



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Badak LNG
LNG ACADEMY Badak LNG



**PERANCANGAN SISTEM ADSORPSI MERKURI
BERBASIS KARBON AKTIF PADA AIR BUANGAN
YANG TERAKUMULASI DI TANGKI KONDENSAT
PT X SEBAGAI UPAYA OPTIMALISASI
PENGELOLAAN LIMBAH B3**

LAPORAN TUGAS AKHIR

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Oleh:

Izzata Sabbahana Falikulisbah

NIM. 2302319020

**PROGRAM STUDI D3 TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
JULI, 2026**



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Badak LNG
LNG ACADEMY Badak LNG



**PERANCANGAN SISTEM ADSORPSI MERKURI
BERBASIS KARBON AKTIF PADA AIR BUANGAN
YANG TERAKUMULASI DI TANGKI KONDENSAT
PT X SEBAGAI UPAYA OPTIMALISASI
PENGELOLAAN LIMBAH B3**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan
Diploma III Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin

Oleh:
Izzata Sabbahana Falikulisbah
NIM. 2302319020

**PROGRAM STUDI D3 TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
JULI, 2026**



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



“Tugas Akhir ini kupersembahkan untuk mbahkung, mbahputri, mama, adik.

Tak lupa kepada bangsa dan almamater”



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**HALAMAN PERSETUJUAN
LAPORAN TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN SISTEM ADSORPSI MERKURI BERBASIS KARBON
AKTIF PADA AIR BUANGAN YANG TERAKUMULASI DI TANGKI
KONDENSAT PT X SEBAGAI UPAYA OPTIMALISASI PENGELOLAAN
LIMBAH B3**

Oleh:

Izzata Sabbahana Falikulisbah

NIM. 2302319020

Program Studi Diploma III Teknik Mesin

Laporan Tugas Akhir telah disetujui oleh pembimbing

Pembimbing 1

Politeknik Negeri Jakarta

Dr. Isnanda Nuriskasari, S.Si., M.T.

NIP. 199306062019032030

Pembimbing 2

PT Badak NGL

Anto Yamashita Saputra

NIP. 133163

Ketua Program Studi
Diploma III Teknik Mesin

Nabila Yudisha, S.T., M.T.

NIP. 199311302023212045



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN SISTEM ADSORPSI MERKURI BERBASIS KARBON
AKTIF PADA AIR BUANGAN YANG TERAKUMULASI DI TANGKI
KONDENSAT PT X SEBAGAI UPAYA OPTIMALISASI PENGELOLAAN
LIMBAH B3**

Oleh:

Izzata Sabbahana Falikulisbah

NIM. 2302319020

Program Studi Diploma III Teknik Mesin

Telah berhasil dipertahankan dalam sidang Tugas Akhir di hadapan Dewan
Penguji pada tanggal 8 Juli 2026 dan diterima sebagai persyaratan untuk
memperoleh gelar Diploma III pada Program Studi Diploma III Teknik Mesin
Jurusan Teknik Mesin

DEWAN PENGUJI

No.	Nama	Posisi Penguji	Tanda Tangan	Tanggal
1.	Dr. Isnanda Nuriskasari, S.Si., M.T	Ketua Penguji		08/07/26
2.	Dr. Eng. Pribadi Mumpuni Adhi	Penguji		08/07/26
3.	Bambang Irawan	Penguji		08/07/26

Bontang, 8 Juli 2026

Disahkan oleh:

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si.

NIP. 197602252000121002



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Izzata Sabbahana Falikulisbah
NIM : 2302319020
Program Studi : Diploma III Teknik Mesin

menyatakan bahwa yang dituliskan di dalam Laporan Tugas Akhir ini adalah hasil karya saya sendiri bukan jiplakan (plagiasi) karya orang lain baik sebagian atau seluruhnya. Pendapat, gagasan, atau temuan orang lain yang terdapat di dalam Laporan Tugas akhir telah saya kutip dan saya rujuk sesuai dengan etika ilmiah.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-besarnya.

Bontang, 8 Juli 2026



Izzata Sabbahana Falikulisbah

NIM. 2302319020



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

PERANCANGAN SISTEM ADSORPSI MERKURI BERBASIS KARBON AKTIF PADA AIR BUANGAN YANG TERAKUMULASI DI TANGKI KONDENSAT PT X SEBAGAI UPAYA OPTIMALISASI PENGELOLAAN LIMBAH B3

Izzata Sabbahana Falikulisbah¹⁾, Isnanda Nuriskasari²⁾, Anto Yamashita Saputra³⁾

¹⁾Program Studi Diploma Tiga Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok, 16424

²⁾Program Studi Diploma Tiga Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok, 16424

³⁾PT Badak NGL, Bontang, Kalimantan Timur, 75324

Email: izzata.sabbahana.falikulisbah.tm23@stu.pnj.ac.id

ABSTRAK

Air hasil drain tangki kondensat pada fasilitas pengolahan LNG berpotensi mengandung merkuri (Hg) akibat mekanisme redistribusi fase antara hidrokarbon dan air selama penyimpanan. Karena bersifat toksik, pembuangannya harus memenuhi baku mutu ≤ 5 ppb sesuai Peraturan Menteri LHK Nomor 5 Tahun 2014. Penelitian ini bertujuan merancang sistem adsorpsi merkuri berbasis karbon aktif sebagai alternatif pengolahan *on-site*. Penelitian dilakukan menggunakan karbon aktif *industrial grade* melalui pengujian *batch* dan kontinu untuk menentukan kondisi optimum yang menjadi dasar perancangan, serta dibandingkan dengan karbon aktif *market grade* pada sistem terbaik. Karakterisasi menunjukkan konsentrasi merkuri di air buangan sebesar 1,7-115,5 ppb dengan rata-rata 43,8 ppb, di mana 3 dari 5 sampel melebihi baku mutu 5 ppb. Pengujian laboratorium menunjukkan sistem kontinu menggunakan karbon aktif *industrial grade* menghasilkan efisiensi penyisihan merkuri sebesar 91,22-97,15% dengan seluruh konsentrasi efluen memenuhi baku mutu. Kondisi optimum diperoleh pada tinggi *bed* 7,26 cm (ekuivalen 0,45 m skala pilot) dengan efisiensi 94,80% dan konsentrasi efluen 0,51 ppb. Sebaliknya, karbon aktif *market grade* hanya mencapai efisiensi 39,16-71,04% sehingga belum memenuhi baku mutu. Hasil evaluasi tekno-ekonomi menunjukkan rancangan sistem *dual adsorption vessel* menggunakan karbon aktif *industrial grade* layak diterapkan dengan CAPEX Rp35.259.361, NPV Rp27.512.637, dan IRR 21,14%, sehingga direkomendasikan sebagai alternatif pengolahan air buangan merkuri secara *on-site*.

Kata kunci: Adsorpsi, Air buangan, Karbon aktif, LNG, Merkuri, Tangki kondensat



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ABSTRACT

Condensate tank drain water from LNG processing facilities may contain mercury (Hg) due to phase redistribution between hydrocarbons and water during storage. As mercury is highly toxic, wastewater discharge must comply with the Indonesian regulatory limit of 5 ppb. This study aimed to design an activated carbon-based adsorption system for on-site mercury removal. Industrial-grade activated carbon was evaluated through batch and continuous experiments to determine optimum operating conditions for system design and compared with market-grade activated carbon under the best system. Mercury concentrations in wastewater ranged from 1.7 to 115.5 ppb (average 43.8 ppb), with three of five samples exceeding the regulatory limit. The continuous system using industrial-grade activated carbon achieved mercury removal efficiencies of 91.22–97.15%, with an optimum bed height of 7.26 cm (equivalent to 0.45 m at pilot scale), resulting in 94.80% removal and an effluent concentration of 0.51 ppb. In contrast, market-grade activated carbon achieved only 39.16–71.04% removal. Techno-economic analysis confirmed the feasibility of the proposed dual adsorption vessel system, with a CAPEX of IDR 35.26 million, an NPV of IDR 27.51 million, and an IRR of 21.14%.

Keywords: activated carbon, adsorption, condensate tank, LNG, mercury, wastewater.

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan Sistem Adsorpsi Merkuri Berbasis Karbon Aktif pada Air Buangan yang Terakumulasi di Tangki Kondensat PT X sebagai Upaya Optimalisasi Pengelolaan Limbah B3”. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan pada Program Studi D-III Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta.

