

SKRIPSI

**ADSORBEN DARI SELULOSA KULIT DURIAN TERMODIFIKASI
JARINGAN LOGAM-FENOLIK UNTUK PENYERAPAN ION
KROMIUM**



Diajukan oleh

Carlos David Sulistyو NRP: 5203018017

Henoch Jaya Su'andi NRP: 5203018034

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK WIDYA MANDALA
SURABAYA
2022**

LEMBAR PENGESAHAN

Seminar **SKRIPSI** bagi mahasiswa tersebut di bawah ini:

Nama : Carlos David Sulistyo


NRP : 5203018017


telah diselenggarakan pada tanggal 21 Maret 2022, karenanya yang bersangkutan dapat dinyatakan telah memenuhi sebagian persyaratan kurikulum guna memperoleh gelar **Sarjana Teknik** Program Studi **Teknik Kimia**.

Surabaya, 28 Maret 2022

Pembimbing I

Pembimbing II



Ir. Shella P. Santoso, Ph.D., IPM.
NIK. 521.17.0971



Ir. Maria Yuhana, Ph.D., IPM.
NIK. 521.18.1010

Dewan Penguji

Ketua

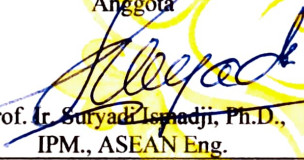
Sekretaris

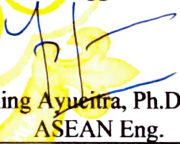

Ir. Christian J. Wijaya, S.T., M.T.
NIK. 521.17.0948


Ir. Shella P. Santoso, Ph.D., IPM.
NIK. 521.17.0971

Anggota

Anggota



Prof. Ir. Suryadi Isnadji, Ph.D.,
IPM., ASEAN Eng.
NIK. 521.93.0198


Ir. Aning Ayuendra, Ph.D., IPM.,
ASEAN Eng.
NIK. 521.03.0563

Mengetahui


Prof. Ir. Suryadi Isnadji, Ph.D.,
IPM., ASEAN Eng.
NIK. 521.93.0198

FAKULTAS TEKNIK
KIMIA


Ir. Sandy Budi Hartono, Ph.D.,
IPM.
NIK. 521.03.0401

Prod. Teknik Kimia
Ketua

LEMBAR PENGESAHAN

Seminar **SKRIPSI** bagi mahasiswa tersebut di bawah ini:

Nama : Henoeh Jaya Su'andi

NRP : 5203018034

telah diselenggarakan pada tanggal 21 Maret 2022, karenanya yang bersangkutan dapat dinyatakan telah memenuhi sebagian persyaratan kurikulum guna memperoleh gelar **Sarjana Teknik** Program Studi **Teknik Kimia**.

Surabaya, 28 Maret 2022

Pembimbing I

Ir. Shella P. Santoso, Ph.D., IPM.
NIK. 521.17.0971

Pembimbing II

Ir. Maria Yuliana, Ph.D., IPM.
NIK. 521.18.1010

Dewan Penguji

Ketua

Ir. Christian J. Wijaya, S.T., M.T
NIK. 521.17.0948

Sekretaris

Ir. Shella P. Santoso, Ph.D., IPM.
NIK. 521.17.0971

Anggota

Prof. Ir. Suryadi Ismadji, Ph.D.,
IPM., ASEAN Eng.
NIK. 521.93.0198

Anggota

Ir. Aning Ayucentra, Ph.D., IPM.,
ASEAN Eng.
NIK. 521.03.0563

Mengetahui

Prof. Ir. Suryadi Ismadji, Ph.D.,
IPM., ASEAN Eng.
NIK. 521.93.0198

Ir. Sandy Endi Hartono, Ph.D.,
IPM.
NIK. 521.03.0401

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN
PUBLIKASI KARYA ILMIAH**

Dengan perkembangan ilmu pengetahuan, saya sebagai mahasiswa Unika Widya Mandala Surabaya:

Nama : Carlos David Sulistyo
NRP : 5203018017

Menyetujui skripsi/karya ilmiah saya:

Judul:

Adsorben dari Selulosa Kulit Durian Termodifikasi Jaringan Logam-Fenolik untuk Penyerapan Ion Kromium

untuk dipublikasikan/ditampilkan di internet atau media lain (*Digital Library* Perpustakaan Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya) untuk kepentingan akademik sebatas sesuai dengan Undang-Undang Hak Cipta.

