, R., Indraningtyas, L., Amelia J. R., Hasanudin, U. And Hernas, T. 2022. Reactivation of Spent Bleaching Earth using Acid-Activation and Calcination Treatment for Enhancing Adsorption Abilities and Reducing Environmental Loading in Palm Oil Refining Industries. *AIDIC*.
- Ke, Y., Zhu, X., Si, S., Zhang, T., Wang, J. and Zhang, Z. 2023. A Novel Adsorbent of Attapulgit & Carbon Composites Derived from Spent Bleaching Earth for Synergistic Removal of Copper and Tetracycline in Water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 20, 1573. [1573.https://doi.org/10.3390/ijerph20021573](https://doi.org/10.3390/ijerph20021573)
- Khenifi, A., Zohra, B., Kahina, B., Houari, H. and Zoubir, D. 2009. Removal of 2,4-DCP from wastewater by CTAB/bentonite using one-step and two-step methods: a comparative study. *Chemical Engineering Journal*. 146 (3), 345-354.
- Kilinççeker, G., Sangün, M. K., Arslan, U., Çelik, S. and Zarifi, F. 2020. Evaluation of reusability of bleaching earth in vegetable oil refining. *Pigment and Resin Technology*. DOI 10.1108/PRT-02-2020-0009.
- Kohler, A., Seames, W., Shaeffer, C., Bjerke, C. and Dahl, J. 2021. Techno-Economic Analysis of a Process for the Aqueous Conversion of Corn Stover into Lactic and Levulinic Acid through Sn-Beta Catalysis. *Processes*. 9, 436. <https://doi.org/10.3390/pr9030436>.

- Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A. And Roslan, A. M. 2020. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. *Sustainability*, 12, 4609. doi:10.3390/su12114609
- Lampiran I Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.
- Liu, R., Guo, X., Cheng, M., Zheng, L., Gong, M., Chang, M., Jin, Q. and Wang, X. 2019. Effects of chemical refinement on the quality of coconout oil. *Journal Food Science Technology*. 56(6):3109-3116. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03810-w>.
- Liu, Y., Li, J., Wu, L., Shi, Y., He, Q., Chen, J. And Wang, D. 2020. Magnetic spent bleaching earth carbon (Mag-SBE@C) for efficient adsorption of tetracycline hydrochloride: Response surface methodology for optimization and mechanism of action. *Science of the Total Environment*. 72, 137817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137817>
- Loh, S. K., Cheong, K. Y. and Salimon, J. 2017. Surface-active physicochemical characteristics of spent bleaching earth on soil-plant interaction and water-nutrient uptake: A review. *Applied Clay Science*. 140, 59-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.024>
- Loh, S. K., James, S., Ngatiman, M., Cheong, K. Y., Choo., Y. M. And Lim, W. S. 2013. Enhancement of palm oil refinery waste – Spent Bleaching Earth (SBE) into bio organic fertilizer and their effects on crop biomass growth. *Industrial Crops and Products*. 49, 775-781. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.06.016>
- Low, A., Shamsuddin, R. and Siyal, A. A. 2022. Economic analysis of waste minimisation and energy recovery from spent bleaching earth. *Cleaner Engineering and Technology*. 7, 100418. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100418>.
- Machmudah S. Maulana, N. A., Norman, A.S.M., Nyoto, V.M., Amrullah, I. Wahyudiono, W., Winardi, S. Wenten, I. G. and Goto, M. Oil removal from spent bleaching earth of vegetable oil refinery plant using supercritical carbon dioxide. 2022. *Heliyon*. 8, e10826. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10826>
- Mba, O. I., Dmont, M. J., and Ngadi, M. 2015. Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry – A review. *Food Bioscience*. 26-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbio.2015.01.003>.
- M. Muslich, S. Utami, and N. S. Indrasti, “Palm Oil Recovery Through Reflux Extraction From Spent Bleaching Earth,” *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, vol. 30, no. 1, pp. 90–99, 2020.

