



## Tinjauan Literatur Pemanfaatan Nuklir dalam Pengurangan Sampah Plastik

Hermawan Puji Yuwana<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dit. Pengaturan Pengawasan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif, BAPETEN

[hermawanpujiyuwana@gmail.com](mailto:hermawanpujiyuwana@gmail.com)

### Makalah Tinjauan

### ABSTRAK

Limbah padat domestik menjadi sektor prioritas dalam penurunan emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia. Sampah plastik merupakan satu jenis limbah padat domestik yang berkontribusi hingga 23,57% dari timbunan sampah di Indonesia pada tahun 2022 ini. Penulisan makalah ini bertujuan sebagai review secara umum terhadap pemanfaatan tenaga nuklir dan aspek terkait dengan pengelolaan sampah plastik dalam mendukung penurunan emisi GRK. Metode penulisan yang digunakan adalah studi literatur dari aspek peraturan, rekomendasi/panduan internasional, dan penelitian terkait. Pengelolaan sampah plastik secara konvensional melalui prinsip 3R melalui pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang. Pemanfaatan nuklir dapat berkontribusi dalam proses pengelolaan sampah plastik yaitu salah satunya dengan teknik iradiasi. Interaksi radiasi dengan plastik yang diharapkan terjadi adalah depolimerisasi dan ikatan silang sehingga terbentuk molekul yang lebih besar. Pemanfaatan teknologi iradiasi dalam pengurangan sampah plastik secara langsung dengan cara depolimerisasi sampah plastik. Sedangkan proses tak langsung, plastik digunakan sebagai bahan substitusi dari material lain seperti pembuatan beton serat (Fiber Reinforced Concrete/FRC) kemudian diiradiasi dengan dosis tertentu. Peningkatan dosis radiasi akan meningkatkan jumlah pemotongan rantai/ degradasi dan meningkatkan derajat kristalinitas, tetapi berbanding terbalik dengan berat molekul yang didapatkan akan semakin menurun. Teknologi iradiasi terbukti dapat meningkatkan kekuatan mekanik, tekan, dan modulus elastisitas dalam beton serat. Aspek peraturan dan perizinan yang ada saat ini telah melingkupi pemanfaatan teknologi iradiasi (iradiator). Hanya saja tantangan dalam implementasi teknologi iradiasi dalam pengolahan sampah plastik diantaranya kebutuhan energi dalam pengoperasian teknologi iradiasi (iradiator) dan efisiensi pengurangan.

**Kata Kunci:** nuklir, sampah, plastik, iradiasi, dosis radiasi

### Menyerahkan

2 Juni 2022

### Diterima

18 Juli 2022

### Terbit

29 Juli 2022

### ABSTRACT

*Solid domestic waste is a priority sector in reducing greenhouse gas emissions (GHG) in Indonesia. Plastic waste is a type of solid domestic waste that will contribute up to 23.57% of waste generation in Indonesia in 2022. The aim of this paper was a general review of the use of nuclear technology and aspects related to plastic waste management in supporting the reduction of GHG emissions. The research method is a literature study from regulatory aspects, international recommendations/guidelines, and several related studies. Conventional plastic waste management through 3R principles through reducing, reusing, and recycling. Nuclear utilization can contribute to plastic waste management, one of which is irradiation techniques. The expected interaction of radiation with plastic is depolymerization and cross-linking. Utilization of irradiation technology in reducing plastic waste directly by depolymerizing plastic waste. In the indirect process, plastic is used as a substituent for other materials, such as the manufacture of Fiber Reinforced Concrete (FRC), and then irradiated with a specific dose. Increasing the radiation dose will increase the number of chain cleavage/degradation and increase the degree of crystallinity, but inversely proportional to the molecular weight obtained will decrease. Irradiation technology is proven to increase the mechanical strength, compressive strength, and modulus of elasticity in FRC. The current regulatory and licensing aspects cover irradiation technology (irradiators). It's just that the challenges in implementing irradiation technology in processing plastic waste include energy requirements in the operation of irradiation technology (irradiators) and a reduction in efficiency.*

**Keywords:** nuclear, waste, plastic, irradiation, radiation dose

## PENDAHULUAN

Tenaga nuklir dapat dimanfaatkan dalam berbagai aspek kehidupan. Persepsi publik secara umum sering mengaitkan nuklir dengan bom atau pembangkit listrik tenaga nuklir. Padahal nuklir tidak hanya terbatas pada 2 istilah itu saja. Mengacu pada peraturan perundangan, pemanfaatan nuklir dapat digunakan dalam aspek yang luas meliputi mulai dari penelitian, produksi, pengangkutan, penggunaan, ekspor, impor, hingga pengolahan limbah radioaktif [1].

Dalam kurun waktu beberapa tahun terakhir, teknologi nuklir sering dikaitkan dan dibicarakan dalam upaya pengurangan pemanasan global. Pemanasan global disebabkan oleh efek gas rumah kaca (GRK). GRK dalam atmosfer dapat berasal dari secara alami dan aktivitas tangan manusia (antropogenik) [2]. Data menunjukkan bahwa emisi GRK dari aktivitas manusia (antropogenik) mengalami peningkatan konsentrasi secara terus menerus di atmosfer [3]. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* memprediksikan terjadinya kenaikan temperatur permukaan bumi sebesar 1,5 – 5,8°C [4].

