

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <https://ejournal.brin.go.id/urania>



PENGARUH IRADIASI GAMMA TERHADAP KARAKTERISTIK POLIMER POLIESTER TAK JENUH UNTUK APLIKASI SOLIDIFIKASI LIMBAH RADIOAKTIF

Risdiyana Setiawan^{1,3}, Purwantiningsih Sugita²,
Muhammad Farid², Ratiko³, Jaka Rachmadetin³, Kuat Heriyanto³,
Yuli Purwanto³, Dwi Iuhur Ibnu Saputra³, Andry Setiawan³

¹Pascasarjana Program Studi Kimia IPB University
Jl. Tanjung Kampus IPB, Dramaga, Bogor

²Departemen Kimia, Fakultas MIPA, IPB University
Jl. Tanjung Kampus IPB, Dramaga, Bogor

³Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir Dan Limbah Radioaktif – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J Habibie Gd. 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: purwantiningsih@apps.ipb.ac.id

(Naskah diterima: 24–08–2024, Naskah direvisi: 23–09–2024, Naskah disetujui: 03–10–2024)

ABSTRAK

PENGARUH IRADIASI GAMMA TERHADAP KARAKTERISTIK POLIMER POLIESTER TAK JENUH UNTUK APLIKASI SOLIDIFIKASI LIMBAH RADIOAKTIF. Upaya pertama dalam pengelolaan limbah radioaktif adalah melalui karakterisasi limbah radioaktif dengan mengidentifikasi nuklida dan mengukur radioaktivitas. Karakterisasi limbah radioaktif sangat membantu dalam pengelolaan limbah yang terdiri atas pewadahan limbah, penguraian limbah, penyimpanan limbah sementara, dan operasi pembuangan. Penggunaan polimer poliester dalam solidifikasi limbah radioaktif merupakan salah satu solusi penting dalam pengelolaan limbah yang aman dan berkelanjutan. Polimer ini dipilih karena sifat mekanik dan kimianya yang baik, seperti ketahanan terhadap degradasi dan stabilitas jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi dan menganalisis pengaruh iradiasi sinar gamma terhadap sifat mekanik dan kimia polimer poliester tak jenuh yang digunakan dalam solidifikasi limbah radioaktif. Iradiasi dilakukan dengan variasi dosis 50, 100, 200, dan 300 kGy. Hasil menunjukkan bahwa pada dosis rendah hingga sedang (50-200 kGy), terjadi peningkatan kuat tekan dan densitas akibat terbentuknya ikatan silang antar rantai polimer. Namun, pada dosis iradiasi yang lebih tinggi (300 kGy), terjadi degradasi material yang menyebabkan penurunan kekuatan. Spektrofotometri Raman dan SEM menunjukkan perubahan struktur kimia dan morfologi akibat iradiasi, terutama dalam hal perubahan gugus fungsi dan kepadatan struktur. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa iradiasi dapat memperkuat polimer pada dosis tertentu, namun batasan dosis harus diperhatikan untuk mencegah degradasi material.

Kata kunci: Solidifikasi, poliester tak jenuh, iradiasi.

ABSTRACT

EFFECT OF GAMMA IRRADIATION ON THE CHARACTERISTICS OF UNSATURATED POLYESTER POLYMERS FOR RADIOACTIVE WASTE SOLIDIFICATION APPLICATIONS. *The first effort in radioactive waste management is through radioactive waste characterization by identifying nuclides and measuring radioactivity. Characterization of radioactive waste is helpful in waste management consisting of waste containment, waste decomposition, temporary waste storage, and disposal operations. The use of polyester polymers in radioactive waste solidification is one of the important solutions in safe and sustainable waste management. These polymers are chosen for their good mechanical and chemical properties, such as resistance to degradation and long-term stability. This study aims to characterize and analyze the effect of gamma irradiation on the mechanical and chemical properties of unsaturated polyester polymers used in radioactive waste solidification. Irradiation was carried out with dose variations of 50, 100, 200, and 300 kGy. The results showed that at low to medium doses (50-200 kGy), there was an increase in compressive strength and density due to the formation of crosslinks between polymer chains. However, at higher irradiation doses (300 kGy), material degradation occurred leading to a decrease in strength. Raman spectrophotometry and SEM showed changes in chemical structure and morphology due to irradiation, especially in terms of changes in functional groups and structural density. The results of this study indicate that irradiation can strengthen polymers at certain doses, but dose limits must be considered to prevent material degradation.*

Keywords: *Solidification, unsaturated polyester, irradiation.*

Pengaruh Iradiasi Gamma Terhadap Karakteristik

Polimer Poliester Tak Jenuh Untuk Aplikasi Solidifikasi Limbah Radioaktif

(Risdiyana Setiawan, Purwantiningsih Sugita, Muhammad Farid, Ratiko, Jaka Rachmadetin, Kuat Heriyanto, Yuli Purwanto, Dwi Luhur Ibnu Saputra, Andry Setiawan)

PENDAHULUAN

Upaya pertama dalam pengelolaan limbah radioaktif adalah melalui karakterisasi limbah radioaktif dengan mengidentifikasi nuklida dan mengukur radioaktivitas. Karakterisasi limbah radioaktif sangat membantu dalam pengelolaan limbah yang terdiri atas pewadahan limbah, penguraian limbah, penyimpanan limbah sementara, dan operasi pembuangan. Dalam operasi pembuangan limbah radioaktif dilakukan proses klasifikasi limbah radioaktif yang dianggap aman bagi manusia dan lingkungan, sehingga tidak lagi memerlukan pengelolaan khusus disebut Klirens. Limbah yang telah mencapai klirens dianggap telah kehilangan sifat radioaktifnya secara signifikan dan tidak lagi menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan [1].

Proses solidifikasi adalah salah satu metode pengolahan limbah yang banyak dilakukan dengan tujuan untuk mengubah limbah yang berbahaya menjadi tidak berbahaya karena permeabilitasnya berkurang dan kekuatan fisiknya meningkat sehingga mudah diangkat dan ditimbun. Proses solidifikasi berupaya memperkecil dan membatasi daya larut, pergerakan/penyebaran dan daya racunnya (immobilisasi unsure yang bersifat racun) sebelum limbah B3 tersebut dibuang ke tempat penimbunan akhir (Kep-03/Bapedal/09/1995). Prinsip kerja solidifikasi adalah pengubahan watak fisik dan kimiawi limbah B3 dengan cara penambahan senyawa pengikat (landfill) sehingga pergerakan senyawa-senyawa B3 dapat dihambat atau terbatas dan membentuk ikatan massa monolit dengan struktur yang kekar [2].

