

PENGEMBANGAN DAN KARAKTERISASI MATERIAL IMOBILISASI BERBASIS POLIESTER UNTUK SERIUM DAN SESIUM SEBAGAI SURROGATE LIMBAH PRODUKSI RADIOISOTOP ^{99}Mo

RISDIYANA SETIAWAN



**PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@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



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

IPB University

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Pengembangan Dan Karakterisasi Material Imobilisasi Berbasis Poliester Untuk Serium dan Sesium Sebagai *Surrogate* Limbah Produksi Radioisotop ⁹⁹Mo” 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 tesis ini.

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

Bogor, 27 Februari 2025

Risdiyana Setiawan
G4501231037

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.



RINGKASAN

RISDIYANA SETIAWAN. Pengembangan Dan Karakterisasi Material Imobilisasi Berbasis Poliester Untuk Serium Dan Sesium Sebagai *Surrogate* Limbah Produksi Radioisotop ^{99}Mo . Dibimbing oleh PURWANTININGSIH SUGITA, MUHAMMAD FARID, dan RATIKO.

Pemanfaatan teknologi nuklir di bidang kesehatan, khususnya dalam produksi radioisotop ^{99}Mo , sangat penting untuk aplikasi diagnostik medis. Radioisotop ini menghasilkan limbah radioaktif cair yang mengandung radionuklida berbahaya, seperti uranium dan produk fisi, yang memerlukan pengelolaan yang hati-hati. Limbah tersebut memiliki waktu paruh panjang, sehingga sangat berisiko jika tidak ditangani dengan tepat. Untuk itu, diperlukan solusi jangka panjang yang dapat mencegah dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, salah satunya dengan mengembangkan teknologi imobilisasi limbah radioaktif menggunakan matriks polimer.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengkarakterisasi material imobilisasi berbasis poliester tak jenuh yang dipadukan dengan super absorben nochar untuk menyerap dan mengikat limbah radioaktif simulasi dari produk fisi, yaitu serium (Ce) dan sesium (Cs), sebagai surrogate dari limbah radioaktif ^{99}Mo . Penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kombinasi poliester tak jenuh dan nochar dalam menyolidifikasi limbah, menentukan kondisi optimal waste loading, serta menguji ketahanan material terhadap paparan iradiasi gamma pada dosis yang berbeda untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan limbah dalam jangka panjang.

Material komposit yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari poliester tak jenuh sebagai matriks pengikat dan nochar sebagai super absorben. Limbah simulasi menggunakan serium dan sesium dipilih karena sifat kimianya yang mirip dengan aktinida dan produk fisi dalam limbah radioaktif. Proses solidifikasi dilakukan dengan mencampurkan limbah simulasi ke dalam campuran polimer, yang kemudian diuji dengan berbagai metode, seperti uji pelindian untuk mengukur kemampuan material dalam menahan limbah, uji kuat tekan untuk mengevaluasi ketahanan mekanik, serta karakterisasi menggunakan teknik SEM dan Raman spectroscopy untuk menganalisis struktur mikro dan interaksi kimiawi dalam matriks. Selain itu, sampel solidifikasi diuji dengan dosis iradiasi gamma yang bervariasi untuk menguji ketahanan material terhadap radiasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa waste loading 20% adalah kondisi optimal, dengan laju pelindian yang minimal dan kekuatan tekan yang memenuhi standar yang ditetapkan oleh IAEA. Hal ini menjadikan kombinasi poliester tak jenuh dan nochar sebagai pilihan yang aman dan efisien untuk pengelolaan limbah radioaktif dalam jangka panjang. Uji pelindian Pra iradiasi menunjukkan bahwa tidak ada migrasi kontaminan ke lingkungan, sehingga material solidifikasi terbukti efektif menahan limbah radioaktif. Iradiasi gamma hingga dosis 200 kGy meningkatkan stabilitas material melalui pembentukan ikatan silang dalam struktur polimer, yang memperkuat material tersebut. Namun, dosis yang lebih tinggi menyebabkan degradasi struktural yang menurunkan ketahanan material. Proses iradiasi gamma ini memberikan wawasan penting tentang kemampuan material untuk bertahan dalam kondisi radiasi yang ekstrem, serta menentukan batas dosis yang masih dapat menjamin efektivitas material dalam mengelola

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.



limbah radioaktif. Distribusi elemen Ce dan Cs yang homogen dalam matriks solidifikasi pada dosis iradiasi optimal menunjukkan bahwa proses imobilisasi efektif dalam menyerap dan mengikat limbah. Hasil analisis menggunakan spektroskopi Raman dan mikroskopi elektron menunjukkan bahwa interaksi kimia antara nochar dan poliester tak jenuh menghasilkan matriks yang stabil dan homogen, yang menghambat pelepasan radionuklida ke lingkungan.

Penelitian ini memberikan solusi inovatif dalam pengelolaan limbah radioaktif, terutama dari produksi ^{99}Mo , dengan mengembangkan material komposit berbasis polimer yang lebih efisien, tahan lama, dan aman dibandingkan dengan metode imobilisasi konvensional. Material yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, ketahanan kimia yang baik, serta stabilitas terhadap radiasi gamma, menjadikannya pilihan yang lebih aman dan efisien untuk pengelolaan limbah radioaktif dalam jangka panjang.