Pemerintah Indonesia berkomitmen menurunkan emisi GRK sebesar 29% atau setara dengan 834 juta ton CO<sub>2</sub>eq pada Tahun 2030 dari kondisi *Business as Usual (BaU)*. Mengacu pada Perpres 61 No. 2011 terdapat beberapa sektor yang menjadi prioritas dalam penurunan emisi GRK di Indonesia yaitu sektor pertanian, kehutanan, proses industri (IPPU), pengelolaan limbah, dan pemanfaatan sumber energi (transportasi, domestik dan industri) [5]. Pengelolaan sampah padat domestik merupakan bagian dari sektor pengelolaan limbah. Sampah domestik berdasarkan komponennya dapat dibedakan menjadi sisa-sisa makanan, kertas-karton, kayu, kain-tekstil, karet-kulit, plastik, logam besi-non besi, kaca dan lain-lain [6].

Sampah plastik merupakan salah satu sampah yang memiliki komposisi paling banyak setelah sampah organik. Pengolahan sampah plastik bisa dilakukan dengan berbagai cara dengan mengedepankan prinsip 3R (*Reuse, Reduce, Recycle*). Jika kita menengok beberapa pemberitaan terakhir, isu sampah plastik cukup menyita perhatian publik di Indonesia khususnya. Banyak pemberitaan yang menyampaikan Indonesia mengalami “darurat” sampah plastik. Sampah plastik menjadi tidak terkelola dengan baik dan bahkan mencemari lautan.

Persepsi global menganggap tenaga nuklir hanya akan berperan dalam sektor energi yang ramah lingkungan dan minim terhadap emisi karbon jika digunakan sebagai sumber energi. Hanya saja perlu dibahas lebih lanjut, seberapa besar peluang tenaga nuklir berperan dalam penurunan emisi GRK dari sektor pengelolaan limbah. Saat ini teknologi iradiasi sering dikaitkan dengan proses untuk pengawetan makanan, sterilisasi produk, dan polimerisasi. Teknologi iradiasi merupakan peralatan yang dapat dimanfaatkan dengan berbagai tujuan dan tidak terbatas pada tujuan

penggunaan yang telah ada. Teknologi iradiasi memiliki potensi digunakan sebagai modifikasi, pengurai, atau depolimerisasi dari suatu material. Makalah ini bertujuan revidu secara umum terhadap pemanfaatan tenaga nuklir dan aspek terkait dengan pengelolaan sampah plastik. Metodologi penelitian dilakukan dengan studi literatur terhadap aspek peraturan, rekomendasi/panduan internasional, dan penelitian terkait.

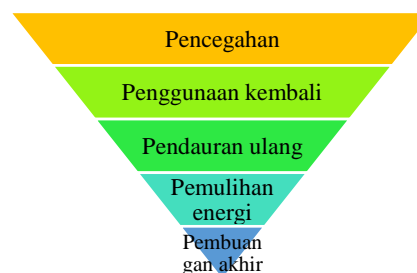
## LANDASAN TEORI

### *Pengelolaan Sampah dan Gas Rumah Kaca*

Sampah telah menjadi permasalahan global sehingga diperlukan pengelolaan secara komprehensif dan terpadu dari hulu ke hilir. Menurut Christensen et al. (2011) sampah adalah sisa, produk atau bahan yang berlebihan yang tidak memiliki nilai bagi pemiliknya dan yang ingin dibuang oleh pemilik [7]. Tchobanaglou et al. (1993) mendefinisikan sampah padat sebagai semua barang sisa yang ditimbulkan dari aktivitas manusia yang dibuang ketika dianggap tidak berguna atau tidak dikehendaki atau tidak diinginkan [8]. Mengacu pada UU No. 18 Tahun 2008, sampah merupakan sisa kegiatan sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat [9].

Berdasarkan pada UU No. 18 tahun 2008 perlunya melakukan perubahan dalam manajemen pengelolaan sampah yang ada. Pengelolaan sampah sebagai suatu kegiatan yang sistematis, menyeluruh, dan berkesinambungan yang meliputi pengurangan dan penanganan sampah [9]. Dalam melakukan pengelolaan sampah terdapat 5 aspek prinsip pengelolaan sampah sebagaimana tertuang dalam SNI 3242-2008 yaitu aspek teknis operasional, pembiayaan, hukum dan peraturan, peran serta masyarakat dan aspek organisasi [10].