Tugas Akhir ini dapat terselesaikan berkat dukungan, bantuan, serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala hormat penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta yang telah memberikan arahan dan dukungan selama masa studi penulis.
2. Bapak Ir. Anas Malik Abdillah, S.T., MBA., IPM., selaku Direktur LNG Academy yang telah membuka kesempatan serta memberikan fasilitas dan dukungan penuh dalam pelaksanaan kegiatan akademik maupun penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Nabila Yudisha, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi D-III Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta yang telah memberikan bantuan dalam mengarahkan pelaksanaan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Zaki Arif, S.T., selaku Kepala Jurusan Pengolahan Gas LNG Academy.
5. Ibu Dr. Isnanda Nuriskasari, selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan, masukan konstruktif, serta motivasi selama proses penulisan dan penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Anto Yamashita Saputra, selaku pembimbing lapangan dari LNG Academy yang telah membimbing penulis secara langsung dalam kegiatan praktikum, eksperimen, hingga evaluasi hasil Tugas Akhir di lapangan dengan penuh ketelitian dan dedikasi.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

7. Mbahkung, yang selama ini menjadi sosok ayah, panutan, sekaligus tempat penulis belajar tentang arti kerja keras dan tanggung jawab. Terima kasih atas doa, kasih sayang, pengorbanan, serta kepercayaan yang tidak pernah putus mengiringi setiap langkah penulis.
8. Mbah putri dan Mama, yang senantiasa menghadirkan doa dalam setiap perjalanan hidup penulis. Terima kasih telah menjadi rumah yang selalu memberikan ketenangan dan kekuatan.
9. Mba Sariwati, selaku pengurus LNG Academy, yang telah banyak membantu dan memfasilitasi penulis selama pelaksanaan analisis di laboratorium dengan penuh perhatian dan kesabaran.
10. Seluruh pekerja Laboratorium PT Badak NGL, yaitu Mba Dewi, Mba Tatik, Mba Nisa, Mba Santi, Mas Aul, Mas Wafi, Mas Jalu, dan Mas Dalu, yang dengan tulus selalu bersedia meluangkan waktu, berbagi pengalaman, serta membantu penulis selama proses penelitian di laboratorium.
11. Bapak Lalang Dwiyoga Sakti, yang telah memberikan banyak arahan, masukan, serta ilmu yang sangat berharga selama proses penelitian sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lebih baik.
12. Rekan seperjuangan Tugas Akhir, Yugi Armadhan dan Ary Maulana, serta seluruh teman-teman Angkatan 13 LNG Academy, atas kebersamaan, dukungan, semangat, dan cerita yang telah mewarnai perjalanan akademik penulis.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan karya ini di masa yang akan datang. Akhir kata, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi referensi yang bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik mesin dan industri LNG.

Bontang, 8 Juli 2026

Izzata Sabbahana



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN.....	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I.....	15
PENDAHULUAN	15
1.1 Latar Belakang	15
1.2 Rumusan Masalah.....	17
1.3 Tujuan	18
1.4 Batasan Masalah	19
1.5 Manfaat	20
1.6 Lokasi Objek.....	21
1.7 Sistematika Penulisan	21
BAB II.....	23
TINJAUAN PUSTAKA.....	23
2.1 Proses Pengolahan Gas Alam Cair (<i>Liquefied Natural Gas</i> – LNG).....	23
2.2 Tangki Kondensat dan Pembentukan Air Drain.....	25
2.3 Karakteristik Air Hasil Drain Tangki Kondensat	27
2.4 Merkuri (Hg) dalam Industri Migas dan LNG.....	28
2.5 Analisis Merkuri dalam Air Buangan	31
2.6 Regulasi dan Baku Mutu Merkuri pada Air Buangan.....	34
2.7 Teknologi Pengolahan Merkuri dalam Air Buangan.....	36
2.8 Adsorpsi sebagai Metode Pengolahan Air Buangan	38
2.9 Karbon Aktif sebagai Media Adsorben Merkuri.....	43



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.10 Parameter Desain Sistem Adsorpsi Karbon Aktif.....	46
2.11 Penelitian Terdahulu Terkait Adsorpsi Merkuri	48
2.12 Aspek Ekonomi.....	50
2.13 Mitigasi Risiko Merkuri (Hg) pada Sistem Adsorpsi.....	51
BAB III	53
METODOLOGI PENELITIAN.....	53
3.1 Diagram Alir Pengerjaan.....	53
3.2 Penjelasan Langkah Kerja.....	55
3.3 Metode Pemecahan Masalah.....	68
BAB IV	72
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	72
4.1 Konsentrasi Awal Merkuri dan Kinerja Kolom Adsorpsi Karbon Aktif Skala Laboratorium.....	72
4.2 Perancangan Sistem Adsorpsi Karbon Aktif Skala Pilot	86
4.3 Evaluasi Kelayakan Teknis dan Ekonomis Sistem Adsorpsi Skala Pilot.....	92
BAB V.....	100
PENUTUP.....	100
5.1 Kesimpulan	100
5.2 Saran	100
Daftar Pustaka	102
LAMPIRAN.....	110



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Regulasi Nasional Baku Mutu Lingkungan	35
Tabel 3.1 Ringkasan Statistik Verifikasi Check Standard 10 ng (n=5).....	69
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Merkuri Air Buangan Tangki Kondensat (April-Juni 2026)	73
Tabel 4.2 Karakteristik Karbon Aktif Industrial Grade.....	74
Tabel 4.3 Distribusi Ukuran Partikel (%) Karbon Aktif Industrial dan Market Grade	76
Tabel 4.4 Bulk Density Karbon Aktif	77
Tabel 4.5 Rekapitulasi Kondisi Operasi Pengujian Skala Laboratorium.....	79
Tabel 4.6 Rekapitulasi Reduksi Merkuri (%).....	80
Tabel 4.7 Hasil Analisis Logam Kompetitor.....	82
Tabel 4.8 Hasil Analisis Kapasitas Adsorpsi.....	85
Tabel 4.9 Spesifikasi Rancangan Unit Adsorpsi Skala Pilot.....	87
Tabel 4.10 Analisis Umur Jenuh Adsorben.....	88
Tabel 4.11 Rekapitulasi Capital Expenditure (CAPEX) Sistem Adsorpsi Skala Pilot	92
Tabel 4.12 Rincian Operational Expenditure (OPEX) Sistem Adsorpsi Skala Pilot	94
Tabel 4.13 Rincian Revenue/Cost Saving Sistem Adsorpsi Skala Pilot	95
Tabel 4.14 Rekapitulasi Hasil Evaluasi Kelayakan Ekonomi Sistem Adsorpsi Skala Pilot	96
Tabel 4.15 Rekapitulasi Perbandingan Kelayakan Antar Skenario.....	98

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Hasil Analisis Merkuri	16
Gambar 2.1 Data Adsorpsi Amonia pada Arang Aktif.....	40
Gambar 2.2 Bentuk Isoterm Favorable, Unfavorable, Irreversible.....	41
Gambar 3.1 Diagram Alir.....	53
Gambar 3.2 NIC Mercury Analyzer.....	61
Gambar 3.3 AAS The Agilent 240FS AA yang Dipakai Untuk Analisis Logam Kompetitor.....	63
Gambar 3.4 Process Flow Diagram Unit Adsorpsi Merkuri.....	66
Gambar 3.5 Piping and Instrumentation Diagram Unit Adsorpsi Merkuri.....	66
Gambar 3.6 Kurva Kalibrasi NIC Mercury Analyzer SP-3D (Profile 20).....	68
Gambar 4.1 Sampel Air Buangan	72
Gambar 4.2 Proses Pengayakan Karbon Aktif Menggunakan Sieve Shaker.....	75
Gambar 4.3 Rancangan Sistem Kontinu Skala Laboratorium	80
Gambar 4.4 Karbon Aktif Market Grade	81
Gambar 4.5 Kurva Perbandingan Industrial dan Market Grade	82

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Merkuri (Hg) secara alami terdapat sebagai unsur jejak dalam fluida reservoir minyak dan gas, dengan konsentrasi yang sangat bervariasi bergantung pada karakteristik geologi lapangan [1], [2]. Meskipun keberadaannya di reservoir tergolong sekadar jejak, merkuri menjadi perhatian serius karena bersifat sangat toksik, persisten di lingkungan, dan mampu terbioakumulasi dalam rantai makanan, di perairan, merkuri anorganik dapat bertransformasi menjadi metilmerkuri yang jauh lebih toksik dan mudah terakumulasi pada biota akuatik, menimbulkan risiko ekotoksikologis sekaligus risiko kesehatan manusia melalui konsumsi [3].

