

Kajian Fragmentasi *Low Density Polyethylene* Akibat Radiasi Sinar Ultraviolet dan Kecepatan Aliran Air

Aminatus Sa'diyah dan Yulinah Trihadiningrum
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: trihadiningrum@gmail.com

Abstrak—Pencemaran plastik di badan air telah menjadi fokus permasalahan lingkungan global. Plastik yang berukuran lebih besar dapat terdegradasi menjadi mikroplastik (MP). Keberadaan MP di perairan dapat mengganggu kehidupan ekosistem dan kehidupan biota air. Salah satu plastik yang paling banyak ditemukan di perairan adalah LDPE. Plastik LDPE merupakan poliolefin yang paling rentan terhadap degradasi. Kerentanan LDPE tersebut mengakibatkan lebih cepatnya proses fragmentasi sehingga terbentuk MP dalam jumlah yang lebih banyak. Plastik di badan air dapat mengalami degradasi melalui fotodegradasi dan degradasi fisik-mekanik. Mekanisme fotodegradasi mampu menginisiasi terjadinya fragmentasi plastik. Fragmentasi plastik di perairan dapat didukung dengan adanya degradasi mekanik akibat kecepatan aliran air. Tujuan penulisan artikel ini adalah untuk mengkaji mekanisme fragmentasi LDPE akibat radiasi sinar UV dan kecepatan aliran air. Artikel ini disusun dengan mengumpulkan berbagai sumber pustaka mengenai fragmentasi plastik akibat radiasi UV dan kecepatan aliran air. Sumber pustaka yang digunakan berupa *text book*, jurnal ilmiah, tugas akhir, tesis, dan disertasi. Fotodegradasi LDPE pada kondisi lingkungan yang berbeda dalam kurun waktu kurang lebih 90 hari dapat mengakibatkan terjadinya fragmentasi. Fragmentasi dapat diamati dari perubahan mekanik, fisik, dan kimia. Fotodegradasi dapat menurunkan nilai kekuatan tensil dan meningkatkan nilai modulus Young pada LDPE sehingga mengakibatkan munculnya retakan pada permukaan. Fotodegradasi lebih lanjut dapat merusak ikatan kimia dalam plastik. Perubahan tersebut menunjukkan adanya penurunan kualitas LDPE. Kombinasi radiasi UV dan kecepatan aliran air mengakibatkan fragmentasi yang lebih besar pada LDPE. Kecepatan aliran air pada kondisi turbulen menghasilkan jumlah fragmen yang lebih tinggi dibandingkan pada kondisi stagnan. Keberadaan pasir di dalam air juga mempercepat proses fragmentasi akibat adanya gesekan langsung dengan LDPE.

Kata Kunci—Fragmentasi, kecepatan aliran, LDPE, Plastik, Radiasi UV.

I. PENDAHULUAN

PLASTIK bersifat persisten di lingkungan karena stabilitas dan daya tahannya [1]. Indonesia menjadi penyumbang sampah plastik ke laut terbesar kedua di dunia setelah China. Estimasi jumlah sampah plastik yang dibuang mencapai 3,21 juta ton/tahun [2]. Sungai merupakan jalur utama masuknya sampah plastik ke laut [3]. Plastik yang berukuran lebih besar dapat terdegradasi menjadi mikroplastik (MP) dan dapat masuk ke dalam tubuh biota air melalui rantai makanan. MP mengandung berbagai bahan kimia seperti zat aditif yang dapat terakumulasi dalam tubuh organisme sehingga berisiko

menimbulkan gangguan fungsi organ [4]. MP dapat terbentuk secara primer maupun sekunder. MP primer adalah plastik yang sengaja diproduksi dalam bentuk mikro, seperti microbeads pada produk perawatan kulit, medis, maupun tekstil. Sedangkan MP sekunder merupakan pecahan, bagian, atau hasil fragmentasi dari plastik yang lebih besar [5]. Eriksen *et al.* menyatakan bahwa sebagian besar MP yang ditemukan di lingkungan adalah MP sekunder [6]. Ketika MP lepas ke lingkungan, ada kemungkinan terjadinya penguraian MP menjadi nanoplastik yang mungkin memiliki risiko lebih tinggi terhadap lingkungan karena ukurannya.

Beberapa sungai di dunia telah tercemar oleh MP. Kelimpahan MP di permukaan Sungai Tame, Sungai Ottawa, dan Sungai Beijing berturut-turut mencapai 16,5; 22; dan 17,8-54,4 partikel/100 gram [7]. Jenis sampah plastik yang paling sering ditemukan di perairan adalah *low density polyethylene* (LDPE) yakni sebesar 20,6% [8]. Pencemaran MP di Kali Surabaya didominasi oleh jenis LDPE yaitu sebesar 44-68% di permukaan [9]. Hal ini terjadi karena LDPE adalah jenis plastik yang banyak digunakan, harganya ekonomis, dan mudah dibentuk. Selain itu, plastik jenis LDPE merupakan poliolefin yang paling rentan terhadap fotodegradasi [10].

Plastik di perairan dapat mengalami fragmentasi melalui fotodegradasi, oksidasi, hidrolisis, degradasi mekanik, dan biodegradasi. Fotodegradasi dan hidrolisis menginisiasi degradasi plastik di air yang selanjutnya mengakibatkan terjadinya oksidasi [11]. Fotodegradasi oleh sinar ultraviolet (UV) menjadi salah satu faktor utama terfragmentasinya plastik di badan air. Plastik jenis LDPE cukup sulit mengalami fragmentasi akibat hidrolisis [12]. Hal ini dikarenakan rantai utama LDPE memiliki resistensi yang tinggi terhadap hidrolisis. Di perairan, degradasi mekanik terjadi akibat kecepatan air dan gesekan dengan partikel sedimen. Biodegradasi berlangsung dalam waktu lama dan lebih mudah terjadi apabila polimer telah mengalami kerapuhan akibat faktor-faktor yang lain. Oleh karena itu faktor fragmentasi LDPE yang dikaji pada artikel ini yaitu fotodegradasi akibat UV dan degradasi mekanik akibat kecepatan aliran air.