Salah satu pengolahan limbah radioaktif yaitu dengan metode immobilisasi dengan proses solidifikasi. DPFK-BRIN telah menerapkan teknologi solidifikasi limbah radioaktif menggunakan bahan matriks semen khususnya untuk immobilisasi limbah radioaktif tingkat rendah (LRTR) dan limbah radioaktif tingkat sedang (LRTS) umur paruh pendek. Metode Immobilisasi dengan matriks semen memiliki beberapa kekurangan diantaranya matriks semen dapat mengalami degradasi seiring waktu akibat paparan lingkungan atau sifat kimia dari limbah radioaktif, limbah radioaktif dapat menyebabkan korosi pada matriks semen seiringnya waktu, dan matriks semen tidak

memiliki kekuatan mekanis yang cukup untuk menahan limbah radioaktif dalam jangka waktu yang panjang. Hal-hal tersebut dapat menyebabkan risiko kebocoran limbah. Maka dari itu dibutuhkan pengembangan material baru yaitu immobilisasi berbasis polimer untuk meningkatkan kekuatan mekanik, ketahanan kimia dan keselamatan paket limbah radioaktif dalam jangka waktu yang panjang.

Terdapat beberapa jenis polimer yang telah digunakan dalam penelitian pengolahan limbah yaitu polimer epoksi, matriks synroc titanat, polimer poliuretan, epoksi akrilat, dan polivinil ester. Penelitian mengenai komposit polimer epoksi [3] menunjukkan bahwa epoksi memiliki sifat mekanik yang baik, tetapi ketahanannya terhadap radiasi terbatas. Matriks Synroc Titanat [4] memiliki keunggulan dalam stabilitas termal dan kimia, namun proses produksinya yang kompleks dan mahal menjadi hambatan utama. Poliuretan, sebagaimana diteliti [5], menawarkan fleksibilitas dan kemampuan penyerapan energi yang baik, tetapi menunjukkan degradasi di bawah radiasi tinggi. Epoksi akrilat [6] memiliki sifat adhesi dan ketahanan kimia yang baik, namun juga menunjukkan kelemahan dalam stabilitas radiasi jangka panjang. Komposit stiren divinil benzene [7] memberikan kemampuan penyerapan radionuklida yang baik tetapi memiliki masalah dalam stabilitas struktural di bawah kondisi operasional yang ekstrem. Berdasarkan penelitian sebelumnya dibutuhkan keterbaruan dan pengembangan material polimer yang lebih efektif dalam mengimmobilisasi limbah dan memiliki ketahanan dalam menjaga keselamatan limbah yang tersolidifikasi. Keterbaruan dari penelitian ini yaitu menggunakan material berbasis polimer poliester tak jenuh yang memiliki kekuatan dan kekakuan yang baik, membuatnya cocok untuk digunakan dalam pembuatan komposit yang kuat dan tahan lama, serta memiliki toleransi yang baik terhadap paparan radiasi, terutama dalam bentuk sinar gama atau radiasi partikel.

Penggunaan polimer poliester tak jenuh dalam solidifikasi limbah radioaktif merupakan salah satu solusi penting dalam pengelolaan limbah yang aman dan berkelanjutan. Polimer ini dipilih karena sifat mekanik dan kimianya yang baik, seperti ketahanan terhadap degradasi dan stabilitas jangka panjang. Namun, salah satu tantangan utama adalah pengaruh iradiasi dari limbah

radioaktif terhadap integritas polimer selama penyimpanan jangka panjang. Iradiasi dapat menginduksi perubahan pada struktur molekul polimer, yang dapat berdampak pada sifat mekanik seperti kekuatan, ketangguhan, dan elastisitasnya. Permasalahan ini menjadi kritis karena jika polimer mengalami degradasi yang signifikan, fungsi protektifnya dalam isolasi limbah radioaktif akan terganggu, yang berpotensi menyebabkan risiko lingkungan yang serius [8].

Poliester tak jenuh memiliki kestabilan kimia yang tinggi, sehingga mampu bertahan terhadap berbagai jenis pelarut dan kondisi lingkungan ekstrem. Hal ini sangat penting untuk memastikan bahwa limbah radioaktif yang diimobilisasi tetap terisolasi dan tidak mengalami pelindian ke lingkungan. Selain itu, poliester tak jenuh juga memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, yang memungkinkan matriks ini untuk menahan tekanan dan benturan fisik yang mungkin terjadi selama penyimpanan atau transportasi. Kemampuan ini sangat penting untuk menjaga integritas matriks, terutama dalam kondisi penyimpanan yang mungkin penuh dengan tekanan fisik

Untuk menyelesaikan permasalahan ini, penelitian lebih lanjut diperlukan dengan pendekatan yang komprehensif. Kelebihan dari penelitian ini yaitu melibatkan eksperimen iradiasi pada polimer poliester tak jenuh dengan berbagai dosis yang merepresentasikan kondisi nyata dalam penyimpanan limbah radioaktif. Selanjutnya, sifat mekanik polimer setelah iradiasi akan diuji untuk menilai perubahan yang terjadi. Selain itu, analisis kimia menggunakan teknik seperti Spektrofotometri Raman dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) akan dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan struktur molekul. Data dari eksperimen ini kemudian digunakan untuk mengembangkan model prediksi degradasi material, yang pada akhirnya membantu dalam menilai keamanan dan keefektifan polimer poliester dalam aplikasi solidifikasi limbah radioaktif [9].

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi dan menganalisis pengaruh iradiasi terhadap sifat mekanik dan kimia polimer poliester yang digunakan dalam solidifikasi limbah radioaktif. Hipotesis utama yang diajukan adalah bahwa iradiasi akan menyebabkan perubahan signifikan pada sifat-sifat material ini, seperti penurunan kuat tekan dan perubahan komposisi kimia yang dapat mengurangi efektivitasnya dalam

aplikasi jangka panjang. Untuk menguji hipotesis ini, penelitian dilakukan melalui eksperimen iradiasi pada polimer poliester diikuti dengan analisis mekanik dan kimia menggunakan teknik-teknik canggih seperti Spektrometer raman dan SEM. Data yang diperoleh digunakan untuk mengembangkan model prediktif degradasi material, yang bertujuan untuk mengevaluasi keamanan dan keefektifan polimer poliester dalam aplikasi solidifikasi limbah radioaktif.