Di Indonesia, pengelolaan merkuri diatur ketat. Pemerintah telah meratifikasi *Minamata Convention on Mercury* melalui Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2017 sebagai komitmen global pengendalian merkuri [4]. Baku mutu air limbah industri diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 Tahun 2014, yang menetapkan batas maksimum merkuri pada air buangan sebesar $\leq 0,005$ mg/L [5].

PT X merupakan fasilitas pencairan gas alam (*Liquefied Natural Gas/LNG*) yang mengolah gas dari reservoir melalui *wellhead* dan *gathering system* menuju unit pemisahan awal (*knock out drum/KOD*), tempat fluida terpisah menjadi fase gas, kondensat, dan air berdasarkan densitas. Karena pemisahan ini hanya berbasis sifat fisik, spesies merkuri yang terlarut di tiap fase tidak ikut terpisahkan [6]. Merkuri elemental dan organomerkuri yang relatif larut dalam hidrokarbon dibawa ke dalam kondensat [2]. Pada kondisi operasi dinamis atau upset, sebagian merkuri tetap lolos bersama aliran kondensat [7]. Kondensat kemudian disimpan dalam tangki tipe *floating roof*, di mana sejumlah kecil air ikut terbawa sebagai *entrained water* dan terakumulasi di dasar tangki sebagai *bottom water* akibat perbedaan densitas. Selama penyimpanan, kontak antara kondensat dan fase air ini

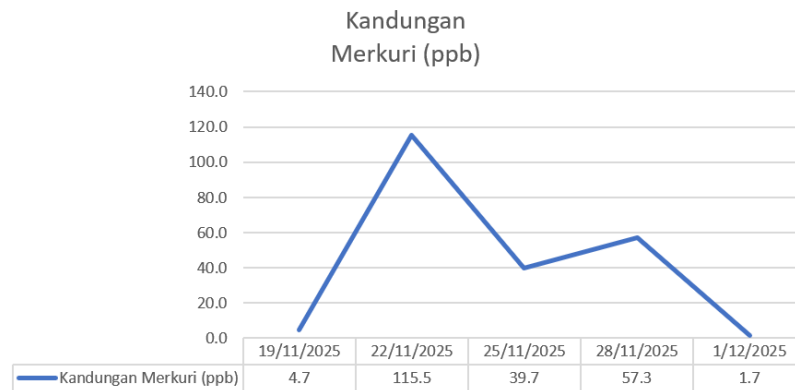


Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

memungkinkan redistribusi merkuri, termasuk oksidasi Hg^0 menjadi bentuk ionik yang lebih larut dalam air [8], [9].



Gambar 1.1 Hasil Analisis Merkuri

Air yang terakumulasi di dasar tangki PT X secara berkala didrain sebagai air buangan. Berdasarkan hasil analisis laboratorium terhadap sampel air drain tangki kondensat di PT X, konsentrasi merkuri yang terukur melebihi baku mutu yang diizinkan (Gambar 1.1), dengan volume air drain tercatat sekitar $2 \text{ m}^3/\text{hari}$, secara konsisten berpotensi membawa logam berat ke lingkungan apabila dilepas tanpa pengolahan memadai [2]. Dengan demikian, air drain tangki kondensat harus dikelola agar memenuhi baku mutu sebelum dilepas ke badan air penerima [5].

Pada kondisi eksisting, PT X telah memiliki *Waste Water Treatment Plant* (WWTP) untuk air limbah operasional utama. Namun, air drain tangki kondensat belum terintegrasi ke sistem tersebut dan masih ditangani pihak ketiga (PT PPLI) sebagai limbah B3. Dengan biaya pembuangan sekitar Rp7,3 juta/tahun ditambah logistik, total biaya mencapai sekitar Rp25 juta/tahun hanya untuk membuang air drain. Skema ini dinilai kurang efisien dalam jangka panjang dan belum memberikan solusi pengolahan yang optimal secara teknis maupun ekonomis [10].

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk menyisahkan merkuri dari air limbah, antara lain presipitasi kimia, pertukaran ion, filtrasi membran, elektrokimia, dan adsorpsi. Presipitasi mampu mengendapkan merkuri menjadi senyawa tak larut namun menghasilkan lumpur B3 dalam jumlah besar; pertukaran ion selektif tetapi sensitif terhadap pH dan kontaminan lain; membran (misalnya *reverse osmosis*)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

berefisiensi tinggi tetapi butuh tekanan operasi dan investasi besar serta rentan *fouling*, elektrokimia efektif namun boros energi [11], [12].

Dibandingkan metode tersebut, adsorpsi menggunakan karbon aktif banyak dipilih untuk penyisihan logam berat karena efisiensinya tinggi, operasinya sederhana, dan biayanya relatif rendah, khususnya pada konsentrasi merkuri rendah hingga sedang. Karbon aktif memiliki luas permukaan spesifik besar (umumnya 500-1500 m²/g) dan struktur pori yang mendukung adsorpsi ion logam [13]. Secara empiris, karbon aktif berbahan *palm kernel shell* mampu menyisihkan hingga 97,7% Hg(II) dari larutan berair pada konsentrasi awal 10 mg/L [14], sedangkan karbon aktif terfungsionalisasi sulfur dilaporkan memiliki kapasitas adsorpsi Hg(II) yang tinggi [15].

Meskipun efektivitas karbon aktif telah banyak dibuktikan, sebagian besar studi masih pada skala laboratorium dengan air sintesis dan kondisi terkontrol. Penerapan pada sistem industri, khususnya air drain tangki kondensat LNG yang berdebit kecil namun kontinu dan mengandung merkuri persisten, masih memerlukan kajian perancangan yang mempertimbangkan aspek teknis-operasional sekaligus kelayakan ekonomi.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan sistem adsorpsi merkuri berbasis karbon aktif untuk mengolah air drain tangki kondensat di PT X. Sistem dirancang dengan konfigurasi *dual adsorption vessel* bermode *service-standby* agar pengolahan berlangsung kontinu tanpa mengganggu kegiatan *draining*. Penelitian ini juga mencakup analisis ekonomi untuk mengevaluasi kelayakan sistem usulan dibandingkan metode penanganan limbah yang digunakan saat ini, sehingga diharapkan menghasilkan rancangan yang efektif menurunkan merkuri hingga memenuhi baku mutu sekaligus layak diterapkan pada fasilitas LNG dengan karakteristik limbah serupa.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi awal merkuri (Hg) pada air buangan tangki kondensat PT X serta variasi jenis karbon aktif, mode operasi, dan tinggi *bed* terhadap kinerja kolom adsorpsi skala laboratorium yang ditinjau dari konsentrasi Hg efluen dan efisiensi penyisihan merkuri (Hg)?
2. Bagaimana rancangan sistem adsorpsi karbon aktif skala pilot yang sesuai berdasarkan kondisi operasi optimum yang diperoleh dari pengujian skala laboratorium?
3. Bagaimana kelayakan teknis dan ekonomis rancangan sistem adsorpsi karbon aktif skala pilot sebagai alternatif pengolahan air buangan tangki kondensat PT X untuk memenuhi baku mutu lingkungan?

1.3 Tujuan

1.3.1 Tujuan Umum

1. Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program pendidikan Diploma III Politeknik Negeri Jakarta.
2. Mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam bidang pengolahan gas, mekanikal rotating, dan listrik instrumentasi, serta mengaplikasikan ilmu yang telah diperoleh selama mengikuti proses belajar mengajar.