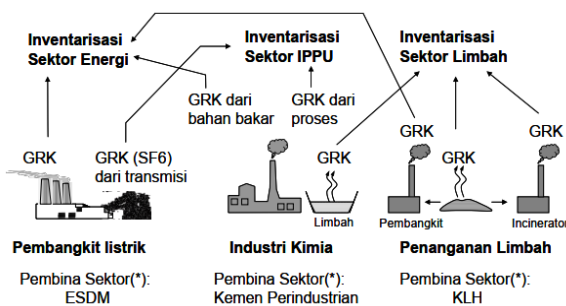
Dalam perkembangannya terjadi perubahan paradigma dalam pengelolaan sampah dari paradigma lama (piramida normal) menjadi paradigma baru (piramida terbalik). Perubahan paradigma ini secara umum bertujuan untuk mencegah dan mengurangi dampak negatif yang disebabkan oleh pengelolaan sampah dan untuk meningkatkan efisiensi sumber daya. Pada gambar 1 berikut merupakan gambaran dari hirarki piramida terbalik dari pengelolaan sampah yang diambil dari *European Commission*.



Gambar 1. Konsep Pengelolaan Sampah berdasarkan *Directive 2008/98/EC* dan Perubahannya – *European Commission* [11], [12]

Perubahan paradigma pola pengelolaan sampah yaitu “kumpul, angkut, dan buang” yang bertumpu pada pembuangan akhir, bergeser kepada pengelolaan sampah yang bertumpu pada pengurangan sampah atau yang biasa dikenal dengan prinsip 3R. Prinsip 3R (*reduce, reuse, dan recycle*), yaitu pengurangan jumlah sampah dari sumbernya; pemanfaatan kembali material sampah; serta pemanfaatan material sampah menjadi produk baru yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan. Pencegahan dan penggunaan kembali sampah merupakan opsi/ pilihan yang paling disarankan, diikuti dengan daur ulang (termasuk pengomposan), kemudian pemulihan energi, sementara pembuangan sampah melalui tempat pembuangan sampah harus menjadi pilihan terakhir. Pemulihan energi dari sampah padat perkotaan (*MSW/ Municipal Solid Waste*) tidak boleh bersaing dengan tindakan pengurangan limbah, penggunaan kembali, dan daur ulang material [13] [14]. Terlihat pada gambar 1, bahwa tujuan yang ingin dicapai juga adalah jumlah timbulan sampah yang buang ke tempat pembuangan akhir akan semakin berkurang.

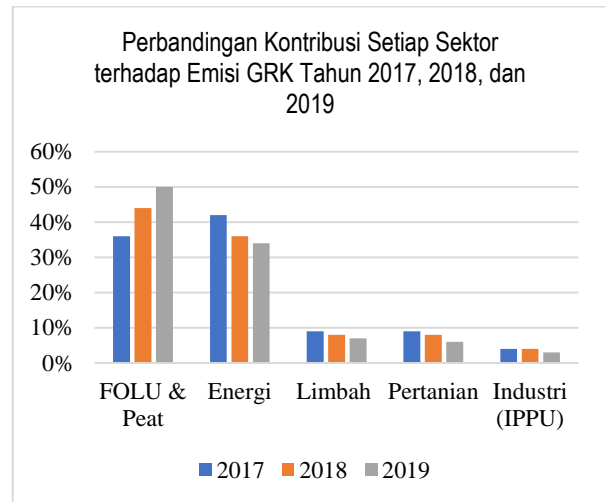
Sektor pengelolaan limbah juga turut memberikan dampak langsung dan tak langsung kepada peningkatan emisi GRK. GRK sendiri secara garis besar terdiri dari 6 jenis gas yaitu karbon dioksida ( $CO_2$ ), dinitrogen oksida ( $N_2O$ ), metana ( $CH_4$ ), sulfurheksafluorida ( $SF_6$ ), perfluorokarbon (PFCs), dan hidrofluorokarbon (HFCs). Jika ditilik balik awal mula kebijakan pengurangan emisi GRK ditandai dengan Protokol Kyoto. Kemudian pada level nasional terbit Undang-Undang dan Peraturan Presiden yang bertujuan mengimplementasikan penurunan emisi GRK. Mengacu Perpres 61 No. 2011 prioritas penurunan emisi GRK di Indonesia dibagi menjadi sektor pertanian, kehutanan, proses industri, pengelolaan limbah, dan pemanfaatan sumber energi (transportasi, domestik dan industri) [5].



Gambar 2. Ilustrasi Pengelompokan Sektor Inventarisasi GRK [15]

Pada Gambar 2 merupakan ilustrasi pengelompokan inventarisasi GRK dari sektor energi, industri (IPPU), dan limbah. Dalam proses inventarisasi GRK, 1 proses dapat memberikan kontribusi pada 1 atau lebih sektor terkait. Sedangkan pada gambar 3 di bawah ini merupakan perbandingan data emisi GRK nasional pada setiap sektor pada tahun 2017, 2018,

dan 2019. Sektor pengelolaan limbah memberikan kontribusi hingga 7% dari emisi GRK Nasional.



Gambar 3. Perbandingan Kontribusi Setiap Sektor terhadap Emisi GRK Nasional [16]

Timbulan sampah harian Indonesia berdasarkan pada data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) berkisar pada 307.961,75 ton/hari. Komposisi sampah plastik memiliki persentase 23,57% atau setara dengan 72.586,58 ton/hari [17]. Meskipun persentase 23,57% tersebut merupakan jumlah keseluruhan dari timbulan sampah plastik campuran dan belum bisa mendapatkan secara spesifik komponen plastik apa saja dari timbulan sampah tersebut.