METODOLOGI

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada tahun 2024 di Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTBNLR), kelompok riset Limbah Radioaktif, Laboratorium Gedung 71 lantai 3, KST BJ Habibie Serpong.

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan adalah timbangan digital analitik, gelas arloji, cup, stik es krim, botol plastik, paralon 5 cm x 2 cm, sudip, sumpit, benang, gelas beaker 2000 ml, gelas beaker 1000 ml, software origen 2.1, ICP-OES Optima 8300 Perkin Eimer, dan Spektrometer FTIR Bruker-Tensor II. Bahan-bahan yang digunakan adalah CsNO₃, CeNO₃, nochar N960 acid bond, nochar limbah pH 1, nochar limbah pH 3, poliester, sesium (Cs), serium (Ce), HNO₃ 20%, akuades, katalis, batu, dan plastik.

Solidifikasi polimer poliester tak jenuh

Solidifikasi polimer poliester tak jenuh dilakukan dengan mencampurkan polimer poliester tak jenuh dengan bobot tertentu seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Bobot *nochar*-limbah dan Poliester tak jenuh untuk imobilisasi

Waste loading (%)	Berat total (g)	Poliester tak jenuh (g)
0	27.0	27.0
0	27.4	27.4
0	27.1	27.1
0	27.8	27.8
Rerata	27.3	27.3

Katalis ditambahkan ke dalam poliester tak jenuh sebanyak 20 tetes dan diaduk sampai agak kekuningan. Selanjutnya poliester tak jenuh diaduk hingga homogen. Campuran dimasukkan ke dalam cetakan yang telah dilapisi *vaseline* dan dibiarkan hingga mengeras.

Pengaruh Iradiasi Gamma Terhadap Karakteristik Polimer Poliester Tak Jenuh Untuk Aplikasi Solidifikasi Limbah Radioaktif (Risdiyana Setiawan, Purwatiningsih Sugita, Muhammad Farid, Ratiko, Jaka Rachmadetin, Kuat Heriyanto, Yuli Purwanto, Dwi Luhur Ibnu Saputra, Andy Setiawan)

Iradiasi

Sampel imobilisasi diiradiasi oleh sinar gamma ^{60}Co . (*Gamma Irradiation Equipment Co-60*, Institute of Isotopes CO. LTD) dengan variasi dosis 50, 100, 200 dan 300 kGy dengan laju 8.2 kGy/jam setelah sebelumnya dimasukkan ke dalam tabung dan divakum. Selanjutnya uji lindi, kuat tekan, mikrostruktur dan struktur kimia dilakukan terhadap sampel yang telah diiradiasi dan dibandingkan dengan hasil pengujian sampel sebelum diiradiasi.

Uji Kuat tekan

Sampel berbentuk silinder sesuai dengan ASTM D695-15 hasil dari imobilisasi dimasukkan ke dalam alat uji tekan. Beban uji diberikan ke sampel dengan laju beban tetap sebesar 0.15 sampai 0.35 MPa/s hingga sampel hancur. Kuat tekan sampel (MPa) dihitung dengan persamaan (1).

$$R_c = \frac{F_c}{\pi r^2} \quad (1)$$

Dengan R_c adalah kuat tekan (*compressive strength*), F_c adalah gaya tekan maksimum (*compressive force*) dan r adalah radius sampel (mm).

Densitas sebelum dan setelah iradiasi

Metode Archimedes adalah salah satu teknik yang umum digunakan untuk mengukur densitas suatu benda atau material, termasuk imobilisasi limbah dengan polimer. Proses ini melibatkan pengukuran perubahan dalam berat suatu benda saat benda tersebut direndam dalam cairan, yang kemudian digunakan untuk menghitung densitasnya. Dalam konteks imobilisasi limbah dengan polimer menggunakan metode Archimedes, sampel imobilisasi limbah yang telah dibentuk dengan polimer dipersiapkan dan ditimbang dalam keadaan kering untuk mendapatkan berat awalnya. Selanjutnya, sampel tersebut direndam dalam cairan yang memiliki densitas yang telah diketahui, seperti air. Berat sampel yang direndam diukur lagi dalam keadaan terendam dalam cairan tersebut menggunakan persamaan (2) [10].

$$\rho_b = \frac{w_f}{w_f - w_u} \times \rho_f \quad (2)$$

Dengan ρ_b adalah densitas material, ρ_f adalah densitas cairan, w_f adalah berat terendam dan w_u adalah berat kering.

Karakterisasi Menggunakan Spektro Raman

Spektrofotometri Raman (Laser 785 nm range cm^{-1}) adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi molekul dan mempelajari interaksi molekul dengan cahaya melalui hamburan Raman. Untuk mengukur poliester menggunakan metode ini, pertama-tama sampel poliester yang bersih dan tidak terkontaminasi dipersiapkan dalam bentuk padatan. Instrumen kemudian dikalibrasi menggunakan standar bahan yang memiliki puncak Raman yang dikenal untuk memastikan akurasi pengukuran. Selanjutnya, parameter instrumen seperti panjang gelombang laser 785 nm, kekuatan laser *Grating* 600, dan waktu pengumpulan data (10 s) diatur sesuai dengan sensitivitas poliester untuk menghindari kerusakan sampel. Setelah sampel ditempatkan di jalur sinar laser Raman, pengukuran spektrum dilakukan, dan hasil spektrum dianalisis dengan memperhatikan puncak-puncak karakteristik yang terkait dengan gugus fungsi dalam poliester. Spektrum ini kemudian dibandingkan dengan referensi untuk mengidentifikasi komposisi dan struktur poliester. Semua parameter dan hasil pengukuran didokumentasikan, dan laporan disusun untuk menyampaikan interpretasi serta kesimpulan tentang poliester yang diukur [11].