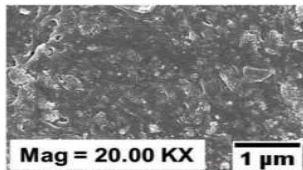
II. METODE STUDI

Artikel ini disusun melalui kajian berbagai sumber pustaka. Sumber pustaka yang digunakan berupa jurnal ilmiah nasional dan internasional, *text book*, serta referensi ilmiah lain yang

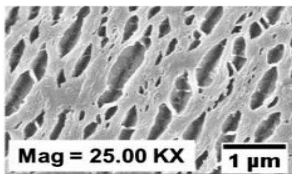
Tabel 1.

Perubahan mekanik LDPE setelah paparan UV 90 hari

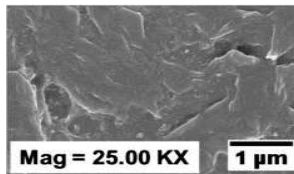
Parameter	Kondisi Awal	Kondisi Lingkungan			
		Udara	MSM	DDW	Air Salin
Kekuatan Tensil (N/mm ²)	23,8	7,61	18,74	10,53	20,9
Modulus Young (N/mm ²)	198,4	350	249	309	209,47
Jumlah Atom C (%)	99,25	52,61	75,13	63,74	94,17
Jumlah Atom O (%)	0,75	47,39	24,87	36,26	5,83



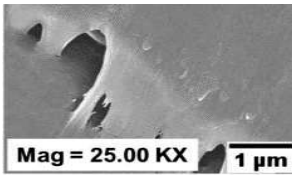
A. Kondisi Awal



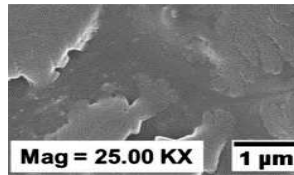
B. Udara



C. MSM



D. DDW



E. Air Salin

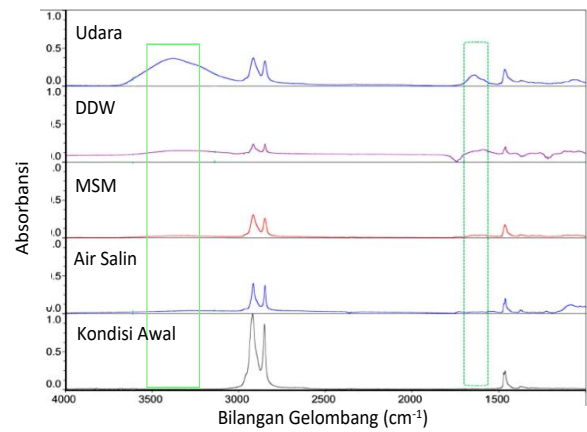
Gambar 1. Perubahan fisik LDPE setelah paparan UV 90 hari.

berkaitan dengan studi. Pustaka yang dikumpulkan mengenai degradasi plastik di perairan, fragmentasi LDPE akibat radiasi UV, serta fragmentasi LDPE akibat kombinasi radiasi UV dan kecepatan aliran air.

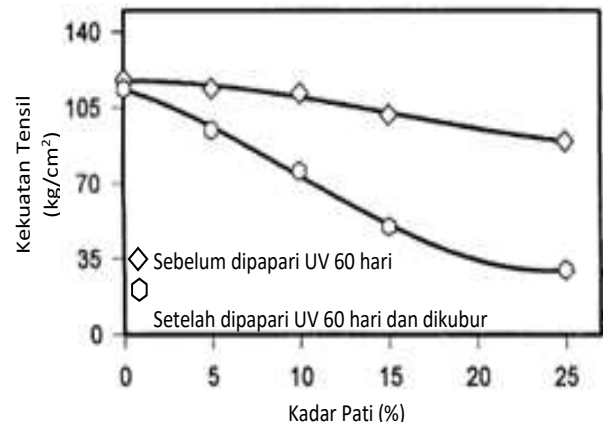
III. HASIL DAN DISKUSI

A. Mekanisme Fragmentasi LDPE akibat Radiasi Sinar UV

Fragmentasi LDPE akibat radiasi UV di empat kondisi lingkungan berbeda dapat diamati melalui penelitian skala laboratorium [13]. Kondisi tersebut meliputi simulasi fragmentasi LDPE di udara, pada *mineral salt medium* (MSM), *double distilled water* (DDW), dan air salin. Sampel LDPE yang digunakan berbentuk film kemasan LDPE murni berukuran 11 x 2 cm dengan ketebalan 35 μm. Plastik yang telah dicuci diletakkan dalam tabung reaksi berukuran 70 mL. Dalam satu tabung reaksi diisi sebanyak 12 sampel. Fragmentasi LDPE di air tawar disimulasikan dengan menambahkan 50 mL MSM dengan kekuatan ion 0,017 mol/L ke dalam tabung reaksi. Fragmentasi LDPE di DDW disimulasikan dengan menambahkan 50 mL DDW. Sedangkan simulasi di air salin dilakukan dengan memasukkan dua belas sampel plastik ke dalam gelas beker berukuran 500 mL. Kemudian ditambahkan 250 mL air salin buatan dengan kekuatan ion 0,6 M.