Demikian pernyataan persetujuan publikasi prarencana pabrik ini kami buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 28 Maret 2022

Yang menyatakan



Carlos David Sulistyo
NRP. 5203018017

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN
PUBLIKASI KARYA ILMIAH**

Dengan perkembangan ilmu pengetahuan, saya sebagai mahasiswa Unika Widya Mandala Surabaya:

Nama : Henoeh Jaya Su'andi
NRP : 5203018034

Menyetujui skripsi/karya ilmiah saya:

Judul:

Adsorben dari Selulosa Kulit Durian Termodifikasi Jaringan Logam-Fenolik untuk Penyerapan Ion Kromium

untuk dipublikasikan/ditampilkan di internet atau media lain (*Digital Library* Perpustakaan Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya) untuk kepentingan akademik sebatas sesuai dengan Undang-Undang Hak Cipta.

Demikian pernyataan persetujuan publikasi prarencana pabrik ini kami buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 28 Maret 2022

Yang menyatakan



Henoeh Jaya Su'andi
NRP. 5203018034

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri dan bukan merupakan hasil karya orang lain, baik sebagian maupun seluruhnya, kecuali dinyatakan dalam teks. Seandainya diketahui bahwa skripsi ini ternyata merupakan hasil karya orang lain, maka saya sadar dan menerima konsekuensi bahwa skripsi ini tidak dapat saya gunakan sebagai syarat untuk memperoleh gelar **Sarjana Teknik**.

Surabaya, 28 Maret 2022

Mahasiswa yang bersangkutan,



Carlos David Sulisty
NRP. 5203018017

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri dan bukan merupakan hasil karya orang lain, baik sebagian maupun seluruhnya, kecuali dinyatakan dalam teks. Seandainya diketahui bahwa skripsi ini ternyata merupakan hasil karya orang lain, maka saya sadar dan menerima konsekuensi bahwa skripsi ini tidak dapat saya gunakan sebagai syarat untuk memperoleh gelar **Sarjana Teknik**.