**Karakteristik dan Jenis Plastik**

Plastik merupakan bahan yang dapat dilunakkan dan memiliki kekristalan yang lebih rendah dibandingkan dengan serat. Monomer merupakan rantai pendek pembentuk polimer. Gabungan dari beberapa monomer akan membentuk rantai panjang yang disebut dengan polimer [18]. Polimer sintetik dibuat dari polimerisasi monomer yang berasal dari minyak atau gas dan ditambahkan bahan kimia tambahan [19]. Beberapa referensi menyebutkan bahwa bahan plastik dapat diproduksi dari beberapa sumber seperti fosil (minyak mentah, gas, dll) atau bahan terbarukan (tebu, pati, minyak nabati, dll) atau bahkan basa mineral (garam) [20].

Secara umum, plastik dibedakan menjadi 2 jenis yaitu termoplastik dan termoset. Termoplastik memiliki sifat *reversible*, dimana dapat dipanaskan kembali, dibentuk ulang, dan dikeraskan berulang kali. Beberapa contoh termoplastik diantaranya polietilena (PE), poliamida (PA), polipropilena (PP), polivinil klorida(PVC), polietilena tereftalat (PET), dan polistirena (PS). Sedangkan termoset memiliki sifat dapat dipanaskan dan dibentuk tetapi tidak dapat dilebur dan dibentuk kembali. Contoh dari termoset

diantaranya poliuretana (PU), *unsaturated polyester (UPR)*, resin epoksi, silikon, dan melamine [20] [21].

### **Teknologi Radiasi dan Kaitannya dalam Pengelolaan Sampah Plastik**

Iradiator merupakan teknologi iradiasi yang menggunakan sumber radioaktif atau pembangkit radiasi pengion untuk mengiradiasi bahan dengan tujuan polimerisasi, pengawetan, atau sterilisasi [22]. Saat ini, praktik penggunaan teknologi iradiasi bahan atau material dengan tujuan yang masih terbatas pada hal tersebut seperti pengawetan makanan, sterilisasi bahan atau peralatan, atau polimerisasi serta modifikasi polimer pada industri tertentu. Dengan kemampuannya yang multi tujuan, iradiator kemungkinan tidak terbatas hanya dalam 3 penggunaan tersebut. Iradiator merupakan teknologi yang telah teruji digunakan dalam beberapa dekade ini. Iradiator dapat digunakan dalam iradiasi lateks karet alam yang akan digunakan untuk pembuatan produk tertentu [23]. Industri pelapisan kabel dan ban juga dapat menerapkan teknologi iradiasi dengan iradiator [24].

Dari aspek pengawasan (peraturan dan perizinan) penggunaan teknologi iradiasi telah ada sejak tahun 1999 dengan terbitnya Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 yang kemudian diganti dengan Peraturan BAPETEN No. 3 Tahun 2020 Tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Iradiator untuk Iradiasi [22]. Rekomendasi internasional yang diterbitkan oleh IAEA juga telah mengalami perubahan dan perkembangan yaitu dengan terbitnya *Safety Series 107 on Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities* yang kemudian juga digantikan dengan *Specific Safety Guide 8 on Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities (SSG 8)* [25].

Teknologi iradiasi memiliki potensi digunakan dalam pengelolaan sampah plastik. Penggunaan teknologi iradiasi dalam pengelolaan sampah plastik bertujuan untuk modifikasi atau depolimerasi. Teknologi iradiasi dapat mengurangi periode waktu yang dibutuhkan oleh material plastik terurai menjadi bagian yang kecil. Metode konvensional umumnya dibutuhkan waktu yang cukup lama untuk mengurai plastik menjadi bagian makromolekul yang kecil. Pada dosis tertentu, paparan radiasi yang diberikan, diserap oleh material, radiasi gamma memberikan energi yang cukup kepada elektron untuk berpindah ke keadaan tidak stabil yang kemudian ditransfer ke atom lain dalam rantai polimer. Proses ini menghasilkan pembentukan rantai polimer ukuran kecil atau monomer dengan berat molekul lebih rendah, yang pada akhirnya akan menghasilkan sifat material yang lebih rendah [26].

### **Pembahasan**

Sampah plastik menyebabkan permasalahan terhadap lingkungan seperti akumulasi dan timbulan

sampah plastik yang cepat dan besar, tingkat degradasi material plastik yang lambat, pemilahan yang masih minim, kompleksitas jenis plastik, dan kesadaran pengguna yang minim [27]. Data Asosiasi Plastik Eropa menyebutkan total produksi plastik dunia mencapai 348 juta ton, dimana Benua Asia menyumbang 50,1% dengan rincian China 29,4%, Jepang 3,9%, dan sisanya 16,8% [21]. Sedangkan daur ulang sampah plastik setelah digunakan oleh konsumen tahun 2018 berkisar pada rentang 20 – 40% di setiap negara di Dunia [20].

