

PENGUNAAN GRAFENA OKSIDA SEBAGAI BAHAN PENYERAP RADIONUKLIDA LIMBAH RADIOAKTIF CAIR DAN EVALUASI SOLIDIFIKASINYA PADA SEMENTASI

SRIYONO



**PROGRAM STUDI ILMU KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

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

Perpustakaan IPB University



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “*Penggunaan Grafena Oksida sebagai Bahan Penyerap Radionuklida Limbah Radioaktif Cair dan Evaluasi Solidifikasinya pada Sementasi*” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Sriyono
G4601231002



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

RINGKASAN

SRIYONO. Penggunaan Grafena Oksida sebagai Bahan Penyerap Radionuklida Limbah Radioaktif Cair dan Evaluasi Solidifikasinya pada Sementasi. Dibimbing oleh DYAH ISWANTINI PRADONO, KOMAR SUTRIAH, DJAROT SULISTIO WISNUBROTO dan GENI RINA SUNARYO.

Pengelolaan limbah radioaktif merupakan tantangan besar dalam industri nuklir karena potensi bahayanya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Limbah radioaktif ini dihasilkan dari berbagai fasilitas seperti reaktor riset, laboratorium bahan bakar nuklir, serta fasilitas pendukung lainnya, dan diklasifikasikan menjadi limbah padat, cair, dan gas. Seluruh jenis limbah tersebut harus dikelola secara tepat melalui tahapan pengumpulan, pemilahan, pengolahan awal, imobilisasi, dan penyimpanan yang aman. Berdasarkan tingkat paparan radiasinya, limbah Radioaktif Cair (LRC) dari reaktor riset dikategorikan menjadi Limbah Cair Aktivitas Rendah (LCAR) dan Aktivitas Menengah (LCAM). Pemisahan radionuklida dari limbah cair harus dilakukan sebelum dibuang atau disimpan, karena hanya limbah dengan aktivitas tertentu (sangat rendah) yang diperbolehkan dilepaskan ke lingkungan. Metode pemisahan yang umum digunakan antara lain adalah evaporasi, ekstraksi pelarut, penukar ion, dan penyerapan menggunakan bahan seperti zeolit. Hasil dari proses pengolahan awal berupa resin bekas pakai atau konsentrat akan diimobilisasi menggunakan bahan seperti semen, bitumen, polimer, atau gelas. Meskipun dianggap sebagai opsi yang paling hemat biaya, metode sementasi memiliki kelemahan pada penggunaan resin. Sifat resin yang cenderung menyerap air diketahui dapat merusak integritas beton dengan menimbulkan retakan pada permukaannya

Grafena Oksida (GO) adalah material sebagai bahan penyerap (adsorben) alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan ini. GO memiliki struktur dua dimensi dengan luas permukaan tinggi serta gugus fungsional yang mampu berinteraksi kuat dengan logam berat dan radionuklida. GO telah terbukti efektif menyerap berbagai unsur radioaktif dari limbah cair, meskipun penggunaannya untuk LCAM dari reaktor nuklir belum banyak diteliti. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan GO dalam menyerap radionuklida dari limbah radioaktif cair, termasuk tingkat kecenderungan adsorpsi (afinitas relatif) dan efisiensinya. Pengamatan dilakukan dengan membandingkan kadar radioaktivitas sebelum dan sesudah proses penyerapan. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi proses solidifikasi limbah yang telah mengandung GO dalam matriks semen, termasuk pengujian kekuatan beton dan uji lindi untuk melihat potensi pelepasan radionuklida ke lingkungan.

Hasil analisis bibliometrik terhadap data *Scopus* dan *Web of Science* selama periode 1963–2023 (60 tahun) mengonfirmasi adanya tren peningkatan riset global mengenai penggunaan GO sebagai adsorben. Puncak publikasi dunia tercatat pada tahun 2020 dengan 42 artikel, namun kontribusi dari Indonesia masih sangat terbatas dengan hanya menghasilkan tiga publikasi. Sedikitnya publikasi domestik ini membuka peluang besar bagi penguatan riset nasional, khususnya dalam mengeksplorasi potensi masif GO sebagai adsorben radionuklida untuk remediasi limbah cair. Berbagai studi telah membuktikan efektivitas adsorpsi GO yang unggul terhadap deretan radionuklida seperti Co-60, Zn-65, Cs-137, Sr-90, Am-241, U-235.