Gambar 2. Perubahan kimia LDPE setelah paparan UV 90 hari.



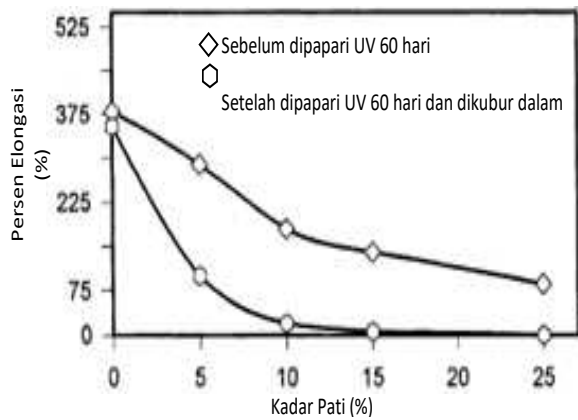
Gambar 3. Kekuatan tensil pada campuran LDPE.

Penelitian dilakukan selama 90 hari dengan memasukkan sampel ke dalam inkubator yang dilengkapi dengan paparan sinar UV secara kontinyu. Sumber UV yang digunakan adalah lampu UV 15 watt dengan panjang gelombang antara 280-320 nm. Jarak antara lampu UV dan sampel adalah 15 cm. Nilai intensitas radiasi pada sampel diperkirakan sekitar 1,8 mwatt/cm². Temperatur dalam inkubator sekitar 30°C [13]. Pengamatan yang dilakukan berupa perubahan mekanik, fisik, dan kimia.

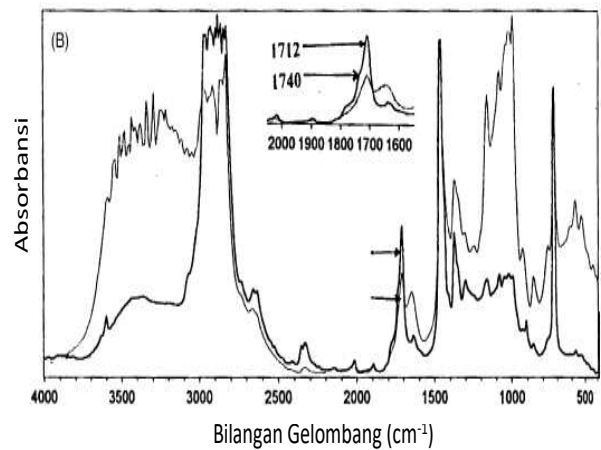
Perubahan mekanik yang diamati yaitu kekuatan tensil, modulus Young, dan jumlah atom. Setelah paparan UV selama 90 hari, LDPE mengalami penurunan kekuatan tensil dan jumlah atom karbon, serta peningkatan nilai modulus Young dan jumlah atom oksigen (Tabel 1).

UV mengakibatkan suatu material menjadi berkurang elastisitasnya sehingga lebih mudah mengalami fragmentasi.

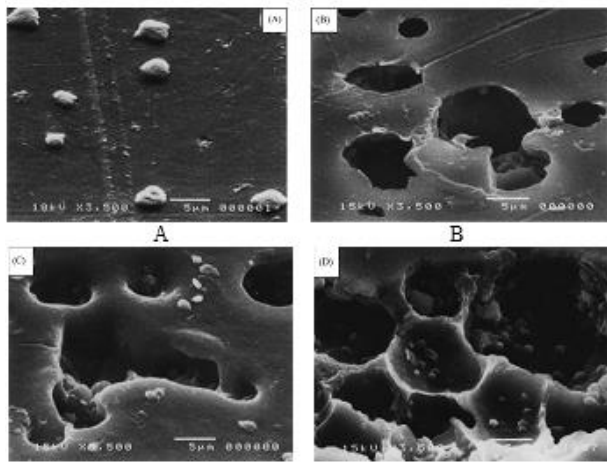
Setelah 90 hari LDPE mengalami penurunan jumlah atom karbon dan peningkatan jumlah atom oksigen. Perubahan jumlah atom terjadi karena adanya reaksi fotokimia. Reaksi fotokimia timbul akibat penyerapan sinar UV oleh gugus karbonil pada rantai utama. Gugus kromofor internal atau eksternal menyerap cahaya dan menghasilkan senyawa radikal dengan berat molekul yang rendah dan polimer makro radikal. Radikal bebas terbentuk akibat putusnya ikatan C-H dan C=C yang kemudian berikatan dengan oksigen bebas sehingga menjadi gugus karbonil (C=O) dan hidroksil (O-H). Hal inilah



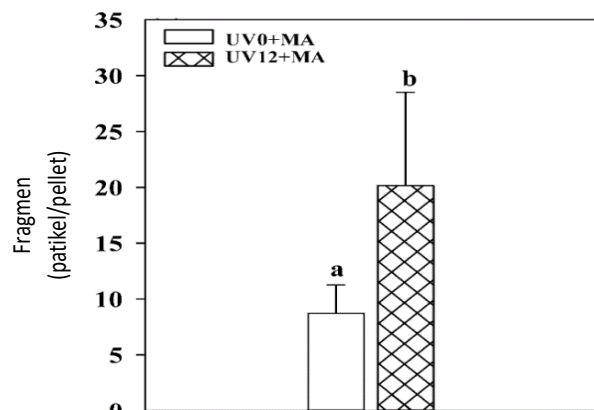
Gambar 4. Persen elongasi pada campuran LDPE.