Secara konvensional, beberapa upaya pengurangan penggunaan sampah plastik telah dilakukan oleh berbagai pihak, seperti industri hulu. Pelaku usaha dan asosiasi terkait dalam industri produksi kemasan (hulu) telah melakukan kampanye pengurangan penggunaan plastik dan penggunaan material daur ulang dalam produknya. Salah satu pelaku usaha yang menggunakan strategi dan kampanye “*less plastik, better plastik, dan no plastik*”. Secara tidak langsung hal ini merupakan salah satu praktik ekonomi sirkular. Ekonomi sirkular merupakan sistem regeneratif yang meminimalkan penggunaan sumber daya, limbah, emisi, dan kelebihan energi dengan memperlambat, menutup, dan mempersempit siklus energi dan material [28]. Konsep ekonomi sirkular sangat dekat artinya dengan konsep 3R yaitu pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang.

El Essawy et al. (2017) dan Zander et al. (2018) menyebutkan bahwa polietilena tereftalat (PET) merupakan salah satu polimer yang paling banyak dipelajari karena banyak digunakan dalam berbagai macam industri. Meskipun PET merupakan salah satu komoditas plastik yang dapat didaur ulang, namun hanya sebagian kecil dari polimer ini yang praktis didaur ulang, karena biaya produk daur ulang yang relatif tinggi [29]. PET memiliki keunggulan dan sifat seperti stabilitas termal yang tinggi, kejernihan material, biaya rendah, kekuatan yang baik, dan aspek fisik/penampilan permukaan yang baik [30] [31].

Pemanfaatan teknologi iradiasi dalam pengurangan sampah plastik menurut penulis dapat dibedakan menjadi 2 yaitu secara langsung dan tidak langsung berdasarkan proses dan material akhir yang akan didapatkan. Pada proses langsung, plastik dikenai radiasi dengan dosis tertentu, kemudian material akhirnya adalah plastik yang terdegradasi telah mengalami depolimerisasi. Sedangkan pada proses tak langsung, plastik digunakan sebagai bahan substitusi dari material lain seperti pembuatan beton serat (*Fiber Reinforced Concrete/FRC*) kemudian diberikan dosis radiasi tertentu.

### **Penggunaan Teknologi Iradiasi Secara Langsung**

Pada prinsipnya baik secara langsung maupun tidak langsung dengan memanfaatkan sifat dan interaksi radiasi dengan plastik yaitu proses eksitasi dan ionisasi molekul organik. Beberapa interaksi

tersebut diantaranya adalah polimerisasi, ikatan silang, pemotongan rantai/degradasi, dan pembentukan ikatan rangkap [32]. Proses iradiasi polimer (umumnya) dan PET khususnya akan mengalami pemotongan rantai/degradasi, molekul dipecah menjadi fragmen yang lebih kecil, atau ikatan silang dapat terjadi dengan pembentukan molekul yang lebih besar. Polimer akan mengalami ikatan silang atau degradasi tergantung pada struktur kimianya. PET baik densitas rendah maupun tinggi tahan terhadap sterilisasi radiasi dosis tunggal dan dapat bertahan, tanpa adanya perubahan substansial dalam sifat mekanik, hingga setidaknya 1000 kGy [32]. Sedangkan dalam depolimerisasi berbanding terbalik dengan prinsip polimerisasi yaitu bertujuan untuk memutus atau pemotongan rantai/degradasi sehingga terbentuk rantai yang pendek (monomer).

Besaran dosis yang diberikan pada PET akan mempengaruhi efek pemotongan rantai/ degradasi dan derajat kristalinitas. Kristalinitas berarti rantai polimer sejajar dan tersusun rapat, dan amorf merupakan rantai polimer tidak teratur. Sebagian besar polimer merupakan struktur kompleks yang terdiri dari daerah kristal dan amorf. Tingkat kristalinitas dan morfologi secara signifikan mempengaruhi sifat-sifat polimer dan sifat mekanik PET [33]. PET dengan kristalinitas yang lebih tinggi memiliki modulus, ketangguhan, kekakuan, kekuatan, dan kekerasan yang lebih tinggi [34]. Pemotongan rantai/ degradasi ataupun ikatan silang dapat terjadi secara bersamaan pada PET dapat menghasilkan peningkatan kekuatan [32][35].

Dosis radiasi yang meningkat akan meningkatkan jumlah pemotongan rantai/ degradasi dan meningkatkan derajat kristalinitas, tetapi berbanding terbalik dengan berat molekul yang didapatkan akan semakin menurun. Pengurangan berat ini menyebabkan peningkatan mobilitas molekul dalam struktur kristal [31] [32] [34]. Tabel 1 merupakan beberapa contoh dosis radiasi yang digunakan untuk mengiradiasi plastik. Tujuan dari penenaan dosis

radiasi tersebut adalah untuk proses depolimerisasi untuk melihat hubungan dosis radiasi terhadap penurunan berat molekul. Dalam beberapa penelitian, dosis radiasi digunakan untuk melihat hubungan dosis radiasi dengan derajat kristalinitas yang berkorelasi dengan peningkatan kekuatan dari material plastik. Dari hasil penelitian yang tertuang dalam tabel 1, penurunan berat molekul proporsional sebanding dengan besarnya dosis radiasi yang diberikan. Metode viskositas digunakan untuk mengukur berat molekul plastik pasca iradiasi.

