

**DISERTASI
(TEK 010317)**

**PEMANFAATAN ADSORBEN KERAMIK BERBASIS TANAH
LIAT DAN *RESIDUE CATALYTIC CRACKING (RCC)* YANG
TERINTEGRASI DENGAN MEMBRAN REVERSE OSMOSIS
(RO) UNTUK PENURUNAN PARAMETER POLUTAN DARI
AIR TERPRODUKSI**



Nama : Netty Herawati
NIM : 03013622126028
BKU : Teknik Kimia
Promotor : Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S., Ph.D
Ko Promotor I : Prof. Dr. Ir. Kiagus Ahmad Roni, ST.,MT
Ko Promotor II : Dr. Ir. Muhammad Arief Karim, M.Sc

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU ILMU TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2025**

**HALAMAN PENGESAHAN
DISERTASI**

**PEMANFAATAN ADSORBEN KERAMIK BERBASIS TANAH LIAT DAN
RESIDUE CATALYTIC CRACKING (RCC) YANG TERINTEGRASI DENGAN
MEMBRAN *REVERSE OSMOSIS (RO)* UNTUK PENURUNAN PARAMETER
POLUTAN DARI AIR TERPRODUKSI**

**DIUSULKAN OLEH
NETTY HERAWATI
03013622126028**

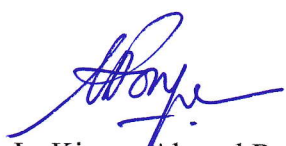
**TELAH DISETUJUI
PADA 25 JULI 2025**

Promotor



**Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S., Ph.D
NIP. 196009091987031004**

Ko Promotor I



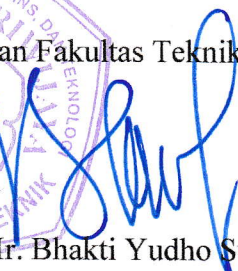
**Prof. Dr. Ir. Kiagus Ahmad Roni, ST.,MT
NIDN. 0227077004**

Ko Promotor II



**Dr. Ir. Muhammad Arief Karim, M.Sc
NIDN. 0203016201**

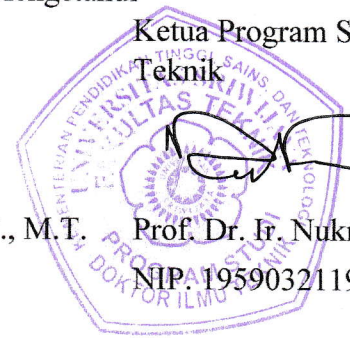
Dekan Fakultas Teknik,



**Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T.
NIP. 197502112003121002**

Mengetahui

Ketua Program Studi Doktor Ilmu
Teknik



**Prof. Dr. Ir. Nukman, MT
NIP. 195903211987031001**

HALAMAN PERSETUJUAN

Disertasi berjudul “PEMANFAATAN ADSORBEN KERAMIK BERBASIS
TANAH LIAT DAN *RESIDUE CATALYTIC CRACKING (RCC)* YANG
TERINTEGRASI DENGAN MEMBRAN *REVERSE OSMOSIS (RO)* UNTUK
PENURUNAN PARAMETER POLUTAN DARI AIR TERPRODUKSI’

telah dipresentasikan dihadapan Tim Penguji Disertasi pada Program Studi Doktor
Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada hari kamis tanggal
31 Juli 2025

Palembang, 13 Agustus 2025

Tim Penguji Disertasi

Ketua Tim penguji

Ir. Irsyadi Yani, ST., M.Eng., Ph.D
NIP. 197112251997021001

()

Anggota Tim Penguji

1 Prof. Dr. Ir. Rusdianasari, M.Si
NIP. 196711191993032003

()

2 Prof. Dr. Ir. H. M. Faizal, DEA
NIP. 195805141984031001

()


Dekan Fakultas Teknik,

Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T.
NIP. 197502112003121002

Mengetahui


Ketua Program Studi Doktor Ilmu
Teknik
Prof. Dr. Ir. Nukman, MT
NIP. 195903211987031001

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Netty Herawati
Nim : 03013622126028
Program studi : Doktor ilmu teknik
BKU : Teknik Kimia

Dengan ini menyatakan bahwa disertasi saya dengan judul **“PEMANFAATAN ADSORBEN KERAMIK BERBASIS TENAH LIAT DAN RESIDU CATALYTIC CRACKING (RCC) YANG TERINTEGRASI DENGAN MEMBRANE REVERSE OSMOSIS (RO) UNTUK MENURUNKAN PARAMETER POLUTAN DARI AIR TERPRODUKSI”**, bebas dari fabrikasi, falsifikasi, plagiat, kepengarangan yang tidak sah dan konflik kepentingan dan pengajuan jamak, seperti yang tercantum dalam Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia Nomor 39 Tahun 2021.

Bilamana ditemukan ketidak sesuaian dengan hal-hal di atas, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan aturan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan dengan sebenar-benarnya.

Palembang, 26 Juli 2025

Yang menyatakan



Netty Herawati

NIM. 03013622126028

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. IDENTITAS DIRI

Nama Lengkap	Netty Herawati, ST., MT			
Tempat & Tanggal Lahir	Palembang & 25 Januari 1976			
Pekerjaan	Dosen			
Alamat	R u m a h		Lembaga (Instansi / Perusahaan)	
	Perumahan Ogan Permata Indah Jl. Jaya Wijaya Blok AG No. 11 RT.34 RW.10 Kelurahan 15 Ulu Kecamatan Seberang Ulu I		Nama Lembaga: Universitas Muhammadiyah Palembang (UMP)	
			Jabatan di Lembaga : Wakil Dekan Bidang akademik, administrasi dan sumber daya Manusia FT-UMP	
	Kota :	Palembang	Kode Pos:	30257
Komunikasi	Telepon : 082176190063	Faks:	Telepon 0711-510820	Faks: 0711-519049
Komunikasi lainnya	Telepon Seluler : 081373937624		E-Mail : netty_herawati@um-palembang.ac.id	

B. RIWAYAT PENDIDIKAN

NO		S1	S2	S3
1	Nama Perguruan Tinggi	Universitas Sriwidjaya	Universitas Sriwidjaya	Universitas Sriwidjaya
2	Bidang Ilmu	Teknik Kimia	Teknik Kimia	Teknik kimia
3	Tahun Masuk-lulus	1994 – 2000	2005 – 2007	2020 - 2025
4	Judul Tugas Akhir/ Skripsi/ Tesis/ Disertasi	Pra rencana pabrik pembuatan hidrogen kapasitas 60.000 Ton/tahun	Penentuan Yield Gasoline dari Bagasse dengan Mengkaji Kerja Temperatur, Konsentrasi Pelarut Metanol dan Waktu Reaksi Menggunakan Katalis Zink Sulfide pada Two Stages Fixed Bed Reactor	Pemanfaatan adsorben keramik berbasis tanah liat dan <i>residue catalytic cracking (rcc)</i> yang terintegrasi dengan membran <i>reverse osmosis (ro)</i> untuk penurunan parameter polutan dari air terproduksi

C. PENGALAMAN JABATAN DAN ORGANISASI

Peran/Jabatan	Institusi (Univ., Fak., Jur., Lab., Studio, dll)	Jangka waktu
Anggota Tim	Proyek TPSDP (<i>Techonological Professional Strengthening Development Project</i>) - ADB Loan	2003
Kasi. Kepegawaian FT-UMP	Fakultas Teknik – UMP	2009 – 2011
PAW Sekretaris	Program studi Teknik Kimi FT-UMP	2011 - 2012

PIC Bidang Peningkatan Manajemen Sistem Informasi terintegrasi)	Proyek PHKI (Program Hibah Kompetisi Berbasis institusi)	2011 - 2013
Sekretaris Prodi	Program studi Teknik Kimi FT-UMP	2012 - 2015
Sekretaris Prodi	Program studi Teknik Kimi FT-UMP	2015 - 2019
Ketua Prodi	Program studi Teknik Kimi FT-UMP	2019 - 2023
Anggota senat (Perwakilan Lektor)	Senat Fakultas	2018 -2019
Anggota senat (Ketua Prodi)	Senat Fakultas	2019 -2023
Wakil Dekan Bidang I	Fakultas teknik UMP	2020 - 2024
Sekretaris	Senat Fakultas	2020 - 2024
Anggota	Senat Universitas	2024 - 2026
Wakil Dekan Bidang I	Fakultas teknik UMP	2024 - 2028
Sekretaris	Senat Fakultas	2024 - 2028
Pengurus PII Kota Palembang	Anggota	2024 - 2027

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa berkat Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga Laporan Desertasi dengan judul “Pemanfaatan Adsorben Keramik Berbasis Tanah Liat dan Katalis Bekas yang terintegrasi dengan Membran Reverse Osmosis (RO) untuk penurunan parameter polutan dari air terproduksi” dapat diselesaikan dengan baik. Laporan desertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh Gelar Doktor pada program Doktor Ilmu Teknik, BKU Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya. Mengucapkan terimakasih dan penghargaan sebesar besarnya kepada tim promotor yang telah memberikan bimbingan, arahan dan motivasi dalam penulisan dan penyelesaian disertasi saya yaitu:

- | | |
|---|-----------------------|
| 1. Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S., Ph.D | Selaku Promotor |
| 2. Prof. Dr. Ir. Kiagus Ahmad Roni, ST., MT | Selaku Ko Promotor I |
| 3. Dr. Ir. Muhammad Arief Karim, M.Sc | Selaku Ko Promotor II |

Yang telah meluangkan waktu yang sangat berharga memberikan bimbingan dalam penulisan disertasi ini.

Terimakasih juga saya sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Abid Djazuli, SE., MM selalu Rektor Universitas Muhammadiyah Palembang yang telah memberikan kesempatan dan bantuan finansial kepada penulis untuk mengikuti program Doktor Ilmu Teknik di UNSRI
2. Ir. A. Junaidi, MT selalu Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk mengikuti program Doktor Ilmu Teknik di UNSR
3. Bapak Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM, selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, atas kesempatan yang telah diberikan dalam penyelesaian program Doktoral
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Nukman, MT, selaku Ketua Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, atas kesempatan yang telah diberikan dalam penyelesaian program Doktoral

5. Ir. Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D, Prof. Dr. Rusdianasari, M.Si, Prof. Dr. Ir. H.M. Faizal, DEA, selaku Penguji
6. Seluruh dosen pengajar dan staf program studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
7. Seluruh dosen pengajar dan staf program studi Teknik Kimia Teknik Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang
8. Suamiku tercinta Rupawansyah, S.Sos., M.Si dan anak anakku Kurniawan Akbar Nepa Setiadi, S.Ars, Nadiah syawalia Putri, Nadila Syawalia putri atas kesabaran, dukungan dan doa yang telah diberikan.
9. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunan proposal desertasi ini.

Penulis menyadari bahwa laporan desertasi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu kritik dan saran sangat penulis harapkan.

Palembang, 20 Agustus 2025

Penulis

Netty Herawati

RINGKASAN

PEMANFAATAN ADSORBEN KERAMIK BERBASIS TANAH LIAT DAN *RESIDUE CATALYTIC CRACKING (RCC)* YANG TERINTEGRASI DENGAN MEMBRAN *REVERSE OSMOSIS (RO)* UNTUK PENURUNAN PARAMETER POLUTAN DARI AIR TERPRODUKSI

Industri perminyakan merupakan salah satu industri di Indonesia yang terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Peningkatan produksi minyak diimbangi dengan meningkatnya jumlah limbah cair yang dihasilkan dari eksplorasi minyak bumi. Limbah eksplorasi minyak dan gas disebut *produced water* (air terproduksi), merupakan salah satu limbah paling signifikan dalam industri minyak dan gas (Almeida et al., 2019). Air terproduksi sering dihasilkan selama produksi minyak dan gas dari sumur darat dan lepas pantai. Air formasi adalah air laut atau air tawar yang telah terperangkap selama jutaan tahun dengan minyak dan gas alam dalam reservoir geologis yang terdiri dari formasi batuan sedimen berpori di antara lapisan batuan kedap air di dalam kerak bumi. Pada umumnya, rasio minyak dan air terproduksi adalah 1:3 untuk sebagian besar sumur minyak (Munirasu et al., 2016). Komposisi kimia dari air terproduksi sangat kompleks mencakup campuran berbagai komponen seperti minyak terdispersi, hidrokarbon terlarut, asam organik, fenol, logam, serta residu senyawa kimia yang ditambahkan ke aliran produksi atau pemisahan (Al-Ghouti et al., 2019). Tanpa penanganan yang tepat, disposisi akhir air terproduksi dapat mencemari permukaan, air tanah, dan tanah. Komposisi kimiawi dari air yang dihasilkan bervariasi tergantung pada lokasi geografis area produksi, pembentukan bawah permukaan yang dengannya air yang dihasilkan telah bersentuhan selama ribuan tahun, dan jenis produk hidrokarbon yang diproduksi. Volume air yang dihasilkan juga bervariasi sepanjang waktu eksplorasi reservoir. Jika injeksi air dan kimia atau surfaktan dilakukan untuk meningkatkan produksi minyak, komposisi kimia dalam air yang diproduksi akan lebih bervariasi. Logam-logam dalam air yang dihasilkan memiliki konsentrasi tergantung pada usia dan geologi reservoir dari mana minyak dan gas diproduksi. Logam umum yang ditemukan di perairan yang dihasilkan termasuk seng, timah, mangan, besi, dan barium (Veil et al., 2004; Novira et al., 2022). Pembuangan tanpa pengolahan yang tepat air terproduksi dapat mengakibatkan kerusakan ekosistem (Clark, et al., 2009; Al-Ghouti et al., 2019). Logam berat memiliki kecenderungan terakumulasi di lingkungan dan menyebabkan efek negatif pada kesehatan manusia (Hendges et al., 2021). Ketika logam berat memasuki rantai makanan dalam konsentrasi besar, dapat menumpuk di tubuh manusia. Tertelan atau terpapar logam berat dalam konsentrasi di luar batas yang diatur akan menciptakan masalah kesehatan yang serius pada manusia. Masalah serius pada manusia yang disebabkan oleh paparan logam berat termasuk kelainan pertumbuhan dan perkembangan, kanker, kerusakan sistem saraf, dan dalam kasus yang lebih buruk adalah kematian. Pengolahan air terproduksi telah banyak dilakukan diantaranya dengan cara biologis, yaitu biodegradasi komponen hidrokarbon menggunakan mikroorganisme (Hommel, 1997), adsorpsi komponen organik terlarut dengan karbon aktif (Doyle, Brown, 2000), penggunaan cyclones (Knudsen et al., 2006), koagulasi dan flokulasi (Khalid M. Mousa and Hind J. Hadi, 2016). Teknologi membran, khususnya ultrafiltrasi

dapat digunakan sebagai alternatif pengolahan limbah eksploitasi minyak bumi. Ultrafiltrasi sudah pernah digunakan untuk pengolahan umpan yang mengandung komponen minyak bumi seperti drawing oil, emulsi oil (Sherhan et al., 2016); (Santra et al., 2020). Katalis buangan proses cracking minyak bumi di Pertamina RU III memiliki struktur regular, yang mengandung unsur-unsur Oksida, Calsium, Magnesium dan Rare earthfamily (Lathanum, Cherium). Limbah katalis ini digunakan pada suatu kilang minyak yang dilengkapi RCC sebagai suatu bahan untuk mengarahkan dan mempercepat laju reaksi produk utama yang diinginkan seperti : LPG (Elpiji), Propylene, Polygasoline, Naptha, LCD (bahan dasar diesel) dan Decant Oil (bahan dasar fuel oil). Pemanfaatan katalis bekas sebagai bahan utama yang digunakan dalam pembuatan adsorben keramik dikarenakan tidak dapat diregenerasi kembali sehingga menjadi tidak berguna dan berpotensi menjadi limbah. Katalis bekas yang digunakan berasal dari Pertamina RU III Plaju yang telah melalui proses perengkahan (cracking) minyak bumi. Katalis bekas ini adalah jenis yang mengandung oksida silika dan alumina, serta unsur lainnya antara lain SiO_2 38,27% Al_2O_3 51,37%, Fe_2O_3 0,527%, TiO_2 0,461%, CaO 0,117%, dan MgO 0,145%, lainnya 9,11% (Ermawati et al., 2016). Hasil analisis penelitian yang telah dilakukan Ermawati tahun 2016 menunjukkan bahwa komponen utama katalis bekas hampir sama dengan zeolit, sehingga dari hal tersebut katalis bekas ini dapat dipergunakan sebagai bahan utama campuran pembuatan adsorben keramik.