Karakterisasi Menggunakan SEM

Scanning Electron Microscopy (JEOL JSM-6510LA, voltage 20 kV, energy range 0-20 KeV) dikombinasikan dengan EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) adalah teknik yang kuat untuk karakterisasi sampel secara morfologi dan kimia. Informasi tentang komposisi kimia sampel didapatkan melalui analisa EDS dengan mendeteksi sinar-X yang dihasilkan saat sampel terkena sinar elektron SEM. Langkah-langkah dalam penggunaan SEM dan EDS untuk karakterisasi sampel imobilisasi limbah melibatkan persiapan sampel, seperti pemotongan dan pengeringan, diikuti oleh pelapisan penghantar. Selanjutnya citra SEM diambil untuk mengamati struktur morfologi permukaan sampel. Selanjutnya, sistem EDS diaktifkan untuk mendapatkan spektrum X-ray yang merepresentasikan komposisi kimia sampel [12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Polimer telah banyak digunakan dalam proses imobilisasi limbah radioaktif karena beberapa keunggulannya, seperti kestabilan kimia, kekuatan mekanik, dan kemampuan imobilisasi yang baik. Dalam konteks pengelolaan limbah radioaktif, kestabilan dan integritas matriks imobilisasi menjadi faktor kunci untuk memastikan keamanan jangka panjang dari penyimpanan limbah tersebut [13]. Salah satu keunggulan utama dari poliester tak jenuh adalah kemampuannya untuk mengikat berbagai jenis limbah radioaktif, baik dalam bentuk cair maupun padat. Polimer ini dapat membentuk matriks yang solid dan homogen, yang secara efektif mencegah kebocoran radionuklida [14].

Dalam proses pengelolaan limbah radioaktif, penggunaan polimer poliester sebagai material solidifikasi memiliki beberapa batasan teknis yang penting untuk diperhatikan. Kekuatan mekanik, dan ketahanan terhadap radiasi merupakan beberapa karakteristik utama yang harus dipenuhi agar material ini dapat diandalkan dalam jangka panjang. Berdasarkan berbagai studi, kekuatan tekan polimer poliester yang digunakan dalam solidifikasi limbah radioaktif umumnya berkisar antara 20 hingga 50 MPa, bergantung pada komposisi material dan kondisi operasionalnya. Selain itu, material ini harus memiliki ketahanan yang cukup terhadap radiasi gamma dan neutron untuk menghindari degradasi struktural, yang dapat mengakibatkan pelepasan kontaminan berbahaya [15].

Proses pembuatan matriks imobilisasi menggunakan poliester tak jenuh juga relatif sederhana, dengan bahan baku yang tersedia secara luas dan dengan harga yang terjangkau, sehingga dapat mengurangi biaya keseluruhan proses imobilisasi. Berdasarkan teori Iradiasi dapat meningkatkan kestabilan kimia dan kekuatan mekanik dari matriks imobilisasi melalui pembentukan ikatan silang (*cross-linking*) antar rantai polimer [16]. Selain itu, iradiasi juga dapat menyebabkan penyusutan volume matriks, yang mengurangi volume total limbah yang perlu disimpan. Proses ini juga dapat membunuh mikroorganisme yang mungkin ada dalam limbah, mencegah biodegradasi matriks, dan meminimalkan risiko kontaminasi lingkungan.

Berdasarkan Spektrum Raman pada Gambar 1. terdapat perbandingan antara poliester dan poliester yang telah diiradiasi.

Spektrum ini digunakan untuk menganalisis struktur kimia poliester dengan melihat bagaimana molekulnya menghamburkan cahaya yang dipancarkan oleh laser. Pada spektrum Polyester terlihat puncak-puncak utama di sekitar 1.000 cm^{-1} , $1.200\text{-}1.300\text{ cm}^{-1}$, 1.700 cm^{-1} , dan $2.900\text{-}3.000\text{ cm}^{-1}$, yang masing-masing terkait dengan getaran C-C atau C-O-C, getaran simetris C-O, getaran ulur C=O dari gugus ester, dan getaran ulur C-H dari gugus alkil.

Dalam spektrum Raman poliester yang telah diiradiasi, perubahan struktur kimia yang teramati memengaruhi beberapa gugus fungsi utama dalam molekul poliester. Perubahan intensitas dan pergeseran puncak menunjukkan bahwa gugus karbonil (C=O) yang biasanya terletak di sekitar 1.700 cm^{-1} , mengalami modifikasi. Gugus ini adalah komponen penting dalam rantai ester, dan perubahan yang terjadi bisa menunjukkan pemutusan atau pembentukan ulang ikatan C=O. Selain itu, gugus ester (C-O-C) yang berkontribusi pada puncak di sekitar 1.000 cm^{-1} dan $1.200\text{-}1.300\text{ cm}^{-1}$ mengalami pemutusan atau perubahan struktur akibat iradiasi, menghasilkan produk degradasi atau formasi gugus baru. Gugus alkil (C-H) yang terletak di sekitar $2.900\text{-}3.000\text{ cm}^{-1}$, yang terkait dengan rantai alkil, terpengaruh oleh proses iradiasi, yang menyebabkan perubahan intensitas atau pergeseran puncak dalam spektrum [17].

Perubahan ini disebabkan oleh modifikasi struktur kimia akibat proses iradiasi, seperti pemutusan rantai polimer, pembentukan ikatan baru, atau pembentukan radikal bebas yang dapat menyebabkan reaksi lanjutan seperti oksidasi atau cross-linking. Iradiasi juga dapat mengakibatkan perubahan intensitas puncak atau bahkan pergeseran posisi puncak, yang mengindikasikan adanya perubahan dalam struktur molekul atau lingkungan kimia di sekitar ikatan tertentu. Secara keseluruhan, proses iradiasi pada poliester mempengaruhi struktur kimianya secara signifikan, yang tercermin dalam perubahan pada spektrum Raman, dan ini penting untuk dipahami dalam konteks aplikasi material di mana sifat fisik dan kimia poliester bisa berubah setelah iradiasi [18].