Tabel 1. Dosis Radiasi yang Dikenakan Pada Beberapa Jenis Plastik

No.	Plastik	Dosis Radiasi (kGy)	Sumber
1.	PET	10, 30, 50, 70, dan 100	[26]
2.	PET	30, 50, 50, 100, 300, 500	[29]
3.	PET, PBT, PEN, PEA	300, 845, dan 1000	[36]

Catatan: PET: polietilena tereftalat, PBT: polibutilen tereftalat, PEN= polietilena naftalat, PEA= polietilena adipat, PP: polipropilena

**Penggunaan Teknologi Iradiasi Secara Tidak Langsung – Substitusi Plastik dalam Pembuatan Material Lain**

Istilah tidak langsung di sini adalah plastik digunakan sebagai material substitusi atau tamabahan dalam pembuatan material lain seperti beton serat (*Fiber Reinforced Concrete*) kemudian dikenai radiasi dengan dosis tertentu. Beton serat kemudian dikenai radiasi dengan dosis tertentu untuk melihat komposisi optimum penambahan dan efek dosis radiasi terhadap karakteristik dari beton serat seperti kuat tekan dan kuat tarik. Tabel 2 merupakan contoh aplikasi iradiasi pada plastik PET dan PP yang diaplikasikan dalam pembuatan beton serat (FRC).

Tabel 2. Iradiasi Plastik PET dan PP dalam Pembuatan Beton Serat (FRC)

No.	Plastik	Tujuan Penggunaan	Dosis Radiasi	Hasil	Sumber
1.	PET	Sebagai bahan tambah pembuatan beton serat (FRC)	10, 100 kGy	- Kuat tekan pada dosis 100 kGy lebih besar dibandingkan sampel yang tidak diiradiasi.	[34]
2.	PET	Substitusi agregat halus (pasir) dalam pembuatan beton dengan variasi ukuran partikel PET	100, 150, 200 kGy	- Kekuatan mekanik pada perlakuan iradiasi lebih lebih besar dibandingkan sampel yang tidak diiradiasi. - Kekuatan mekanik menurun dengan meningkatnya ukuran partikel PET. - Semakin besar dosis, kekuatan mekanik semakin besar. Kekuatan mekanik menurun dengan meningkatnya ukuran partikel PET. - Semakin kecil ukuran partikel PET, semakin besar modulus elastisitas.	[37]
3.	PP	Sebagai bahan tambah pembuatan beton serat (FRC)	5, 10, 50, 100 kGy	- Kuat tekan dipengaruhi dosis yang diterapkan pada serat dan kandungan serat dalam beton.	[38]

No.	Plastik	Tujuan Penggunaan	Dosis Radiasi	Hasil	Sumber
4.	PP	Sebagai bahan tambah pembuatan beton serat (FRC)	5, 10, 50, 100, 150 kGy	- Kuat tekan optimum pada variasi penambahan 1,5% serat PP dan dosis radiasi 10 kGy - Kuat tekan dan modulus elastisitas optimum pada variasi penambahan 1,5% serat PP pada dosis radiasi 50 kGy.	[39]

Teknologi iradiasi terbukti dapat digunakan untuk mengubah atau mendaur ulang sampah plastik dan digunakan dalam material lain, seperti pengisi dan pengikat bahan konstruksi pembuatan beton serat (FRC). Meskipun variasi komposisi penambahan serta plastik seperti PET dan PP dalam beton serat masih relatif kecil, tetapi terbukti bahwa daur ulang plastik dengan teknologi iradiasi memiliki fisibilitas penggunaan sebagai material pengganti. Teknologi radiasi menawarkan proses produksi dan daur ulang yang lebih bersih sehingga mengurangi penggunaan bahan tambahan dan pelarut yang berpotensi berbahaya serta memberikan penghematan energi. Dari aspek daur ulang plastik, minimaliai bahan mentah yang digunakan untuk pembuatan plastik, dan energi dalam proses pembuatan plastik serta daur ulang akan menurunkan perhitungan emisi GRK yang ada.

Menurut penulis penggunaan teknologi nuklir dalam mendorong pengurangan sampah plastik dapat diimplementasikan dalam skala industri. Dari aspek peraturan dan perizinan juga telah melingkupi penggunaan teknologi iradiasi (iradiator). Saat ini juga telah ada beberapa pelaku usaha yang bergerak dalam bidang iradiasi. Meskipun dari nomenklatur definisi yang ada, iradiator masih diklasifikasikan sebagai alat untuk mencapai tujuan seperti pengawetan, sterilisasi, dan polimerisasi. Meskipun dari aspek unjuk kerja peralatan, teknologi iradiasi (iradiator) sendiri bersifat multi guna.