Surabaya, 28 Maret 2022

Mahasiswa yang bersangkutan,



Henoch Jaya Su'andi
NRP. 5203018034

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan	ii
Lembar Persetujuan Publikasi	iii
Lembar Pernyataan	vi
Daftar Isi	viii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	xi
Kata Pengantar	xiv
Intisari	xvi
I. Pendahuluan	1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Tujuan Penelitian	4
I.3. Rumusan Masalah	4
II. Tinjauan Pustaka	5
III. Metode Penelitian	14
IV. Hasil dan Pembahasan	27
V. Kesimpulan dan Saran	60
Daftar Pustaka	63
Lampiran	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1. Mekanisme adsorpsi pada pH 2.....	12
Gambar IV.1. Spektrum FT-IR dari KD, DRC, DRC-FTN _{1:1} dan DRC-FGN _{1:1} sebelum adsorpsi	28
Gambar IV.2. Difraktogram XRD dari Selulosa Literatur, DRC, DRC-FTN _{1:1} dan DRC-FGN _{1:1} sebelum adsorpsi.....	30
Gambar IV.3. Isoterm dari adsorpsi-desorpsi N ₂ terhadap a) DRC, b) DRC-FGN _{1:1} dan c) DRC-FTN _{1:3}	32
Gambar IV.4. Kurva distribusi ukuran pori-pori (PSD) Barret-Johner-Halenda (BJH) adsorben	32
Gambar IV.5. Analisa SEM dan EDX Mapping terhadap a) DRC, b) DRC-FGN _{1:1} , c) DRC-FTN _{1:1} Perbesaran 150 X	34
Gambar IV.6. Hasil Analisa Spektrum Dispersi Energi (EDX) terhadap a) DRC, b) DRC-FGN _{1:1} , c) DRC-FTN _{1:1}	35
Gambar IV.7. a) Nilai pH _{pzc} dari DRC, DRC-FTN _{1:1} , dan DRC-FGN _{1:1} , b) Efek pH terhadap % <i>removal</i> Cr(VI) oleh DRC, DRC-FGN _{1:1} , dan DRC-FTN _{1:1} pada C ₀ =100 ppm, 30°C, 24 jam.....	36
Gambar IV.8. Pengaruh variasi rasio mol Fe a) Fe:GA, b) Fe:TA terhadap % <i>removal</i> Cr(VI) pada pH 2, 30°C, 24 jam, 0,2 gram	38
Gambar IV.9. Pengaruh Dosis Adsorben terhadap % <i>removal</i> Cr(VI) oleh DRC, DRC-FGN _{1:1} , dan DRC-FTN _{1:3} pada pH 2, C ₀ =500 ppm, 30°C, 24 jam.....	39
Gambar IV.10. Pengaruh Konsentrasi Adsorbat mula-mula terhadap % <i>removal</i> Cr(VI) oleh DRC, DRC-FGN _{1:1} , dan DRC-FTN _{1:3} pada pH 2, 30°C, 24 jam, 0,2 gram.....	40
Gambar IV.11. Pengaruh Waktu Adsorpsi terhadap Kapasitas Adsorpsi Cr(VI) oleh DRC, DRC-FGN _{1:1} , dan DRC-FTN _{1:3} pada pH 2, C ₀ =500 ppm, 30°C, 0,02 gram.....	51
Gambar IV.12. Pengaruh Suhu Adsorpsi terhadap Kapasitas Adsorpsi Cr(VI) oleh DRC, DRC-FGN _{1:1} , dan DRC-FTN _{1:3} pada pH 2, 30°C, 0,02gram, 24 jam.....	42
Gambar IV.13. Kurva isoterm adsorpsi Cr(VI) pada DRC, DRC-FGN _{1:1} dan DRC-FTN _{1:3} model a) Langmuir, b) Freundlich, c) Sips, d) Redlich-Peterson dan e) Temkin. Adsorpsi dilakukan pada pH 2, 30°C, 24 jam, 0,02 gram.....	27

Gambar IV.14. Kinetika Adsorpsi dan kurva model pseudo-first dan pseudo-second order a) DRC, b) DRC-FGN _{1:1} , c) DRC-FTN _{1:3} , dan d) model difusi intrapartikel Weber dan Morris, pH 2, C ₀ =500 ppm, 30°C, 24 jam, 0,02 gram	50
Gambar IV.15. Koefisien distribusi termodinamika pada adsorben a) DRC, b) DRC-FGN _{1:1} dan c) DRC-FTN _{1:3} , pH 2, 24 jam	54
Gambar IV.16. Mekanisme Adsorpsi Cr(VI) pada a) DRC; b) DRC-FGN; c) DRC-FTN.....	57
Gambar IV.17. Kapasitas Adsorpsi Cr(VI) Sampel dan Literatur	58
Gambar IV.18. Efisiensi adsorpsi dari adsorben DRC, DRC-FGN _{1:1} dan DRC-FTN _{1:3} untuk penghilangan Cr(VI) setelah lima siklus adsorpsi-desorpsi, pH 2, C ₀ =500 ppm, 30°C, 24 jam	59
Gambar L1. Tipe Isoterm Adsorpsi dan Kesesuaian dengan Tipe Pori: a) Tipe dari Isoterm, b) <i>Spesific Surface Area</i> (SSA) yang diuji dengan Range BET, c) Loop Histeresis dan Kesesuaian Bentuk Pori	83
Gambar L2. Hasil Pengukuran dengan Teknik Image-J terhadap Adsorben: a) DRC, b) DRC-FGN _{1:1} dan c) DRC-FTN _{1:1}	86
Gambar L3. a) Panjang gelombang maksimum Cr(VI), b) kurva baku Cr(VI) pada WL = 540 nm.....	87
Gambar L4. Isoterm adsorpsi Cr(VI) pada DRC, DRC-FGN _{1:1} dan DRC-FTN _{1:3} dengan garis lurus merepresentasikan kurva model isoterm a) Langmuir, b) Freundlich, c) Sips, d) Redlich-Peterson dan e) Temkin. Adsorpsi dilakukan pada pH 2, 40°C, 24 jam, 0,02	96
Gambar L5. Isoterm adsorpsi Cr(VI) pada DRC, DRC-FGN _{1:1} dan DRC-FTN _{1:3} dengan garis lurus merepresentasikan kurva model isoterm a) Langmuir, b) Freundlich, c) Sips, d) Redlich-Peterson dan e) Temkin. Adsorpsi dilakukan pada pH 2, 50°C, 24 jam, 0,02	97
Gambar L6. Adsorben DRC-FGN	99
Gambar L7. Adsorben DRC-FTN	100