Selain bahan utama seperti katalis bekas dan tanah liat, pada proses pembuatan adsorben keramik juga perlu penambahan zat yang berfungsi sebagai pembentuk pori. Material pembentuk pori ini dapat berupa bahan kimia seperti urea, maupun polimer, baik polimer dari alam maupun polimer sintetis. Polimer dari alam yang banyak dikembangkan untuk membentuk pori pada pembuatan membran keramik adalah jenis pati, seperti pati jagung, pati beras, pati gandum, pati gadung, dll. Pati secara luas digunakan sebagai bahan untuk menghasilkan porositas dalam keramik karena dapat membentuk pori-pori selama proses pembakaran pada suhu sekitar 500°C (Elomari et al., 2017). Teknologi membran merupakan teknologi bersih yang ramah lingkungan karena tidak menimbulkan dampak yang buruk bagi lingkungan, Teknologi membran dapat mengurangi senyawa organik dan anorganik yang berada dalam air tanpa adanya penggunaan bahan kimia dalam pengoperasiannya (Dickhout et al., 2019; Neff et al., 2011; Novira et al., 2022).

Dari hasil Analisa SEM, adsorben keramik memiliki struktur heterogen dan berpori, dengan kristal klinoptilolit yang terdefinisi dengan baik. Hasil karakterisasi dengan SEM EDX menginformasikan bahwa permukaan adsorben keramik memiliki banyak pori dan sebagian besar didominasi oleh struktur amorf. Kandungan unsur dalam adsorben sebelum proses adsorpsi meliputi karbon (C). aluminium oksida (Al_2O_3), silika oksida (SiO_2), sulfur oksida (SO_3) dan kalsium oksida (CaO). Namun, setelah proses adsorpsi selain komponen tersebut juga terdeteksi komponen besi dan barium. Karakterisasi dengan metode FTIR terlihat adanya interaksi antara gugus aktif yang terdapat dalam adsorben Adsorben keramik dengan gugus aktif dari ion logam Fe (II) dan Ba (II) dalam larutan asam sintetis. Hal ini terdeteksi melalui pembentukan ikatan hidrogen antar molekul dan dipol dengan dipole tereduksi.

Studi kesetimbangan menunjukkan bahwa adsorben adsorben keramik mampu menghilangkan logam berat dari larutan. Dalam penelitian ini, studi keseimbangan adsorpsi dilakukan terhadap dua komponen tunggal ion logam Fe(II) dan Ba(II)

serta campuran antara keduanya. Kesetimbangan adsorpsi tersebut diuji menggunakan model persamaan isotermik Langmuir dan Freundlich. Hasil menunjukkan bahwa pola adsorpsi isotermik dalam menyerapan ion logam Fe (II) oleh adsorben Adsorben keramik mengikuti pola isothermik model Langmuir maupun pola isotermik model Freundlich. Hal ini dikarenakan nilai koefisien regresi dari kedua model mendekati satu ($R > 0,95$). Pengujian keseimbangan adsorpsi untuk ion logam Ba (II) oleh adsorben Adsorben keramik cenderung mengikuti pola isotermik model Freundlich yang ditunjukkan dengan nilai $R^2 > 0,95$, sedang penggunaan pola isotermik Langmuir hanya memberikan nilai $R < 0,95$. Pengujian adsorpsi pada campuran ion Fe(II) dan Ba(II) oleh adsorben Adsorben keramik menunjukkan bahwa model adsorpsi isotermik Langmuir dan Freundlich memadai untuk menggambarkan pola kesetimbangan adsorpsinya dengan nilai R^2 yang mendekati satu.

Hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa adsorben keramik berbahan campuran adsoben RCC dan Tanah liat cocok digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan konsentrasi ion Fe (II). Kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi terhadap penghilangan ion logam Fe (II) cenderung meningkat dengan meningkatnya pH serta konsentrasi awal larutan ion Fe (II). Kinetika adsorpsi ion Fe (II) pada Adsorben keramik sesuai dengan kinetika adsorpsi pseudo orde satu. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi ion logam Fe (II) oleh adsorben keramik dikategorikan sebagai adsorpsi secara kimia (Chemisorptions)..

Adsorben keramik juga mampu menurunkan konsentrasi ion logam Ba (II) dari larutan air terproduksi dan artifisial. Kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi terhadap ion logam Ba (II) meningkat dengan meningkatnya konsentrasi awal larutan ion Ba (II), tetapi mengalami penurunan dengan bertambahnya massa adsoben. Kinetika adsorpsi ion Ba (II) oleh adsorben keramik, cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde satu, sehingga dikategorikan proses adsorpsi yang berlangsung pada ion logam Ba (II) oleh adsorben keramik adalah adsorpsi secara fisika. Hasil pengamatan yang diperoleh berupa garis lurus yang tidak melewati titik koordinat (0,0) maka menunjukkan bahwa difusi intra-partikel bukan satu-satunya langkah pembatas laju, tetapi juga model kinetik lainnya dapat mengontrol laju adsorpsi ion logam Ba (II), yang semuanya dapat beroperasi secara bersamaan.

Kinetika adsorpsi campuran ion logam Fe (II) dan ion logam Ba (II) pada adsorben keramik cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde dua yang menegaskan bahwa proses adsorpsinya adalah proses chemisorption. Urutan selektivitas adsorben keramik terhadap ion logam Fe (II) lebih tinggi bila dibandingkan dengan ion logam Ba (II). Studi adsorpsi secara kontinu dengan kolom adsorpsi.

Penelitian ini menunjukkan bahwa adsorben keramik yang terdiri dari lempung dan RCC efektif menghilangkan ion besi dan barium dari air dalam susunan kolom adsorpsi. Dengan menggunakan kolom berdiameter 10 cm, tinggi unggun 30 cm, dan laju alir 6, 7, dan 8 mL/menit, teramati bahwa laju alir yang lebih lambat menghasilkan efektivitas adsorpsi yang lebih tinggi karena waktu interaksi yang lebih lama antara adsorbat dan permukaan adsorben.

Breakthrough curve menunjukkan bahwa laju alir yang lebih rendah menghasilkan Breakthrough time yang lebih lambat, yang mengonfirmasi kemampuan adsorpsi yang lebih baik. Untuk menjelaskan kinetika adsorpsi, pemodelan matematika dilakukan menggunakan model Thomas, Yoon–Nelson,

dan Adams–Bohart. Di antara model-model tersebut, model Thomas menunjukkan kesesuaian terbaik untuk hasil eksperimen, sebagaimana dibuktikan oleh koefisien korelasi yang tinggi ($R^2 \geq 0,95$). Sementara itu, model Yoon–Nelson secara efektif memprediksi waktu terobosan 50% (τ). Model Adams–Bohart secara efektif menangkap tahap awal proses adsorpsi, tetapi terbukti kurang akurat selama fase saturasi karena asumsi-asumsi yang mendasarinya.

SUMMARY

UTILIZATION OF CLAY-BASED CERAMIC ADSORBENTS AND RESIDUE CATALYTIC CRACKING (RCC) INTEGRATED WITH REVERSE OSMOSIS (RO) MEMBRANES TO REDUCE POLLUTANT PARAMETERS FROM PRODUCED WATER

The petroleum industry is one of the industries in Indonesia that continues to increase from year to year. The increase in oil production is offset by the increase in the amount of liquid waste generated from petroleum exploration. Oil and gas exploration waste, called produced water, is one of the most significant wastes in the oil and gas industry (Almeida et al., 2019). The water produced is often produced during oil and gas production from onshore and offshore wells. Formation water is seawater or freshwater that has been trapped for millions of years with oil and natural gas in a geological reservoir consisting of porous sedimentary rock formations between layers of impermeable rock within the earth's crust. Generally, the ratio of oil to water produced is 1:3 for most oil wells (Munirasu et al., 2016). The chemical composition of highly complex produced water includes mixtures of various components such as dispersed oils, dissolved hydrocarbons, organic acids, phenols, metals, as well as chemical compound residues added to production or separation streams (Al-Ghouti et al., 2019). Without proper handling, the final disposition of the water produced can contaminate surfaces, groundwater, and soil. The chemical composition of the resulting water varies depending on the geographical location of the production area, the subsurface formations with which the resulting water has been in contact for thousands of years, and the type of hydrocarbon products produced. The volume of water produced also varies throughout the exploration time of the reservoir. If water and chemical injections or surfactants are done to increase oil production, the chemical composition in the water produced will be more varied. The metals in the water produced have concentrations depending on the age and geology of the reservoir from which the oil and gas are produced. Common metals found in the waters produced include zinc, tin, manganese, iron, and barium (Veil et al., 2004; Novira et al., 2022). Disposal without proper treatment of the water produced can result in damage to ecosystems (Clark *et al.*, 2009; Al-Ghouti et al., 2019). Heavy metals tend to accumulate in the environment and cause negative effects on human health (Hendges et al., 2021). When heavy metals enter the food chain in large concentrations, they can accumulate in the human body. Ingestion or exposure to heavy metals in concentrations beyond regulated limits will create serious health problems in humans. Serious problems in humans caused by exposure to heavy metals include growth and developmental disorders, cancer, nervous system damage, and, in worst cases, death. The treatment of produced water has been carried out in a lot of ways, including by biological means, namely the biodegradation of hydrocarbon components using microorganisms (Hommel, 1997), adsorption of dissolved organic components with activated carbon (Doyle, Brown, 2000), use of cyclones (Knudsen et al., 2006), coagulation and flocculation (Khalid M. Mousa and Hind J. Hadi, 2016). Membrane technology, especially ultrafiltration, can be used as an alternative to treating petroleum exploitation waste.

Ultrafiltration has been used for the processing of feeds containing petroleum components such as drawing oil, emulsion oil (Santra et al., 2020; Sherhan et al., 2016). The petroleum cracking disposal catalyst at Pertamina RU III has a regular structure, which contains elements of Oxide, Calcium, Magnesium, and the Rare earth family (Lanthanum, Cerium). This catalytic waste is used in an oil refinery equipped with RCC as a material to direct and accelerate the reaction rate of the main desired products, such as LPG (LPG), Propylene, Poly gasoline, Naptha, LCD (diesel base material) and Decant Oil (fuel oil base material). The use of used catalysts as the main material used in the manufacture of ceramic adsorbents is because they cannot be regenerated so that they become useless and have the potential to become waste. The used catalyst used comes from Pertamina RU III Plaju which has gone through a petroleum cracking process. This scrap catalyst is a type that contains silica and alumina oxides, as well as other elements including SiO_2 38.27%, Al_2O_3 51.37%, Fe_2O_3 0.527%, TiO_2 0.461%, CaO 0.117%, and MgO 0.145%, others 9.11% (Ermawati et al., 2016). The results of the research analysis that Ermawati has conducted in 2016 show that the main components of used catalysts are almost the same as zeolite, so that from this used catalyst can be used as the main ingredient in ceramic adsorbent manufacturing mixtures.

In addition to the main materials such as container catalysts and clay, in the process of making ceramic adsorbents, it is also necessary to add substances that function as pore formers. This pore-forming material can be in the form of chemicals such as urea, or polymers, both natural polymers and synthetic polymers. Polymers from nature are widely developed to form pores in membrane manufacturing. Ceramics are types of starch, such as corn starch, rice starch, wheat starch, gadung starch, etc. Starch is widely used as a material to produce porosity in ceramics because it can form pores during the combustion process at temperatures around 500°C (Elomari et al., 2017). Membrane technology is a clean technology that is environmentally friendly because it does not have a bad impact on the environment. Membrane technology can reduce organic and inorganic compounds in water without the use of chemicals in its operation (Dickhout et al., 2019; Neff et al., 2011; Novira et al., 2022).

From the results of SEM analysis, ceramic adsorbents have a heterogeneous and porous structure, with well-defined crystals. The results of characterization with SEM EDX indicate that the surface of the ceramic adsorbent has many pores and is mostly dominated by amorphous structures. The content of the elements in the adsorbent before the adsorption process includes carbon (C), aluminum oxide (Al_2O_3), silica oxide (SiO_2), sulfur oxide (SO_3), and calcium oxide (CaO). However, after the adsorption process, other than these components, iron and barium components were also detected. Characterization using the FTIR method showed that there was an interaction between the active groups contained in the ceramic adsorbent and the active groups of Fe (II) and Ba (II) metal ions in the synthetic acid solution. This is detected through the formation of hydrogen bonds between molecules and dipoles with reduced dipoles.

Equilibrium studies show that ceramic adsorbents are able to remove heavy metals from the solution. In this study, an adsorption balance study was carried out on two single components of metal ions, Fe (II) and Ba (II), and a mixture of them. The adsorption equilibrium was tested using the Langmuir and the Freundlich isothermal equation model. The results showed that the isothermal adsorption

pattern in the absorption of Fe (II) metal ions by ceramic adsorbents followed the isothermal pattern of the Langmuir model and the isothermal pattern of the Freundlich model. This is because the value of the regression coefficient of both models is close to one ($R > 0.95$). The adsorption balance test for Ba (II) metal ions by ceramic adsorbents tends to follow the isothermal pattern of the Freundlich model, shown with an R^2 value > 0.95 , while the use of the Langmuir isothermal pattern only gives an $R^2 < \text{value of } 0.95$. Adsorption testing on a mixture of Fe (II) and Ba (II) ions by ceramic adsorbents showed that the Langmuir and the Freundlich isothermal adsorption models were adequate to describe their adsorption equilibrium patterns with values of R^2 close to one.

The results of this study can be concluded that ceramic adsorbents made from a mixture of RCC and clay adsorbents are suitable for use as adsorbents to reduce the concentration of Fe (II) ions. The adsorption capacity and adsorption efficiency of the Fe (II) metal ion removal tend to increase with increasing pH as well as the initial concentration of the Fe (II) ion solution. The adsorption kinetics of Fe (II) ions in ceramic adsorbents correspond to the pseudo-first-order adsorption kinetics. This shows that the process of adsorption of metal ions Fe (II) by ceramic adsorbents is categorized as chemically adsorption (Chemisorption).