Sedangkan beberapa tantangan dalam implementasi penggunaan teknologi iradiasi (iradiator) dalam proses iradiasi plastik diantaranya adalah kebutuhan energi yang besar untuk pengoperasian teknologi iradiasi (iradiator) dan efisiensi pengurangan. Sumber energi di Indonesia mayoritas masih berasal dari tenaga fosil yang tentunya juga menghasilkan emisi GRK yang relatif besar juga. Sebagai contoh faktor emisi GRK sistem ketenagalistrikan untuk *grid* Jawa, Madura, dan Bali (JAMALI) mengacu pada data Kementerian ESDM sebesar 0,87 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Sehingga diharapkan dengan menggunakan teknologi radiasi ini tidak memindahkan nilai emisi GRK ke sektor lainnya (sektor energi). Tujuan yang ingin dicapai adalah pengurangan emisi dari plastik, tetapi jika hanya menambah emisi di sektor energi juga menjadi tantangan dan pertimbangan dalam implementasinya.

### Kesimpulan

Limbah padat domestik merupakan bagian dari sektor pengelolaan limbah yang menjadi prioritas dalam

penurunan emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia. Berdasarkan jenisnya, salah satu limbah padat domestik adalah sampah plastik. Sampah plastik berkontribusi hingga 23,57% dari timbulan sampah di Indonesia. Pengelolaan sampah plastik secara konvensional melalui prinsip 3R melalui pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang. Teknologi iradiasi nuklir dapat berkontribusi dalam proses pengelolaan sampah plastik yaitu salah satunya dengan teknik iradiasi. Pemanfaatan teknologi iradiasi dalam pengurangan sampah plastik dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu secara langsung dan tidak langsung berdasarkan proses dan material akhir yang akan didapatkan. Pada proses langsung, plastik mengalami proses depolimerisasi. Sedangkan proses tak langsung, plastik digunakan sebagai bahan substitusi dari material lain seperti pembuatan beton serat (*Fiber Reinforced Concrete/FRC*) kemudian diberikan dosis radiasi tertentu. Dosis radiasi yang meningkat akan meningkatkan jumlah pemotongan rantai/degradasi dan meningkatkan derajat kristalinitas, tetapi berbanding terbalik dengan berat molekul yang didapatkan akan semakin menurun. Teknologi iradiasi terbukti dapat meningkatkan kekuatan mekanik, tekan, dan modulus elastisitas dari plastik sebagai material pengisi dan pengikat tambahan dalam beton serat. Dalam implementasinya, aspek peraturan dan perizinan yang ada saat ini juga telah melingkupi penggunaan teknologi iradiasi (iradiator). Beberapa faktor yang menjadi tantangan dalam implementasi teknologi iradiasi dalam pengolahan sampah plastik diantaranya kebutuhan energi dalam pengoperasian teknologi iradiasi (iradiator) dan efisiensi pengurangan.

### Daftar Pustaka

- [1]. Republik Indonesia, "Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran," Jakarta, 1997.
- [2]. Kementerian ESDM, "Permen ESDM Nomor 22 Tahun 2019 tentang Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi dan Mitigasi Gas Rumah Kaca Bidang Energi," Jakarta, 2019.
- [3]. W. Purwanta, "Bunga Rampai Inovasi Teknologi Pengukuran dan Estimasi Emisi Karbon Indonesia," in Bab 1: Perubahan Iklim dan Emisi Gas Rumah Kaca: A Point of View, Jakarta, BPPT Press, 2017, pp. 1-7.