1.3.2 Tujuan Khusus

1. Menganalisis pengaruh konsentrasi awal merkuri (Hg) pada air buangan tangki kondensat PT X serta variasi jenis karbon aktif, mode operasi, dan tinggi *bed* terhadap kinerja kolom adsorpsi skala laboratorium yang ditinjau dari konsentrasi Hg efluen dan efisiensi penyisihan merkuri (Hg).
2. Merancang sistem adsorpsi karbon aktif skala pilot berdasarkan kondisi operasi optimum yang diperoleh dari pengujian skala laboratorium.
3. Mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis rancangan sistem adsorpsi karbon aktif skala pilot sebagai alternatif pengolahan air



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

buangan tangki kondensat PT X untuk memenuhi baku mutu lingkungan.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menjaga agar penelitian ini terarah dan tidak melebar dari tujuan utama, maka perlu ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya dilakukan pada air buangan tangki kondensat PT X dan tidak mencakup aliran limbah proses maupun sumber limbah lainnya.
2. Parameter utama yang dianalisis adalah merkuri (Hg) sebagai dasar evaluasi kinerja sistem adsorpsi. Parameter kualitas air lainnya tidak dijadikan dasar penentuan performa sistem.
3. Adsorben yang dievaluasi dalam penelitian ini terbatas pada karbon aktif *industrial grade* dan karbon aktif *market grade*, tanpa membandingkannya dengan jenis adsorben lain.
4. Pengujian adsorpsi dilakukan pada skala laboratorium dengan variasi mode operasi (*batch* dan kontinu) serta variasi tinggi bed adsorben, sedangkan parameter operasi lainnya dijaga konstan.
5. Penelitian ini tidak mencakup analisis isoterm adsorpsi (Langmuir maupun Freundlich) karena pengujian difokuskan pada penentuan kondisi operasi optimum untuk perancangan sistem adsorpsi skala pilot.
6. Penelitian ini tidak mencakup analisis kinetika adsorpsi (seperti model *pseudo-first-order*, *pseudo-second-order*, maupun *intraparticle diffusion*), karena sistem dirancang dan dievaluasi berdasarkan kondisi operasi kontinu dengan pendekatan rekayasa proses, bukan untuk menentukan mekanisme laju adsorpsi secara fundamental.
7. Perancangan sistem dibatasi pada skala pilot berdasarkan kondisi operasi aktual PT X dan tidak mencakup tahap konstruksi maupun implementasi lapangan.
8. Estimasi umur adsorben hanya didasarkan pada kapasitas adsorpsi merkuri (Hg) pada kondisi operasi optimum. Pengaruh logam lain, *fouling*,



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

penyumbatan pori, peningkatan *pressure drop*, serta fenomena *breakthrough* multikomponen tidak dimodelkan secara kuantitatif sehingga umur adsorben yang diperoleh merupakan estimasi awal untuk kebutuhan perancangan skala pilot.

9. Evaluasi ekonomi dibatasi pada estimasi biaya investasi utama sistem adsorpsi (*vessel*, pompa, perpipaan, dan instrumentasi dasar) serta biaya operasional yang berkaitan dengan penggunaan adsorben dan pengelolaan limbah karbon aktif jenuh.
10. Analisis kelayakan ekonomi dilakukan dengan membandingkan skenario pengelolaan limbah menggunakan sistem adsorpsi terhadap skenario pengiriman limbah secara langsung ke fasilitas pengolahan pihak ketiga, tanpa memperhitungkan biaya instalasi sipil, modifikasi utilitas, maupun integrasi dengan sistem *Oily Water Sewer* (OWS) yang telah ada.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1.5.1 Bagi Penulis

1. Sebagai syarat untuk memenuhi penyusunan Tugas Akhir guna mendapatkan gelar Diploma III dari Program Studi Teknik Mesin di Politeknik Negeri Jakarta.
2. Menambah pengalaman dan ketrampilan dalam merancang bangun suatu alat industri.
3. Dapat mengimplementasikan pengetahuan yang telah diperoleh selama masa perkuliahan dengan mempraktikkannya secara nyata.

1.5.2 Bagi Institusi LNG Academy dan Politeknik Negeri Jakarta

Sebagai media pembelajaran dan penelitian unit adsorpsi air kondensat

1.5.3 Bagi PT X

1. Memberikan alternatif teknologi pengolahan air buangan yang efisien dan mudah diimplementasikan di fasilitas eksisting.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Mendukung kepatuhan terhadap baku mutu air buangan sesuai regulasi KLHK.
3. Menjadi studi lanjutan bagi PT X untuk pengembangan pengelolaan buangan B3, ataupun di unit lain yang berpotensi menghasilkan air tercemar merkuri.
4. Menjadi dukungan terhadap program keberlanjutan (*Sustainability & ESG Compliance*) yang sejalan dengan agenda ESG (*Environmental, Social, and Governance*). Pengembangan sistem adsorpsi internal akan menunjukkan komitmen PT X dalam mendukung penerapan teknologi ramah lingkungan dan pengurangan emisi tidak langsung (*Scope 3*) yang berasal dari aktivitas penanganan buangan.

1.6 Lokasi Objek

Lokasi objek tugas akhir berada di outlet pembuangan buangan air kondensat dari tangki kondensat di PT X dan *workshop* LNG Academy.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini merujuk pada “Buku Pedoman Penulisan Tugas Akhir Tahun 2020” yang diterbitkan oleh Politeknik Negeri Jakarta.

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini, penyusun laporan menguraikan latar belakang pemilihan topik, tujuan umum dan khusus, ruang lingkup penelitian dan batasan masalah, serta sistematika penulisan keseluruhan laporan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Studi Pustaka/Tinjauan Pustaka berisi sumber bacaan atau literatur, memaparkan rangkuman kritis atas pustaka yang menunjang penyusunan atau penelitian, meliputi pembahasan tentang topik yang dikaji dalam tugas akhir.

BAB III METODE PENELITIAN



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Metode penelitian membahas secara sistematis langkah-langkah penyelesaian permasalahan dalam penelitian, yang meliputi penyajian diagram alir sebagai gambaran umum proses kerja dan penjelasan detail kegiatan yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV menyajikan uraian hasil yang diperoleh dan dianalisis berdasarkan tujuan yang telah dirumuskan sebelumnya, dengan pembagian subbab yang disesuaikan dengan jumlah tujuan penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab V berisi ringkasan inti dari hasil pembahasan sebagai jawaban atas tujuan penelitian, serta saran berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Konsentrasi awal merkuri air buangan tangki kondensat PT X berkisar 9,8–49,06 ppb (rata-rata 33,29 ppb), seluruhnya melampaui baku mutu 5 ppb. Karbon aktif *industrial grade* jauh mengungguli *market grade* (efisiensi kontinu 91-97% vs. maksimum 71% dan tidak pernah memenuhi baku mutu), dan mode kontinu (fixed-bed) memberikan efisiensi yang lebih tinggi dan konsisten dibanding batch (91-97% vs. 76-89% dengan pola scatter). Efisiensi meningkat seiring bertambahnya tinggi bed namun melandai setelah 0,45 m, menandakan pendekatan kesetimbangan kapasitas adsorpsi.
2. Rancangan sistem skala pilot menggunakan vessel eksisting berdiameter 12 inch (0,31 m) dengan tinggi bed 0,45 m ($H/D = 1,45$, memenuhi kriteria $1 < H/D < 5$), kebutuhan adsorben 21,39 kg/vessel dengan konfigurasi dua *vessel duty-standby*, serta EBCT 24,3 menit yang konsisten dengan hasil skala laboratorium.
3. Sistem dinyatakan layak secara teknis (memenuhi baku mutu ≤ 5 ppb) maupun ekonomis, dengan CAPEX \$1.974,54 ($\approx$ Rp35,26 juta), OPEX tahun pertama \$1.079,67 ($\approx$ Rp19,28 juta), NPV 15 tahun \$1.540,72 ($\approx$ Rp27,51 juta), dan IRR 21,14% ($>$ MARR 10%). Dibandingkan skenario *market grade* dan tanpa sistem, skenario karbon aktif *industrial grade* memberikan keseimbangan teknis-ekonomi terbaik dan menjadi rekomendasi utama.

5.2 Saran

1. Penambahan unit pra-pengolahan besi di hulu adsorber perlu dikaji untuk melindungi unggun karbon aktif dari akumulasi endapan besi yang menjadi

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

faktor pembatas utama umur operasi, sehingga interval penggantian adsorben dapat diperpanjang secara signifikan.