Ceramic adsorbents are also able to lower the concentration of Ba(II) metal ions from both produced and artificial aqueous solutions. The adsorption capacity and adsorption efficiency of the Ba (II) metal ions increase with the increase in the initial concentration of the Ba (II) ion solution, but decrease with the increase in adsorbent mass. The kinetics of the adsorption of Ba (II) ions by ceramic adsorbents tend to follow the pseudo-first-order kinetics model, so it is categorized as the adsorption process that takes place on Ba (II) metal ions by ceramic adsorbents as physical adsorption. The observation results obtained in the form of a straight line that does not pass the coordinate point (0.0) show that intra-particle diffusion is not the only rate-limiting measure, but also other kinetic models can control the adsorption rate of Ba (II) metal ions, all of which can operate simultaneously.

The adsorption kinetics of a mixture of Fe (II) and Ba (II) metal ions in ceramic adsorbents tend to follow a second-order pseudo kinetic model, which confirms that the adsorption process is a chemisorption process. The selectivity sequence of ceramic adsorbents against metal ions Fe (II) is higher when compared to metal ions Ba (II). The adsorption study is continuous with adsorption columns.

This study shows that ceramic adsorbents consisting of clay and RCC effectively remove iron and barium ions from water in the adsorption column arrangement. Using columns with a diameter of 10 cm, a bed height of 30 cm, and a flow rate of 6, 7, and 8 mL/min, it was observed that a slower flow rate resulted in higher adsorption effectiveness due to the longer interaction time between the adsorbate and the adsorbent surface.

The breakthrough curve shows that a lower flow rate results in a slower Breakthrough time, which confirms better adsorption capabilities. To explain the kinetics of adsorption, mathematical modeling was performed using the Thomas, Yoon–Nelson, and Adams–Bohart models. Among these models, the Thomas model showed the best fit for the experimental results, as evidenced by a high correlation coefficient ($R^2 \geq 0.95$). Meanwhile, the Yoon–Nelson model effectively predicts a breakthrough time of 50% (τ). The Adams–Bohart model effectively

captures the early stages of the adsorption process, but it proves to be less accurate during the saturation phase due to underlying assumptions.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
SURAT PERNYATAAN.....	iv
KATA PENGANTAR	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xxii
DAFTAR TABEL.....	xxv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	7
1.3. Tujuan Penelitian	10
1.3.1. Tujuan Umum	10
1.3.2. Tujuan Khusus	11
1.4. Hipotesa.....	11
1.5. Ruang Lingkup.....	12
1.6. Manfaat	12
1.6. Keunggulan Penelitian	12
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	13
2.1. Air Terproduksi.....	13
2.1.1. Pembentukan air terproduksi.....	14
2.1.2. Karakteristik Air Terproduksi	14
2.1.2.1. Air Terproduksi dari produksi Minyak	16
2.1.2.2. Air Terproduksi dari produksi gas alam	16
2.1.2.3. Air Terproduksi dari produksi CBM.....	16
2.1.3. Komponen air terproduksi.....	17
2.1.3.1. Komponen minyak terlarut	18
2.1.3.2. Mineral Terlarut	18
2.1.3.3. Senyawa kimia dari proses produksi.....	19
2.1.3.4. Padatan dari proses produksi.....	19
2.1.3.5. Gas terlarut.....	19
2.1.4. Dampak air terproduksi terhadap ekologi dan lingkungan	19
2.1.5. Pengaruh Derajat Keasaman (pH) air Terproduksi.....	20
2.1.6. Pengaruh Logam besi.....	20
2.1.7. Pengaruh Total Dissolved Solid (TDS)	21
2.1.8. Pengaruh Logam Berat Terlarut (Barium)	21
2.2. Pengolahan air terproduksi.....	24
2.3. Proses Adsorpsi.....	25
2.3.1. Pengertian Adsorpsi dan adsorben.....	25

2.3.2. Mekanisme Adsorpsi.....	28
2.3.3. Jenis Adsorpsi	28
2.3.4. Faktor Yang Mempengaruhi Proses Adsorpsi	29
2.4. Karakteristik Adsorben	30
2.5. Jenis Adsorben	31
2.5.1. Karbon aktif	33
2.5.2. Zeolit	34
2.5.3. Silika gel.....	34
2.5.4. Alumina Aktif	35
2.5.5. Adsorben Keramik	35
2.5.5.1. Keramik.....	36
2.5.5.2. Tanah Liat	36
2.5.5.3. Limbah Katalis	38
2.6. Aktivasi Adsorben.....	40
2.7. Adsorben Keramik	41
2.7.1. Pembuatan Adsorben keramik	41
2.7.2. Karakteristik Adsorben Keramik	44
2.8. Kinerja Membran	44
2.9. Klasifikasi Membran.....	45
2.9.1. Berdasarkan jenis	46
2.9.2. Berdasarkan asal.....	46
2.9.3. Berdasarkan gaya dorong tekanan	46
2.10. Aplikasi Adsorben keramik.....	49
2.10.1. Keamanan Adsorben Keramik untuk air minum	49
2.10.2. Aplikasi Adsorben keramik dalam pengolahan air limbah	49
2.11. Kestimbangan Adsorpsi	52
2.12. Model Adsorpsi Isoterm	55
2.12.1. Model adsorpsi Isoterm Langmuir	56
2.12.2. Model adsorpsi Isoterm Freundlich	57
2.13. Kinetika adsorpsi.....	58
2.13.1. Model Adsorpsi.....	59
2.13.1.1. Model pseudo first order	59
2.13.1.2. Model Pseudo second order	60
2.13.2. Model Difusi Adsorpsi	61
2.13.2.1. Model Difusi film cair.....	61
2.13.2.1.1. Hukum laju gaya pendorong linear	61
2.13.2.1.2. Persamaan laju perpindahan massa difusi film	62
2.13.2.2. Model difusi interpartikel.....	63
2.13.2.2.1. Model difusi padatan homogen.....	63
2.13.2.2.2. Model Weber Morris.....	64
2.13.2.2.3. Model Dumwald Wagner	65
2.13.2.3. Model Doublek eksponensial (DEM)	65
2.14. Kolom Adsorpsi	66
2.14.1. Kurva Breakthrough Kolom.....	67
2.14.1.1. Model Thomas	69

2.14.1.2. Model Yoon Nelson	69
2.14.1.3. Model Bohart Adam.....	70
2.15. Teknologi Membran.....	71
2.15.1. Proses Membran Berbasis Tekanan untuk Pengolahan Air Limbah.....	72
2.15.2. Proses Membran Hibrid	73
2.15.3. Polarisasi Konsentrasi (CP).....	74
2.15.4. Membran Foulingdan Strategi Pre-treatment.....	75
2.15.5. Metode Pengendalian Fouling: Pembersihan Membran	76
2.15.6. Strategi Pre-treatment untuk Proses Membran	78
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	80
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian;	80
3.2. Bahan dan Alat Penelitian.....	80
3.2.1. Alat.....	80
3.2.2. Bahan.....	80
3.3. Metode Penelitian.....	81
3.3.1. Penelitian Tahap I. Karakteristik bahan baku dan adsorben keramik.....	81
3.3.1.1. Persiapan awal limbah air terproduksi	81
3.3.1.2. Persiapan awal limbah katalis residu catalytic cracking	81
3.3.1.3. Persiapan awal pembuatan tepung tanah liat	82
3.3.1.4. Pembuatan Adsorben keramik	83
3.3.2. Penelitian Tahap 2. Pengolahan Air Terproduksi (Optimasi proses adsorpsi dalam air terproduksi menggunakan adsorben keramik terintergasi dengan membrane RO).....	85
3.3.2.1. Proses adsorpsi dengan variasi laju alir limbah air terproduksi.....	86
3.3.2.2. Proses adsorpsi dengan variasi waktu Operasi antara air terproduksi dan adsorben keramik	87
3.3.2.3. Proses adsorpsi dengan variasi diameter partikel adsorben keramik..	87
3.3.2.4. Proses adsorpsi dengan variasi komposisi campuran	87
3.3.2.5. Skema alat penelitian	88
3.3.3. Penelitian Tahap 3. Studi kesetimbangan proses adsorpsi limbah air terproduksi oleh adsorben keramik	88
3.3.3.1. Persiapan proses adsorpsi.....	89
3.3.3.2. Prosedur Penelitian.....	89
3.3.4. Penelitian Tahap 4. Penentuan model kinetika adsorpsi limbah air terproduksi oleh adsorben keramik	89
3.3.4.1. Persiapan proses adsorpsi.....	90
3.3.4.2. Prosedur penelitian.....	90
3.3.5. Parameter yang diamati.....	90
3.3.5.1. Analisis Derajat Keasaman (pH).....	90
3.3.5.2. Analisa logam berat.....	91
3.3.5.3 Analisa morfologi partikel Adsorben keramik.....	91
3.3.5.4 Analisis TDS	91
3.3.6. Teknik Pengumpulan data.....	91
BAB 4. KARAKTERISASI BAHAN BAKU DAN ADSORBEN KERAMIK ..	93

4.1.	Karakterisasi Bahan Baku	93
4.1.1.	Air Terproduksi.....	93
4.1.2.	SEM EDX dan BET RCC	93
4.2.	Karakterisasi Adsorben Keramik	95
4.2.1.	Scanning Electron Microscopy (SEM) Adsorben Keramik.....	95
4.2.2.	Analisa komposisi Unsur Adsorben Keramik.....	107
4.2.3.	Analisa Luas Permukaan.....	118
4.2.4.	Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR)	118
BAB 5. OPTIMASI PROSES ADSORPSI MENGGUNAKAN ADSORBEN		
KERAMIK TERINTEGRASI DENGAN REVERSE OSMOSIS		122
5.1.	Pendahuluan	122
5.2.	Penghilangan Total Padatan Terlarut (TDS).....	126
5.2.1.	Pengaruh Adsorben Keramik pada Penghilangan TDS dalam air terproduksi menggunakan adsorben keramik-reverse osmosis.....	126
5.2.2.	Pengaruh Adsorben Keramik -Reverse Osmosis pada Penghapusan TDS dalam air terproduksi menggunakan adsorben keramik-reverse osmosis.....	128
5.3.	Penurunan Nilai pH.....	132
5.4.	Penghilangan Logam Besi.....	135
5.4.1.	Pengaruh adsorben keramik pada penghilangan ion besi	135
5.4.2.	Pengaruh adsorben keramik-Reverse Ormosisi pada penghilangan ion besi..	138
5.5.	Penghilangan Logam Barium.....	139
5.5.1.	Pengaruh Adsorben Keramik pada penghapusan Barium.....	140
5.5.2.	Pengaruh Adsorben keramik-reverse osmosis pada penghapusan barium	142
5.6.	Analisis Kurva Breakthrough.....	144
5.6.1.	Analisis Data Kolom Adsorpsi	145
5.6.1.1.	Model Thomas	148
5.6.1.2.	<i>Adams-Bohart Model</i>	149
5.6.1.3.	Yoon-Nelson	150
BAB 6. STUDI KESETIMBANGAN		154
6.1.	Pendahuluan	154
6.2.	Penyerapan ion logam Besi.....	154
6.2.1.	Pengaruh Waktu Kontak dan dosis adsorben keramik pada Penghilangan ion Fe (II)	154
6.3.	Penyerapan ion Barium	158
6.3.1.	Pengaruh waktu kontak dan Dosis adsorben keramik pada Penghilangan ion Barium.....	158
6.3.	Adsorpsi Isotermik	161
6.3.1.	Kesetimbangan adsorpsi isotermik model Langmuir ion tunggal Besi	161
6.3.2.	Kesetimbangan adsorpsi isotermik model Freundlich ion tunggal Besi...	163
6.3.3.	Kesetimbangan adsorpsi isotermik model Langmuir dan Freundlich tunggal Barium.....	164
BAB 7. KINETIKA ADSORPSI		168

7.1. PENDAHULUAN.....	168
7.2. Kinetika Adsorpsi ion Logam Besi	170
7.2.1. Model Kinetika Adsorpsi Pseudo orde satu	170
7.2.2. Model Kinetika Adsorpsi Pseudo orde Dua	171
7.3. Kinetika Adsorpsi ion Logam Barium	172
7.3.1. Model Kinetika Adsorpsi Pseudo orde satu	173
7.3.2. Model Kinetika Adsorpsi Pseudo orde dua.....	173
BAB 8. KESIMPULAN DAN REKOMENDARI.....	175
8.1. Kesimpulan	175
8.1.1. Karakterisasi adsorben keramik	175
8.1.2. Studi keseimbangan	176
8.1.3. Studi kinetika Adsorpsi	176
8.2. Rekomendasi	178
DAFTAR PUSTAKA	180
LAMPIRAN.....	192
SURAT KETERANGAN	Error! Bookmark not defined.
SURAT KETERANGAN	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Ilustrasi pengambilan air terproduksi dari sumur CBM	17
Gambar 2. Proses dasar adsorpsi (Worch, 2012)	25
Gambar 3. Proses adsorpsi molekul gas pada permukaan padatan	25
Gambar 4. adsorpsi terhadap penyerapan (adsorpsi menyiratkan deposisi pada permukaan saja, absorpsi menyiratkan penetrasi ke permukaan padatan	26
Gambar 5. Hidrogen teradsorpsi pada molekular platinum serta Hidrogen teradsorpsi pada atom platinum.....	28
Gambar 6. Proses regenerasi katalis.....	39
Gambar 7. Pembuatan Membran Keramik Dengan Metode Slip CastinSumber : (Issaoui and Limousy, 2019)	42
Gambar 8. Pembuatan Membran Keramik Dengan Metode Tape Casting	42
Gambar 9. Pembuatan Membran Keramik Dengan Metode Pressing	43
Gambar 10. Pembuatan Membran Keramik Dengan Metode Ekstrusi	43
Gambar 11. Perbedaan dead-end filtration dan cross-flow filtration.....	46
Gambar 12. Skema Fenomena Osmosis dan Reverse Osmosis (Williams, 2013).....	48
Gambar 13. Diagram Alir Proses preparasi Residu Catalytic Cracking	82
Gambar 14. Diagram Alir Proses pembuatan Tepung tanah liat	83
Gambar 15. Diagram alir pembuatan Adsorben Keramik	84
Gambar 16. Diagram alir proses adsorpsi dengan adsorben keramik terintegrasi dengan Reverse Osmosis.....	86
Gambar 17. Skema Pengolahan Air Terproduksi Pertamina Menggunakan Adsorben Keramik - Membran Reverse Osmosis (RO)	88
Gambar 18. SEM RCC (a) sebelum di aktivasi, (b) setelah di aktivasi	94
Gambar 19. EDX dari spektrum Residu Catalytic Creacking (RCC) (a) Sebelum di aktifasi (b) setelah di aktifasi	94
Gambar 20. Morfologi permukaan adsorben 70% clay : 30% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	97
Gambar 21. Morfologi permukaan adsorben 70% clay : 30% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	98
Gambar 22. Morfologi permukaan adsorben 30% clay : 70% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	99
Gambar 23. Morfologi permukaan adsorben 30% clay : 70% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	100
Gambar 24. Morfologi permukaan adsorben 60% clay : 40% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	101
Gambar 25. Morfologi permukaan adsorben 60% clay : 40% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	102
Gambar 26. Morfologi permukaan adsorben 40% clay : 60% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	103