Hasil analisis SEM pada Gambar 2 menunjukkan bahwa poliester tak jenuh mengalami perubahan struktur morfologi

Pengaruh Iradiasi Gamma Terhadap Karakteristik

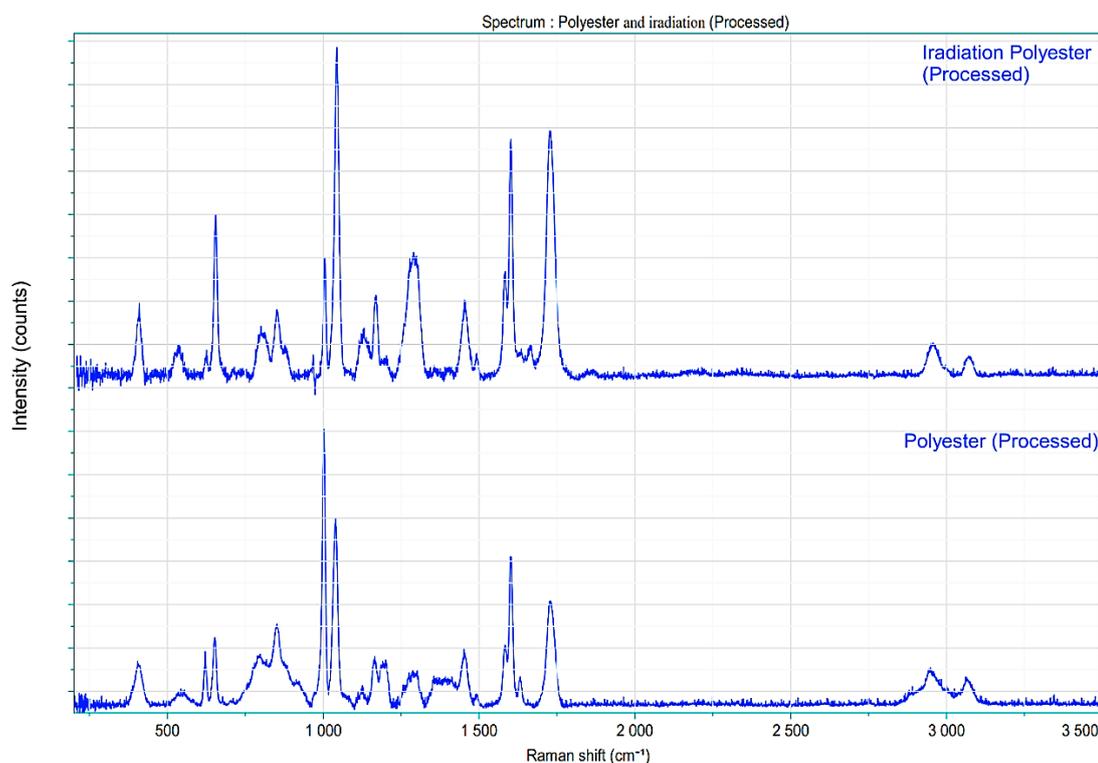
Polimer Poliester Tak Jenuh Untuk Aplikasi Solidifikasi Limbah Radioaktif

(Risdiyana Setiawan, Purwantingsih Sugita, Muhammad Farid, Ratiko, Jaka Rachmadetin, Kuat Heriyanto, Yuli Purwanto, Dwi Luhur Ibnu Saputra, Andry Setiawan)

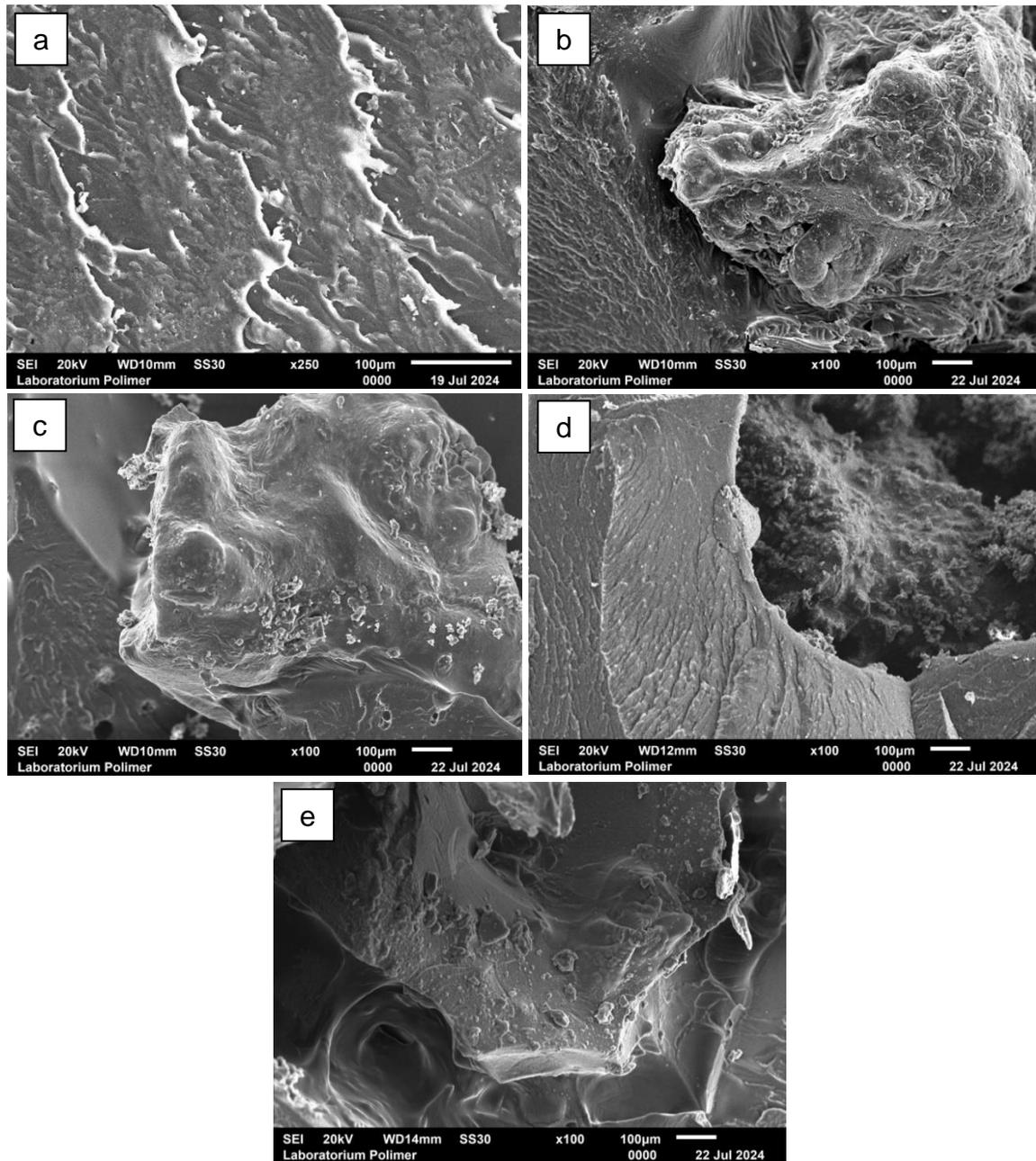
setelah iradiasi. Sebelum iradiasi, poliester tak jenuh cenderung memiliki struktur yang lebih longgar dan kurang padat. Hal ini disebabkan karena rantai polimer dalam poliester tak jenuh belum mengalami proses cross-linking yang signifikan, sehingga jaringan polimer masih memiliki ruang antar rantai yang relatif lebih besar. Setelah iradiasi, terutama pada dosis 50, 100, dan 200 kGy, terjadi peningkatan kerapatan dalam struktur poliester. Iradiasi menyebabkan terbentuknya ikatan silang (cross-linking) antar rantai polimer, yang memperkuat dan memperpadat jaringan polimer. Oleh karena itu, poliester tak jenuh setelah iradiasi pada dosis tersebut menjadi lebih rapat dibandingkan sebelum iradiasi.