- Mussagy, C. U., Farias, F. O., Bila, N. M., Giannini, M. J. S. M., Pereira, J. F. B., Santos-Ebinuma, V. C. and Jr, A. P. 2022. Recovery of β -carotene and astaxanthin from *Phaffia rhodozyma* biomass using aqueous solutions of cholinium-based ionic liquids. *Separation and Purification Technology*. 290, 120852.
- Nabu, E. B. P., Sulaswatty, A. and Kartohardjono, S. 2021. Palm carotene production technologies – A membrane perspective. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 1053, 012136. Doi:10.1088/1757-899X/1053/1/012136.
- Naser, J., Avbenake, O. P., Dabai, F. N. and Jibril, B. Y. 2021. Regeneration of spent bleaching earth and conversion of recovered oil to biodiesel. *Waste Management*. 126, 258-265.
- Nga, J., Avom, J., Limbe, J.T., Ndinteh, D., Assonfack, H.L. and Kede, C. M. 2022. Kinetics and Thermodynamics of β -Carotene Adsorption onto Acid-Activated Clays Modified by Zero Valent Iron. *Hindawi Journal of Chemistry*. Vol 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6505556>.
- Pasaribu, K. F. dan Sukandar, S. 2017. Analisis Manfaat Biaya Pengelolaan Limbah Spent Bleaching Earth Melalui Pemanfaatan Dan Penimbunan Dengan Memperhitungkan Nilai Gas Rumah Kaca. *Jurnal Teknik Lingkungan*. Volume 23, Nomor 2 : 33-42.
- Paradiso, V. M., Castelino, M., Renna, M., Santamaria, P. And Caponio, F. 2020. Setup of an Extraction Method for the Analysis of Carotenoids in Microgreens. *MDPI foods*. 9, 459. Doi:10.3390/foods9040459.
- Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 46 Tahun 2019 Tentang Pemberlakuan Standar Nasional Indonesia (SNI) Minyak Goreng Sawit Secara Wajib.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.
- Peters, M. S. and Timmerhaus, K. D. 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw Hill International. Singapore, 925 hlm.
- Phey Phey, M. L., Abdullah, T. A. T., Ahmad, A. and Md Ali, U. F. 2022. Application of regenerated spent bleaching earth as an adsorbent for the carbon dioxide adsorption by gravimetric sorption system *J. Phys.: Conf. Ser.* 2259 012015.

- Phey Phey, M. L., Abdullah, T. A. T., Md Ali, U. F., Mohamud, M. Y., Ikram, M. and Nabgan, W. 2023. Reverse water gas shift reaction over a Cu/ZnO catalyst supported on regenerated spent bleaching earth (RSBE) in a slurry reactor : the effect of the Cu/Zn ratio on the catalytic activity. *Royal Society of Chemistry*. 13, 3039-3055. DOI: 10.1039/d2ra07617a.
- Phoon, K. Y., Ng, H. S., Zakaria, R., Yim, H. S. and Mokhtar, M. N. 2018. Enrichment of minor components from crude palm oil and palm-pressed mesocarp fibre oil via sequential adsorption-desorption strategy. *Industrial Crops & Products*. 113, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.039>.
- Phichitsurathaworn, N., Simasatitkul, L., Amornraksa, S., Anantpinijwatna, A., Charoensuppanimit, P. and Assabumrungrat, S. 2021. Techno-economic analysis of co-production of bio-hydrogenated diesel from palm oil and methanol. *Energy Conversion and Management*. 244, 114464. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114464>
- Prasetyo, A. dan Sumarno, A. 2022. Pemanfaatan Limbah Spent Bleaching Earth (SBE) untuk Beton Ringan sebagai Material Konstruksi yang Ramah Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. Vol. 23 No 1; 071-076.
- Pubchem. 2023. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/n-HEXANE>. Diakses pada tanggal 18 November 2023.
- Pubchem. 2023. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methylene-Chloride>. Diakses pada tanggal 18 November 2023.
- Rahayu, E., Luna, P., Usmiati, S. dan Sunarmani. 2021. Optimasi Sintesis dan Aplikasi Adsorben dari Limbah Ekstraksi Biosilika Sekam Padi. *Warta IHP*, 38 (1) : 36-45.
- Ribeiro J. A. A., Almeida, E. S., Neto, B. A. D., Abdelnur, P. V. and Monteiro, S. 2018. Identification of carotenoid isomers in crude and bleached palm oils by mass spectrometry. *LWT-Food Science and Technology*. 89, 631-637. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.039>
- Rifqi, M., Setiasih, I. S. and Cahayana, Y. 2019. Total β -carotene of β -carotene carrot powder (*Daucus Carota L.*) encapsulation result. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 443, 012063.
- Ruskandi, C., Siswanto, A. dan Widodo, R. 2020. Karakteristik fisik dan kimiawi bentonite untuk membedakan natural sodium bentonit dengan sodium bentonite hasil aktivasi. *Jurnal Polimesin*. Vol 18 No 1: 53-60.
- Sahafi, S. M., Goli, S. A. H., Tabatabaei, M., Nikbakht, M. and Pourvosoghi, N. 2016. The reuse of waste cooking oil and spent bleaching earth to produce

biodiesel. *Energy Source, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. Vol 38, No. 7, :942-950.