Kata kunci: Limbah radioaktif, *Surrogate*, Nochar, Poliester tak jenuh

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.

SUMMARY

RISDIYANA SETIAWAN. Development and characterisation of polyester-based immobilised materials for serium and sesium as surrogates for ^{99}Mo radioisotope production waste. Supervised by PURWANTININGSIH SUGITA, MUHAMMAD FARID and RATIKO.

The utilization of nuclear technology in the healthcare field, particularly in the production of the radioisotope ^{99}Mo , is essential for medical diagnostic applications. This radioisotope generates liquid radioactive waste containing hazardous radionuclides, such as uranium and fission products, which require careful management. The waste has a long half-life, making it extremely risky if not handled appropriately. For this reason, a long-term solution is needed that can prevent negative impacts on human health and the environment, one of which is by developing radioactive waste immobilization technology using a polymer matrix.

This study aims to develop and characterize unsaturated polyester-based immobilization materials combined with super absorbent nochar to absorb and bind simulated radioactive waste from fission products, namely cerium (Ce) and cesium (Cs), as surrogates of ^{99}Mo radioactive waste. This research also aims to evaluate the effectiveness of the combination of unsaturated polyester and nochar in consolidating waste, determining the optimal conditions for waste loading, and testing the material's resistance to gamma irradiation exposure at different doses to determine the material's ability to withstand waste in the long term.

The composite material used in this study consists of unsaturated polyester as a binder matrix and nochar as a super absorbent. Simulated waste using cerium and cesium was chosen due to its chemical properties similar to actinides and fission products in radioactive waste. The solidification process was carried out by mixing the simulated waste into the polymer blend, which was then tested by various methods, such as leaching test to measure the material's ability to withstand the waste, compressive strength test to evaluate mechanical resistance, and characterization using SEM and Raman spectroscopy techniques to analyze the microstructure and chemical interactions in the matrix. In addition, solidification samples were tested with varying doses of gamma irradiation to test the material's resistance to radiation.

The results showed that 20% waste loading was the optimum condition, with minimal leaching rate and compressive strength that met the standards set by the IAEA. This makes the combination of unsaturated polyester and nochar a safe and efficient option for long-term radioactive waste management. Leaching tests showed that there was no migration of contaminants into the environment, so the solidification material proved to be effective in containing radioactive waste. Gamma irradiation up to a dose of 200 kGy improved the stability of the material through the formation of cross-links in the polymer structure, which strengthened the material. However, higher doses cause structural degradation that decreases the durability of the material. This gamma irradiation process provides important insights into the material's ability to withstand extreme radiation conditions, as well as determining the dose limit that can still guarantee the material's effectiveness in managing radioactive waste.

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.



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.

The homogeneous distribution of Ce and Cs elements in the solidification matrix at the optimal irradiation dose indicates that the immobilization process is effective in absorbing and binding waste. Analytical results using Raman spectroscopy and electron microscopy showed that the chemical interaction between nochar and unsaturated polyester resulted in a stable and homogeneous matrix, which inhibited the release of radionuclides into the environment.

This research provides an innovative solution in radioactive waste management, especially from ⁹⁹Mo production, by developing polymer-based composite materials that are more efficient, durable, and safe compared to conventional immobilization methods. The materials developed in this research have high mechanical strength, good chemical resistance, and stability against gamma radiation, making them a safer and more efficient option for long-term radioactive waste management.

Keywords: Radioactive waste, Surrogate, Nochar, Unsaturated polyester



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 2025
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.



PENGEMBANGAN DAN KARAKTERISASI MATERIAL IMOBILISASI BERBASIS POLIESTER UNTUK SERIUM DAN SESIUM SEBAGAI SURROGATE LIMBAH PRODUKSI RADIOISOTOP ^{99}Mo

RISDIYANA SETIAWAN

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Kimia

**PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
Dr. Dra. Sri Mulijani, M.Si



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

Perpustakaan IPB University

Judul Tesis : Pengembangan Dan Karakterisasi Material Imobilisasi Berbasis
Poliester Untuk Serium dan Sesium Sebagai *Surrogate* Limbah
Produksi Radioisotop ⁹⁹Mo
Nama : Risdiyana Setiawan
NIM : G4501231037

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Purwantiningsih Sugita, MS



Pembimbing 2:
Dr. Drs. Muhammad Farid, MSi



Pembimbing 3:
Dr. Dipl.-Ing. Ratiko, M.T

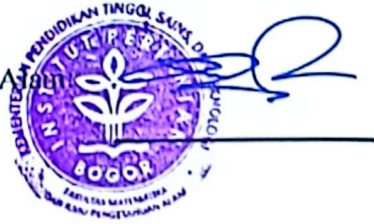


Diketahui oleh

Ketua Program Studi Kimia:
Prof. Dr. Irmanida Batubara, S.Si., M.Si.
NIP 197508072005012001



Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam:
Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si.
NIP 197807232007011001