Gambar 6. Hasil FTIR Campuran LDPE/Pati (75/25) setelah dipapari sinar UV 90 hari dan ditimbun tanah setelah 6 bulan.



Gambar 5. Hasil SEM campuran LDPE dan pati a) kadar pati 25% tanpa paparan uv, b) kadar pati 15% dan ditimbun tanah, c) kadar pati 25% dan ditimbun tanah, d) kadar pati 25% + uv + ditimbun tanah (6 bulan).



Gambar 7. Jumlah fragmen LDPE setelah a) UV0+MA dan b) UV12+MA.

yang mengakibatkan jumlah atom C berkurang dan atom O bertambah [14].

Perubahan fisik yang diamati yaitu struktur permukaan. Struktur permukaan diamati menggunakan SEM. Perubahan fisik pada LDPE setelah 90 hari dapat dilihat pada Gambar 1.

Pada LDPE kondisi awal (hari ke-0), permukaannya masih halus, homogen, dan teksturnya padat (Gambar 1A). Setelah 90 hari paparan UV, terjadi perubahan yang signifikan pada LDPE di udara yaitu munculnya retakan dan lubang yang besar pada permukaan (Gambar 1B). Pada LDPE di MSM dan DDW muncul lubang dan retakan (Gambar 1C dan Gambar 1D). Sedangkan pada LDPE di air salin terdapat sedikit retakan (Gambar 1E). Hal ini dikarenakan kristal garam mencegah masuknya radiasi sinar UV ke dalam LDPE. Munculnya retakan dan lubang pada permukaan LDPE menunjukkan bahwa telah terjadi fragmentasi pada LDPE.

Perubahan kimia LDPE diamati dari hasil spektroskopi FTIR. Grafik FTIR dapat dilihat pada Gambar 2. Puncak nilai absorbansi LDPE di udara, MSM, dan DDW muncul sekitar pada bilangan gelombang 3.300 (gugus hidroksil) dan 1700 cm^{-1} (gugus karbonil). Sedangkan pada LDPE di air salin hanya muncul pada bilangan gelombang 1700 cm^{-1} (gugus karbonil).

Mekanisme yang mengakibatkan terjadinya pelapukan film LDPE adalah fotooksidasi. Fotooksidasi disebabkan oleh pembentukan radikal bebas selama proses inisiasi. Sinar UV

mempunyai kemampuan energi untuk melepaskan ikatan antar karbon sebesar 375 kJ/mol dan sebesar 420 kJ/mol untuk melepas ikatan karbon dengan hidrogen [15]. Radikal bebas dihasilkan sebagai hasil pemutusan ikatan C–H dan C–C yang dapat bereaksi secara bebas dengan oksigen di atmosfer. Kemudian terbentuk gugus hidroksil (O–H) dan karbonil (C=O) melalui percabangan dan pemotongan rantai yang terjadi dalam polimer [16].

Fragmentasi LDPE di empat kondisi lingkungan yang berbeda menunjukkan tingkat perubahan yang berbeda pula. Sampel LDPE di udara yang dipapari sinar UV menunjukkan penurunan sifat yang paling signifikan baik secara mekanik, fisik, dan kimia. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan oksigen memiliki peran penting yang dapat menginisiasi proses fotooksidasi. Kandungan oksigen di udara tersedia lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi sampel dalam air. Selain itu, tingkat pemanfaatan sinar UV pada LDPE di udara juga lebih tinggi. Hal ini dimungkinkan terjadi karena peningkatan energi panas saat kondisi tanpa air. Peningkatan energi tersebut dapat menginisiasi reaksi termooksidatif untuk memecah ikatan polimer. Keberadaan air dapat memantulkan cahaya dan menyebabkan difusi yang lebih rendah.

Fotodegradasi terbaik terjadi pada LDPE di udara, kemudian disusul di DDW, MSM, dan air salin. Hal ini ditunjukkan dari nilai puncak absorbansi FTIR masing-masing sampel.

Tabel 2.

Jumlah fragmen LDPE tanpa paparan UV pada kondisi stagnan dan turbulen

Bentuk Plastik	Jumlah Partikel MP	
	Kondisi Stagnan	Kondisi Turbulen
Fragmen	0	1
Serat	5	10
Kelompok Serat	0	0
Total	5	11

Tabel 3.

Jumlah fragmen LDPE yang telah dipapari UV pada kondisi stagnan

Klasifikasi Ukuran (μm)	Jumlah Partikel MP pada Kondisi Stagnan			
	Fragmen	Serat	Kelompok Serat	Total berdasarkan ukuran
841+	1	0	0	1
240-841	4	2	3	9
177-240	2	22	4	28
74-177	10	41	10	61
Total berdasarkan bentuk	17	65	17	99

Tabel 4.