- Saini, R. K. and Keum, Y. S. 2018. Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*. 240 : 90-103
- Sakr, A. K., Cheira, M. F., Hassanin, M. A., Mira, H. I., Mohamed, S. A., Khandaker, M. U., Osman, H., Eed, E. M., Sayyed, M. I. and Hanfi, M. Y. 2021. Adsorption of Yttrium Ions on 3-Amino-5-Hydroxyprazole Impregnated Bleaching Clay, a Novel Sorbent Material. *Applied sciences*. 11, 10320. <https://doi.org/10.3390/app112110320>
- Saputra, E., Utama, P. S., Irdoni., Simatupang, M. D. V., Prawiranegara B. A., Abid, H. R. and Muraza, O. 2020. Spent Bleaching Earth Supported CeFeO₃ Perovskite for Visible Light Photocatalytic Oxidation of Methylene Blue. *Journal Applied Materials and Technology*. 1 (2), 81-87. [Doi.org/10.31258/Jamt.1.2.81-87](https://doi.org/10.31258/Jamt.1.2.81-87)
- Saputro, K. E., Siswanti, P., Nugroho, D. W., Ikono, R., Noviyanto, A. and Rochman, N. T. 2020. Reactivating adsorption capacities of spent bleaching earth for using in crude palm oil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 924, 012014.
- Siddiqui, M.K. H. 1968. *Bleaching Earths*. Pergamon Press, London. 92 hlm.
- Singh, R. V. And Sambyal, K. 2022. An overview of β -carotene production: Current status and future prospects. *Food Bioscience*. 47, 101717.
- Soetaredjo, F. E., Laysandra, L., Putro, J. N., Santoso, S. P., Angkawijaya, A. E. Yuliana, M. Ju, Y. H., Zhou, C. H. and Ismadji, S. 2021. Ecological-safe and low-cost activated-bleaching earth: Preparation, characteristics, bleaching performance, and scale-up production. *Journal of Cleaner Production*. 279, 123793.
- Srisang, S. and Srisang, N. 2021. Recycling spent bleaching earth and oil palm ash to tile production: Impact on properties, utilization, and microstructure. *Journal of Cleaner Production*. 294, 126336.
- Su, C., Duan, L., Donat, F. and Anthony, E. J. 2018. From waste to high value utilization of spent bleaching clay in synthesizing high-performance calcium-based sorbent for CO₂ capture. *Applied Energy*. 210, 117-126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.104>.
- Suhartati, T. 2017. *Dasar-Dasar Spektrofotometri UV-VIS dan Spektrofotometer Massa Untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*. AURA. Bandar Lampung, 99 hlm.

- Suhartini, S., Hidayat, N. and Wijaya, S. 2011. Physical properties characterization of fuel briquette made from spent bleaching earth. *Biomass and Energy*. 35, 4209-4214.
- Sun, Y., Liu, D., Chen, J., Ye, X. and Yu, D. 2011. Effects of different factors of ultrasound treatment on the extraction of the all-trans- β -carotene from citrus peels. *Ultrasonics Sonochemistry*. 18, 243-249.
- Syukri, D. 2021. *Pengetahuan Dasar Tentang Senyawa Karotenoid Sebagai Bahan Baku Produksi Produk Olahan Hasil Pertanian*. Andalas University Press, Padang. 51 hlm.
- Tang, J., Mu, B., Zheng, M. and Wang, A. 2015. One-step calcination of spent bleaching earth for the efficient removal of heavy metal ions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00040
- Taylor, D. R., Toro-Vazquez, J. F. and Charo-Alonso, M. A. 2020. (*Bleaching*) *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. John Wiley & Sons, New York. 51 hlm.
- Tien, C. 2019. *Introduction to Adsorption Basic, Analysis, and Applications*. Elsevier, Amsterdam. 205 hlm.
- Towler, G. and Sinnott, R. 2013. *Chemical Engineering Design Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Elsevier, Oxford. 1271 hlm.
- Tsai, W. T., Chen, H. P., Hsieh, M. F., Sun, H. F. and Lai, C. W. 2011. Regeneration of Bleaching Clay Waste by Chemical Activation with Chloride Salts. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substance and Environmental Engineering*. 38:4, 685-696. DOI: 10.1081/ESE-120016933.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2009. *Hazardous Waste Characteristics*.
- Vidoca, L. P., Almeida, E. S., Cardoso, M. F., Otavio, L., Valadares, L. F. and Monteiro, S. 2020. Extraction of carotene from crude hybrid palm oil using polymeric resin. *Journal of Food Engineering*. 278, 109944.
- Wang, J. and Guo, X. Adsorption kinetics models : Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*. 390, 122156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>.
- Wang, J., Hu, X., Chen, J., Wang, T., Huang, X. and Chen, G. 2022. The Extraction of β -Carotene from Microalgae for Testing Their Health Benefits. *foods*. 11, 502. <https://doi.org/10.3390/foods11040502>.