Melalui visualisasi data rekam jejak riset tersebut, posisi GO kini semakin dikukuhkan sebagai material adsorben yang sangat prospektif.

Sejalan dengan hasil kajian tersebut, penelitian ini juga mengembangkan pendekatan eksperimental melalui sintesis ramah lingkungan GO dari serabut kelapa menggunakan teknik *arc plasma* dengan temperatur proses melebihi 3000 °C, yang memungkinkan konversi karbon secara efektif serta mendukung produksi berkelanjutan berbasis sumber daya lokal. Karakterisasi material menggunakan BET, PSA, FTIR, Raman, XRD, SEM-EDX dan HRTEM menunjukkan bahwa GO modifikasi dengan asam asetat yang dihasilkan memiliki luas permukaan sangat tinggi, yaitu 3.302 m²/g, serta mengandung gugus fungsi oksigen, termasuk karboksil, yang berperan penting dalam mekanisme pertukaran ion. Analisis morfologi memperlihatkan struktur yang seragam dengan komposisi unsur didominasi oleh karbon, oksigen, hidrogen, dan sejumlah kecil kalium. Uji adsorpsi secara *batch* menggunakan limbah aktual dari reaktor G.A. Siwabessy menunjukkan efisiensi pemisahan yang tinggi, yaitu 98,7% untuk Co-60 dan 75,6% untuk Cs-137. Kinetika adsorpsi mengikuti model *pseudo second order*, sedangkan data kesetimbangan sesuai dengan isoterm Langmuir dengan kapasitas adsorpsi maksimum masing-masing sebesar 249,047 MBq/g untuk Co-60 dan 151,016 MBq/g untuk Cs-137. Nilai ΔG° , ΔH° , dan ΔS° semuanya negatif menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara spontan, bersifat eksotermik, dan menyebabkan sistem menjadi lebih teratur setelah adsorpsi terjadi. Nilai afinitas relatif $\alpha_{Co/Cs}$ yang diperoleh menunjukkan nilai jauh lebih besar dari satu ($\alpha_{Co/Cs} \gg 1$), mengindikasikan bahwa GO bersifat lebih selektif dalam mengadsorpsi Co-60 dibandingkan Cs-137. Jika dibandingkan dengan GO-komersial, GO hasil sintesis plasma memiliki kemampuan yang lebih baik. Hasil ini menegaskan bahwa GO hasil sintesis *arc plasma* merupakan adsorben hijau berkinerja tinggi yang potensial untuk pengolahan LRC secara berkelanjutan.

Lebih lanjut, penelitian ini juga mengevaluasi aspek pengelolaan limbah sekunder berupa grafena oksida bekas (GO-bekas) pasca digunakan sebagai adsorben, yang memerlukan imobilisasi untuk menjamin keselamatan jangka panjang. Metode solidifikasi berbasis semen diterapkan dengan komposisi rasio semen terhadap pasir 3:2 dan rasio air terhadap semen (w/c) sekitar 0,34. Variasi fraksi limbah menunjukkan bahwa matriks semen mampu mengakomodasi hingga 3% berat GO-bekas dengan kuat tekan lebih dari 20 MPa, sehingga memenuhi kriteria penerimaan IAEA dan ANSI/ANS-16.1, sedangkan resin penukar ion bekas terbatas hingga 2% berat. Analisis mikrostruktur menggunakan mikroskop optik, FTIR, XRD, XRF, serta SEM-EDX menunjukkan hubungan erat antara proses hidrasi semen, densifikasi matriks, dan mekanisme retensi radionuklida. Uji pelindian statik selama 136 hari memperlihatkan pelepasan Cs-137 dan Co-60 yang terkendali dengan nilai *Leachability Index* (LI) di atas 6,14. Selain itu, koefisien difusi efektif Co-60 yang lebih rendah dibandingkan Cs-137 menunjukkan retensi kimia kobalt divalen yang lebih kuat dalam matriks semen terhidrasi. Secara keseluruhan, hasil ini memberikan dasar rekayasa yang kuat bagi penerapan sementasi dalam imobilisasi GO-bekas, sekaligus menunjukkan keunggulannya dibandingkan dengan limbah resin bekas dalam pengelolaan limbah radioaktif yang berkelanjutan.