DAFTAR TABEL

Tabel II.1. Komposisi kulit durian dari berbagai penelitian	6
Tabel II.2. Berbagai jenis adsorben untuk adsorpsi Cr(VI)	10
Tabel IV.1. Komposisi lignoselulosa kulit durian sebelum dan sesudah delignifikasi.....	27
Tabel IV.2. Hasil karakterisasi BET	31
Tabel IV.3. Parameter beberapa persamaan adsorpsi untuk adsorpsi Cr(VI) dalam DRC pada Suhu 30°C, 40°C dan 50°C	44
Tabel IV.4. Parameter beberapa persamaan adsorpsi untuk adsorpsi Cr(VI) dalam DRC-FGN _{1:1} pada Suhu 30°C, 40°C dan 50°C	44
Tabel IV.5. Parameter beberapa persamaan adsorpsi untuk adsorpsi Cr(VI) dalam DRC-FTN _{1:3} pada Suhu 30°C, 40°C dan 50°C.....	45
Tabel IV.6. Parameter kinetik untuk adsorpsi Cr(VI) dalam DRC dan variasi DRC termodifikasi MPN	49
Tabel IV.7. Parameter difusi untuk model intrapartikel Weber dan Morris terhadap adsorpsi Cr(VI) dalam DRC, DRC-FGN _{1:1} dan DRC-FTN _{1:3}	49
Tabel IV.8. Parameter termodinamika untuk adsorpsi Cr(VI) dalam adsorben DRC, DRC-FGN _{1:1} dan DRC-FTN _{1:3} , pH 2, 24 jam, 0,02 gram ..	54