Gambar 27. Morfologi permukaan adsorben 40% clay : 60% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	104
Gambar 28. Morfologi permukaan adsorben 50% clay : 50% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	105
Gambar 29. Morfologi permukaan adsorben 50% clay : 50% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	106
Gambar 30. Analisa EDX adsorben 70% clay : 30% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) proses adsorpsi	107
Gambar 31. Analisa EDX adsorben 70% clay : 30% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	108
Gambar 32. Analisa EDX adsorben 30% clay : 70% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	109
Gambar 33. Analisa EDX adsorben 30% clay : 70% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	110
Gambar 34. Analisa EDX adsorben 60% clay : 40% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	111
Gambar 35. Analisa EDX adsorben 60% clay : 40% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	112
Gambar 36. Analisa EDX adsorben 40% clay : 60% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	113
Gambar 37. Analisa EDX adsorben 40% clay : 60% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	114
Gambar 38. Analisa EDX adsorben 50% clay : 50% RCC, 10 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	115
Gambar 39. Analisa EDX adsorben 50% clay : 50% RCC, 20 mm sebelum (a) dan sesudah (b) dengan pembesaran 500 kali	117
Gambar 40. Hasil Analisa FTIR adsorben keramik (50% clay : 50% RCC, 10 mm) a. Sebelum adsorpsi, b. Sesudah Adsorpsi	119
Gambar 41. Hasil Analisa FTIR adsorben keramik (50% clay : 50% RCC, 20 mm) a. Sebelum adsorpsi, b. Sesudah Adsorpsi	120
Gambar 42. Penghilangan TDS dalam air terproduksi oleh adsorben keramik (diameter 10 mm dan ketebalan 10 mm)	127
Gambar 43. Penghilangan TDS dalam air terproduksi oleh adsorben keramik (diameter 20 mm dan ketebalan 10 mm)	127
Gambar 44. Penghilangan TDS menggunakan gabungan adsorben keramik-Reverse Osmosis (diameter adsorben 10 mm dan ketebalan 10 mm)	128
Gambar 45. Penghilangan TDS menggunakan gabungan adsorben keramik Reverse Osmosis (diameter adsorben 20 mm dan ketebalan 10 mm)	128
Gambar 46. Pengaruh jenis adsorben terhadap Penyerapan TDS dalam air terproduksi	129
Gambar 47. Pengaruh Adsorben keramik-Membran Reverse Osmosis pada penyerapan TDS dalam air terproduksi	130
Gambar 48. Penghilangan TDS dengan adsorben keramik dan adsorben keramik-Reverse Osmosis.....	131
Gambar 49. Efek Laju Aliran dan Waktu Kontak pada persen penghilangan besi dengan adsorben keramik dengan diameter 10 mm dan ketebalan 10 mm.....	135

Gambar 50. Efek Laju Aliran dan Waktu Kontak pada persen penghilangan besi dengan adsorben keramik dengan diameter 20 mm dan ketebalan 10 mm.....	137
Gambar 51. Efek Laju Aliran dan Waktu Kontak pada persen penghilangan besi dengan adsorben keramik-Reberse Osmosi dengan ketebalan 10 mm	139
Gambar 52. Kandungan barium dalam air yang dihasilkan setelah proses pengolahan menggunakan adsorben keramik.....	140
Gambar 53. Pengaruh adsorben keramik--reverse osmosis keramik pada efisiensi penghilangan barium	142
Gambar 54. Kandungan barium dalam air yang diproduksi setelah proses pengolahan menggunakan adsorben-reverse osmosis keramiki.....	143
Gambar 55. Kurva breakthrough penghapusan barium	147
Gambar 56. Model kinetik Thomas.....	149
Gambar 57. Model Kinetik Adam-Bohart	150
Gambar 58. Model Kinetika Yoon-Nelson.....	151
Gambar 59. Hubungan antara konsetrasi awal ion Fe (II) dengan waktu kontak pada massa 2,5 g.....	155
Gambar 60. Hubungan antara konsetrasi awal ion Fe (II) dengan waktu kontak pada massa 5 g	156
Gambar 61. Hubungan antara konsetrasi awal ion Fe (II) dengan waktu kontak pada massa 7,5 g.....	157
Gambar 62. Hubungan antara konsetrasi awal ion Besi dengan waktu kontak pada massa 2,5 g	159
Gambar 63. Hubungan antara konsetrasi awal ion barium dengan waktu kontak pada massa 5 g	160
Gambar 64. Hubungan antara konsetrasi awal ion bariumdengan waktu kontak pada massa 7,5 g.....	160
Gambar 65. Adsorpsi kesetimbangan isotherm Langmuir ion besi dengan berbagai dosis adsorben: (a) 2,5 g. (b) 5 g. dan (c) 7,5 g	162
Gambar 66. Adsorpsi kesetimbangan isotherm Freundlich dari besi dengan dosis adsorben keramik yang bervariasi (a) 2,5 g, (b) 5 g, dan (c) 7,5 g	164
Gambar 67. Adsorpsi barium pada kesetimbangan isothermal Langmuir dan Freundlich dengan variasi dosis adsorben keramik (a) 2,5 g, (b) 5 g, dan (c) 7,5 g.....	165
Gambar 68. Kinetika adsorpsi PFO untuk ion besi (a) 2,5 g, (b) 5 g, dan (c) 7,5 g	170
Gambar 69. Kinetika adsorpsi PSO untuk ion besi (a) 2,5 g, (b) 5 g, dan c) 7,5 g.....	171
Gambar 70. Kinetika adsorpsi PFO untuk ion barium (a) 2,5 g, (b) 5 g, dan (c) 7,5 g....	173
Gambar 71. Kinetika adsorpsi PSO untuk ion barium (a) 2,5 g, (b) 5 g, dan (c) 7,5	174

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Baku mutu air limbah eksplorasi dan produksi Migas	25
Tabel 2. Perbedaan adsorpsi fisik dan adsorpsi kimia.....	29
Tabel 3. Jenis dan kegunaan Adsorben.....	32
Tabel 4. Sifat Kimia Tanah Liat Alami untuk Daerah Sumatera Selatan	37
Tabel 5. Hasil Pengukuran Komposisi Kimia Spent dan Fresh Catalyst Pada Tahun 2020 di PT. Pertamina	39
Tabel 6. Beberapa aplikasi proses membran dengan tekanan pada pengolahan air limbah	73
Tabel 7. Kandungan Awal Air Limbah	93
Tabel 8. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	95
Tabel 9. BET RCC	95
Tabel 10. Perbedaan SEM sebelum dan sesudah proses adsorpsi	101
Tabel 11. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	107
Tabel 12. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	108
Tabel 13. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	109
Tabel 14. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	110
Tabel 15. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	111
Tabel 16. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	112
Tabel 17. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	113
Tabel 18. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	114
Tabel 19. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	115
Tabel 20. Perbandingan komposisi unsur EDX sebelum dan sesudah adsorpsi	117
Tabel 21. Characterization of BET ceramic adsorbent sebelum proses adsorpsi.....	118
Tabel 22. Characterization of BET ceramic adsorbent setelah proses adsorpsi	118
Tabel 23. Perbandingan Penghapusan TDS oleh adsorben A, B, C, D, F, G, H, I, dan J.	131
Tabel 24. Keasaman hasil pengolahan air terproduksi menggunakan berbagai adsorben keramik	133
Tabel 25. Keasaman RO meresap pada komposisi adsorben keramik yang berbeda	134
Tabel 26. Konsentrasi limbah (ct) dan rasio Ct/Co sebagai fungsi waktu pada laju aliran yang berbeda.....	146
Tabel 27. Perbandingan hasil model Thomas, Yoon-Nelson, dan Adams-Bohart	152
Tabel 28. Data hasil pengamatan perubahan konsentrasi ion Fe (II) selama proses adsorpsi dengan massa adsorben keramik 2,5 g	155
Tabel 29. Data hasil pengamatan perubahan konsentrasi ion Fe (II) selama proses adsorpsi dengan massa adsorben keramik 5 g.....	156
Tabel 30. Data hasil pengamatan perubahan konsentrasi ion Fe (II) selama proses adsorpsi dengan massa adsorben keramik 7,5 g	156

Tabel 31. Data hasil pengamatan perubahan konsentrasi ion Barium selama proses adsorpsi dengan massa adsorben keramik 2,5 g	158
Tabel 32. Data hasil pengamatan perubahan konsentrasi ion barium selama proses adsorpsi dengan massa adsorben keramik 5 g.....	159
Tabel 33. Data hasil pengamatan perubahan konsentrasi ion barium selama proses adsorpsi dengan massa adsorben keramik 7,5 g	160
Tabel 34. Konstanta isotherm Langmuir untuk adsorpsi	162
Tabel 35. Konstanta isotherm Freundlich untuk adsorpsi besi	164
Tabel 36. Menyajikan konstanta isothermal Langmuir yang diperoleh dari data adsorpsi Fe^{2+}	166
Tabel 37. Menyajikan konstanta isothermal Freundlich yang diperoleh dari data adsorpsi Fe^{2+}	166
Tabel 38. Parameter model kinetik adsorpsi besi dan koefisien determinasi (R^2)	171
Tabel 39. Parameter model kinetik adsorpsi Barium dan koefisien determinasi (R^2)	174

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri perminyakan merupakan salah satu industri di Indonesia yang terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Peningkatan produksi minyak diimbangi dengan meningkatnya jumlah limbah cair yang dihasilkan dari eksplorasi minyak bumi. Limbah eksplorasi minyak dan gas disebut produced water (air terproduksi), merupakan salah satu limbah paling signifikan dalam industri minyak dan gas (Almeida et al., 2019). Air terproduksi sering dihasilkan selama produksi minyak dan gas dari sumur darat dan lepas pantai. Air formasi adalah air laut atau air tawar yang telah terperangkap selama jutaan tahun dengan minyak dan gas alam dalam reservoir geologis yang terdiri dari formasi batuan sedimen berpori di antara lapisan batuan kedap air di dalam kerak bumi. Pada umumnya, rasio minyak dan air terproduksi adalah 1:3 untuk sebagian besar sumur minyak (Munirasu et al., 2016). Komposisi kimia dari air terproduksi sangat kompleks mencakup campuran berbagai komponen seperti minyak terdispersi, hidrokarbon terlarut, asam organik, fenol, logam, serta residu senyawa kimia yang ditambahkan ke aliran produksi atau pemisahan (Al-Ghouti et al., 2019). Tanpa penanganan yang tepat, disposisi akhir air terproduksi dapat mencemari permukaan, air tanah, dan tanah. Komposisi kimiawi dari air yang dihasilkan bervariasi tergantung pada lokasi geografis area produksi, pembentukan bawah permukaan yang dengannya air yang dihasilkan telah bersentuhan selama ribuan tahun, dan jenis produk hidrokarbon yang diproduksi. Volume air yang dihasilkan juga bervariasi sepanjang waktu eksplorasi reservoir. Jika injeksi air dan kimia atau surfaktan dilakukan untuk meningkatkan produksi minyak, komposisi kimia dalam air yang diproduksi akan lebih bervariasi. Logam-logam dalam air yang dihasilkan memiliki konsentrasi tergantung pada usia dan geologi reservoir dari mana minyak dan gas diproduksi. Logam umum yang ditemukan di perairan yang dihasilkan termasuk seng, timah, mangan, besi, dan barium (Veil et al., 2004; Novira et al., 2022). Pembuangan tanpa pengolahan yang tepat air terproduksi dapat mengakibatkan kerusakan ekosistem (Clark, *et al.*, 2009; Al-Ghouti et al., 2019). Banyak logam berat yang diidentifikasi sebagai zat beracun dan karsinogenik juga memberikan dampak negatif bagi populasi manusia dan makhluk hidup lainnya di lingkungan. Logam berat memiliki kecenderungan

terakumulasi di lingkungan dan menyebabkan efek negatif pada kesehatan manusia (Hendges et al., 2021). Ketika logam berat memasuki rantai makanan dalam konsentrasi besar, dapat menumpuk di tubuh manusia. Tertelan atau terpapar logam berat dalam konsentrasi di luar batas yang diatur akan menciptakan masalah kesehatan yang serius pada manusia. Masalah serius pada manusia yang disebabkan oleh paparan logam berat termasuk kelainan pertumbuhan dan perkembangan, kanker, kerusakan sistem saraf, dan dalam kasus yang lebih buruk adalah kematian. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 19 tahun 2010 tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan /atau kegiatan minyak dan gas serta panas bumi, menetapkan bahwa konsentrasi maksimum yang diperbolehkan untuk kadar COD 200 - 300 mg/L, minyak dan lemak 25 – 50 mg/L, sulfida terlarut 0,5 mg/L, ammonia 5 mg/L, dan phenol 2 mg/L. Pengolahan air terproduksi telah banyak dilakukan diantaranya dengan cara biologis, yaitu biodegradasi komponen hidrokarbon menggunakan mikroorganisme (Hommel, 1997), adsorpsi komponen organik terlarut dengan karbon aktif (Doyle, Brown, 2000), penggunaan cyclones (Knudsen et al., 2006), koagulasi dan flokulasi (Khalid M. Mousa and Hind J. Hadi, 2016). Teknologi membran, khususnya ultrafiltrasi dapat digunakan sebagai alternatif pengolahan limbah eksploitasi minyak bumi. Ultrafiltrasi sudah pernah digunakan untuk pengolahan umpan yang mengandung komponen minyak bumi seperti drawing oil, emulsi tasfalout 22B oil (Sherhan et al., 2016); Santra et al., 2020)

Air terproduksi merupakan air produk sampingan yang terbawa ke permukaan pada saat pengambilan minyak dan gas bumi, termasuk didalamnya adalah air formasi, air injeksi, dan bahan kimia yang ditambahkan untuk pengeboran atau untuk proses pemisahan minyak atau air.

Air terproduksi akan semakin banyak seiring dengan tuanya umur dari lahan minyak ataupun gas, tetapi pengolahan yang baik dan pembukaan lahan minyak ataupun gas yang baru akan mengurangi jumlah air terproduksi. Air terproduksi dapat berasal dari air garam dan air formasi. Air terproduksi tidak dapat dibuang dan dimanfaatkan secara langsung karena mengandung beberapa parameter seperti COD, minyak dan lemak, TDS, pH dan Barium. Pemanfaatan air terproduksi dan pembuangan air terproduksi yang belum diolah dan mengandung banyak bahan berbahaya dapat mengganggu keseimbangan lingkungan. Oleh karena itu,

diperlukan pengolahan yang lebih baik dengan melakukan pengolahan air terproduksi menggunakan filter keramik yang terintegrasi dengan membran *reverse osmosis* (RO). Pengolahan menggunakan filter keramik ini materialnya utamanya terdiri dari katalis bekas dan tanah liat serta didukung oleh teknologi pengolahan dengan menggunakan membran *reverse osmosis* (RO), sehingga akan dihasilkan air terproduksi dengan kualitas yang sangat baik yaitu stabil dan sesuai dengan baku mutu ketika air terproduksi dimanfaatkan dan dibuang ke lingkungan. Air terproduksi yang telah diolah tersebut harus memenuhi standar baku mutu sesuai Peraturan Gubernur Sumatera Selatan No. 8 Tahun 2012.