Kata kunci: sintesis grafena oksida (GO), serabut kelapa, limbah radioaktif cair, adsorben radionuklida, reaktor riset

SUMMARY

SRIYONO. Utilization of Graphene Oxide as a Radionuclide Adsorbent for Liquid Radioactive Waste and Its Solidification Evaluation in Cementation. Supervised by DYAH ISWANTINI PRADONO, KOMAR SUTRIAH, DJAROT SULISTIO WISNUBROTO, and GENI RINA SUNARYO.

Radioactive waste management poses a major challenge in the nuclear industry due to its potential hazards to the environment and human health. Generated from various facilities such as research reactors, nuclear fuel laboratories, and other supporting facilities. Radioactive waste is classified into solid, liquid, and gaseous forms. All types of waste must be appropriately managed through sequential stages of collection, segregation, pre-treatment, immobilization, and safe storage. Based on radiation exposure levels, Liquid Radioactive Waste (LRW) from research reactors is categorized into Low-Level Liquid Waste (LLLW) and Intermediate-Level Liquid Waste (ILLW). The separation of radionuclides from liquid waste is mandatory prior to disposal or storage, given that only waste with specific (very low) activity levels is permissible for environmental release. Commonly employed separation methods include evaporation, solvent extraction, ion exchange, and sorption using materials such as zeolites. The secondary products of pre-treatment, in the form of spent resins or concentrates, are subsequently immobilized using matrices like cement, bitumen, polymers, or glass. Although cementation is considered the most cost-effective option, it exhibits performance drawbacks when applied to spent resins. The hydrophilic nature of resins is known to compromise concrete integrity by inducing surface cracking.

Graphene Oxide (GO) emerges as a highly promising alternative adsorbent to address these limitations. GO features a two-dimensional structure characterized by a high specific surface area and oxygen-containing functional groups capable of strong interactions with heavy metals and radionuclides. While GO has proven effective in capturing various radioactive elements from liquid waste, its application for ILLW originating from nuclear reactors remains underdeveloped. This study aims to evaluate the capacity of GO to adsorb radionuclides from liquid radioactive waste, including its selectivity and efficiency. Observations were conducted by comparing radioactivity levels before and after the adsorption process. Furthermore, this research evaluates the solidification process of GO-bearing waste within a cement matrix, encompassing compressive strength evaluations and leaching tests to monitor potential radionuclide release into the environment.

Bibliometric analysis of Scopus and Web of Science data over a 60-year period (1963–2023) confirms an increasing global research trend in utilizing GO as an adsorbent. Global publications peaked in 2020 with 42 published articles; however, Indonesia's contribution remains severely limited, accounting for only three publications. This sparse domestic literature opens substantial opportunities for strengthening national research, particularly in exploring the massive potential of GO as a radionuclide adsorbent for liquid waste remediation. Numerous studies have verified the superior adsorption efficiency of GO against a spectrum of radionuclides, including Co-60, Zn-65, Cs-137, Sr-90, Am-241, and U-235. Through data visualization of this research trajectory, the position of GO is increasingly established as a highly prospective adsorbent material.



In line with these insights, this study developed an experimental approach via the green synthesis of GO from coconut coir using an arc plasma technique at a process temperature exceeding 3,000 °C, enabling effective carbon conversion and supporting sustainable production based on local resources. Material characterization using BET, PSA, FTIR, Raman, XRD, SEM-EDX, and HRTEM revealed that the resulting acetic acid-modified GO possesses an ultra-high specific surface area of 3,302 m²/g and bears oxygen functional groups, including carboxyls, which play a critical role in the ion-exchange mechanism. Morphological analysis showed a uniform structure with an elemental composition dominated by carbon, oxygen, hydrogen, and a minor trace of potassium. Batch adsorption tests using actual waste from the G.A. Siwabessy reactor demonstrated high separation efficiencies of 98.7% for Co-60 and 75.6% for Cs-137. Adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model, indicating a chemisorption-dominated mechanism, while the equilibrium data fitted well with the Langmuir isotherm, yielding maximum adsorption capacities of 249.047 MBq/g for Co-60 and 151.016 MBq/g for Cs-137. The negative values of ΔG° , ΔH° , and ΔS° denote that the adsorption process is spontaneous, exothermic, and accompanied by a decrease in system randomness. The obtained selectivity coefficient $\alpha_{Co/Cs}$ indicates that the GO is significantly more selective toward Co-60 than Cs-137. Compared to commercial GO, the plasma-synthesized GO demonstrated superior performance. These findings confirm that arc plasma-synthesized GO serves as a high-performance green adsorbent with strong potential for sustainable LRW treatment.