2. Uji *breakthrough* lengkap perlu dilakukan hingga kondisi jenuh adsorben ($C_t/C_o \geq 0,95$) untuk memperoleh nilai kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}) secara empiris sebagai dasar estimasi umur adsorben yang lebih akurat pada skala pilot.
3. Penelitian ini difokuskan pada evaluasi kinerja sistem melalui variasi tinggi bed, mode operasi, dan jenis karbon. Belum mencakup model kinetika (*pseudo-first-order*, *pseudo-second-order*, difusi intrapartikel) secara sistematis. Kajian isoterm dan kinetika yang komprehensif sangat disarankan dilakukan pada tahap penelitian selanjutnya untuk memperoleh pemahaman menyeluruh tentang mekanisme adsorpsi merkuri pada karbon aktif *industrial grade* dalam matriks air drain yang kompleks, serta untuk memperkuat validitas pendekatan *scale-up* yang digunakan.
4. Implementasi dan uji kinerja pada skala pilot sesungguhnya di lapangan PT X selama minimal 3-6 bulan diperlukan untuk memvalidasi seluruh hasil perancangan ini, khususnya konsistensi efisiensi penyisihan pada kondisi operasi aktual yang berfluktuasi serta performa *pressure differential* sebagai indikator penggantian media.
5. Kajian integrasi sistem dengan fasilitas pengolahan limbah yang telah ada (WWTP eksisting) dan potensi penerapannya pada fasilitas LNG serupa perlu dilakukan.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Daftar Pustaka

- [1] S. M. Wilhelm dan N. Bloom, "Mercury in petroleum," *Fuel processing technology*, vol. 63, no. 1, hlm. 1–27, 2000, doi: 10.1016/S0378-3820(99)00068-5.
- [2] F. Kho dkk., "Current understanding of the ecological risk of mercury from subsea oil and gas infrastructure to marine ecosystems," *J. Hazard. Mater.*, vol. 438, no. April, hlm. 129348, 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129348.
- [3] B. M. Scalet, "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide (CLM BREF) European IPPC Bureau European Commission Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and ,," *UNEP-Partnership on Mercury Geneva*, no. June, hlm. 18–19, 2013.
- [4] "UUD merkuri sumarjono.pdf."
- [5] M. L. H. dan K. Indonesia, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2021 Tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun," *Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia*, no. April, hlm. 5–24, 2021.
- [6] M. F. Ezzeldin, Z. Gajdosechova, M. B. Masod, T. Zaki, J. Feldmann, dan E. M. Krupp, "Mercury Speciation and Distribution in an Egyptian Natural Gas Processing Plant," *Energy and Fuels*, vol. 30, no. 12, hlm. 10236–10243, 2016, doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b02035.
- [7] M. C. Fay, L. Morin, dan J. Cockbill, "Mercury concentrations in produced gas, condensate, rock and water from the Montney Formation," hlm. 1–6, 2023.
- [8] M. Jack-up dkk., "Perbaikan Kemiringan Atap Tangki Tipe Floating Roof Menggunakan berbagai produk cairan / liquid seperti penampungan air . dari lokasi letak tangki tersebut dipasang , yaitu above ground tank dan underground • Aboveground tank , dimana tangki yang berada d," vol. 17, hlm. 152–160, 2025.
- [9] M. A. Saad, M. Kamil, N. H. Abdurahman, R. M. Yunus, dan O. I. Awad, "An overview of recent advances in state-of-the-art techniques in the demulsification of crude oil emulsions," *Processes*, vol. 7, no. 7, 2019, doi: 10.3390/pr7070470.
- [10] "IL 2. Izin Permbuangan Air Limbah ke Laut SK DPMPTSP Kaltim.pdf."
- [11] Z. Raji, A. Karim, A. Karam, dan S. Khalloufi, "Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Wastewater Remediation—A Review,” *Waste*, vol. 1, no. 3, hlm. 775–805, 2023, doi: 10.3390/waste1030046.

- [12] M. Sitarska, T. Traczewska, A. Holtra, D. Zamorska-Wojdyla, W. Filarowska, dan B. Hanus-Lorenz, “Removal of mercury from water by phytoremediation process with *Salvinia natans*(L.) All.,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 36, hlm. 85494–85507, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-27533-w.
- [13] P. Hadi, M. H. To, C. W. Hui, C. S. K. Lin, dan G. McKay, “Aqueous mercury adsorption by activated carbons,” *Water Res.*, vol. 73, hlm. 37–55, 2015, doi: 10.1016/j.watres.2015.01.018.
- [14] N. S. Abdullah, S. S. Sharifuddin, dan M. H. Hussin, “Study on adsorption of mercury from aqueous solution on activated carbons prepared from palm kernel shell,” *Key Eng. Mater.*, vol. 783, hlm. 109–114, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.783.109.
- [15] O. D. C. Salcedo, D. P. Vargas, L. Giraldo, dan J. C. Moreno-Piraján, “Study of mercury [Hg(II)] Adsorption from aqueous solution on functionalized activated carbon,” *ACS Omega*, vol. 6, no. 18, hlm. 11849–11856, 2021, doi: 10.1021/acsomega.0c06084.
- [16] IEA, “Assessing Emissions from LNG Supply and Abatement Options,” hlm. 5, 2025, [Daring]. Tersedia pada: www.iea.org
- [17] L. Gao, J. Wang, M. Binama, Q. Li, dan W. Cai, *The Design and Optimization of Natural Gas Liquefaction Processes: A Review*, vol. 15, no. 21. 2022. doi: 10.3390/en15217895.
- [18] A. Rajbongshi dan S. B. Gogoi, “A review on oilfield produced water and its treatment technologies,” *Petroleum Research*, vol. 9, no. 4, hlm. 640–656, 2024, doi: 10.1016/j.ptlrs.2024.06.003.
- [19] A. A. Stoicescu, R. G. Ripeanu, M. Tănase, dan L. Toader, “Current Methods and Technologies for Storage Tank Condition Assessment: A Comprehensive Review,” *Materials*, vol. 18, no. 5, 2025, doi: 10.3390/ma18051074.
- [20] A. M. A. Hasan, R. S. Kamal, R. K. Farag, dan M. E. Abdel-raouf, “Petroleum sludge formation and its treatment methodologies: a review,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 6, hlm. 8369–8386, 2024, doi: 10.1007/s11356-023-31674-3.
- [21] F. Al-Ajmi, M. Al-Marri, F. Almomani, dan A. AlNouss, “A Comprehensive Review of Advanced Treatment Technologies for the Enhanced Reuse of Produced Water,” *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 22, 2024, doi: 10.3390/w16223306.
- [22] Z. Zhao dkk., “Mechanism of Selective Extraction and Separation of Vanadium and Aluminum from Oxalic Acid Leachate of Shale: Experimental