Senyawa-senyawa yang terkandung di dalam air terproduksi merupakan senyawa pencemar yang apabila nilai dari senyawa-senyawa tersebut melebihi baku mutu lingkungan yang ditetapkan maka potensi terjadinya pencemaran ke lingkungan melalui badan air akan semakin besar. Kadar minyak dan lemak dalam air terproduksi merupakan campuran senyawa hidrokarbon yang terlarut sehingga mengandung senyawa seperti benzena, toluena, dan xilena dimana ketiga senyawa ini merupakan senyawa karsinogenik yang dapat memicu pertumbuhan sel kanker. Sedangkan apabila kadar garam (salinitas) melewati baku mutu lingkungan, maka kualitas dari air permukaan maupun air tanah berpotensi mengalami penurunan, oleh karena itu pengelolaan air terproduksi tersebut perlu dilakukan menggunakan metode yang bersifat menguntungkan secara ekonomi ataupun lingkungan (Simões et al., 2020).

Ada beberapa metode untuk pengolahan air yang tercemar seperti proses pendidihan, pasteurisasi, klorinasi, flokulasi desinfektan, penggunaan sinar ultraviolet (UV), biosand filter dan sebagainya (MacDonald et al., 2012). Karena, air terproduksi mengandung beberapa beberapa kontaminan yang berbeda dengan konsentrasi yang bervariasi, oleh karena itu, banyak teknologi pengolahan telah diusulkan untuk pengolahan air terproduksi. Teknologi pengolahan lain seperti ultra filtrasi, elektrolisis, reverse osmosis, ekstraksi (Motsi et al., 2011); (C. Wang et al., 2020). Diantara teknologi tersebut, yang umum digunakan adalah metode adsorpsi.

Metode adsorpsi ini menawarkan fleksibilitas dalam hal memilih bahan adsorben dan tergantung pada waktu, ruang dan dana yang tersedia untuk penetralan air limbah. Keuntungan utama system adsorpsi adalah investasi yang

rendah, tidak ada efek samping zat beracun, serta mampu menghilangkan bahan organik lebih baik dibandingkan dengan perlakuan secara biologi konvensional (J. M. Dickhout, J. Moreno, P. M. Biesheuvel and R. G. Lammertink, 2017; Dong *et al.*, 2011; Namasivayam and Sureshkumar, 2007). Pada proses adsorpsi melibatkan tiga tahapan, yaitu penghilangan molekul atau ion dari larutan, penghilangan pelarut dari permukaan padat, dan melekatkan molekul pada permukaan padat (Crini *et al.*, 2007). Mekanisme adsorpsi tergantung pada interaksi antara adsorbat dan adsorben, interaksi adsorbat dan larutan, serta interaksi adsorben dan larutan.

Proses adsorpsi umumnya terjadi pada permukaan adsorben, sehingga luas permukaan adsorben menjadi parameter penentu keberhasilan proses. Adsorben umumnya dari bahan atau partikel yang berpori sehingga mempunyai luas permukaan besar yang berkorelasi dengan tingginya kapasitas adsorpsi. Dinding dalam pori-pori pada partikel berporous dapat meningkatkan luas permukaan internal. Partikel yang sangat porous dapat memiliki luas permukaan internal antara $10^2 \text{ m}^2/\text{g}$ hingga $10^3 \text{ m}^2/\text{g}$, sebaliknya luas permukaan eksternal biasanya dibawah $1 \text{ m}^2/\text{g}$ (Worch, 2021). Luas permukaan internal untuk *peanut hull carbon* (PHC) telah ditemukan yaitu $485 \text{ m}^2/\text{g}$. Luas permukaan internal yang tinggi pada adsorben diperlukan untuk menghasilkan kapasitas pemisahan atau proses pemurnian yang baik. Adsorben yang dapat dibuat dengan luas permukaan internal berkisar mulai dari $100 \text{ m}^2/\text{g}$ hingga $3000 \text{ m}^2/\text{g}$, meskipun luas permukaan internal yang umum dipakai antar 300 hingga $1200 \text{ m}^2/\text{g}$, dengan diameter pori sebesar $0,0003$ hingga $0,02 \text{ }\mu\text{m}$ (Gul Zaman et al., 2021)

Adsorpsi logam berat menggunakan adsorben konvensional seperti karbon aktif dan tanah liat telah digunakan secara luas diberbagai aplikasi sebagai adsorben yang efektif. Namun, tingginya biaya proses aktivasi membatasi penggunaan karbon aktif dalam aplikasi pengolahan air limbah. Mengingat proses adsorpsi ini merupakan metode yang relative mudah pengoperasiannya, sehingga perlu dicari bahan murah, yang cocok diaplikasikan sebagai adsorben. Pada beberapa dekade terakhir banyak penelitian tentang penggunaan adsorben murah untuk menghilangkan kandungan logam beracun dalam air terproduksi. Jenis material adsorben yang telah banyak dikembangkan dalam meminimalkan cemaran logam

berat diperairan antara lain Lignit, *fly-ash*, klinker alam, zeolite sintetis dan berbagai limbah pertanian (Mohan and Chander, 2006; Rios *et al.*, 2008; Uddin, 2017). Penelitian yang telah dilakukan tentang limbah pertanian sebagai adsorben dalam proses adsorpsi antara lain Kulit kacang tanah sebagai adsorben untuk menghilangkan kandungan logam Cu^{2+} (Zhu *et al.*, 2009), Serbuk gergaji untuk menghilangkan zat warna kationik (Krowiyak *et al.*, 2011), Bungkil kedelai sebagai penyerap logam Cr^{3+} (Krowiyak, 2013), Limbah industry (Ahmaruzzaman, 2011), Material gambut (Holub *et al.*, 2013), Zeolit alam (Motsi *et al.*, 2011; Shavandi *et al.*, 2012), Campuran zeolite alam dan gambut dalam penyerapan ion logam berat Fe^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} dalam air terproduksi (daminian *et al.*, 2013), serat kulit kayu untuk menyerap Cu(II) , Pb(II) dan Zn(II) (Shamsudin *et al.*, 2016).

Bahan lain yang potensial untuk dikembangkan sebagai material adsorben yaitu Tanah liat dan limbah padat dari proses perengkahan minyak bumi yaitu katalis bekas. Katalis bekas perengkahan memiliki luas permukaan yang besar, butirannya halus, tidak mudah larut, dan mudah didapat. Berdasarkan karakteristik tersebut katalis bekas ini dapat digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan air terproduksi. Penggunaan katalis bekas sebagai pencampur dalam pembuatan adsorben diharapkan dapat menetralkan pH dan menurunkan kadar logam berat sehingga kualitas air terproduksi dapat di tingkatkan dan amat jika dialirkan ke badan air

Limbah eksploitasi minyak bumi yang disebut air terproduksi mengandung senyawa-senyawa seperti BTEX, ammonia, phenol, besi, dan Barium yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Beberapa teknologi yang telah digunakan dalam pengolahan air terproduksi antara lain pengolahan limbah secara biologis dengan mikroorganisme, koagulasi serta flokulasi, metode penukar ion, reverse osmosis, filtrasi berbasis membran untuk pengendapan dalam bentuk kompleksnya, elektrokoagulasi, presipitasi, dan adsorpsi (Al-Ajmi *et al.*, 2024; Mehta & Saini, 2017).

Dalam penelitian pembuatan filter keramik, komposisi bahan baku perlu diketahui agar bahan baku dapat terbentuk dan dapat menyaring air. Setelah dapat dibentuk saringan akan diuji coba untuk mendapatkan kecepatan aliran air yang melewati saringan keramik dan kualitas air yang telah melewati saringan keramik.

Pemisahan dengan menggunakan filter keramik terus meningkat dan diterapkan pada berbagai industri karena sifat membran yang mempunyai kekuatan mekanis yang baik, tahan terhadap asam dan basa, stabil secara termal dan kimiawi, mempunyai rentang distribusi pori yang sempit, struktur mikronya yang mudah disesuaikan, konsumsi energi yang rendah dan kecilnya kemungkinan menjadi polutan terhadap lingkungan. Oleh sebab itu banyak riset yang difokuskan pada pengembangan membran anorganik dan aplikasi prosesnya. Namun demikian, adsorben keramik berpori yang terbuat dari alumina, zirconia, titania, mullite, dll sebagai media utamanya.

Bahan utama yang digunakan pada pembuatan adsorben keramik adalah tanah liat. Tanah liat merupakan suatu zat yang terbentuk dari partikel-partikel yang sangat kecil, terutama dari mineral-mineral yang disebut kaolinit, yaitu persenyawaan dari oksida alumina (Al_2O_3) dengan oksida silika (SiO_2) dan air (H_2O).

Katalis buangan proses cracking minyak bumi di Pertamina RU III memiliki struktur regular, yang mengandung unsur-unsur Oksida, Calsium, Magnesium dan Rare earthfamily (Lathanum, Cherium). Limbah katalis ini digunakan pada suatu kilang minyak yang dilengkapi RCC sebagai suatu bahan untuk mengarahkan dan mempercepat laju reaksi produk utama yang diinginkan seperti : LPG (Elpiji), Propylene, Polygasoline, Naptha, LCD (bahan dasar diesel) dan Decant Oil (bahan dasar fuel oil). Pemanfaatan katalis bekas sebagai bahan utama yang digunakan dalam pembuatan filter keramik dikarenakan tidak dapat diregenerasi kembali sehingga menjadi tidak berguna dan berpotensi menjadi limbah. Katalis bekas yang digunakan berasal dari Pertamina RU III Plaju yang telah melalui proses perengkahan (cracking) minyak bumi. Katalis bekas ini adalah jenis yang mengandung oksida silika dan alumina, serta unsur lainnya antara lain SiO_2 38,27%, Al_2O_3 51,37%, Fe_2O_3 0,527%, TiO_2 0,461%, CaO 0,117%, dan MgO 0,145%, lainnya 9,11% (Ermawati et al., 2016). Hasil analisis penelitian yang telah dilakukan Ermawati tahun 2016 menunjukkan bahwa komponen utama katalis bekas hampir sama dengan zeolit, sehingga dari hal tersebut katalis bekas ini dapat dipergunakan sebagai bahan utama campuran pembuatan adsorben keramik.

Selain bahan utama seperti katalis bekas dan tanah liat, pada proses pembuatan adsorben keramik juga perlu penambahan zat yang berfungsi sebagai pembentuk pori. Material pembentuk pori ini dapat berupa bahan kimia seperti urea, maupun polimer, baik polimer dari alam maupun polimer sintetis. Polimer dari alam yang banyak dikembangkan untuk membentuk pori pada pembuatan membran keramik adalah jenis pati, seperti pati jagung, pati beras, pati gandum, pati gadung, dll.). Pati secara luas digunakan sebagai bahan untuk menghasilkan porositas dalam keramik karena dapat membentuk pori-pori selama proses pembakaran pada suhu sekitar 500 °C (Elomari et al., 2017).

Teknologi membran merupakan teknologi bersih yang ramah lingkungan karena tidak menimbulkan dampak yang buruk bagi lingkungan, Teknologi membran dapat mengurangi senyawa organik dan anorganik yang berada dalam air tanpa adanya penggunaan bahan kimia dalam pengoperasiannya (Dickhout et al., 2019; Neff et al., 2011; Novira et al., 2022).

Sehubungan dengan uraian yang telah disampaikan, maka peneliti tertarik untuk melakukan penelitian mengenai pengolahan air terproduksi menjadi air bersih. Air terproduksi ini akan diolah dengan menggunakan adsorben keramik berupa katalis bekas dari Pertamina RU III-Plaju sebagai tahap awal (pre-treatment) yang terintegrasi dengan sistem reverse osmosis (RO).

1.2. Perumusan Masalah

Adsorpsi adalah salah satu unit operasi utama yang digunakan untuk menghilangkan polutan dari berbagai limbah. Sejauh ini metode adsorpsi adalah metode yang paling efektif, ekonomis dan secara luas digunakan untuk mengurangi polutan logam berat. Selain itu, proses adsorpsi juga mudah dioperasikan dan memiliki desain yang sederhana (Amrutha et al., 2023; Gupta et al., 2021; Zaimee et al., 2021) (Fu and Wang, 2011; Gupta and Ali, 2013; Yavuz *et al.*, 2003). Karbon aktif adalah bahan yang sering digunakan sebagai adsorben dalam proses adsorpsi. Karbon aktif, merupakan bahan yang tidak berbahaya sehingga penggunaannya sebagai adsorben berkembang cukup pesat. Selain itu karbon aktif memiliki porositas dan luas permukaan yang cukup besar yaitu berkisar antara 600 hingga 2000 m²/g, terutama setelah proses aktivasi (Amjad H El-Sheikh, Alan P Neivewman, Hafid K Al-Daffae, Suki Phull, 2004; Imelda et al., 2019) (Guo *et*

al., 2009; Henning and Knielle, 2012; Lakovlepa and Sillanpaa, 2013). Karbon aktif umumnya dianggap sebagai salah satu adsorben yang paling populer dan banyak digunakan untuk menghilangkan berbagai zat dalam air maupun air limbah (Bhatnagar and Sillanpaa, 2010). Namun, Penggunaan karbon aktif sebagai adsorben membutuhkan biaya yang besar untuk proses aktivasi, karena harus dipanaskan pada temperatur sekitar 600 hingga 800 °C selama 30 hingga 60 menit (Kalderis *et al.*, 2008). Oleh karena itu, perlu dicari alternatif bahan adsorben yang murah, mudah didapat, tersedia dalam jumlah yang melimpah dan efektif untuk pengendalian pencemaran air dan air limbah. Salah satu bahan yang dapat dikembangkan sebagai bahan adsorben yang murah, mudah didapat, dan tersedia cukup banyak adalah limbah padat yang berasal dari buangan proses cracking minyak bumi dan tanah liat.