Furthermore, this study evaluates the management aspect of the secondary waste—specifically spent graphene oxide (spent-GO) after its utilization as an adsorbent—which requires immobilization to guarantee long-term safety. A cement-based solidification method was applied with a cement-to-sand ratio of 3:2 and a water-to-cement (w/c) ratio of approximately 0.34. Waste fraction variations demonstrated that the cement matrix can accommodate up to 3 wt% of spent-GO while maintaining a compressive strength exceeding 20 MPa, thereby satisfying the acceptance criteria of both the IAEA and ANSI/ANS-16.1, whereas spent ion-exchange resin was limited to 2 wt%. Microstructural analyses using optical microscopy, FTIR, XRD, XRF, and SEM-EDX revealed a close correlation between cement hydration, matrix densification, and the radionuclide retention mechanism. A 136-day static leaching test exhibited controlled release of Cs-137 and Co-60, with a Leachability Index (LI) above 6.14. Additionally, the lower effective diffusion coefficient of Co-60 compared to Cs-137 indicates stronger chemical retention of divalent cobalt within the hydrated cement matrix. Overall, these results provide a robust engineering foundation for applying cementation in spent-GO immobilization, while demonstrating its superiority over spent resin waste for sustainable radioactive waste management.

Keywords: graphene oxide (GO) synthesis, coconut fiber, liquid radioactive waste, radionuclide adsorbent, research reactor



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

PENGUNAAN GRAFENA OKSIDA SEBAGAI BAHAN PENYERAP RADIONUKLIDA LIMBAH RADIOAKTIF CAIR DAN EVALUASI SOLIDIFIKASINYA PADA SEMENTASI

SRIYONO

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Kimia

**PROGRAM STUDI ILMU KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Mohammad Khotib, S.Si., M.Si.
- 2 Prof. Dr. Ir. Budi Setiawan, M.Eng

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Mohammad Khotib, S.Si., M.Si.
- 2 Prof. Dr. Ir. Budi Setiawan, M.Eng

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



IPB University
— Bogor Indonesia —

Judul Disertasi : Penggunaan Grafena Oksida sebagai Bahan Penyerap Radionuklida Limbah Radioaktif Cair dan Evaluasi Solidifikasinya pada Sementasi

Nama : Sriyono
NIM : G4601231002

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Dra. Dyah Iswantini Pradono, MSc.Agr.

Pembimbing 2:

Dr. Drs. Komar Sutriah, M.Si.

Pembimbing 3:

Prof. Dr. Ir. Djarot Sulistio Wisnubroto, M.Eng.

Pembimbing 4:

Dr. Geni Rina Sunaryo, M.Sc.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Irmanida Batubara, S.Si., M.Si.

NIP. 19750807 2005012 001

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam:

Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si

NIP. 19780723 200701 001

Tanggal Ujian:

25 Juni 2026

Tanggal Lulus:



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Alloh subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Agustus 2024 sampai bulan April 2026 adalah sintesis dan aplikasi grafena oksida dari biomassa, dengan judul *“Penggunaan Grafena Oksida sebagai Bahan Penyerap Radionuklida Limbah Radioaktif Cair dan Evaluasi Solidifikasinya pada Sementasi”*. Penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Dra. Dyah Iswantini Pradono, MSc.Agr, selaku Ketua Komisi Pembimbing, yang selalu memberikan arahan dan dorongan untuk menyelesaikan kuliah, penelitian dan disertasi.
2. Dr. Drs. Komar Sutriah, M.Si., selaku Anggota Komisi Pembimbing yang telah banyak memberi bimbingan dan saran selama proses penyelesaian disertasi ini.
3. Prof. Dr. Djarot S. Wisnubroto, M.Eng., selaku Anggota Komisi Pembimbing sekaligus co-promotor dari BRIN yang banyak memberikan dukungan penelitian baik sarana laboratorium ataupun pendanaan riset di BRIN.
4. Dr. Geni Rina Sunaryo, M.Sc., selaku Anggota Komisi Pembimbing yang telah membimbing dan banyak memberi saran untuk selesainya riset dan publikasi.
5. Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN)-ORTN-BRIN, Dr. Eng. Topan Setiadipura, S.Si., MSi, yang selalu memberikan dorongan dan semangat dalam mendukung selesainya perkuliahan dan penelitian disertasi ini.
6. Dr. Ing Pudji Untoro yang memberikan ide dan dukungan laboratorium karakterisasi di PT. Cipta Mikro Material (CMiM). Dr.Ing. Arbi Dimiyati dan mbak Airin Handayani, M.Si, yang memberikan dukungan dan fasilitas di Plasma Center, pada Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sains dan Teknologi- BRIN
7. Teman-teman anggota penelitian RIIM Batch-4 Aplikasi Grafena Oksida sebagai Penyerap Zat Radioaktif, yang mendukung dalam kegiatan riset di Lab-50 IPLR
8. Teman-teman anggota kelompok riset Keandalan Sistem Pendingin dan Rekayasa Proses Nuklir- PRTRN, yang selalu memberikan semangat dan dukungan untuk menyelesaikan studi S3.
9. Keluarga kami, istri tercinta (Sri Haryani, Dra) dan anak-anak kami (Aviciena Akbar Enggartyasto, Alferos Jabbar Enggartyasto) yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya sehingga disertasi dan perkuliahan berjalan lancar.
10. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada moderator seminar hasil, dan penguji luar komisi pembimbing.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2026

Sriyono



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR LAMPIRAN	v
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup	4
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	5
1.7 Hipotesis	5
II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Pengolahan Limbah Radioaktif	7
2.2 Proses Adsorpsi	10
2.3 Adsorpsi Isotermal pada GO	11
2.4 Kandungan Radionuklida pada Limbah Pendingin Primer RSG-	12
2.5 Karakteristik Cs-137 dan Co-60 pada Limbah Cair RSG-GAS	14
2.6 Solidifikasi Limbah GO dengan Proses Sementasi	14
2.7 Spektrometer Gamma	16
III KAJIAN TREN PENELITIAN DAN POTENSI MATERIAL BERBASIS GRAFENA OKSIDA DALAM ADSORPSI RADIONUKLIDA	19
3.1 Abstrak	19
3.2 Pendahuluan	20
3.3 Bahan dan Alat	21
3.4 Hasil dan Pembahasan	23
3.5 Simpulan	35
IV SINTESIS GRAFENA OKSIDA DARI SERABUT KELAPA DENGAN METODE ARC PLASMA SEBAGAI ADSORBEN Co-60 DAN Cs-137 PADA LIMBAH RADIOAKTIF CAIR	37
4.1 Abstrak	37
4.2 Pendahuluan	38
4.3 Metode Penelitian	39
4.4 Hasil dan Pembahasan	42
4.5 Simpulan	61
V PERBANDINGAN KINERJA SEMENTASI GRAFENA OKSIDA BEKAS DAN RESIN PENUKAR ION BEKAS PADA IMOBILISASI LIMBAH RADIOAKTIF	63
5.1 Abstrak	63
5.2 Pendahuluan	64
5.3 Alat dan Bahan	66
5.4 Hasil dan Pembahasan	71



5.5.	Simpulan	90
VI	PEMBAHASAN UMUM	93
6.1	Kinerja dan Mekanisme Adsorpsi Co-60 dan Cs-137 pada GO	95
6.2	Komparasi Hasil Penelitian Adsorpsi GO sebagai Adsorben	96
6.3	Urgensi Grafena Oksida sebagai Substitusi Resin Penukar Ion dalam Pengolahan Limbah Radioaktif Cair	101
6.4	Lanskap Riset Global dan Peluang Strategis Nasional	101
6.5	Inovasi Sintesis Hijau GO Berbasis Sumber Daya Lokal (Serabut Kelapa) dan Modifikasinya	101
6.6	Pertimbangan Tekno-Ekonomi dan Implikasi Ekonomi Sirkular	102
6.7	Evaluasi Imobilisasi Limbah Sekunder (Sementasi GO-Bekas) dan Aspek Keselamatan	103
6.8	Implikasi Penelitian dan Prospek Berkelanjutan	104
VII	SIMPULAN UMUM DAN SARAN	105
7.1	Simpulan Umum	105
7.2	Saran	106
	DAFTAR PUSTAKA	107
	LAMPIRAN	125
	RIWAYAT HIDUP	134