Namun, pada dosis iradiasi yang lebih tinggi, seperti 300 kGy, terjadi degradasi struktur akibat pemutusan rantai polimer yang mulai mendominasi. Ini menyebabkan penurunan kerapatan dan membuat struktur menjadi lebih longgar dibandingkan dengan kondisi setelah iradiasi pada dosis yang lebih rendah. Secara keseluruhan, poliester tak jenuh sebelum iradiasi memiliki struktur yang kurang rapat dibandingkan dengan struktur setelah iradiasi pada dosis 50 hingga 200 kGy,

tetapi pada 300 kGy kerapatan mulai menurun kembali akibat degradasi material [19]. Berdasarkan data yang diperoleh dari sampel poliester tak jenuh sebelum dan setelah proses iradiasi, terlihat pada Gambar 3. adanya hubungan yang kuat antara kuat tekan dan densitas. Secara umum, ada korelasi positif di mana peningkatan densitas material diiringi oleh peningkatan kuat tekan. Sebagai contoh, sebelum iradiasi, poliester tak jenuh memiliki kuat tekan sebesar 20,87 N/mm² dan densitas 1,13 g/cm³, nilai terendah di antara sampel. Setelah diiradiasi dengan dosis 50 kGy, kuat tekan meningkat tajam menjadi 69,41 N/mm², dengan densitas juga meningkat menjadi 1,28 g/cm³. Semakin tinggi dosis iradiasi hingga 200 kGy, nilai kuat tekan dan densitas terus meningkat, mencapai puncak pada dosis 200 kGy dengan kuat tekan sebesar 75,64 N/mm² dan densitas 1,36 g/cm³. Namun, pada dosis iradiasi 300 kGy, kuat tekan menurun sedikit menjadi 70,16 N/mm² sementara densitas juga menurun menjadi 1,29 g/cm³, menunjukkan bahwa dosis iradiasi yang sangat tinggi mulai menyebabkan kerusakan struktural pada material.



. Gambar 1. Spektrum Raman Poliester tak jenuh sebelum dan sesudah iradiasi



Gambar 2. Mikrostruktur dan morfologi poliester tak jenuh sebelum iradiasi (a); dan sesudah iradiasi pada dosis 50 (b);100 (c); 200 (d) serta 300 kGy (e).

Berdasarkan data yang diperoleh dari sampel poliester tak jenuh sebelum dan setelah proses iradiasi, terlihat pada Gambar 3. adanya hubungan yang kuat antara kuat tekan dan densitas. Secara umum, ada korelasi positif di mana peningkatan densitas material diiringi oleh peningkatan kuat tekan. Sebagai contoh, sebelum iradiasi, poliester tak jenuh memiliki kuat tekan sebesar

20,87 N/mm² dan densitas 1,13 g/cm³, nilai terendah di antara sampel. Setelah diiradiasi dengan dosis 50 KGy, kuat tekan meningkat tajam menjadi 69,41 N/mm², dengan densitas juga meningkat menjadi 1,28 g/cm³. Semakin tinggi dosis iradiasi hingga 200 kGy, nilai kuat tekan dan densitas terus meningkat, mencapai puncak pada dosis 200 kGy dengan kuat tekan sebesar 75,64 N/mm² dan densitas

Pengaruh Iradiasi Gamma Terhadap Karakteristik

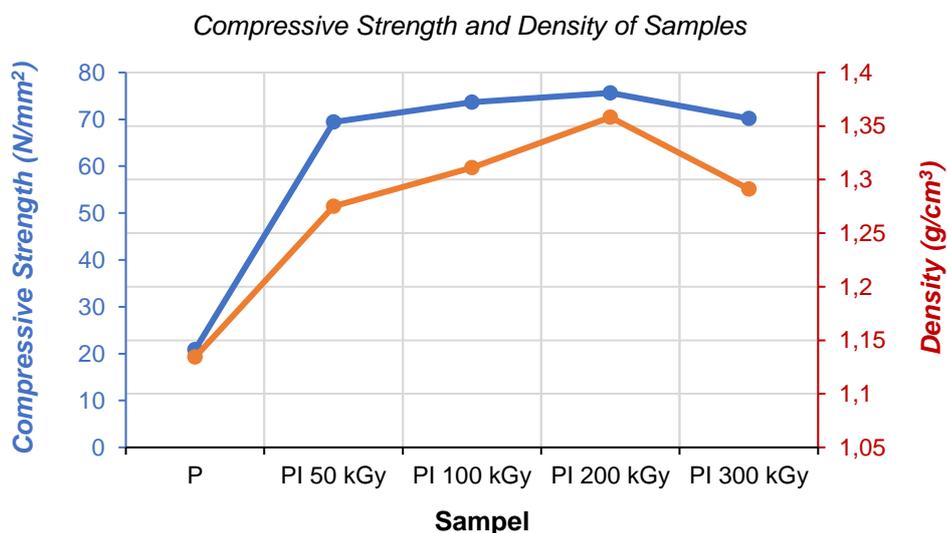
Polimer Poliester Tak Jenuh Untuk Aplikasi Solidifikasi Limbah Radioaktif

(Risdiyana Setiawan, Purwantiningsih Sugita, Muhammad Farid, Ratiko, Jaka Rachmadetin,

Kuat Heriyanto, Yuli Purwanto, Dwi Luhur Ibnu Saputra, Andry Setiawan)

1,36 g/cm³. Namun, pada dosis iradiasi 300 kGy, kuat tekan menurun sedikit menjadi 70,16 N/mm² sementara densitas juga menurun menjadi 1,29 g/cm³, menunjukkan

bahwa dosis iradiasi yang sangat tinggi mulai menyebabkan kerusakan struktural pada material.