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Investigation and DFT Calculations,” *Separations*, vol. 13, no. 2, hlm. 1–15, 2026, doi: 10.3390/separations13020045.
- [23] W. Jiang, X. Jin, X. Yu, W. Wu, L. J. Xu, dan F. F. Fu, “Ion-imprinted magnetic nanoparticles for specific separation and concentration of ultra-trace methyl mercury from aqueous sample,” *J. Chromatogr. A*, vol. 1496, hlm. 167–173, 2017, doi: 10.1016/j.chroma.2017.03.049.
- [24] A. Méré, “Reliability of mercury and arsenic sampling and analysis in the petrochemical and oil industry,” 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://theses.hal.science/tel-04085642v1>
- [25] W. S. Chai *dkk.*, “A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application,” *J. Clean. Prod.*, vol. 296, hlm. 126589, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126589.
- [26] A. A. Meutia, R. Lumowa, dan M. Sakakibara, “Indonesian Artisanal and Small-Scale Gold Mining—A Narrative Literature Review,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 7, 2022, doi: 10.3390/ijerph19073955.
- [27] K. Sukanto, A. Lukum, M. Pikoli, dan A. La Kilo, “Sosialisasi Dampak Penggunaan Merkuri pada Pekerja Tambang Rakyat di Desa Buladu, Kecamatan Sumalata Timur, Kabupaten Gorontalo Utara,” *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, vol. 3, no. 1, hlm. 32–39, 2024, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/damhil/index>
- [28] P. Diviš, M. Reichstädter, Y. Gao, M. Leermakers, dan J. Křikala, “Determination of mercury in fish sauces by thermal decomposition gold amalgamation atomic absorption spectroscopy after preconcentration by diffusive gradients in thin films technique,” *Foods*, vol. 9, no. 12, 2020, doi: 10.3390/foods9121858.
- [29] K. E. Kristian, S. Friedbauer, D. Kabashi, K. M. Ferencz, J. C. Barajas, dan K. Obrien, “A simplified digestion protocol for the analysis of hg in fish by cold vapor atomic absorption spectroscopy,” *J. Chem. Educ.*, vol. 92, no. 4, hlm. 698–702, 2015, doi: 10.1021/ed500687b.
- [30] K. Phan, N. Richardson, dan N. M. Hepp, “Mercury Determination in Certifiable Color Additives Using Thermal Decomposition Amalgamation and Atomic Absorption Spectrometric Analysis,” *J. AOAC Int.*, vol. 105, no. 1, hlm. 69–73, 2022, doi: 10.1093/jaoacint/qsab125.
- [31] R. B. Baird, A. D. Eaton, dan E. W. Rice, *2540 Solids*. 2017.
- [32] EPA, “Determination of Mercury in Water By Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry Method 245.1,” *Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development*, hlm. 1–18, 1994.
- [33] C. T. Driscoll, R. P. Mason, H. M. Chan, D. J. Jacob, dan N. Pirrone, “Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects,” 2013.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- [34] W. H. O. WHO, "Mercury in Drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality," *Who*, vol. WHO/SDE/WS, hlm. WHO/SDE/WSH/05.08/10, 2005, [Daring]. Tersedia pada:
http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/mercuryfinal.pdf
- [35] F. Fu dan Q. Wang, "Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review," *J. Environ. Manage.*, vol. 92, no. 3, hlm. 407–418, 2011, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.
- [36] C. Chen dan R. Wang, "Mercury Removal Mechanism of Elemental Sulfur-Modified Activated Carbon Based on Density Functional Theory," hlm. 1–32.
- [37] K. Hua, X. Xu, Z. Luo, D. Fang, R. Bao, dan J. Yi, "Effective Removal of Mercury Ions in Aqueous Solutions: A Review," *Curr. Nanosci.*, vol. 16, no. 3, hlm. 363–375, 2019, doi: 10.2174/1573413715666190112110659.
- [38] Q. Sun, L. Wang, Y. Li, L. Li, S. Li, dan G. Zhu, "Highly Efficient Removal of Mercury Ions from Aqueous Solutions by Thiol-Functionalized Graphene Oxide," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 14, 2023, doi: 10.3390/w15142529.
- [39] I. G. Wenten dan Khoiruddin, "Reverse osmosis applications: Prospect and challenges," *Desalination*, vol. 391, hlm. 112–125, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2015.12.011.
- [40] M. Nurfahasdi dkk., "Enhanced removal of mercury from leachate using electrocoagulation : Reaction kinetics," vol. 27, no. 4, hlm. 235–243, 2026.
- [41] N. Shah, M. Awais, M. Ali, dan H. Li, "Speciation-Driven Toxicity and Remediation of Mercury: Mechanistic Insights and Policy Implications," *Authorea Preprints*, vol. 23, no. May, hlm. 101233, 2025, doi: 10.1016/j.hazadv.2026.101233.
- [42] M. M. Aljohani dkk., "Adsorbents Used for Removal of Mercury from Aqueous Solutions: A Review," *Int. Res. J. Pure Appl. Chem.*, vol. 23, no. 1, hlm. 43–55, 2022, doi: 10.9734/irjpac/2022/v23i130455.
- [43] R. D. D. Jong-Hwan Parka, Jim J. Wanga*, Baoyue Zhoua, Joseph E. R. Mikhaela, "[Manuscript Number: ENVPOL_2018_2422_R2] Removing mercury from aqueous solution using sulfurized biochar and associated mechanisms Jong-Hwan Park," vol. 1, no. 225, hlm. 1–38, 2018.
- [44] A. Gabelman, "Adsorption basics: Part 2," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 113, no. 8, hlm. 1–6, 2017.
- [45] F. Zulfania, an Fathoni, dan A. Moh Nur, "Adsorbability of Zn Heavy Metals by Using Corn Skin Adsorbent (Zea Mays)," *Jurnal Chemurgy*, vol. 6, no. 2,

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- hlm. 65–69, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK>
- [46] A. P. Uzoiye, C. O. Kamalu, dan U. Basil, “Adsorption Kinetics and Mechanisms of Cypermethrin and Dichlorovos on Heterogeneous Activated Carbon Porous Media,” *OALib*, vol. 02, no. 11, hlm. 1–15, 2015, doi: 10.4236/oalib.1101988.
- [47] M. Musah, Y. Azeh, J. Mathew, M. Umar, Z. Abdulhamid, dan A. Muhammad, “Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review,” *Caliphate Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 1, hlm. 20–26, 2022, doi: 10.4314/cajost.v4i1.3.
- [48] H. N. Tran, S. J. You, A. Hosseini-Bandegharai, dan H. P. Chao, “Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review,” *Water Res.*, vol. 120, hlm. 88–116, 2017, doi: 10.1016/j.watres.2017.04.014.
- [49] B. Wang, J. Lan, C. Bo, B. Gong, dan J. Ou, “Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review,” *RSC Adv.*, vol. 13, no. 7, hlm. 4275–4302, 2023, doi: 10.1039/d2ra07911a.
- [50] M. Goyal, M. Bhagat, dan R. Dhawan, “Removal of mercury from water by fixed bed activated carbon columns,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 171, no. 1–3, hlm. 1009–1015, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.107.
- [51] M. D. Vedenyapina, A. Y. Kurmysheva, S. A. Kulaishin, dan Y. G. Kryazhev, “Adsorption of Heavy Metals on Activated Carbons (A Review),” *Solid Fuel Chemistry*, vol. 55, no. 2, hlm. 83–104, 2021, doi: 10.3103/S0361521921020099.
- [52] E. Worch, *Adsorption Technology in Water Treatment*. 2012. doi: 10.1515/9783110240238.
- [53] U. S. Patent dan R. G. Pearson, “Of the american chemical society,” vol. 265, no. 3, 1963.
- [54] J. H. Park, J. J. Wang, B. Zhou, J. E. R. Mikhael, dan R. D. DeLaune, “Removing mercury from aqueous solution using sulfurized biochar and associated mechanisms,” *Environmental Pollution*, vol. 244, hlm. 627–635, 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.069.
- [55] E. R. Raut, A. B. Thakur, dan A. R. Chaudhari, “Review on toxic metal ions removal by using activated carbon prepared from natural biomaterials,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1913, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1913/1/012091.
- [56] L. Raj Somera, R. Cuazon, J. Kenneth Cruz, dan L. Joy Diaz, “Kinetics and Isotherms Studies of the Adsorption of Hg(II) onto Iron Modified Montmorillonite/Polycaprolactone Nanofiber Membrane,” *IOP Conf. Ser.*

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Mater. Sci. Eng., vol. 540, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/540/1/012005.