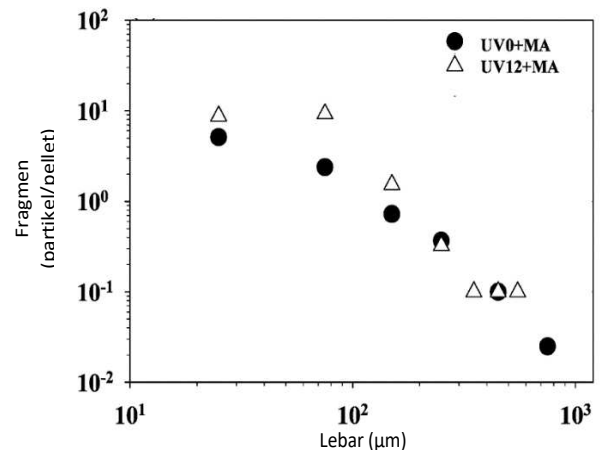
Jumlah fragmen LDPE yang telah dipapari UV pada kondisi turbulen

Klasifikasi Ukuran (μm)	Jumlah Partikel MP pada Kondisi Turbulen			
	Fragmen	Serat	Kelompok Serat	Total berdasarkan ukuran
841+	1	0	0	1
240-841	5	2	1	8
177-240	10	94	28	132
74-177	6	114	39	159
Total berdasarkan bentuk	22	210	68	300

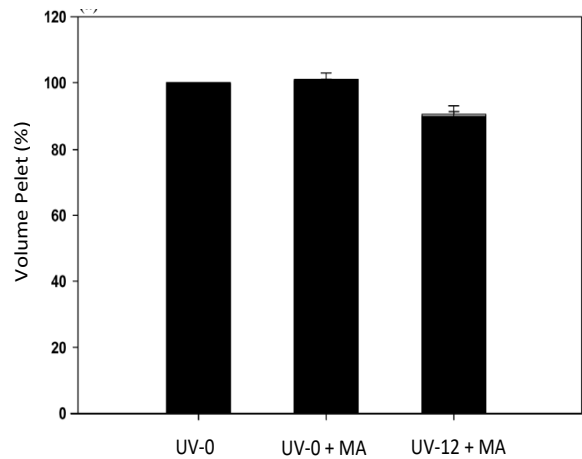
Spektrum FTIR menunjukkan bahwa tingkat degradasi film LDPE di udara dan DDW (muncul puncak gugus hidroksil dan karbonil) lebih tinggi daripada di MSM dan air salin, dimana hanya muncul puncak gugus karbonil.

Keberadaan sinar UV juga dapat menginisiasi degradasi LDPE di tanah. Kemudian LDPE dapat terdegradasi lebih lanjut dengan bantuan mikroorganisme. Selain itu, untuk mempercepat proses degradasi di tanah, LDPE dapat dimodifikasi. Modifikasi dapat dilakukan dengan penambahan pati pada kadar tertentu. LDPE dengan penambahan pati pada kadar 25% yang dipapari sinar UV selama 3 bulan, dan dikubur dalam tanah selama 6 bulan mengalami perubahan yang signifikan [17]. Perubahan

Pada LDPE dengan kadar pati 25%, nilai kekuatan tensil berkurang sebesar $\pm 85\%$ dari kondisi awal (Gambar 3). Hal ini terjadi karena pati menyerap uap air dari lingkungan, kemudian dapat terdegradasi oleh mikroorganisme seperti jamur dan bakteri. Degradasi oleh mikroorganisme mengakibatkan terbentuknya porositas dan rongga pada permukaan plastik sehingga luas permukaan partikel polimer meningkat. Peningkatan luas permukaan polimer menyebabkan degradasi lebih cepat karena reaktivitas yang lebih tinggi. Oksigen dapat masuk lebih mudah ke dalam polimer. Keberadaan oksigen menimbulkan terjadinya reaksi oksidasi. Rantai LDPE yang



Gambar 8. Distribusi ukuran fragmen LDPE.



Gambar 9. Perubahan total volume LDPE setelah terfragmentasi.

teroksidasi lebih rentan terhadap reaksi biotik. Sementara nilai persen elongasi campuran LDPE dengan kadar pati 25% berkurang sebesar 100% (Gambar 4).

Perubahan fisik yang diamati berupa struktur permukaan LDPE. Hasil SEM menunjukkan bahwa muncul lubang dan rongga pada permukaan campuran LDPE yang telah dipapari sinar UV. Pada kondisi awal, LDPE masih tampak halus dengan sedikit benjolan pati di permukaan (Gambar 5A). Tingkat degradasi cenderung lebih tinggi seiring dengan meningkatnya kadar pati dalam campuran. Hal ini ditandai dengan semakin besarnya lubang yang terbentuk pada permukaan LDPE (Gambar 5B dan Gambar 5C). Kerusakan tertinggi terjadi pada campuran dengan kadar pati tertinggi yang terpapar sinar UV dan ditimbun dalam tanah (Gambar 5D). Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroba di tanah mendegradasi pati dan mengoksidasi daerah amorf LDPE lebih mudah pada campuran yang telah terpapar radiasi sinar UV. Hal ini terjadi karena paparan radiasi sinar UV

Perubahan kimia yang diamati dari analisis FTIR. Hasil FTIR menunjukkan munculnya puncak gugus karbonil pada bilangan gelombang 1712 cm^{-1} sebagai hasil dari degradasi campuran LDPE dan pati setelah dipapari sinar UV dan ditimbun tanah. Selain itu juga muncul puncak pada bilangan gelombang 1740 cm^{-1} untuk gugus peroksida (Gambar 6). Hal tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan ikatan

kimia dalam LDPE yang dicampur pati dan dipapari UV selama 90 hari. Perubahan sifat mekanik, fisik, dan kimia menunjukkan bahwa LDPE di tanah telah mengalami fragmentasi.

B. Mekanisme Fragmentasi LDPE akibat Radiasi Sinar UV dan Kecepatan Aliran Air

Kecepatan aliran air di sungai merupakan salah satu faktor penyebab terjadinya degradasi mekanik plastik. Degradasi mekanik dapat terjadi karena gaya gesek atau tekanan. Degradasi mekanik merupakan faktor penting dalam fragmentasi plastik di lingkungan akuatik. Pelapukan polimer akibat pengaruh lingkungan, seperti fotodegradasi atau degradasi kimia aditif dapat mengubah sifat dan menyebabkan pelapukan polimer. Polimer kemudian dipecah menjadi partikel yang lebih kecil oleh gaya gesek yang terjadi selama pergerakan partikel di lingkungan yang berbeda [18]. Degradasi mekanik di perairan dapat terjadi melalui kecepatan aliran air yang mengakibatkan turbulensi baik dalam kondisi jernih maupun dengan kekeruhan tertentu.