Gambar 3. Korelasi uji kuat tekan dan densitas poliester tak jenuh sebelum iradiasi dan sesudah iradiasi pada dosis 50,100, 200 serta 300 kGy.

Hubungan ini dapat dijelaskan oleh efek iradiasi terhadap struktur internal material. Iradiasi menyebabkan pembentukan ikatan silang (cross-linking) dalam matriks polimer, yang mengarah pada material yang lebih padat dan kuat. Peningkatan densitas menunjukkan bahwa molekul-molekul dalam poliester saling terikat lebih erat, mengurangi ruang kosong dalam struktur material, sehingga meningkatkan kekuatan tekan. Namun, pada dosis iradiasi yang sangat tinggi, seperti 300 kGy, radiasi dapat menyebabkan pemutusan ikatan molekul atau degradasi rantai polimer, sehingga mengurangi kekuatan tekan meskipun densitasnya tetap tinggi [20]. Berdasarkan literature poliester tak jenuh dapat menahan dosis radiasi sekitar 10 hingga 100 kGy sebelum mengalami degradasi signifikan. Pada batas dosis tersebut, terjadi perubahan sifat mekanis seperti retakan dan penurunan ketahanan kimia, yang berpotensi mempengaruhi kemampuan immobilisasi limbah radioaktif. Seiring bertambahnya waktu penyimpanan, terutama dalam jangka panjang [21].

Paparan radiasi akumulasi pada sampel polimer poliester tak jenuh dapat dikendalikan atau dikurangi, hal ini berpotensi memperpanjang masa penyimpanan limbah

radioaktif secara signifikan. Radiasi adalah salah satu faktor utama yang menyebabkan degradasi material immobilisasi, dengan mengurangi akumulasi paparan radiasi, baik melalui teknik shielding (perlindungan tambahan dari radiasi), atau pemilihan desain fasilitas penyimpanan yang lebih baik material akan lebih tahan terhadap degradasi, sehingga dapat memperpanjang masa penyimpanan limbah tanpa risiko kerusakan material. Ini akan menjaga kemampuan material untuk mengisolasi limbah dan mencegah pelepasan kontaminan berbahaya dalam jangka waktu yang lebih lama [22].

Dalam uji kuat tekan, beberapa faktor penting harus diperhatikan untuk mendapatkan hasil yang akurat. Pertama, kondisi sampel sangat penting, termasuk kekompakan dan keseragaman material. Setiap ketidaksempurnaan dalam sampel, seperti adanya rongga udara atau cacat mikro, dapat mempengaruhi hasil uji. Kedua, prosedur pengujian juga penting; pengaturan mesin uji, kecepatan penerapan beban, dan kalibrasi peralatan harus sesuai standar agar hasil yang didapatkan dapat diandalkan. Ketiga, kondisi lingkungan, seperti suhu dan kelembapan, dapat mempengaruhi hasil uji karena sifat polimer bisa berubah dengan perubahan lingkungan ini. Terakhir, interaksi

kimia dalam material juga perlu diperhatikan. Iradiasi mempengaruhi ikatan kimia dalam poliester, yang berujung pada perubahan sifat mekanik seperti kuat tekan dan densitas, terutama melalui pembentukan ikatan silang atau pemutusan rantai molekul pada dosis iradiasi yang lebih tinggi [23].

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa iradiasi dengan sinar gamma menghasilkan perubahan signifikan pada sifat mekanik dan kimia dari polimer tersebut. Pada dosis iradiasi rendah hingga sedang (50-200 kGy), terjadi peningkatan kuat tekan dan densitas akibat terbentuknya ikatan silang antar rantai polimer yang memperkuat struktur material. Namun, pada dosis iradiasi yang lebih tinggi (300 kGy), efek degradasi mulai mendominasi dan menyebabkan penurunan kekuatan material. Karakterisasi sampel menggunakan Spektrofotometri Raman dan SEM juga menunjukkan perubahan struktur kimia dan morfologi pada sampel yang disebabkan oleh iradiasi, termasuk pergeseran puncak pada spektrum Raman yang menunjukkan modifikasi gugus fungsi penting dalam poliester. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa iradiasi dapat memperkuat polimer pada dosis tertentu, namun batasan dosis harus diperhatikan untuk mencegah degradasi material.

Penelitian lanjutan pasca dilakukan karakterisasi akibat pengaruh iradiasi adalah membuat komposit dengan super absorben yang tahan akan bahan kimia yaitu Nochar berbasis poliacrilamid untuk mengetahui kekuatan mekanik dan kimia pra dan pasca iradiasi. Dalam rangka mendukung keberlanjutan penelitian tersebut, kolaborasi riset sebaiknya dilakukan secara lebih intensif dengan Politeknik Teknologi Nuklir untuk mempermudah akses penelitian menggunakan iradiator.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada Ir. Aisyah, M.T yang telah membimbing penulis dalam proses penelitian ini. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Pusat Riset Polimer dan Organisasi Riset Tenaga Nuklir BRIN yang telah memfasilitasi proses karakterisasi serta analisis untuk pengujian mekanik (kuat tekan), analisis unsur dan morfologi permukaan menggunakan SEM-EDS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aisyah *et al.*, "Radioactive Fission Waste of the Conversion of High-Enriched Uranium to Low-Enriched Uranium Target on 99Mo Production," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1201/1/012003.
- [2] Y. D. Jati and H. Martono, "H-Zeolit Serta Solidifikasi Dengan Polimer Epoksi," *J. Tek. Lingkungan*, vol. 2, no. 2, pp. 1–8, 2013.
- [3] K. Chen *et al.*, "Influence of gamma irradiation on the molecular dynamics and mechanical properties of epoxy resin," *Polym. Degrad. Stab.*, 2019, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.108940.
- [4] M. A. Gavrilov, D. A. Gubanov, A. A. Martynov, and A. V. Filatov, "Development of an Analytical and Graphic Method for Determining the Compositions of Epoxy Compounds with Increased Chemical and Biological Resistance," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1079/6/062015.
- [5] E. Mossini *et al.*, "Pre-impregnation approach to encapsulate radioactive liquid organic waste in geopolymer," *J. Nucl. Mater.*, vol. 585, no. March, p. 154608, 2023, doi: 10.1016/j.jnucmat.2023.154608.
- [6] L. Jiao *et al.*, "Effect of gamma and neutron irradiation on properties of boron nitride/epoxy resin composites," *Polym. Degrad. Stab.*, 2021, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109643.
- [7] A. T. Naikwadi, B. K. Sharma, K. D. Bhatt, and P. A. Mahanwar, "Gamma Radiation Processed Polymeric Materials for High Performance Applications: A Review," *Frontiers in Chemistry*, 2022. doi: 10.3389/fchem.2022.837111.
- [8] Y. Hizhar and N. Nusyirwan, "Metode Peningkatan Ketahanan Retak Resin Polyester Terhadap Penambahan Serat Sekam Padi," *J. Tek. Mesin*, 2023, doi: 10.30630/jtm.16.1.1097.
- [9] Nurhayati; Dwi Luhur Ibnu Saputra; Wati;, "Pengolahan Limbah Uranium Cair Dengan Resin Anion Amberlite IRA-400 Cl Dan Imobilisasi Resin