- Watanabe, M., Musumi, K. and Ayugase, J. 2011. Carotenoid pigment composition, polyphenol content, and antioxidant activities of extracts from orange-colored Chinese cabbage. *LWT - Food Science and Technology*. 44 (9) : 1971–1975.
- Xu, L., Chen, S., Song, H., Liu, Y., Shi, C. and Lu, Q. 2019. Comprehensively utilization of spent bleaching clay for producing high quality bio-fuel via fast pyrolysis process. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116371>.
- Yu, Q., Ning, P., Yi, H., Tang, X., Li, M. and Yang, L. 2012. Effect of Preparation Conditions on the Property Cu/AC Adsorbents for Phosphine Adsorption. *Separation Science and Technology*. 47:3, 527-533. DOI: 10.1080/01496395.2011.614315.
- Yuliana, M., Sutrisno, R.J., Hermanto, S., Ismadji, A., Wijaya, C. J., Santoso, S. P., Soetaredjo, F. E. And Ju, Y. H. 2020. Hydrophobic Cetyltrimethylammonium Bromide-Pillared Bentonite as an Effective Palm Oil Bleaching Agent. *ACS OMEGA*. <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c04238>
- Yuliana, M., Trisna, L., Sari, F. and Lunardi, V. B. 2021. Glycerol purification using reactivated spent bleaching earth from palm oil refineries: Zero-waste approach. *Journal of Environment Chemical Engineering*. 9, 105239.
- Yung, C.L., Subramaniam, V. and Yusoff, S. 2020. LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR PALM OIL REFINING AND FRACTIONATION. *Journal of Oil Palm Research*. Vol. 32 (2). p. 341-354. DOI: <https://doi.org/10.21894/jopr.2020.0029>
- Zabochnicka, M., Krzywonos, M., Duda, Z. R., Szufa, S., Darkalt, A. and Mubashar, M. 2022. Algal Biomass Utilization toward Circular Economy. *Life*. 12, 1480. <https://doi.org/10.3390/life12101480>
- Zhang, C., Yu, M., Li, X., Li, X., Siyal, A. A., Liu, Y., Jin, Y., Dai, J., Wang, L., Zhou, C., Zhang, Y., Yuan, Y., Qu, J., Yu, H., Fu, J., Liu, C. and Li, Y. 2022. Disposal, regeneration and pyrolysis products characterization of spent bleaching clay from vegetable oil refinery in fluidized bed pyrolyzer. *Journal of Cleaner Production*. 346, 131157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131157>
- Zhang, J., Chen, Y., Song, X., Liu, Y., Zhao, J. and Wang, F. 2022. Synergistic adsorption and degeneration of diclofenac by zero-valent iron modified spent bleaching earth carbon: Mechanism and toxicity assessment. *Journal of Hazardous Materials*. 432, 128753. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128753>.

Zhou, C., Tong, D. and Yu, W. 2019. Smectite Nanomaterials : Preparation, Properties, and Functional Applications. *Nanomaterials from Clay Minerals*, 335-364. doi : 10.1016/b978-0-12-814533-3.00007-7.

Zubaidi, I. A., Tamimi, A. A. and Zubaidi, M. A. 2021. Applications of de-oiling and reactivation of spent clay. *Environmental Technology & Innovation*. 21, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101182>