- [57] H. Patel, "Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review," *Appl. Water Sci.*, vol. 9, no. 3, hlm. 1–17, 2019, doi: 10.1007/s13201-019-0927-7.
- [58] S. T. Song dkk., "Process analysis of mercury adsorption onto chemically modified rice straw in a fixed-bed adsorber," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 2, hlm. 1685–1697, 2016, doi: 10.1016/j.jece.2016.02.033.
- [59] A. E. Burakov dkk., "Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 148, no. August 2017, hlm. 702–712, 2018, doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.034.
- [60] C. S. Park, *Contemporary engineering economics (6th ed.)*. Boston: Prentice Hall. 2015.
- [61] H. Nathasya, "No TitleEAENH," *Edu Research Indonesian Institute For Corporate Learning And Studies (IICLS)*, vol. 5, no. 1, hlm. 70–80, 2024.
- [62] AACE International, "Recommended Practice No. 18R-97, TCM Framework: 7.3 – Cost Estimating and Budgeting," *Cost Estimate Classification System guidelines*, hlm. 1–7, 2020, [Daring]. Tersedia pada: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_18r-97.pdf
- [63] G. Towler, *Chemical Engineering Design*. 2022. doi: 10.1016/c2019-0-02025-0.
- [64] R. Executive, E. R. Offices, E. D. Issued, dan D. L. Revised, "Working with Mercury Guideline," hlm. 3–5, 2023.
- [65] M. Castiglioni, L. Rivoira, I. Ingrando, M. Del Bubba, dan M. C. Bruzzoniti, "Characterization techniques as supporting tools for the interpretation of biochar adsorption efficiency in water treatment: A critical review," *Molecules*, vol. 26, no. 16, 2021, doi: 10.3390/molecules26165063.
- [66] A. H. Sulaymon, T. J. Mohammed, dan J. Al-najar, "Equilibrium and kinetics Studies of Adsorption of Heavy Metals onto Activated Carbon," *Canadian Journal on Chemical Engineering & Technology*, vol. 3, no. 4, 2012.
- [67] B. Tsai dan C. Lee, "A Generalized Framework for Flow Resistance in Canopies and Granular Beds," *Water Resour. Res.*, vol. 62, no. 4, 2026, doi: 10.1029/2025WR041950.
- [68] M. M. Rao, D. H. K. K. Reddy, P. Venkateswarlu, dan K. Sessaiah, "Removal of mercury from aqueous solutions using activated carbon prepared from agricultural by-product/waste," *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 1, hlm. 634–643, 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2007.12.019.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- [69] J. Wang, B. Deng, X. Wang, dan J. Zheng, "Adsorption of aqueous Hg(II) by sulfur-impregnated activated carbon," *Environ. Eng. Sci.*, vol. 26, no. 12, hlm. 1693–1699, 2009, doi: 10.1089/ees.2008.0418.
- [70] J. Rivera-Utrilla, M. Sánchez-Polo, V. Gómez-Serrano, P. M. Álvarez, M. C. M. Alvim-Ferraz, dan J. M. Dias, "Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview," *J. Hazard. Mater.*, vol. 187, no. 1–3, hlm. 1–23, 2011, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.033.
- [71] Ihsanullah dkk., "Heavy metal removal from aqueous solution by advanced carbon nanotubes: Critical review of adsorption applications," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 157, hlm. 141–161, 2016, doi: 10.1016/j.seppur.2015.11.039.
- [72] F. J. Alguacil dan F. A. López, "Adsorption processing for the removal of toxic hg(Ii) from liquid effluents: Advances in the 2019 year," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 3, 2020, doi: 10.3390/met10030412.
- [73] A. Tripathi dan M. Rawat Ranjan, "Heavy Metal Removal from Wastewater Using Low Cost Adsorbents," *J. Bioremediat. Biodegrad.*, vol. 06, no. 06, 2015, doi: 10.4172/2155-6199.1000315.
- [74] K. Y. Foo dan B. H. Hameed, "Insights into the modeling of adsorption isotherm systems," *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, no. 1, hlm. 2–10, 2010, doi: 10.1016/j.cej.2009.09.013.
- [75] Suryadi Ismadji, *Adsorpsi Pada Fase Cair*. 2021. [Daring]. Tersedia pada: <http://www.ukwms.ac.id/>
- [76] L. Rafati, M. H. Ehrampoush, A. A. Rafati, M. Mokhtari, dan A. H. Mahvi, "Fixed bed adsorption column studies and models for removal of ibuprofen from aqueous solution by strong adsorbent Nano-clay composite," *J. Environ. Health Sci. Eng.*, vol. 17, no. 2, hlm. 753–765, 2019, doi: 10.1007/s40201-019-00392-9.
- [77] C. J. Geankoplis, *Transport processes and separation process principles (PDFDrive)*. 1993.
- [78] PP Nomor 22 Tahun 2021, "PP RI No. 22 Tahun 2021 Tentang ENYELENGGARAAN PERLI N DU NGAN DAN PENGELO I-AAN LINGKUNGAN HIDUP," *Sekretariat Negara Republik Indonesia*, vol. 1, no. 078487A, hlm. 1–483, 2021, [Daring]. Tersedia pada: <http://www.jdih.setjen.kemendagri.go.id/>
- [79] BWSP, "Interim Recommendations for Granular Activated Carbon (GAC) Installations - Design Review , Startup and Operations I . Definitions," 2021, [Daring]. Tersedia pada: [https://www.health.ny.gov/environmental/water/drinking/docs/interim_recommendations_for_granular_activated_carbon_installations_v_1.pdf#:~:text](https://www.health.ny.gov/environmental/water/drinking/docs/interim_recommendations_for_granular_activated_carbon_installations_v_1.pdf#:~:text=mmendations_for_granular_activated_carbon_installations_v_1.pdf#:~:text)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

=GAC10: Granular activated carbon filter beds with,of every 240 days (10 NYCRR 5-1.1(ar)).

- [80] S. Müller, F. Corbera-Rubio, F. Schoonenberg Kegel, M. Laureni, M. C. M. van Loosdrecht, dan D. van Halem, “Shifting to biology promotes highly efficient iron removal in groundwater filters,” *Water Res.*, vol. 262, no. July, hlm. 122135, 2024, doi: 10.1016/j.watres.2024.122135.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LAMPIRAN

Lampiran 1

Keputusan Kepala Dinas Penanaman Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu
Provinsi Kalimantan Timur

LAMPIRAN II : KEPUTUSAN KEPALA DINAS PENANAMAN MODAL DAN PELAYANAN TERPADU SATU PINTU PROVINSI KALIMANTAN TIMUR NOMOR 503/ 979 /LINGK/DPMP/VI/2018 TENTANG PEMBERIAN IZIN PEMBUANGAN AIR LIMBAH KE LAUT KEGIATAN PT. BADAK NATURAL GAS LIQUEFACTION BONTANG.

a. DEBIT MAKSIMUM AIR LIMBAH YANG DIIZINKAN DIBUANG KE LAUT

No.	Jenis/ Sumber Air Limbah	Lokasi Pembuangan	Debit maksimum (m ³ / hari)
1.	Air Pendingin Kilang LNG	Outlet Canal Air Pendingin Kilang (Muara Kanal Sekangat)	6,5 x 10 ⁶
2.	Air Limbah dari Plant WWTP #34	Outfall Canal	5.600
3.	Air Limbah Domestik WWTP #48	Outlet Rotary Biodisc	600
		Activated Sluge	1.800
		Aerated Lagoon	2.000
4.	Blowdown Boiler & Neutralizing Pit	Outlet Various Module I	7.381
		Outlet Various Module II	7.132
5.	Air Limbah Drainase	Outlet Drainage	600

b.

c. BAKU MUTU AIR LIMBAH YANG KELUAR DARI TITIK PENAATAN (COMPLIANCE POINTS).

No.	Jenis / Sumber Air Limbah	Parameter	Satuan	Nilai Maksimum
1.	Air Pendingin Kilang LNG	pH	-	6 – 9
		Residu Chlorine	mg/l	1
		Temperatur	°C	40 *)
2.	Air Limbah dari Plant WWTP #34	pH	-	6 – 9
		Minyak dan Lemak	mg/l	20
		Khlorin bebas (Cl ₂)	mg/l	1
		Raksa (Hg)	mg/l	0,005
		Sulfida	mg/l	0,1
		BOD ₅	mg/l	150
		COD	mg/l	300
		pH	-	6 – 9

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 2

Data kalibrasi (enam titik standar) dan verifikasi presisi-akurasi (lima replikasi *check standard* 10 ng) disajikan pada tabel lampiran 2.1, sesuai hasil keluaran perangkat lunak NIC Data Analysis Software.

Tabel Lampiran 2.1 Data Kalibrasi (Profile 20)

No.	Standar (ng)	Peak
1.	0,000	0,040
2.	5,000	5,180
3.	5,000	5,000
4.	10,000	10,615
5.	10,000	10,622
6.	15,000	15,560

Persamaan kalibrasi: $\text{Respons} = 1,0418 \times \text{Konsentrasi} + 0,0400$ ($r = 0,9996$).