Pengaruh Iradiasi Gamma Terhadap Karakteristik

Polimer Poliester Tak Jenuh Untuk Aplikasi Solidifikasi Limbah Radioaktif

(Risdiyana Setiawan, Purwantiningsih Sugita, Muhammad Farid, Ratiko, Jaka Rachmadetin, Kuat Heriyanto, Yuli Purwanto, Dwi Luhur Ibnu Saputra, Andry Setiawan)

- Jenuh Menggunakan Polimer,” *Prosiding Semin. Nas. Teknol. Pengelolaan Limbah XIV*, pp. 118–123, 2016, [Online]. Available: <http://repo-nkm.batan.go.id/id/eprint/493>
- [10] B. Indrawijaya, “Pemanfaatan Limbah Plastik LDPE Sebagai Pengganti Agregat Untuk Pembuatan Paving Blok Beton,” *J. Ilm. Tek. Kim.*, 2019, doi: 10.32493/jitk.v3i1.2594.
- [11] D. Chacón, J. Vedelago, M. C. Strumia, M. Valente, and F. Mattea, “Raman spectroscopy as a tool to evaluate oxygen effects on the response of polymer gel dosimetry,” *Appl. Radiat. Isot.*, 2019, doi: 10.1016/j.apradiso.2019.05.006.
- [12] M. Azad and A. Avin, “Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review,” in *Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX*, 2019.
- [13] S. V. S. Rao, K. B. Lal, S. V. Narasimhan, and J. Ahmed, “Copper ferrocyanide - polyurethane foam as a composite ion exchanger for removal of radioactive cesium,” *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 240, no. 1, pp. 269–276, 1999, doi: 10.1007/BF02349164.
- [14] C. V. More, Z. Alsayed, M. S. Badawi, A. A. Thabet, and P. P. Pawar, “Polymeric composite materials for radiation shielding: a review,” *Environmental Chemistry Letters*. 2021. doi: 10.1007/s10311-021-01189-9.
- [15] A. Bedar *et al.*, “Nanodiamonds as a state-of-the-art material for enhancing the gamma radiation resistance properties of polymeric membranes,” *Nanoscale Adv.*, 2020, doi: 10.1039/c9na00372j.
- [16] A. Charlesby, V. Wycherley, and T. T. Greenwood, “Radiation Reactions of Unsaturated Polyesters,” *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 244, no. 1236, pp. 54–71, 1958, doi: 10.1098/rspa.1958.0025.
- [17] P. G. Ghule, G. T. Bholane, R. P. Joshi, S. S. Dahiwalé, P. N. Shelke, and S. D. Dhole, “Gamma radiation shielding properties of unsaturated polyester /Bi₂O₃ composites: An experimental, theoretical and simulation approach,” *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 216, no. December 2023, p. 111452, 2024, doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.111452.
- [18] T. Jurkin and I. Pucić, “Post-irradiation crosslinking of partially cured unsaturated polyester resin,” *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 75, no. 9, pp. 1060–1068, 2006, doi: 10.1016/j.radphyschem.2006.04.001.
- [19] S. Yazdani-Darki, M. Eslami-Kalantari, S. Feizi, and H. Zare, “Study of the structural and shielding properties of unsaturated polyester/lead oxide nanocomposites against gamma-rays,” *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 209, no. April, p. 110966, 2023, doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.110966.
- [20] S. M. Razavi, S. J. Ahmadi, P. Rahmani Cherati, M. Hadi, and S. A. R. Ahmadi, “Effect of electron beam irradiation on mechanical properties of unsaturated polyester/nanoclay composites reinforced with carbon and glass fibers,” *Mech. Mater.*, vol. 141, no. November 2019, p. 103265, 2020, doi: 10.1016/j.mechmat.2019.103265.
- [21] L. Dong, W. Tao, L. I. U. Wei, and Y. Zhongtian, “The Influence of γ -Rays Irradiation and Thermal Sequence Aging on the Mineral Composition of GMZ Sodium Bentonite,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1676/1/012061.
- [22] M. S. S. Ahamad and S. Z. Ahmad, “Comprehensive Spatial Criteria and Parameters for Sustainable Landfill Site Selection,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. doi: 10.1088/1755-1315/540/1/012071.
- [23] A. B. Inceoglu and U. Yilmazer, “Synthesis and Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Based Nanocomposites,” *Polym. Eng. Sci.*, 2003, doi: 10.1002/pen.10054.

Pengaruh Iradiasi Gamma Terhadap Karakteristik
Polimer Poliester Tak Jenuh Untuk Aplikasi Solidifikasi Limbah Radioaktif
(Risdiyana Setiawan, Purwantiningsih Sugita, Muhammad Farid, Ratiko, Jaka Rachmadetin,
Kuat Heriyanto, Yuli Purwanto, Dwi Luhur Ibnu Saputra, Andry Setiawan)

HALAMAN INI DIBIARKAN KOSONG