Hebner dan Maurer-Jones mensimulasikan fragmentasi LDPE akibat paparan UV dan gerakan air. Gerakan air yang diamati yaitu pada keadaan stagnan dan turbulen [19]. Film LDPE tanpa penstabil UV dengan ketebalan 0,03 mm dipapari sinar UV pada panjang gelombang 254 nm. Pemaparan dilakukan selama 72 jam pada setiap sisi film LDPE. Kemudian film LDPE (80 mg) dimasukkan ke dalam mangkuk berukuran 4 L. Mangkuk tersebut diisi air deionisasi sebanyak 1800 mL dan dilengkapi dengan pompa submersibel 80 GPH untuk mensimulasikan aliran turbulen.

Pompa diatur dengan debit 120 L/menit sehingga menghasilkan kecepatan aliran rata-rata sekitar 0,13 m/detik. Semua perlakuan ditutup dengan aluminium foil untuk mencegah kontaminasi. Setelah 7 hari, film LDPE yang berdiameter lebih dari 5 mm dikeluarkan dari air. Sisa air yang mengandung film LDPE berdiameter kurang dari 5 mm disaring melalui empat ukuran kawat stainless berbeda. Ukuran kawat untuk menyaring adalah 20, 40, 80, 200 mesh yang setara dengan jarak antar kawat berturut-turut 841, 740, 177, dan 74 mm. Perhitungan jumlah MP diklasifikasikan berdasarkan ukuran dan bentuknya.

Mikroplastik dihitung menggunakan mikroskop stereo (SZH10 Zoom Stereo Microscope System, Olympus, Jepang). Jumlah MP pada setiap kawat filter dihitung dan dikategorikan sebagai fragmen, serat, atau kelompok serat. MP dihitung sebagai serat jika lebar serat adalah <50 mm dan rasio aspek partikel berjumlah >25. Fragmen memiliki rasio aspek yang lebih rendah. Sedangkan kelompok serat terjadi jika terdapat untaian serat antara yang satu dengan lainnya tidak dapat dibedakan.

Pada kondisi kontrol, MP ditempatkan pada aliran stagnan dan tanpa UV. Selain itu, kontrol pada kondisi turbulen, MP tanpa paparan UV dimasukkan ke dalam mangkuk yang dilengkapi pompa dan dioperasikan selama 7 hari. Jumlah MP pada kontrol kondisi stagnan dan turbulen berturut-turut sebanyak 5 dan 11 partikel (Tabel 2).

Paparan UV mengakibatkan fragmentasi yang lebih tinggi pada LDPE. Plastik LDPE yang telah dipapari sinar UV baik

pada kondisi stagnan maupun turbulen menghasilkan jumlah fragmen yang lebih besar. Plastik LDPE pada kondisi aliran stagnan menghasilkan MP sebanyak 99 fragmen (Tabel 3). Sedangkan jumlah MP yang terbentuk pada kondisi turbulen sebanyak 300 fragmen. Berdasarkan bentuknya, jumlah MP yang ditemukan yaitu berupa 22 fragmen, 210 serat, dan 68 kelompok serat (Tabel 4). Rasio jumlah MP pada keadaan turbulen dan stagnan sebesar 3:1. Hal tersebut menunjukkan bahwa turbulensi menghasilkan jumlah MP 3 kali lipat dibandingkan pada kondisi stagnan.

Data di atas menunjukkan bahwa paparan UV dan keberadaan air baik dalam kondisi stagnan maupun turbulen mengakibatkan terjadinya fragmentasi LDPE. Aliran air turbulen menyebabkan lebih banyak terbentuknya MP dibandingkan dengan kondisi stagnan. Berdasarkan penelitian dalam Hebner dan Maurer-Jones [19], jumlah fragmen yang dihasilkan pada kondisi turbulen tanpa paparan sinar UV sebanyak 11 fragmen. Sedangkan pada kondisi stagnan (tanpa kecepatan aliran) dan dengan paparan UV, jumlah fragmen yang dihasilkan sebanyak 99 fragmen. Hasil tersebut menunjukkan bahwa radiasi sinar UV memiliki peran yang lebih besar dalam fragmentasi LDPE dibandingkan kecepatan aliran air. Akan tetapi kombinasi sinar UV dan kecepatan aliran air akan menghasilkan fragmentasi LDPE yang lebih maksimum.

Sinar UV menginisiasi fragmentasi sehingga sifat mekanik LDPE menurun. Radiasi UV menyebabkan degradasi fotooksidatif yang mengakibatkan putusannya rantai polimer, menghasilkan radikal, mengurangi berat molekul, dan menyebabkan kerusakan sifat mekanik [20]. Kerusakan polimer akibat radiasi UV berupa kerapuhan, perubahan warna, retakan, dan penurunan sifat mekanik [21]. Fragmentasi lebih lanjut dapat terjadi akibat kecepatan aliran air. Kecepatan aliran air dapat berperan maksimum ketika LDPE sudah mengalami penurunan sifat mekanik akibat radiasi UV. Akan tetapi LDPE dalam kondisi normal (tanpa paparan UV) akan lebih sulit untuk terfragmentasi karena masih kuatnya ikatan dalam polimer.