Tabel Lampiran 2.2 Data Verifikasi Check Standard 10 ng (5 replikasi)

No.	Sampel Amount (μL)	Peak	Merkuri (ng)	Konsentrasi (μg/L)	Standar (ng)
1.	100	10,354	9,900	99,00000	10,000
2.	100	10,162	9,716	97,16000	10,000
3.	100	10,066	9,624	96,24000	10,000
4.	100	10,166	9,720	97,20000	10,000
5.	100	9,831	9,398	93,98000	10,000

Rata-rata: 9,6716 ng; standar deviasi: 0,182759 ng; koefisien variasi: 1,89% (n = 5). Data sesuai keluaran NIC Data Analysis Software, dianalisis pada 25 Februari 2026.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 3

Massa Karbon *Industrial Grade* yang Tertahan pada Tiap Ayakan *Mesh*

Mesh	Bukaan (mm)	Batch 1 (g)	Batch 2 (g)	Batch 3 (g)
8	2,380	0,16	0,47	0,88
10	2,000	3,04	5,35	8,96
12	1,680	198,36	253,18	212,61
14	1,410	183,94	125,55	72,19
16	1,190	7,74	5,89	2,29
18	1,000	1,26	2,29	0,55
20	0,841	0,21	0,87	0,19
Residu	<0,841	1,56	3,91	1,25
Total teranalisis		396,17	397,41	298,92
Massa awal		400,00	400,00	300,00
Recovery (%)		99,04	99,35	99,64

Lampiran 4

Persentase Distribusi Ukuran Partikel Karbon Aktif *Industrial Grade*

Mesh	% Batch 1	% Batch 2	% Batch 3	Rata-rata (%)
8	0,04	0,12	0,29	0,15
10	0,77	1,35	3,00	1,71
12	50,07	63,71	71,13	61,64
14	46,40	31,59	24,15	34,05
16	1,95	1,46	0,77	1,39
18	0,32	0,58	0,18	0,36
20	0,05	0,22	0,06	0,11
Residu	0,39	0,98	0,42	0,60

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 5Distribusi Ukuran Partikel Karbon Aktif *Market Grade*

Mesh	Bukaan (mm)	Massa Tertahan (g)	Persentase Massa (%)
8	2,380	140,00	71,77
10	2,000	7,77	3,98
12	1,680	6,93	3,55
14	1,410	7,77	3,98
16	1,190	6,24	3,20
18	1,000	6,05	3,10
20	0,841	3,77	1,93
Residu	<0,841	16,54	8,48
Total		195,07	100,00

Lampiran 6

Variasi Tinggi Bed Skala Laboratorium dan Representasinya pada Skala Pilot

No.	Volume Karbon Aktif (mL)	Tinggi bed lab (cm)	Tinggi bed pilot (m)
1.	40	6,45	0,40
2.	45	7,26	0,45
3.	50	8,06	0,50
4.	55	8,87	0,55

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 7

Massa Karbon Aktif pada Tiap Variasi Tinggi

No.	Tinggi bed lab (cm)	Volume (mL)	Massa industrial (g)	Massa market (g)
1.	6,45	40	25,35	33,06
2.	7,26	45	28,52	37,19
3.	8,06	50	31,69	41,33
4.	8,87	55	34,85	45,46

Lampiran 8

EBCT pada Tiap Variasi Tinggi Bed

No.	Tinggi bed lab (cm)	Volume (mL)	EBCT (menit)	EBCT (jam)
1.	6,45	40	21,59	0,360
2.	7,26	45	24,28	0,405
3.	8,06	50	26,98	0,450
4.	8,87	55	29,68	0,495

Lampiran 9

Hasil Adsorpsi Sistem *Batch* pada Karbon Aktif *Industrial Grade*

Tinggi bed (cm)	Volume (mL)	Ce (ppb)	Reduksi (%)
Percobaan Batch ($C_0 = 41$ ppb)			
6,45	40	6,82	83,37
7,26	45	4,31	89,49
8,06	50	8,68	78,83
8,87	55	9,50	76,83

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 10

Hasil Adsorpsi Sistem Kontinu pada Karbon Aktif *Market Grade*

Tinggi bed (cm)	Volume (mL)	Ce (ppb)	Reduksi (%)
Percobaan Kontinu ($C_0 = 9,8$ ppb)			
6,45	40	0,60	93,88
7,26	45	0,51	94,80
8,06	50	0,70	92,86
8,87	55	0,86	91,22

Lampiran 11

Hasil Adsorpsi Menggunakan Karbon Aktif *Market Grade* – Sistem Kontinu ($C_0 = 49,06$ ppb)

Tinggi bed (cm)	Volume (mL)	Ce (ppb)	Reduksi (%)
6,45	40	16,66	66,04
7,26	45	14,21	71,04
8,06	50	29,32	40,24
8,87	55	27,52	43,91

Lampiran 12

Hasil Analisis Logam Kompetitor

Parameter	Fe^{2+}	Cu^{2+}	Zn^{2+}	Ni^{2+}
Before (mg/L)	10,692	0,0049	0,0071	0,0259
After ulangan 1 (mg/L)	0,096	0,0066	0,0105	0,0392
After ulangan 2 (mg/L)	0,067	0,0084	0,0139	0,0317
After ulangan 3 (mg/L)	0,351	0,0098	0,0121	0,0365
After ulangan 4 (mg/L)	0,052	0,0071	0,0075	0,0350
After ulangan 5 (mg/L)	0,026	0,0099	0,0085	0,0449
Reduksi rata-rata (%)	98,89	-70,61	-48,73	-44,63

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 13

Proyeksi Arus Kas dan Present Value Sistem Adsorpsi Skala Pilot

Tahun	Cost Saving (USD)	OPEX (USD)	Cash Flow (USD)	Cash Flow (IDR)	PV @10% (USD)
0	-	-	(1974.54)	(Rp 35.259.361)	(1974.54)
1	1411.04	1079.67	331.37	Rp 5.917.274	301.25
2	1496.97	1123.29	373.68	Rp 6.672.804	308.83
3	1541.88	1145.76	396.13	Rp 7.073.693	297.62
4	1588.14	1168.67	419.47	Rp 7.490.476	286.50
5	1635.78	1192.04	443.74	Rp 7.923.865	275.53
6	1684.86	1215.88	468.97	Rp 8.374.397	264.72
7	1735.40	1240.20	495.20	Rp 8.842.786	254.12
8	1787.46	1265.01	522.46	Rp 9.329.568	243.73
9	1841.09	1290.31	550.78	Rp 9.835.278	233.58
10	1896.32	1316.11	580.21	Rp 10.360.810	223.70
11	1953.21	1342.44	610.77	Rp 10.906.520	214.07
12	2011.81	1369.28	642.52	Rp 11.473.480	204.73
13	2072.16	1396.67	675.49	Rp 12.062.225	195.67
14	2134.32	1424.60	709.72	Rp 12.673.470	186.89
15	2198.35	1453.09	745.26	Rp 13.308.108	178.41
NPV					\$1540.72

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 14

Perbandingan Kebutuhan dan Biaya Adsorben Skenario 1 dan Skenario 2

Parameter	Skenario 1 (Industrial Grade)	Skenario 2 (Market Grade)	Satuan	Keterangan
Bulk density adsorben	0,6337	0,8265	g/ml	Hasil pengukuran dan perhitungan
Volume bed per vessel	0,0340	0,0340	m ³	Tetap (A x H)
Massa adsorben per vessel	21,52	28,07	Kg	$m = pb \times V_{bed}$
Massa total (2 vessel)	43,05	56,14	Kg	Market grade +30,6%
Harga adsorben	Rp 100.803	Rp 50.000	per kg	Industrial 2,02x lebih mahal/kg
Biaya adsorben per penggantian	Rp 2.169.626	Rp 1.403.585	per penggantian	1 vessel per penggantian
Frekuensi penggantian	4x	8x	per tahun	Asumsi <i>market grade</i> jenuh 2x lebih cepat dikarenakan air dilewatkan dua kali siklus untuk memenuhi baku

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

				mutu lingkungan
Biaya adsorben per tahun	Rp 8.678.502	Rp 11.228.680	IDR	Selisih Rp 2.550.178

Lampiran 15

Perbandingan Komponen OPEX Ketiga Skenario (tahun ke-1)

Komponen Biaya	Skenario 1 Industrial Grade (IDR)	Skenario 2 Market Grade (IDR)	Skenario 3 Tanpa Sistem (IDR)
Tenaga kerja	Rp 954.278	Rp 1.918.068	-
Listrik	Rp 7.883.866	Rp 7.883.866	-
Perawatan	Rp 1.763.022	Rp 1.640.623	-
Penggantian adsorben	Rp 8.678.502	Rp 11.228.680	-
Biaya disposasi ke PPLI	-	-	Rp 7.299.942
Biaya transportasi	-	-	Rp 17.897.000
Total OPEX /tahun	Rp 19.279.668	Rp 22.671.237	Rp 25.196.942
CAPEX	Rp 35.259.361	Rp 32.651.111	Rp 0