DAFTAR LAMBANG

a_R	= Parameter Redlich Peterson 2 (1/mg)
A_T	= Konstanta pengikatan kesetimbangan (L/mg)
B	= Konstanta afinitas adsorpsi (L/mg)
β	= Koefisien eksponensial
BJH	= Barret-Johner-Halenda
b_T	= Konstanta isoterm temkin
C_e	= Konsentrasi larutan pada saat setimbang (mg/L)
C_0	= Konsentrasi adsorbat mula-mula (mg/L)
Cr(VI)	= Kromium heksavalen
DRC	= <i>Durian rind cellulose</i> / selulosa kulit durian
DRC-FGN	= <i>Durian rind cellulose</i> termodifikasi asam galat
DRC-FGN _{3:1}	= <i>Durian rind cellulose</i> termodifikasi asam galat dengan rasio Fe:GA = 3:1
DRC-FGN _{1:1}	= <i>Durian rind cellulose</i> termodifikasi asam galat dengan rasio Fe:GA = 1:1
DRC-FGN _{1:3}	= <i>Durian rind cellulose</i> termodifikasi asam galat dengan rasio Fe:GA = 1:3
DRC-FTN	= <i>Durian rind cellulose</i> termodifikasi asam tanat
DRC-FTN _{3:1}	= <i>Durian rind cellulose</i> termodifikasi asam tanat dengan rasio Fe:TA = 3:1
DRC-FTN _{1:1}	= <i>Durian rind cellulose</i> termodifikasi asam tanat dengan rasio Fe:TA = 1:1
DRC-FTN _{1:3}	= <i>Durian rind cellulose</i> termodifikasi asam tanat dengan rasio Fe:TA = 1:3
FGN	= <i>Ferric Gallic Network</i>
FTIR	= <i>Fourier Transform Infra-Red</i>
FTN	= <i>Ferric Tannic Network</i>
IPD	= <i>Intraparticle diffusion</i>
IUPAC	= <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
KD	= Kulit durian sebelum ditreatment
K_F	= Konstanta Freundlich (mg/g) (mg/L) ^{1/n}
k_i	= Konstanta laju untuk difusi intrapartikel (mg/g.min ^{1/2})
$k_{i,1}$	= Laju difusi segmen pertama
$k_{i,2}$	= Laju difusi segmen kedua
K_L	= Konstanta Langmuir (L/mg)
K_R	= Parameter Redlich Peterson 1 (1/mg)

K_s	= Konstanta setimbang sips (L/mg)
k_1	= Konstanta laju reaksi adsorpsi orde-1 (menit ⁻¹)
k_2	= Konstanta laju reaksi adsorpsi orde-2 (g/mg.menit ⁻¹)
MPN	= <i>Metal phenolic network</i>
n	= Konstanta intensitas adsorpsi
n_s	= Eksponen sips
pH	= <i>Power of hydrogen</i>
pH_{pzc}	= pH <i>point of zero charge</i>
PSD	= Kurva distribusi ukuran pori-pori
Q_e	= Kapasitas adsorpsi pada saat setimbang (mg/g)
q_{exp}	= Kapasitas adsorpsi eksperimental (mg/g)
Q_m	= Kapasitas adsorpsi maksimum pada keadaan <i>monolayer</i> (mg/g)
q_s	= Kapasitas adsorpsi maksimum sips (mg/g)
q_t	= Jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada waktu t (mg/g)
R	= Konstanta gas ideal (J/mol K)
SEM	= <i>Scanning Electron Microscope</i>
t	= Waktu adsorpsi (menit)
T	= Suhu adsorpsi (°C/K)
USA	= <i>The United State of America</i>
v	= kecepatan pengadukan (rpm)
WHO	= World Health Organization
x_i	= Efek ketebalan lapisan pembatas/permukaan adsorpsi
$x_{i,1}$	= Efek lapisan pembatas segmen 1
$x_{i,2}$	= Efek lapisan pembatas segmen 2
χ^2	= Chi-square
ΔG	= Perubahan energi bebas Gibbs (kJ/mol)
ΔH	= Perubahan entalpi (kJ/mol)
ΔS	= Perubahan entropi (J/mol K)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa serta kepada kerabat-kerabat yang berperan besar dalam menyelesaikan penyusunan Skripsi yang berjudul “Adsorben dari Selulosa Kulit Durian Termodifikasi Jaringan Logam-Fenolik untuk Penyerapan Ion Kromium” dengan baik. Skripsi ini merupakan salah satu syarat penting untuk memperoleh gelar Sarjana (S-1) Teknik di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya. Penulis merasa bersyukur dan sadar dalam penulisan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, Kedua Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ir. Shella Permatasari Santoso, S.T., Ph.D., IPM., selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran dan perhatiannya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan.
2. Ir. Maria Yuliana, S.T., Ph.D., IPM., selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran dan perhatiannya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan.
3. Prof. Ir. Suryadi Ismadji, M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
4. Ir. Sandy Budi Hartono, S.T., M.Phil. Ph.D., IPM., selaku Prodi Teknik Kimia, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
5. Christian Julius Wijaya, S.T., M.T., selaku ketua penguji serta Prof. Ir. Suryadi Ismadji, M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., dan Ir. Aning Ayucitra, S.T., M.Eng.Sc., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, kritikan, dan arahan yang konstruktif.