Tanggal Ujian: 27 Februari 2025

Tanggal Lulus:



@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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Maret 2024 sampai bulan Oktober 2024, dengan judul Pengembangan Dan Karakterisasi Material Imobilisasi Berbasis Poliester Untuk Serium Dan Sesium Sebagai Surrogate Limbah Produksi Radioisotop ⁹⁹Mo.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof. Dr. Purwantiningsih Sugita, MS, Dr. Drs. Muhammad Farid, M.Si, dan Dr. Dipl.-Ing. Ratiko, M.T yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pembimbing akademik, moderator seminar, dan penguji luar komisi pembimbing. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada kepada Jaka Rachmadetin, Ph.D., Ir. Aisyah, M.T., Kuart Heriyanto, S.Si., M.Si., dan Dwi Luhur Ibnu, S.T., yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian di ORTN Badan Riset Inovasi Nasional Serpong yang telah membantu selama pengumpulan data. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnyadan seterusnya.

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

Bogor, Februari 2025

Risdiyana Setiawan



DAFTAR ISI

RINGKASAN	iii
SUMMARY	v
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
II METODE	4
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	4
2.2 Alat dan Bahan	4
2.3 Prosedur Kerja	4
III HASIL DAN PEMBAHASAN	9
3.1 Limbah Hasil Produksi Radioisotop ⁹⁹ Mo	9
3.2 Karakteristik dan Nilai Kapasitas Serap Super Absorben Nochar N960	10
3.3 Karakteristik Bahan Solidifikasi Poliester Takjenuh	14
3.4 Solidifikasi Noniradiasi	17
3.5 Solidifikasi Teriradiasi Gamma	25
IV SIMPULAN DAN SARAN	34
4.1 Simpulan	34
4.2 Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN	38
RIWAYAT HIDUP	46

DAFTAR TABEL

2.1 Bobot nochar limbah dan polimer poliester tak jenuh untuk imobilisasi	6
3.1 Konsentrasi aktinida pada limbah radioaktif cair	9
3.2 Konsentrasi produk fisi pada limbah radioaktif cair	10
3.3 Variasi Kapasitas serap super absorben polyacrilamid	12
3.4 Konsentrasi Ce dan Cs sebelum uji pelindian	17
3.5 Hasil kuat tekan sampel solidifikasi berbagai <i>waste loading</i>	20

DAFTAR GAMBAR

2.2 Skema eksperimen untuk uji lindih	6
3.1 Spektrum Spektroskopi Raman Nochar	11
3.2 Mikrograf SEM Nochar berbasis Poliakrilamid	12
3.3 Viskositas Poliester tak jenuh	15
3.4 Spektrum Karakterisasi Poliester Tak Jenuh	16
3.5 Mikrograf SEM Poliester Tak Jenuh	17
3.6 (a) Laju pelindihan Cs dan (b) Ce pada sampel solidifikasi dengan <i>waste loading</i> 10%, 15% , 20% , dan 25%	18
3.7 Hubungan antara kekuatan tekan dengan komposisi <i>waste loading</i>	21
3.8 Perbandingan spektrum raman Nochar dan Nochar-limbah	22
3.9 Perbandingan Spektum Raman sampel solidifikasi noniradiasi Nochar, Nochar limbah, Poliester tak jenuh, <i>waste loading</i> 10%-25%	23
3.10 Mikrostruktur dan morfologi poliester tak jenuh sebelum dan SAP perndingan <i>waste loading</i> 10, 15, 20 dan 25%	24
3.11 Peta distribusi elemen (dengan analisis EDX) blok limbah	25
3.12 Perubahan warna polimer polieser tak jenuh setelah iradiasi gamma dari kiri ke kanan (noniradiasi, 50, 100, 200, 300 kGy)	26
3.13 (a) Laju pelindian Ce dan (b) Ce pada sampel solidifikasi <i>waste loading</i> 20% noniradiasi, 50 kGy, 100 kGy, 200 kGy, dan 300 kGy	27
3.14 Hubungan antara kekuatan tekan dengan dosis iradiasi	29
3.15 Perbandingan Spektrum Raman <i>waste loading</i> 20% noniradiasi dan iradiasi 50 100 kGy, 200 kGy, 300 kGy	31
3.16 Mikrostruktur dan morfologi <i>waste loading</i> 20%, dan pasca	32
3.17 Peta distribusi elemen EDX blok limbah <i>waste loading</i> 20%, dan pasca iradiasi <i>waste loading</i> 20 % dengan variasi dosis 200 dan 300 KGy	33

DAFTAR LAMPIRAN

1. Diagram alir penelitian	39
2. Perhitungan komposisi <i>surrogate</i> limbah	40
3. Nochar-limbah pH 1	41
4. Proses solidifikasi blok polimer-limbah	41
5. Uji pelindian dipercepat (ASTM C-1308)	42
6. Proses pengujian kuat tekan (ASTM D-695)	42
7. Perhitungan konsentrasi awal Ce	42
8. Perhitungan konsentrasi awal Cs	43
9. Spektrum raman Nochar dan nochar limbah	44



@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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University