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

DAFTAR TABEL

1	Aktivitas radionuklida dalam air pendingin primer	13
2	Aktivitas produk fisi pada LCAM dan batasannya pada Laporan Analisis Keselamatan RSG GAS	13
3	Tahapan perolehan data pada basis data Scopus dan WoS	22
4	Sumber-sumber informasi atau jurnal yang relevan sebagai tempat publikasi riset GO	25
5	Sepuluh negara paling produktif dan kolaboratif dalam riset aplikasi GO	27
6	Kapasitas adsorpsi GO terhadap berbagai adsorbat dalam berbagai larutan	30
7	Perubahan bobot serabut menjadi GO hasil sintesis menggunakan plasma	42
8	Perbandingan kandungan unsur C, H, O dan unsur lainnya berdasar hasil uji SEM EDX untuk GO-AP dan GO-APM	49
9	Pengaruh dosis massa GO terhadap efisiensi	53
10	Parameter Langmuir pada adsorpsi Cs-137 dan Co-60 oleh GO-APM pada pH 3,0 dan temperatur 298 hingga 313 K.	59
11	Termodinamika adsorpsi GO-APM terhadap Cs-137 dan Co-60	59
12	Nilai afinitas relatif GO terhadap Co-60 dan Cs-137	60
13	Dimensi geometris, sifat fisik, dan parameter terhitung dari sampel beton sementasi GO-bekas dan resin-bekas.	72
14	Parameter regresi linier dan koefisien difusi efektif analisis pelindian beton GO-bekas dan resin-bekas	87
15	Perbandingan kinerja adsorpsi berbagai jenis adsorben GO dan modifikasinya terhadap berbagai isotop radionuklida	97

DAFTAR GAMBAR

1	Sumber limbah radioaktif dan tahapan pengelolaannya (Sucipta 2019)	7
2	Struktur grafit, grafena oksida (GO) dan <i>reduced graphene oxide</i> (rGO) (Zhu <i>et al.</i> 2014)	9
3	Mekanisme kerja adsorpsi pada permukaan GO (Jiříčková <i>et al.</i> 2022).	11
4	Prosedur uji pelindian pada beton hasil sementasi	16
5	Rangkaian perangkat spektrometer Gamma	17
6	Diagram alur PRISMA yang dilakukan pada penelusuran basis data Scopus dan WoS	23
7	Distribusi perkembangan publikasi, dengan garis biru putus-putus menunjukkan garis tren eksponensial.	24
8	Distribusi jumlah sitasi dari waktu ke waktu, dengan garis putus-putus berwarna kuning dan biru menunjukkan garis tren polinomial	24
9	Visualisasi jaringan jurnal-jurnal relevan yang mempublikasikan artikel pemanfaatan GO	26
10	Visualisasi jaringan negara-negara yang produktif dan berkolaborasi	26
11	Visualisasi <i>overlay</i> negara-negara yang produktif dan berkolaborasi	27