Song *et al.* mensimulasikan fragmentasi LDPE akibat radiasi sinar UV dan kecepatan aliran air di lingkungan pantai. Polimer di pantai dapat terpapar radiasi matahari (terutama UV-B) yang menginisiasi terjadinya degradasi fotooksidatif [22]. Selain itu, *mechanical abrasion* (MA) plastik dengan pasir di pantai terjadi akibat keberadaan angin, gelombang, dan arus pasang surut. Abrasi mekanik pada penelitian tersebut lebih mengarah pada turbulensi antara LDPE dengan partikel pasir. Material yang digunakan berupa pelet LDPE. Pelet LDPE berbentuk butiran putih dengan volume $19 \pm 0,9 \text{ mm}^3$.

Penelitian fragmentasi LDPE diawali dengan paparan sinar UV selama 12 bulan. Fotooksidasi oleh UV dapat meningkatkan fragmentasi plastik di pantai (tanpa air) sebelum MA. Setelah proses inisiasi tersebut berat molekul polimer dapat berkurang dan ikatan kimianya menjadi lebih lemah. Fotooksidasi umumnya merupakan proses yang cepat, namun bisa berlangsung lambat pada beberapa jenis polimer. Hal ini disebabkan oleh keberadaan zat aditif dalam polimer yang dapat mencegah proses oksidasi [11]. Pelet LDPE ditempatkan

dalam cawan petri dan dimasukkan ke dalam ruang UV. Sumber UV yang digunakan adalah lampu logam halida (UV-A: 11,01 Watt/m²; UV-B: 0,12 Watt/m²; UV-C: 0,04 Watt/m²). Temperatur ruang dipertahankan pada 43–45°C.

Sampel kontrol ditempatkan dalam cawan petri dan dibungkus dengan aluminium foil. Periode paparan sinar UV yaitu 24 jam per hari selama 12 bulan. Pelet LDPE yang telah dipapari sinar UV ditempatkan dalam *separate amber bottle* (60 mL). Kemudian ditambahkan 50 g pasir dan diputar pada *roller mixer* selama 2 bulan dengan kecepatan 37 rpm. Putaran pasir dan LDPE dimaksudkan untuk mensimulasikan kondisi turbulen. Sampel kontrol berisi pasir yang telah dibersihkan dan pelet LDPE (tanpa paparan UV). Kemudian diputar selama 2 bulan. Pengamatan sampel berupa perubahan mekanik, fisik, dan kimia.

Perubahan mekanik yang diamati yaitu jumlah fragmen, distribusi ukuran partikel, dan perubahan total volume pelet. Sampel dengan perlakuan UV-0+MA menghasilkan fragmen sebanyak 8,7±2,5 partikel/pelet. Sedangkan sampel dengan UV-12+MA menghasilkan 20±8,3 partikel/pellet (Gambar 7).

Jumlah partikel LDPE yang terfragmentasi akibat paparan UV dan MA meningkat seiring dengan penurunan ukuran tiap fragmen. Kelimpahan fragmen LDPE setelah paparan UV selama 12 bulan dan MA selama 2 bulan menunjukkan hubungan yang signifikan ($p < 0,05$). Nilai analisis regresi hubungan tersebut yaitu 0,9498 (Gambar 8).

Volume pelet yang tersisa dihitung dari diameter rata-rata yang telah diukur. Volume partikel yang dihasilkan dihitung dengan asumsi semua partikel berbentuk bulat dengan mengklasifikasikan ukuran diameternya (contoh: 150 µm dalam rentang 100–200 µm). Total volume dari pelet yang tersisa ditambah partikel terfragmentasi dikonversi menjadi proporsi volume awal pelet yang sesuai untuk setiap perlakuan paparan UV. Volume pelet LDPE tetap hampir utuh (> 90%) pada semua perlakuan, bagian volume LDPE yang hilang setelah pelapukan meningkat dari 1,3% pada UV-0+MA menjadi 9,1% pada UV-12+MA (Gambar 9).

Hebner dan Maurer-Jones [19] dan Song *et al.* [22] menunjukkan bahwa kombinasi radiasi sinar UV dan kecepatan aliran air mengakibatkan fragmentasi pada LDPE. Paparan sinar UV dapat menginisiasi proses degradasi sehingga ikatan polimer melemah. Kemudian turbulensi dengan pasir mengakibatkan gesekan dengan LDPE sehingga semakin mudah terfragmentasi. Kecepatan aliran air baik pada kondisi stagnan maupun turbulen menyebabkan LDPE terfragmentasi. Akan tetapi fragmen lebih banyak terbentuk pada LDPE dengan kondisi turbulen. Selain itu, keberadaan pasir/sedimen dapat meningkatkan fragmentasi pada LDPE. Hal ini dikarenakan terjadinya gesekan antara LDPE dan pasir.

IV. KESIMPULAN

Fotodegradasi LDPE di kondisi lingkungan yang berbeda dalam kurun waktu kurang lebih 90 hari mampu mengakibatkan fragmentasi. Fragmentasi tersebut mengakibatkan penurunan kualitas LDPE yang dapat diamati dari perubahan mekanik, fisik, dan kimia. Perubahan mekanik pada fragmentasi LDPE

berupa penurunan nilai tensil dan jumlah atom karbon, serta peningkatan nilai modulus Young dan jumlah atom oksigen. Perubahan fisik berupa hasil analisis SEM yang menunjukkan adanya goresan, retakan, hingga lubang pada permukaan LDPE. Perubahan kimia ditunjukkan oleh munculnya gugus hidroksil dan gugus karbonil pada spektrum FTIR.