Katalis yang digunakan pada penelitian yang digunakan sebagai bahan tambahan pembuatan adsorbent keramik adalah katalis buangan dari proses cracking minyak bumi. Katalis bekas mengandung silika alumina, jika dimanfaatkan maka dapat membantu pengurangan limbah industri dengan pemanfaatan kembali. Katalis ini termasuk kedalam golongan katalis heterogen yang mana dalam penggunaannya dapat lebih mudah untuk dipisahkan melalui penyaringan

Sedangkan sifat-sifat limbah katalis jenis Zeolit kristalin adalah sebagai berikut (Saifuddin *et al.*, 2018):

1. Kapasitas adsorpsi tinggi.
2. Tidak bersifat korosif.

Katalis RCC merupakan katalis bekas proses perengkahan, yang digunakan pada perusahaan pengolahan minyak menjadi bahan bakar. RCC merupakan residu katalis dari proses *Catalytic Cracking* (CC). Unit katalis CC digunakan untuk menghasilkan bahan bakar. Residu RCC belum dimanfaatkan secara optimal dan hanya dibuang ke tempat pembuangan akhir (Ermawati *et al.*, 2016; Putri *et al.*, 2022). Katalisator buangan proses perengkahan minyak bumi adalah katalis hasil reaksi mengandung coke hasil perengkahan hidrokarbon, oleh karena itu sebelum di gunakan menjadi bahan baku pembuatan filter keramik, katalisator harus dilakukan proses regenerasi katalis. Tujuan menghasilkan katalis yang dapat

menjadi adsorben dengan menghilangkan coke pada katalis dengan cara reaksi pembakaran antara coke pada katalis dengan udara yang mengandung oksigen (O_2). Sejauh ini buangan katalis bekas proses cracking tidak dimanfaatkan sama sekali. Padahal proses cracking minyak bumi menghasilkan buangan katalis bekas mencapai 1 ton perminggunya (P.P. Pertamina (Persero) Refinery, 2017). Limbah padat sebesar ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Sejauh ini buangan katalis bekas cracking hanya ditampung dan pada masanya akan dibuang ke tempat pembuangan limbah.

Tanah liat sebagai bahan utama pembuatan keramik/gerabah memiliki kemampuan dalam mengadsorpsi unsur-unsur logam diantaranya Pb, Cr, As, Ba dan Cd. Kemampuan ini dikarenakan tanah liat memiliki kandungan unsur-unsur anorganik antara lain SiO_2 dan Al_2O_3 disamping itu tanah liat juga memiliki pori-pori yang luas mencapai $800\text{ m}^2/\text{gr}$. Proses pemanasan dapat digunakan sebagai metode untuk memperluas area permukaan adsorpsi pada tanah liat. Tanah liat (*clay*) atau lempung adalah partikel mineral berkerangka dasar silikat yang berdiameter kurang dari 4 mikrometer. Tanah liat mengandung leburan silika dan alumunium yang halus. Tanah liat terbentuk dari proses pelapukan batuan silika oleh asam karbonat dan sebagian dihasilkan dari aktifitas panas bumi. Tanah liat membentuk gumpalan keras saat kering dan lengket apabila basah terkena air. Sifat ini ditentukan oleh jenis mineral lempung yang mendominasinya. Tanah liat merupakan suatu zat yang terbentuk dari partikel-partikel yang sangat kecil, terutama dari mineral-mineral yang disebut kaolinit, yaitu persenyawaan dari oksida alumina (Al_2O_3) dengan oksida silika (SiO_2) dan air (H_2O). Tanah liat banyak digunakan sebagai adsorben, karena kemampuan tanah liat untuk mengadsorpsi logam.

Pada penelitian ini dikembangkan proses adsorpsi dengan adsorben keramik dari campuran tanah liat dan residue Catalytic Cracking (RCC) yang diintegrasikan dengan reverse osmosis. Keberhasilan penelitian ini diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan tingginya kandungan ion logam didalam air terproduksi. Permasalahan pada air terproduksi mempunyai nilai total padat zat terlarut dan logam barium yang sangat tinggi yang dapat meracuni tanah, air dan lingkungan sekitar (Alcafi et al., 2019; Tiana, 2015). Selain itu, hasil

pengembangan teknologi alternatif proses adsorpsi yang menggunakan adsorben yang murah dapat mudah diadopsi dan diaplikasikan secara luas tidak terbatas hanya untuk pengolahan air terproduksi. Pada penelitian ini, simulasi difokuskan pada pengaruh diameter partikel, waktu dan laju alir terhadap kinerja adsorpsi yang digunakan sebagai proses adsorpsi dengan adsorben keramik campuran tanah liat dan residue catalytic cracking.

1.3. Tujuan Penelitian

1.3.1. Tujuan Umum

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode alternatif proses adsorpsi menggunakan limbah katalis bekas yang di campur dengan tanah liat sebagai adsorben keramik untuk pengolahan air terproduksi dari proses pengeboran minyak bumi. Pada penelitian ini akan dilakukan secara bertahap menjadi empat tahapan. Adapun tahapan tersebut yaitu:

1. Penelitian tahap pertama. Penelitian tahap pertama bertujuan untuk melakukan karakterisasi awal terhadap adsorben keramik. Karakterisasi adsorben keramik yang digunakan adalah 1. Pengamatan morfologi partikel adsorben keramik dengan menggunakan analisa SEM (Scanning elektron Microscopik), dan dilanjutkan dengan pengamatan komposisi kimia atau unsur-unsur yang ada di dalam sample dengan analisa Edx. Selain itu dilakukan juga analisa BET (Brunauer Emmett Teller). Untuk menentukan luas permukaan spesifik (specific surface area) suatu bahan dan menganalisa karakteristik pori-pori (Pore Characteristics) pada material. Pengamatan terhadap adsorben dilakukan sebelum dan sesudah proses adsorpsi.
2. Penelitian tahap kedua, pada tahap ini melakukan proses adsorpsi secara continue menggunakan kolom adsorpsi yang terintegrasi dengan membrane Reverse Osmosis (RO) untuk menurunkan kadar polutan (TDS, Besi dan Barium) didalam air terproduksi menggunakan adsorben keramik. Pada proses adsorpsi ini dilakukan dengan variasi terhadap laju alir dan waktu operasi. Hasil dari proses adsorpsi ini dilakukan analisa
3. Penelitian tahap ketiga, pada tahap ini penelitian dilakukan secara batch untuk mempelajari kinetika adsorpsi untuk menentukan efisiensi adsorben keramik dalam menghilangkan ion logam berat dalam air terproduksi, yaitu dengan

mengkontakkan adsorben keramik dengan air artifisial yang mengandung logam berat tunggal besi dan barium pada kondisi yang berbeda, yaitu variasi waktu, variasi massa adsorben dan konsentrasi ion logam. Selain mempelajari kinetika adsorpsi, pada penelitian tahap ketiga juga mempelajari proses kesetimbangan dalam penurunan parameter polutan air artifisial dalam konsentrasi yang berbeda. Data percobaan dianalisa. etelah proses adsorpsi, dilakukan pengamatan terhadap air terproduksi yang sudah diolah sesuai dengan baku mutu air terproduksi minyak dan gas bumi.

4. Penelitian tahap keempat, Pada penelitian ini ditujukan untuk mendapatkan model kinetika adsorpsi yang sesuai dengan proses adsorpsi ion logam Fe, dan logam Barium menggunakan adsorben keramik. Model kinetika adsorpsi yang diuji adalah model kinetika pseudo orde satu dan pseudo orde dua.

1.3.2. Tujuan Khusus

1. Diperoleh karakteristik spesifik adsorben yang dikembangkan dari campuran tanah liat dan RCC sebagai bahan campuran pembuatan adsorben keramik
2. Kinerja proses adsorpsi pada kolom Adsorpsi dengan menggunakan adsorben keramik yang dikembangkan dari katalis bekas untuk mengolah limbah air terproduksi
3. Model kinetika adsorpsi yang dapat diterapkan pada proses adsorpsi menggunakan adsorben berbahan tanah liat dan RCC

1.4. Hipotesa

Hipotesa dalam penelitian ini yaitu :

1. Adsorben keramik lebih efektif dan efisien sehingga layak dijadikan sebagai teknologi alternatif dalam pengolahan limbah.
2. Perbedaan tekanan operasi dan lama waktu operasi mempengaruhi kinerja Adsorben keramik. Semakin besar perbedaan tekanan dan semakin lama waktu operasi, maka semakin baik hasil permeat yang dihasilkan.
3. Adsorben keramik berbentuk tablet dengan media tanah liat dan residue catalytic cracking dapat menurunkan nilai pH, TDS, besi dan barium dalam air terproduksi (WP).

1.5. Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian berskala laboratorium.
2. Air terproduksi (WP) yang digunakan berasal dari PT Pertamina Hulu Rokan Zona 4 Field Limau EP Prabumulih.
3. Katalis bekas yang digunakan adalah katalis RCC (*Residue Catalytic Cracker*) yang telah melalui proses perengkahan (*cracking*) minyak bumi yang berasal dari Pertamina RU III Plaju.

1.6. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap pengembangan material residue catalytic cracking dan tanah liat sebagai adsorben dalam menurunkan nilai Total Padatan Terlarut, pH, Besi dan Barium, menambah ilmu pengetahuan mengenai karakteristik residue Catalytic cracking dan tanah liat sebagai adsorben. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan solusi terhadap penanganan air terproduksi. Model kinetika adsorpsi yang didapat diharapkan dapat digunakan dalam proses adsorpsi secara luas. Selain itu juga, diharapkan RCC dapat diaplikasikan sebagai adsorben keramik dalam pengendalian limbah cair industri yang mengandung logam tinggi.

1.6. Keunggulan Penelitian

Keunggulan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengatasi permasalahan Pencemaran Lingkungan.
2. Mengembangkan adsorben keramik dari bahan limbah industri yang tidak bernilai menjadi bahan yang potensial.
3. Pengembangan teknologi adsorpsi sederhana dengan bahan yang murah dan mudah didapat untuk di aplikasikan secara tepat guna.
4. Teknologi proses adsorpsi menggunakan adsorben keramik dapat di integrasikan dengan membrane Reverse Osmosis untuk menghasilkan air bersantair air minum

DAFTAR PUSTAKA

- Abo-Elmagd, A. M., et al. (2019). Removal of Iron and Manganese from Groundwater by Adsorption on Agricultural Residues and Natural Waste Materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 13(8), 104–111. <https://doi.org/http://10.22587/ajbas.2019.13.8.14>
- Aboussabek et al. (2024). Experimental investigation, kinetics and statistical modeling of methylene blue removal onto Clay@Fe₃O₄: Batch, fixed bed column adsorption and photo-Fenton degradation studies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100580. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100580>
- ADąbrowski. (2001). Adsorption — from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93(1–3), 135–224. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8)
- Ahmet Gunay, Ertan Arslankaya, I. T. (2006). Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal Hazardous Material*, 146, 362–371. <https://doi.org/http://doi:10.1016>
- Al-Ajmi, F., Al-Marri, M., Almomani, F., & AlNouss, A. (2024). A Comprehensive Review of Advanced Treatment Technologies for the Enhanced Reuse of Produced Water. *Water (Switzerland)*, 16(22). <https://doi.org/10.3390/w16223306>
- Al-Ghouti, M. A., Al-Kaabi, M. A., Ashfaq, M. Y., & Da'na, D. A. (2019). Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 28(January), 222–239. <https://doi.org/http://10.1016/j.jwpe.2019.02.001>
- Al-Kaabi, M. A., Al-Ghouti, M. A., Ashfaq, M. Y. M., Ahmed, T., & Zouari, N. (2019). An integrated approach for produced water treatment using microemulsions modified activated carbon. *Journal of Water Process Engineering*, 31. <https://doi.org/http://10.1016/j.jwpe.2019.100830>
- Alcafi, M. C., Yusuf, M., & Prabu, U. A. (2019). Penggunaan Zeolit dalam Menurunkan Konsentrasi Lemak dan Minyak pada Air Terproduksi Migas. *Jurnal Pertambangan*, 3(4), 23–27.
- Alkadir, O. K. A., Al-Mashhadani, Z. I., Aljeboree, A. M., & Alkaim, A. F. (2021). Comparison Between Pseudo-first-order and Pseudo-second-order of Linear and Nonlinear Equations Adsorption Kinetic Models for the Removal of Amoxicillin (AMX) onto Hydrogel. *International Journal of Pharmaceutical Quality Assurance*, 12(4), 346–350. <https://doi.org/http://10.25258/ijpqa.12.4.24>
- Allen, T. D. (2012). Mentoring Relationships from the Perspective of the Mentor. *The Handbook of Mentoring at Work: Theory, Research, and Practice*, 123–148. <https://doi.org/http://10.4135/9781412976619.n5>
- Almeida, F. B. P. S., Meili, L., Soletti, J. I., Esquerre, K. P., Ribeiro, L. M. O., & De Farias Silva, C. E. (2019). Oil produced water treatment using sugarcane solid residue as adsorbent. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*,

- 18(1), 27–38.
<https://doi.org/http://10.24275/UAM/IZT/DCBI/REVMEXINGQUIM/2019V18N1/ALMEIDA>
- Aly, M. I., Hassan, M. R., Ghobashy, M. M., & Masry, B. A. (2022). Removal of barium (II), cobalt (II), and strontium (II) from aqueous solution using chemically modified poly (acrylonitrile-butadiene-styrene) pellets. *Particulate Science and Technology*.
<https://doi.org/10.1080/02726351.2021.1992060>
- Amanda, D. (2019). *Uji Persamaan Langmuir dan Freundlich Pada Penyerapan Ion Logam Kobalt (II) oleh Kitosan dari Kulit Udang Windu (Penaeus Monodon)*. *Ii*, 16.
- Amari, A., Gannouni, H., Khan, M. I., Almesfer, M. K., Elkhaleefa, A. M., & Gannouni, A. (2018). Effect of structure and chemical activation on the adsorption properties of green clay minerals for the removal of cationic dye. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(11), DOI: 10. 3390/app8112302.
<https://doi.org/http://10.3390/app8112302>
- Amjad H El-Sheikh, Alan P Newman, Hafid K Al-Daffae, Suki Phull, N. C. (2004). Characterization of activated carbon prepared from a single cultivar of Jordanian Olive stones by chemical and physicochemical techniques. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(1), 151–164.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00061-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00061-5)
- Amrutha, Jeppu, G., Girish, C. R., Prabhu, B., & Mayer, K. (2023). Multi-component Adsorption Isotherms: Review and Modeling Studies. *Environmental Processes*, 10(2). <https://doi.org/http://10.1007/s40710-023-00631-0>
- Andina, K. (2017). PENGOLAHAN AIR LIMBAH BERMINYAK DENGAN TEKNOLOGI MEMBRAN. *Researchgate, December*.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1134029>
- Annan, E., Agyei-Tuffour, B., Bensah, Y. D., Konadu, D. S., Yaya, A., Onwona-Agyeman, B., & Nyankson, E. (2018). Application of clay ceramics and nanotechnology in water treatment: A review. *Cogent Engineering*, 5(1), 1–35. <https://doi.org/http://10.1080/23311916.2018.1476017>
- Anwana Abel, U., Rhoda Habor, G., & Innocent Oseribho, O. (2021). Mathematical and Kinetic Modelling of the Adsorption of Crude Oil Spill Using Coconut Coir Activated Carbon. *Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering*, 6(1), 1.
<https://doi.org/http://10.11648/j.jeece.20210601.11>
- Apea, O. B., Akorley, B. E., Oyelude, E. O., & Ampadu, B. (2023). Evaluation of the adsorption behavior and divalent metal ions removal efficiency of ceramic point-of-use water filter materials. *Environmental Systems Research*, 12(1). <https://doi.org/http://10.1186/s40068-023-00322-7>
- Aprianti, T., Sari, T. I., Hadiah, F., Utama, Y., & Said, M. (2022). Powdered Activated Carbon (PAC)-Ceramic Composite Adsorbent for Iron and Aluminum Cations Removal from Acid Mine Drainage. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(1).
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.1.13>
- Arthur, J., Langhus, B., & Patel, C. (2005). Technical Summary of Oil & Gas Produced Water Treatment Technologies. *Tulsa, Oklahoma, USA, ALL ...*,