- [4]. I. Adinatha and C. Arif, "Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Berdasarkan Penggunaan Lahan di Kota Bogor," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 7, no. 1, pp. 49-64, 01 April 2022.
- [5]. Presiden Republik Indonesia, "Perpres No. 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca," Jakarta, 2011.
- [6]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI 19-3964-1994 tentang Metode Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbulan dan Komposisi Sampah Perkotaan," Badan Standarisasi Nasional (BSN), Jakarta, 1994.
- [7]. Thomas H. Christensen et al., "Solid Waste Technology and Management," John Wiley and Sons, United Kingdom, 2011.
- [8]. G. Tchobanoglous and Frank Keith, *Handbook of Solid Waste Management 2nd Edition*, McGraw Hill, New York, 1993.
- [9]. Republik Indonesia, "Undang-Undang No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah," Kemensetneg, Jakarta, 2008.
- [10]. Badan Standardisasi Nasional, "SNI 3242-2008 Tata Cara Pengelolaan Sampah di Permukiman," BSN, Jakarta, 2008.
- [11]. European Commission, "DIRECTIVE (EU) 2008/98/EC on Waste and Repealing Certain Directives," European Commission, 2008.
- [12]. European Commission, "DIRECTIVE (EU) 2018/851 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2008/98/EC on Waste," European Commission, 2018.
- [13]. UNEP, "Guidelines for National Waste Management Strategies: Moving from Challenges to Opportunities," United Nations Environment Programme, 2013.
- [14]. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), "CCET Guideline Series on Intermediate Municipal Solid Waste Treatment Technologies: Waste-to-Energy Incineration," Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan, 2020.
- [15]. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), "Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Buku II - Volume 1 Metodologi Perhitungan Tingkat Emisi Gas Rumah Kaca Kegiatan Pengadaan dan Penggunaan Energi," Jakarta, 2012.
- [16]. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), "Laporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) dan Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (MPV) 2020," Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Jakarta, 2021.
- [17]. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), "http://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/," 07 2022. [Online].
- [18]. Setyowati & Widodo, "Studi Sifat Fisis, Kimia, dan Morfologi pada Kemasan Makanan Berbahan Styrofoam dan LDPE (Low Density Polyethylene): Telaah Kepustakaan," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 39-45, 2017.
- [19]. R. G. Brandon Kuczenski, "Material Flow Analysis Of Polyethylene Terephthalate In The US, 1996–2007," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, pp. 1161-1169, 2010.
- [20]. Plastics Europe (Association of Plastics Manufacturers), "Plastics – the Facts 2019: An Analysis of European Plastics Production, Demand And Waste Data," 2019.
- [21]. Plastics Europe (Association of Plastics Manufacturers), "Plastics – the Facts 2018: An analysis of European Plastics Production, Demand And Waste Data," 2018.
- [22]. Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), "Peraturan BAPETEN No. 3 Tahun 2020 Tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Iradiator untuk Iradiasi," Jakarta, 2020.
- [23]. Utama et al., "Pilot Scale Production of Irradiated Natural Rubber Latex and its Dipping Products," *Atom Indonesia*, vol. 31, no. 2, pp. 61-78, 2005.
- [24]. Sukaryono, "Kajian Jenis-Jenis Dosimeter pada Fasilitas Iradiator," in *Prosiding Nasional Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Akselerator 2015*, 2015.
- [25]. International Atomic Energy Agency (IAEA), "Specific Safety Guide 8 (SSG-8) Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities," International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2010.
- [26]. Jamdar, V., Kathalewar, M., Jagtap, R., Dubey, K.A. and Sabnis, A. (2015), Effect of  $\gamma$ -irradiation on glycolysis of PET waste and preparation of ecofriendly coatings using bio-based and recycled materials. *Polym Eng Sci*, 55: 2653-2660. <https://doi.org/10.1002/pen.24158>
- [27]. Yu Miao, Annette von Jouanne, and Alexandre Yokochi, "Current Technologies in Depolymerization Process and the Road Ahead," *Polymers*, vol. 13, no. 449, pp. 1-17, 2021.
- [28]. G. A. Kristanto, "Materi Kuliah Teknologi Pengolahan Limbah Padat: Operasi dan Desain - Circular Economy in Waste Management," 2020.
- [29]. V. Jamdar, M. Kathalewar, K. A. Dubey, A. Sabnis, "Recycling Of Pet Wastes Using Electron Beam Radiations And Preparation Of Polyurethane Coatings Using Recycled Material," *Progress in Organic Coatings*, vol. 107, pp. 54-63, June 2017.
- [30]. Zhang et al., "PET bottles recycling in China: An LCA Coupled with LCC Case Study Of Blanket Production Made Of Waste PET Bottles," *Journal of Environmental Management*, vol. 260, pp. 1-11, 17 Jan 2020.

- [31]. M. Kattan, "Thermal Behavior Of Gamma-Irradiated Amorphous Poly (Ethylene Terephthalate) Films," *Polymer Engineering & Science*, vol. 46, pp. 1374-1377, 2006.
- [32]. D. W. Plester, "The Effects Of Radiation Sterilization On Plastics," London, 1973.
- [33]. B. Demirel, A. Yaras, and H. Elcicek, "Crystallization Behavior of PET Materials," *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt*, vol. 13, no. 1, pp. 26-35, 2016.
- [34]. C. E. Schaefer, K. Kupwade-Patil, M. Ortega, C. Soriano, O. Büyükoztürk, A. E.White, and M.P. Short, "Irradiated Recycled Plastic as a Concrete Additive for Improved Chemo-Mechanical Properties and Lower Carbon Footprint," *Waste Management*, vol. 71, pp. 426-439, January 2018.
- [35]. Mutiah & Surdia, "Karakteristik Kekuatan Tarik dan Derajat Kristalinitas Polipropilena Teriradiasi," pp. 1-10, 2005.
- [36]. A. Buttafava, G. Consolati, M. Mariani, F. Quasso, and U. Ravasio, "Effects Induced by Gamma Irradiation of Different Polyesters Studied by Viscometry, Thermal Analysis and Positron Annihilation Spectroscopy," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 89, no. 1, pp. 133-139, 2005.
- [37]. G. Martínez-Barrera, L.I. Ávila-Córdoba, M. M. López, E.S.Herrera-Sosa, E. Viguera-Santiago, C.E. Barrera-Díaz, F. Ureña-Nuñez and N. González-Rivas, "Gamma Radiation as a Recycling Tool for Waste Materials Used in Concrete," *Intech*, 2015, pp. 259-279.
- [38]. Gonzalo Martínez-Barrera, E. Viguera-Santiago, Susana Hernandez-Lopez, "Mechanical Improvement of Concrete by Irradiated Polypropylene Fibers," *Polymer Engineering & Science*, vol. 45, pp. 1426-1431, 2005.
- [39]. Gonzalo Martínez-Barrera, Fernando Ureña-Nuñez, Osman Gencil, Witold Brostow, "Mechanical Properties of Polypropylene-Fiber Reinforced Concrete After Gamma Irradiation," *Composites: Part A*, vol. Part A, no. 42, p. 567-572, 2011.