12	Visualisasi jaringan berdasarkan kata kunci penulis dengan frekuensi kemunculan minimal 2 kali	29
13	Visualisasi secara <i>overlay</i>	30
14	Mekanisme adsorpsi radionuklida pada GO (Das <i>et al.</i> 2021).	33
15	Tahapan sintesis GO dengan <i>arc plasma</i> dan modifikasinya	40
16	Hasil uji BET terhadap luas permukaan berbagai jenis GO	43
17	Distribusi partikel dan sifat dispersibilitas GO-APM	44
18	Difraktogram struktur kristal GO-APM	45
19	Spektrum FTIR dari GO-C dan GO-APM	46
20	Spektrum Raman GO-APM	47
21	Citra SEM dari GO-AP (a) dan GO-APM (b) pada perbesaran yang sama, yaitu 1000×, 2500×, 5000×, 10.000× dan 30.000×	48
22	Hasil analisis SEM-EDS dari GO-APM.	49
23	Citra HRTEM dari GO-APM pada berbagai perbesaran yang menunjukkan morfologi dan struktur lembaran GO yang tereksfoliasi	50
24	Citra HAADF-STEM dan TEM perbesaran rendah dari GO-APM yang disintesis melalui <i>arc plasma</i> .	51
25	Spektrum EDS dari GO-APM yang diperoleh melalui HRTEM, menunjukkan puncak C, O, dan jejak K.	52
26	Pengaruh massa GO terhadap efisiensi adsorpsi	52
27	Pengaruh pH terhadap daya adsorpsi GO-APM pada dosis massa 200 mg	53
28	Pendekatan analisis kinetika adsorpsi Cs-137 pada GO-APM	55
29	Pendekatan analisis kinetika adsorpsi Co-60 pada GO-APM	55
30	Analisis Freundlich untuk adsorpsi terhadap Co-60 dengan GO-APM	56
31	Analisis Langmuir (b) untuk adsorpsi terhadap Co-60 dengan GO-APM	57
32	Analisis Freundlich untuk Adsorpsi terhadap Cs-137 pada GO-APM	58
33	Analisis Langmuir untuk Adsorpsi terhadap Cs-137 pada GO-APM	58
34	Perbandingan hasil uji adsorpsi GO-C dan GO-APM terhadap Co-60 dan Cs-137 pada LRC	60
35	Kapasitas adsorpsi GO-C dan GO-APM terhadap Cs-137 dan Co-60 pada LRC	61
36	Mesin uji universal (<i>Universal Testing Machine</i> , UTM) yang dilengkapi dengan tampilan digital beban–perpindahan	68
37	Beton limbah hasil sementasi GO-bekas ((a) dan (b)) serta konfigurasi uji pelindian perendaman statik dalam kondisi terkendali (c)	70
38	Permukaan makrostruktur dari beton GO-bekas pada berbagai <i>waste loading</i>	72
39	Perbandingan spektrum FTIR antara beton GO-bekas (spektrum merah) dan resin-bekas (spektrum hitam)	73
40	Difraktogram XRD dari beton GO-bekas dan resin bekas	75
41	Citra SEM dari beton GO-bekas (a) dan resin-bekas (b)	78
42	Spektrum EDX dari beton GO-bekas	79
43	Spektrum EDX dari beton resin-bekas pada dua lokasi mikro titik spot	80
44	Nilai kuat tekan sampel beton GO-bekas dan resin-bekas.	81
45	Perubahan nilai konduktivitas listrik pada media lindi beton GO-bekas dan resin-bekas	83



46	Perubahan nilai pH pada media pelindian rendaman beton GO-bekas dan resin-bekas.	84
47	Laju pelindian inkremental Cs-137 dan Co-60 dari beton limbah GO-bekas dan resin-bekas	85
48	Indeks pelindian (LI) Cs-137 dan Co-60 pada beton GO-bekas dan resin-bekas	85
49	Perbandingan pelepasan kumulatif Cs-137 dan Co-60 dari beton GO-bekas dan resin-bekas selama uji pelindian.	86
50	Konsep terpadu pengelolaan limbah radioaktif cair dari hulu ke hilir	93
51	Mekanisme adsorpsi Co^{2+} dan Cs-137 pada GO (Novikau <i>et al.</i> 2022)	96
52	Hubungan (1/T) dan ln(K) pada adsorpsi isothermal untuk Co-60	130
53	Hubungan (1/T) dan ln(K) pada adsorpsi isothermal untuk Cs-137	131

DAFTAR LAMPIRAN

1	Bagan alir proses kalibrasi spektrometer Gamma.	126
2	Bagan alir penelitian adsorpsi radionuklida menggunakan GO dan proses sementasinya	127
3	Bagan proses sintesis GO dari serabut kelapa dengan <i>Arc Plasma Sintering</i> (APS)	127
4	Perubahan bobot serabut dan GO hasil sintesis menggunakan plasma	128
5	Prosedur modifikasi GO dengan asam asetat	128
6	Prosedur adsorpsi dengan variasi bobot GO	129
7	Prosedur adsorpsi GO pada limbah radioaktif cair dengan variasi waktu kontak	129
8	Perhitungan termodinamika adsorpsi isothermal untuk GO-APM berdasar pendekatan metode Langmuir	130
9	Perhitungan afinitas relatif GO terhadap Co-60 dan Cs-137 berdasarkan metode Langmuir	132
10	Bagan alir sementasi GO-bekas	133



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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