- March 2005, 1–53. <http://w.all-llc.com/publicdownloads/ALLConsulting-WaterTreatmentOptionsReport.pdf>
- Azizi, A., Forghani, M., Kafshgari, L. A., & Hassanzadeh, A. (2023). Adsorptive Removal Behavior of Pb (II) and Cr (VI) Pollutants from an Aqueous Environment onto Polyaniline-Modified MIL100(Fe). *Minerals*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/min13030299>
- B Carmel Jeeva Mary, et al. (2022). Study of Barium Adsorption from Aqueous Solutions Using Copper Ferrite and Copper Ferrite/rGO Magnetic Adsorbents. *Adsorption Science & Technology*, 2022, 3954536. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/3954536>
- Baldermann, A., Cäcilia Griebbacher, A., Baldermann, C., Purgstaller, B., Letofsky-Papst, I., Kaufhold, S., & Dietzel, M. (2018). Removal of barium, cobalt, strontium and zinc from solution by natural and synthetic allophane adsorbents. <https://doi.org/http://10.20944/preprints201806.0478.v1>
- Beyer, J., Goksøyr, A., Hjermann, D. Ø., & Klungsøyr, J. (2020a). Environmental effects of offshore produced water discharges: A review focused on the Norwegian continental shelf. *Marine Environmental Research*, 162, 105152. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105155>
- Beyer, J., Goksøyr, A., Hjermann, D. Ø., & Klungsøyr, J. (2020b). Environmental effects of offshore produced water discharges: A review focused on the Norwegian continental shelf. *Marine Environmental Research*, 162(July). <https://doi.org/http://10.1016/j.marenvres.2020.105155>
- Bodzek, M., Konieczny, K., & Rajca, M. (2019). Membranes in water and wastewater disinfection – review. *Archives of Environmental Protection*, 45(1), 3–18. <https://doi.org/http://10.24425/aep.2019.126419>
- Brix, K. V., Gerdes, R., Curry, N., Kasper, A., & Grosell, M. (2010). The effects of total dissolved solids on egg fertilization and water hardening in two salmonids-Arctic Grayling (*Thymallus arcticus*) and Dolly Varden (*Salvelinus malma*). *Aquatic Toxicology*, 97(2), 109–115. <https://doi.org/http://10.1016/j.aquatox.2009.12.011>
- Budnyak, T. M., Slabon, A., & Sipponen, M. H. (2020). Lignin–Inorganic Interfaces: Chemistry and Applications from Adsorbents to Catalysts and Energy Storage Materials. *ChemSusChem*, 13(17), 4344–4355. <https://doi.org/http://10.1002/cssc.202000216>
- Cañedo-Argüelles, M., Kefford, B. J., Piscart, C., Prat, N., Schäfer, R. B., & Schulz, C. J. (2013). Salinisation of rivers: An urgent ecological issue. *Environmental Pollution*, 173(173), 157–167. <https://doi.org/http://10.1016/j.envpol.2012.10.011>
- Cui, W. L., Tang, K., Chen, Y., Chen, Z., Lan, Y., Hong, Y. Bin, & Lan, W. G. (2024). Regulating the particle sizes of NaA molecular sieves toward enhanced heavy metal ion adsorption. *New Journal of Chemistry*, 48(17), 7863–7874. <https://doi.org/10.1039/d3nj05924c>
- Dickhout, J. M., Moreno, J., Biesheuvel, P. M., Boels, L., Lammertink, R. G. H., & de Vos, W. M. (2017a). Produced water treatment by membranes: A review from a colloidal perspective. *Journal of Colloid and Interface Science*, 487(487, DOI: 10.1016/j.jcis.2016.10.013), 523–534. <https://doi.org/http://10.1016/j.jcis.2016.10.013>
- Dickhout, J. M., Moreno, J., Biesheuvel, P. M., Boels, L., Lammertink, R. G. H.,

- & de Vos, W. M. (2017b). Produced water treatment by membranes: A review from a colloidal perspective. *Journal of Colloid and Interface Science*, 487(487), 523–534. <https://doi.org/http://10.1016/j.jcis.2016.10.013>
- Dickhout, J. M., Virga, E., Lammertink, R. G. H., & de Vos, W. M. (2019). Surfactant specific ionic strength effects on membrane fouling during produced water treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 556, 12–23. <https://doi.org/http://10.1016/j.jcis.2019.07.068>
- Djoko Kusworo, T., Rahmatya Gerhana, A., & Hanifah Angga Putra, N. (2018). Enhancement Performance of Hybrid Membrane Zeolite/PES for Produced Water Treatment with Membrane Modification Using Combination of Ultra Violet Irradiation, Composition of Zeolite and Thermal Annealing. *MATEC Web of Conferences*, 156. <https://doi.org/http://10.1051/matecconf/201815608002>
- Drioli, E., Ali, A., Lee, Y. M., Al-Sharif, S. F., Al-Beirutty, M., & Macedonio, F. (2016). Membrane operations for produced water treatment. *Desalination and Water Treatment*, 57(31), 14317–14335. <https://doi.org/http://10.1080/19443994.2015.1072585>
- Edet, U. A., & Ifealebuegu, A. O. (2020). Kinetics, isotherms, and thermodynamic modeling of the adsorption of phosphates from model wastewater using recycled brick waste. *Processes*, 8(6), 1–15. <https://doi.org/http://10.3390/PR8060665>
- Elomari, H., Achiou, B., Karim, A., Ouammou, M., Albizane, A., Bennazha, J., Alami.Younssi, S., & Elamrani, I. (2017). Influence of starch content on the properties of low cost microfiltration membranes. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 5(3), 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2017.06.004>
- Ermawati, R., Jati, B. N., Rumondang, I., Oktarina, E., & Naimah, S. (2016). Pengaruh Residue Catalytic Cracking (RCC) dan Zeolit terhadap Kualitas Crude Oil Hasil Pirolisis Limbah Plastik Polietilena. *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, 38(1), 47. <https://doi.org/http://10.24817/jkk.v38i1.1978>
- Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., & Abidin, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2–3), 530–551. <https://doi.org/http://10.1016/j.jhazmat.2009.05.044>
- Fernandez et al. (2023). Experimental Design and Breakthrough Curve Modeling of Fixed-Bed Columns Utilizing a Novel 3D Coconut-Based Polyurethane-Activated Carbon Composite Adsorbent for Lead Sequestration. *Sustainability*, 15(19), 14344. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su151914344>
- Finke, T., Gernsbeck, M., Eisele, U., Bockhorn, H., Hartmann, M., Kureti, S., & Vincent, C. (2007). Surface chemistry of ceramic materials - Analysing strategies and model associations. *CFI Ceramic Forum International*, 84(7–8).
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010a). Detoxification of pesticide waste via activated carbon adsorption process. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), 1–11. <https://doi.org/http://10.1016/j.jhazmat.2009.10.014>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010b). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/http://10.1016/j.cej.2009.09.013>

- Forsido, T. T., McCrindle, R. I., Maree, J., & Monyatsi, L. (2020). Removal of Al, Ba and Mg from industrial wastewater using EAFDS and lime. *Applied Water Science*, 10(6). <https://doi.org/http://10.1007/s13201-020-01234-y>
- Girão, A. V., Caputo, G., & Ferro, M. C. (2017). Application of scanning electron microscopy–energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). In *Comprehensive Analytical Chemistry*, 75, 153–168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.10.002>
- Gul Zaman, H., Baloo, L., Pendyala, R., Singa, P. K., Ilyas, S. U., & Kutty, S. R. M. (2021). Produced water treatment with conventional adsorbents and MOF as an alternative: A review. In *Materials* (Vol. 14, Issue 24). MDPI. <https://doi.org/http://10.3390/ma14247607>
- Gupta, A., Sharma, V., Sharma, K., Kumar, V., Choudhary, S., Mankotia, P., Kumar, B., Mishra, H., Moulick, A., Ekielski, A., & Mishra, P. K. (2021). A review of adsorbents for heavy metal decontamination: Growing approach to wastewater treatment. *Materials*, 14(16), 1–45. <https://doi.org/10.3390/ma14164702>
- Hassan, S. S. M., Kamel, A. H., Youssef, M. A., Aboterika, A. H. A., & Awwad, N. S. (2020). Removal of barium and strontium from wastewater and radioactive wastes using a green bioadsorbent, *salvadora persica* (Miswak). *Desalination and Water Treatment*, 192, 306–314. <https://doi.org/http://10.5004/dwt.2020.25774>
- Haura, U., Razi, F., & Meilina, H. (2017). Karakterisasi Adsorben dari Kulit Manggis dan Kinerjanya Pada Adsorpsi Logam Pb (II) dan Cr (VI). *Biopropal Industri*, 8(1), 47–54.
- Hayes, T., & Arthur, D. (2015). Overview of emerging produced water treatment technologies. In *11th Annual International Petroleum Environmental Conference, Albuquerque, NM*, 12.
- Hendges, L. T., Costa, T. C., Temochko, B., Gómez González, S. Y., Mazur, L. P., Marinho, B. A., da Silva, A., Weschenfelder, S. E., de Souza, A. A. U., & de Souza, S. M. A. G. U. (2021). Adsorption and desorption of water-soluble naphthenic acid in simulated offshore oilfield produced water. *Process Safety and Environmental Protection*, 145(145), 262–272. <https://doi.org/http://10.1016/j.psep.2020.08.018>
- Herbudiman, B., Setyaning, A., & Kemala, P. (2011). *The Use Of Spent Catalyst RCC-15 As Powder On Environmental- Friendly High-Performance Self-Compacting Concrete*. 89–94.
- Hommel, R. . (1997). Formation and physiological role of biosurfactants produced by hydrocarbon-utilizing microorganisms. *Physiology of Biodegradative Microorganisms*, 107–119.
- I G. Wenten, P.T.P. Aryanti, K. (2017). Teknologi membran dalam pengolahan limbah cair industri (Review). *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, January 2016, 18–24. <https://doi.org/10.24817/jkk.v0i0.3281>
- Ibrahim et al. (2023). Advances in Produced Water Treatment Technologies: An In-Depth Exploration with an Emphasis on Membrane-Based Systems and Future Perspectives. *Water*, 15(16), 2980. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15162980>
- Ilham; Amun Amri dan Sofia Anita. (2019). PENGOLAHAN AIR TERPRODUKSI MIGAS DI KECAMATAN MINAS BERBASIS

ADSORBSI LOGAM BORON DAN BARIUM MENGGUNAKAN ADSORBEN ALAMI. *Prosiding Seminar Nasional Pelestarian Lingkungan*, 98–106.

- Imelda, D., Khanza, A., & Wulandari, D. (2019). The Effect of Particle Size and Temperature on the Absorption of Copper Metal (Cu) with Activated Carbon from Kepok Banana Peel (*Musa Paradisiaca* Formatypica). *Technology Journal*, 6(2), 107–118. <https://doi.org/10.31479/jtek.v6i2.10>
- Jang, E., Jeong, S., & Chung, E. (2017). Application of three different water treatment technologies to shale gas produced water. *Geosystem Engineering*, 20(2), 104–110. <https://doi.org/http://10.1080/12269328.2016.1239553>
- Jinadasa, K. K., Peña-Vázquez, E., Bermejo-Barrera, P., & Moreda-Piñeiro, A. (2020). Ionic imprinted polymer solid-phase extraction for inorganic arsenic selective pre-concentration in fishery products before high-performance liquid chromatography – inductively coupled plasma-mass spectrometry speciation. *Journal of Chromatography A*, 1619, 460973. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.460973>
- Karm, Z., Subhi, A. D., & Hamied, R. S. (2020). Synthesis, characterization and application of gamma-alumina as adsorbent material to enhance iron removal from produced water. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 82(1), 237–246. https://www.researchgate.net/profile/Ramzy_Syhood/publication/340209952_SYNTHESIS_CHARACTERIZATION_AND_APPLICATION_OF_GAMMA-ALUMINA_AS_ADSORBENT_MATERIAL_TO_ENHANCE_IRON_REMOVAL_FROM_PRODUCED_WATER/links/5e7d192292851caef4a1f7dd/SYNTHESIS-CHARACTERIZATION
- kasam, I., Siswoyo, E., & Agustina, R. A. (2009). Penggunaan Membran Keramik Untuk Menurunkan Bakteri E. Coli Dan Total Suspended Solid (Tss) Pada Air Permukaan. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 1(1), 77–85. <https://doi.org/http://10.20885/jstl.vol1.iss1.art5>
- Khalid M. Mousa* and Hind J. Hadi. (2016). Coagulation/Flocculation Process for Produced Water Treatment. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 6(2), 551–555.
- Knudsen, B. L., Skjerve, S., Frost, T. K., Gangstad, A., & Birketveit, O. (2006). *Implementation of Environmentally Friendly Corrosion Inhibitor at Statfjord Field. October*. <https://doi.org/http://10.2118/98594-ms>
- Končar, B., & Krepper, E. (2008). CFD simulation of convective flow boiling of refrigerant in a vertical annulus. *Nuclear Engineering and Design*, 238(3), 693–706. <https://doi.org/http://10.1016/j.nucengdes.2007.02.035>
- Kravchenko. et al. (2014). A review of the health impacts of barium from natural and anthropogenic exposure. *Environmental Geochemistry and Health*, 26, 797–814. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-014-9622-7>
- Kurniawan, I., & Mariadi, P. D. (2016). Review : Profil Hybrid Membrane dalam Proses Reduksi Air Limbah. *Jurnal Konversi*, 5(1), 1–10.
- Lach, J., & Ociepa-Kubicka, A. (2017). The removal of chloramphenicol from water through adsorption on activated carbon. *E3S Web of Conferences*, 19. <https://doi.org/http://10.1051/e3sconf/20171902008>
- Larson, A. (2018). Produced Water : Oil and Gas Terminology Glossary. *Water*