6. Seluruh dosen dan staf Prodi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, yang secara tidak langsung telah membantu penulis dalam menyelesaikan Skripsi ini.
7. Orang tua penulis yang telah memberikan dukungan secara materi maupun non-materi dan semua pihak baik secara langsung maupun tidak langsung turut memberikan bantuan dan dukungan selama penyusunan Skripsi ini.
8. Teman-teman yang sudah membantu dan mendukung dalam pekerjaan Skripsi.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata, kedua penulis berharap dengan Skripsi ini dapat bermanfaat terhadap ilmu pengetahuan dan teknologi serta bermanfaat bagi para pembaca.

Surabaya, 28 Maret 2022

Penulis

INTISARI

Kromium, Cr(VI), merupakan salah satu logam berat yang ditemukan terkandung dalam sumber air yang tercemar. Sumber pencemaran Cr(VI) dapat berasal dari industri seperti tekstil, kulit, baja (*stainless steel*), *electroplating*, dan pelapisan krom. Paparan Cr(VI) dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan bahkan kematian bagi makhluk hidup, sehingga diperlukan upaya penanganan yang baik untuk mengurangi kandungan Cr(VI) dari dalam air. Dalam penelitian ini, teknik adsorpsi dengan memanfaatkan limbah agrikultur, yaitu kulit durian, dilakukan untuk mengurangi kadar Cr(VI). Adsorben dibuat dari selulosa dari kulit durian (DRC) yang kemudian dimodifikasi permukaannya dengan menggunakan jaringan logam-fenolik yang terbuat dari gabungan Fe/asam galat (FGN) dan Fe/asam tanat (FTN). Penggabungan jaringan logam-fenolik dapat menambah situs adsorpsi aktif pada selulosa yang berupa gugus hidroksil. Pembuatan DRC termodifikasi FGN/FTN (DRC-FGN atau DRC-FTN) dilakukan dengan merendam DRC pada larutan FGN/FTN yang diikuti dengan *rapid mixing*. Beberapa metode karakterisasi yang relevan digunakan untuk melihat sifat fisikokimia, antara lain FT-IR, XRD, SEM-EDX, dan sorpsi N₂. Perbandingan mol MPN yang memiliki kapasitas adsorpsi terbaik pada FGN dan FTN adalah DRC-FGN_{1:1} dan DRC-FTN_{1:3}. Kapasitas adsorpsi DRC-FGN_{1:1} dan DRC-FTN_{1:3} terhadap Cr(VI) diuji secara isoterm dan kinetik. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan bahwa kondisi pH optimal untuk penyerapan Cr(VI) terjadi pada pH 2 dan kapasitas adsorpsi akan meningkat seiring dengan peningkatan dosis, suhu, dan waktu adsorpsi serta akan menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi awal adsorbat. Sampel DRC-FTN_{1:3} dapat menyerap Cr(IV) lebih baik dibandingkan DRC-FGN_{1:1}, dimana kapasitas maksimum (q_{max}) DRC-FTN_{1:3} dan DRC-FGN_{1:1} masing-masing adalah 271,50 dan 141,76 mg/g. Hasil isoterm adsorpsi menunjukkan persamaan Sips lebih cocok digunakan dalam penelitian ini dan terjadi secara homogen dan mengindikasikan proses adsorpsi secara fisisorpsi. Hasil kinetika adsorpsi sesuai dengan model *pseudo first order*. Hasil termodinamika adsorpsi menunjukkan bahwa adsorpsi berjalan secara spontan dan endotermis. Uji recyclabilitas menunjukkan bahwa DRC, DRC-FGN_{1:1}, dan DRC-FTN_{1:3} dapat mempertahankan efisiensi adsorpsi sebesar 21%; 40%; dan 28% setelah lima siklus adsorpsi.