Kombinasi radiasi sinar UV dan kecepatan aliran air mampu mengakibatkan fragmentasi pada LDPE. Sinar UV menginisiasi proses pelapukan LDPE kemudian terjadi fragmentasi lebih lanjut akibat kecepatan aliran air. Kecepatan aliran air pada kondisi turbulen menghasilkan jumlah fragmen lebih banyak dibandingkan kondisi stagnan. Keberadaan pasir/sedimen dapat meningkatkan fragmentasi akibat adanya gesekan secara langsung dengan LDPE.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. K. Barnes, F. Galgani, R. C. Thomson, and M. Barlaz, "Accumulation and fragmentation microplastics in canadian lake ontario nearshore, tributary, and beach sediments," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 110, pp. 383–395, 2009.
- [2] J. R. Jambeck *et al.*, "Plastic waste input from land into the ocean," *Science* (80-.), vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, Feb. 2015, doi: 10.1126/science.1260352.
- [3] T. Kataoka, Y. Nihei, K. Kudou, and H. Hinata, "Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of japan," *Environ. Pollut.*, vol. 244, pp. 958–965, 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.111.
- [4] D. Lithner, A. Larsson, and G. Dave, "Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 18, pp. 3309–3324, 2011, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.038.
- [5] W. Zhang *et al.*, "Microplastic pollution in the surface waters of the bohai sea, China," *Environ. Pollut.*, vol. 231, pp. 541–548, 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2017.08.058.
- [6] M. Eriksen *et al.*, "Microplastic pollution in the surface waters of the laurentian great lakes," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 77, no. 1–2, pp. 177–182, 2013, doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.10.007.
- [7] J. Tibbetts, S. Krause, I. Lynch, and G. H. S. Smith, "abundance, distribution, and drivers of microplastic contamination in urban river environments," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 11, 2018, doi: 10.3390/w10111597.
- [8] P. Lestari, Y. Trihadiningrum, B. A. Wijaya, K. A. Yunus, and M. Firdaus, "Distribution of microplastics in surabaya river, indonesia," *Sci. Total Environ.*, vol. 726, p. 138560, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138560.
- [9] J. Saleem, M. Adil Riaz, and M. Gordon, "Oil sorbents from plastic wastes and polymers: a review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 341, pp. 424–437, 2018, doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.07.072.
- [10] E. Chiellini, A. Corti, S. D'Antone, and R. Baciù, "Oxo-biodegradable carbon backbone polymers - oxidative degradation of polyethylene under accelerated test conditions," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 91, no. 11, pp. 2739–2747, 2006, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2006.03.022.
- [11] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband, and T. S. Galloway, "Microplastics as contaminants in the marine environment," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 62, no. 12, pp. 2588–2597, 2011, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
- [12] M. Rutkowska, A. Heimowska, K. Krasowska, and H. Janik, "Biodegradability of polyethylene starch blends in sea water," *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 11, no. 3, pp. 267–271, 2002.
- [13] V. P. Ranjan and S. Goel, "Degradation of low-density polyethylene film exposed to uv radiation in four environments," *J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste*, vol. 23, no. 4, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000453.
- [14] J. B. Palter, I. Marinov, J. L. Sarmiento, and N. Gruber, "Large-scale, persistent nutrient fronts of the world," *Handb. Environ. Chem.*, vol. 5, no. Part N, pp. 1–12, 2006, doi: 10.1007/698.
- [15] L. Cai, J. Wang, J. Peng, Z. Wu, and X. Tan, "Observation of the degradation of three types of plastic pellets exposed to uv irradiation in three different environments," *Sci. Total Environ.*, vol. 628–629, pp. 740–747, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.079.

- [16] Y. Hiejima, T. Kida, T. Igarashi, and K. Nitta, "Non-destructive detection of microscopic structural changes in polyethylene during photodegradation by raman spectroscopy," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 150, no. 4, pp. 67–72, 2018.
- [17] H. A. Abd El-Rehim, E. S. A. Hegazy, A. M. Ali, and A. M. Rabie, "Synergistic effect of combining uv-sunlight-soil burial treatment on the biodegradation rate of ldpe/starch blends," *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 163, no. 3, pp. 547–556, 2004, doi: 10.1016/j.jphotochem.2004.02.003.
- [18] Merel Kooi, E. Besseling, C. Kroeze, A. P. Wezel, V. Koelmans, and A. A., *Modeling the Fate and Transport of Plastic Debris in Freshwaters: Review and Guidance*. 2018.
- [19] T. S. Hebner and M. A. Maurer-Jones, "Characterizing microplastic size and morphology of photodegraded polymers placed in simulated moving water conditions," *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 22, no. 2, pp. 398–407, Feb. 2020, doi: 10.1039/c9em00475k.
- [20] F. A. Bottino, A. R. Cinquegrani, G. Di Pasquale, L. Leonardi, and A. Pollicino, "Chemical modifications, mechanical properties and surface photo-oxidation of films of polystyrene (ps)," *Polym. Test.*, vol. 23, no. 4, pp. 405–411, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.polymertesting.2003.10.001.
- [21] E. Yousif and R. Haddad, "Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene," *Springerplus*, vol. 2, no. 1, pp. 1–32, 2013, doi: 10.1186/2193-1801-2-398.
- [22] Y. K. Song, S. H. Hong, M. Jang, G. M. Han, S. W. Jung, and W. J. Shim, "Combined effects of uv exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 8, pp. 4368–4376, 2017, doi: 10.1021/acs.est.6b06155.