- Environment Federation*, 5. <https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-013-iwwc-og-glossary---final---5.21.18.pdf>
- Laus, R., & De Fávère, V. T. (2011). Competitive adsorption of Cu(II) and Cd(II) ions by chitosan crosslinked with epichlorohydrin-triphosphate. *Bioresource Technology*, 102(19), 8769–8776. <https://doi.org/http://10.1016/j.biortech.2011.07.057>
- Liu, X. (2019). Research Progress on Treatment Technology of Produced Water by Adsorption Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 472(1). <https://doi.org/http://10.1088/1757-899X/472/1/012082>
- MacDonald, M. C., Ali, S. I., & Hall, K. (2012). Collaborative innovation for the development of contextually appropriate water treatment technology in a marginalized, low-income South Asian community. *International Journal of Technology, Knowledge and Society*, 8(3), 95–110. <https://doi.org/http://10.18848/1832-3669/cgp/v08i03/56303>
- Mahmood Aljamali, N., Abdul Baqi Aldujaili, D., & Obaid Alfatlawi, I. (2021). Physical and Chemical Adsorption and its Applications. *International Journal*, 7(2), 1–8. <https://doi.org/10.37628/IJTCK>
- Malakootian, M., Mahvi, A. H., Mansoorian, H. J., & Khanjani, N. (2018). Agrowaste based ecofriendly bio-adsorbent for the removal of phenol: adsorption and kinetic study by acacia tortilis pod shell. *Chiang Mai Journal of Science*, 45(1), 355–368.
- Mandoreba, C., Gwenzi, W., & Chaukura, N. (2021). Defluoridation of drinking water using a ceramic filter decorated with iron oxide-biochar composites. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 18(4), 1321–1329. <https://doi.org/http://10.1111/ijac.13768>
- Manihar, S. (2012). *Kimia Lingkungan*. Fakultas Matematika dan ilmu pengetahuan Alam Universitas Negeri Medan.
- Mehmet Çakmakcea, Necati Kayaalp, I. K. (2008). Desalination of produced water from oil production fields by membrane processes. *Desalination*, 222(januari 2007), 176–186. <https://doi.org/http://10.1016/j.desal.0000.00.000>
- Mehta, R. N., & Saini, D. (2017). Archives of Petroleum & Environmental Biotechnology Efficient Removal of Heavy metals from Oil-field Produced Water : *Arch Pet Environ Biotechnol*, 2017(01). <https://doi.org/http://10.29011/2574-7614>.
- Motsi, T., Rowson, N. A., & Simmons, M. J. H. (2009). Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*, 92(1–2), 42–48. <https://doi.org/http://10.1016/j.minpro.2009.02.005>
- Mubiayi, M. P., Muleja, A. A., & Mamba, B. B. (2021). Data on physicochemical properties of natural clay and natural clay/multiwalled carbon nanotubes composite materials for various applications possibilities. *Data in Brief*, 39(39), 107682. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107682>
- Munirasu, S., Haija, M.A. and Banat, F. (2016). Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment - A review. *Process Saf. Environ. Prot*, 100, 183–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.010>

- Munirasu, S., Haija, M. A., & Banat, F. (2016). Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment - A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 183–202.
<https://doi.org/http://10.1016/j.psep.2016.01.010>
- Nandari, W. W., Utami, A., Yogafanny, E., & Kristiati, M. T. (2018). Pengolahan Air Terproduksi Dengan Membran Bioreaktor Di Wilayah Penambangan Wonocolo. *Eksergi*, 15(2), 34. <https://doi.org/10.31315/e.v15i2.2384>
- Nasir, S., & Faizal, S. (2016). Ceramic filters and their application for cadmium removal from pulp industry effluent. *International Journal of Technology*, 7(5), 786–794. <https://doi.org/http://10.14716/ijtech.v7i5.1295>
- Nath, Fatick., Mohammed Omar Sahed Chowdhury., M. M. R. (2023). *Navigating Produced Water Sustainability in the Oil and Gas Sector: A Critical Review of Reuse Challenges, Treatment Technologies, and Prospects Ahead*. 1523, 4088; <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15234088>
- Neff, J., Lee, K., & DeBlois, E. M. (2011). Produced Water: Overview of Composition, Fates, and Effects. In *Produced Water* (Issue July).
https://doi.org/http://10.1007/978-1-4614-0046-2_1
- Nesic, S., & Streletskaya, V. V. (2018). An integrated approach for produced water treatment and injection. *Georesursy*, 20(1), 25–31.
<https://doi.org/http://10.18599/grs.2018.1.25-31>
- Novira, A. A., Nasir, S., & Hadiah, F. (2022). Produced Water Treatment Using The Residue Catalytic Cracking (RCC) Spent Catalyst As Ceramic Filter Material Integrated With Reverse Osmosis (RO) System. *Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan)*, 26(3), 403–411.
[https://doi.org/http://10.6180/jase.202303_26\(3\).0011](https://doi.org/http://10.6180/jase.202303_26(3).0011)
- Odunola B. Omitola, Matthew N. Abonyi, K. G. A. & F. A. D. (2022). Adams-Bohart, Yoon-Nelson, and Thomas modeling of the fix-bed continuous column adsorption of amoxicillin onto silver nanoparticle-maize leaf composite. *Applied Water Science*, 12(94).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13201-022-01624-4>
- Ouallal, H., Dehmani, Y., Moussout, H., Messaoudi, L., & Azrour, M. (2019). Kinetic, isotherm and mechanism investigations of the removal of phenols from water by raw and calcined clays. *Heliyon*, 5(5), 01616.
<https://doi.org/http://10.1016/j.heliyon.2019.e01616>
- P.P. Pertamina (Persero) Refinery. (2017). *Sustainability Report. Tech. rep. Palembang: PT Pertamina (Persero) Refinery Unit III Plaju* (pp. 1–148.).
- Peng, J., Kumar, K., Gross, M., Kunetz, T., & Wen, Z. (2020). Removal of total dissolved solids from wastewater using a revolving algal biofilm reactor. *Water Environment Research*, 92(5), 766–778.
<https://doi.org/http://10.1002/wer.1273>
- Pérez-Botella, E., Valencia, S., & Rey, F. (2022). Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects. *Chemical Reviews*, 122(24), 17647–17695. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00140>
- Pérez-Vidal, A., Silva-Leal, J. A., Diaz-Gómez, J., Meneses-Torres, C. J., Arias-Vallejo, J. E., Giraldo-Tenorio, G. A., & Bacca-Jordán, M. C. (2021). Performance evaluation of ceramic pot filters combined with adsorption processes for the removal of heavy metals and phenolic compounds. *Journal of Water and Health*, 19(5), 750–761.

- <https://doi.org/http://10.2166/wh.2021.052>
 PerGub Sumsel No.8. (2012). *Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 8 Tahun 2012* (p. 10).
- Pinto, P. X., Al-Abed, S. R., Balz, D. A., Butler, B. A., Landy, R. B., & Smith, S. J. (2016). Bench-Scale and Pilot-Scale Treatment Technologies for the Removal of Total Dissolved Solids from Coal Mine Water: A Review. *Mine Water and the Environment*, 35(1), 94–112.
<https://doi.org/http://10.1007/s10230-015-0351-7>
- Pravin Kannan, P. P. and F. B. (2020). Design of adsorption column for reclamation of methyldiethanolamine using homogeneous surface diffusion model. *Oil Gas Sci. Technol*, 75(82), 12.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2516/ogst/2020073>
- Putri, R. E. D., Nasir, S., & Hadiah, F. (2022). Application of Ceramic Filter and Reverse Osmosis Membrane for Produced Water Treatment. *Pollution*, 8(4), 1103–1115. <https://doi.org/http://10.22059/POLL.2022.337380.1343>
- Qiu, H., Lv, L., Pan, B. C., Zhang, Q. J., Zhang, W. M., & Zhang, Q. X. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 10(5), 716–724. <https://doi.org/http://10.1631/jzus.A0820524>
- Richardson, J. F. (2002). *Chemical engineering*. 2(fifth edition).
- Rusdi et al. (2023). Total Dissolved Solids, Phenol, and Barium Removals from Oilfield Produced Water Using Kapok Fibers and Ultrafiltration Membrane. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 67(3), 452–459.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3311/PPch.21802>
- Sabzehmeidani, M. M., Mahnaee, S., Ghaedi, M., Heidari, H., & Roy, V. A. L. (2021). Carbon based materials: A review of adsorbents for inorganic and organic compounds. *Materials Advances*, 2(2), 598–627.
<https://doi.org/10.1039/d0ma00087f>
- Saifuddin, S., Elisa, E., & Sami, M. (2018). *Efisiensi Kinerja Membran Keramik Tanah Liat & Zeolit Aktif Sebagai Media Filter Untuk Filtrasi Air Sungai*. 2(1), 240–247.
- Santra, B., Ramrakhiani, L., Kar, S., Ghosh, S., & Majumdar, S. (2020). Ceramic membrane-based ultrafiltration combined with adsorption by waste derived biochar for textile effluent treatment and management of spent biochar. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(2), 973–992.
<https://doi.org/http://10.1007/s40201-020-00520-w>
- Sappewali, Cindi Meisin, E. (2024). *Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan Pengaruh Variasi Ketebalan Media Filtrasi Terhadap Penurunan*. 15(2), 33–42.
- Scimeca, M., Bischetti, S., Lamsira, H. K., Bonfiglio, R., & Bonanno, E. (2018). Energy dispersive X-ray (EDX) microanalysis: A powerful tool in biomedical research and diagnosis. *European Journal of Histochemistry*, 62(1), 89–99. <https://doi.org/http://10.4081/ejh.2018.2841>
- Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. A. W., & Shamiri, A. (2014). A review of mathematical modeling of fixed-bed columns for carbon dioxide adsorption. *Chemical Engineering Research and Design*, 95(5), 961–988.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.08.018>
- Sherhan, B. Y., Abbas, A. D., Alsahy, Q. F., Abbas, T. K., Mahdi, M., Kareem, N. A. A., Rashad, A. A., Rashad, Z. W., & Shawkat, A. A. (2016). Produced Water Treatment Using Ultrafiltration and Nanofiltration Membranes.

- Journal Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 12(3), 10–18.
- Simões, A., Macêdo-Júnior, R., Santos, B., Silva, L., Silva, D., & Ruzene, D. (2020). Produced Water: An overview of treatment technologies. *International Journal for Innovation Education and Research*, 8(4), 207–224. <https://doi.org/http://10.31686/ijer.vol8.iss4.2283>
- Sinopec catalyst CO., L. (2019). *LMP-Sinopec - MSDS-25-02-2019_135734882.pdf* (p. 12). Tiyyuchang road, zhoucun, zibo, shandong, china.
- Siv Howard; Zhao Anderson; Stuart Parker. (2016). Solubility of Barium Sulfate in Formate Brines - New Insight into Solubility Levels and Reaction Mechanisms. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*, 24–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/179021-MS>
- Srivastav, A., & Srivastava, V. C. (2009). Adsorptive desulfurization by activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2–3), 1133–1140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.088>
- Surbakti, N. A. B., Febriani, H., & Syukriah, S. (2024). Content of the heavy metal iron (Fe) in water and tinfoil barb's meat (*Barbonymus scwhanenfeldii*) in The Belumai River Deli Serdang. *Jurnal Akuakultur Sungai Dan Danau*, 9(1), 69. <https://doi.org/http://10.33087/akuakultur.v9i1.203>
- Susanti, S., Nasir, S., Hermansyah, H., & Mataram, A. (2019). Treatment of Wastewater from Rubber Industry Using Calcium Carbide Residue Adsorbent and Hybrid Membrane UF – RO. *Sriwijaya Journal of Environment*, 4(1), 37–41. <https://doi.org/http://10.22135/sje.2019.4.1.37>
- Syauquiah, I., Amalia, M., & Kartini, H. A. (2011). Analisis Variasi Waktu Dan Kecepatan Pengaduk Pada Proses Adsorpsi Limbah Logam Berat Dengan Arang Aktif. *Info Teknik*, 12(1), 11–20.
- Tiana, A. N. (2015). Air Terproduksi : Karakteristik dan Dampaknya Terhadap Lingkungan. *Jurnal Teknik Kimia*, 1(1), 01–11.
- Uddin, M. K. (2017). A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308(308), 438–462. <https://doi.org/http://10.1016/j.cej.2016.09.029>
- Veil, J. A., Puder, M. G., Elcock, D., & Redweik, R. J. J. (2004). A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane. Prepared by: Argonne National Laboratory. Prepared for: U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory Under Contract W-31-109-Eng-38. *Water*, January, 87. <http://www.osti.gov/servlets/purl/821666/%0Ahttp://www.circleofblue.org/waternews/wp-content/uploads/2010/08/prodwaterpaper1.pdf>
- Verbruggen, E. M. ., Smit, C. ., & Vlaardingen, P. L. A. van. (2020). *Environmental quality standards for barium in surface water: Proposal for an update according to the methodology of the Water Framework Directive*. www.rivm.nl/en
- Vijayaraghavan, K., Padmesh, T. V. N., Palanivelu, K., & Velan, M. (2006). Biosorption of nickel(II) ions onto *Sargassum wightii*: Application of two-parameter and three-parameter isotherm models. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1–3), 304–308. <https://doi.org/http://10.1016/j.jhazmat.2005.10.016>

- Wang, J., Tanuwidjaja, D., Bhattacharjee, S., Edalat, A., Jassby, D., & Hoek, E. M. (2020). Produced water desalination via pervaporative distillation. *Water*, 12(12), 3560. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3560>
- Wang, C., Wang, Y., Qin, H., Lin, H., & Chhuon, K. (2020). Application of Microfiltration membrane Technology in Water treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 571(1). <https://doi.org/http://10.1088/1755-1315/571/1/012158>
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. *Chemosphere*, 258, 127279. <https://doi.org/http://10.1016/j.chemosphere.2020.127279>
- Wang Jianlong, & Xuan, G. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>
- Wang, Q. chao, Liu, S. gen, & Gao, H. ping. (2019). Treatment of hydroxyquinone-containing wastewater using precipitation method with barium salt. *Water Science and Engineering*, 12(1), 55–61. <https://doi.org/http://10.1016/j.wse.2019.03.003>
- Weber-Scannell, P. K., & Duffy, L. K. (2007). Effects of total dissolved solids on aquatic organism: a review of literature and recommendation for salmonid species. In *American Journal of Environmental Sciences*.
- Williams, M. E. (2013). A Brief Review of Reverse Osmosis Membrane Technology. *Engineering*, 1–29. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+Brief+Review+of+Reverse+Osmosis+Membrane+Technology#2>
- Worch, E. (2021). Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling. In *Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling*. <https://doi.org/10.1515/9783110240238>
- Zaimee, M. Z. A., Sarjadi, M. S., & Rahman, M. L. (2021). Heavy metals removal from water by efficient adsorbents. *Water (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/http://10.3390/w13192659>
- Zhang, A., Li, M., Lv, P., Zhu, X., Zhao, L., & Zhang, X. (2016). Disposal and Reuse of Drilling Solid Waste from a Massive Gas Field. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 577–581. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.089>
- Zhang, A., Li, M., Lv, P., Zhu, X., Zhao, L., & Zhang, X. (2016). Disposal and Reuse of Drilling Solid Waste from a Massive Gas Field. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 577–581. <https://doi.org/http://10.1016/j.proenv.2016.02.089>
- Zhang, C., Zhang, W., Huang, Y., & Gao, X. (2017). Analysing the correlations of long-term seasonal water quality parameters, suspended solids and total dissolved solids in a shallow reservoir with meteorological factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(7), 6746–6756. <https://doi.org/http://10.1007/s11356-017-8402-1>
1. Wanita, Y. P. (2018) „Umby-Umbian Minor Lokal Daerah Istimewa Yogyakarta, Sifat Fisikokimia dan Diversifikasi Pengolahannya“, *Jurnal Pertanian Agros*, 20(1), pp. 49–58.

2. Wu, S. *et al.* (2015) „*Preparation of ceramic filler from reusing sewage sludge and application in biological aerated filter for soy protein secondary wastewater treatment*“, *Journal of Hazardous Materials*, 283, pp. 608–616. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.10.013.
3. Worch, E. (2012) *Adsorption Technology in Water Treatment Fundamentals, Processes, and Modeling*, Germany. Walter de Gruyter, GmbH & Co. KG, Berlin, 345 p. <https://doi.org/10.1515/9783110240238>