

Kajian Fragmentasi *Polypropylene* Akibat Radiasi Sinar Ultraviolet dan Kecepatan Aliran Air

Salsabila Sifa Susanto dan Yulinah Trihadiningrum

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

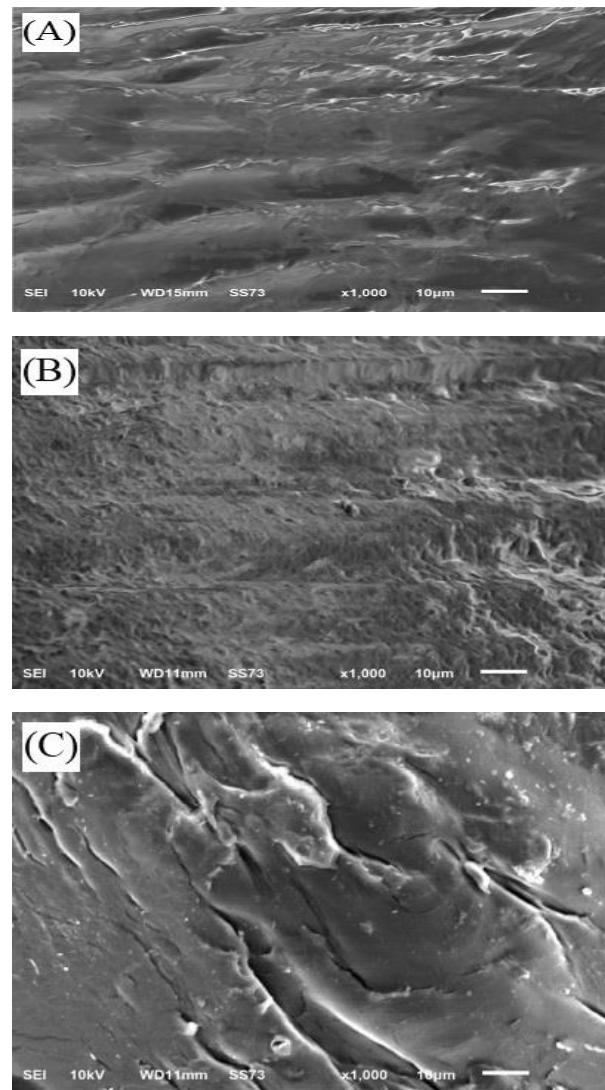
e-mail: trihadiningrum@gmail.com

Abstrak—Plastik jenis *polypropylene* (PP) yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari telah menyebabkan pencemaran mikroplastik (MP) di badan air. MP dapat dihasilkan dari fragmentasi PP akibat radiasi sinar ultraviolet (UV) dan degradasi secara mekanik. Degradasi secara mekanik dapat diakibatkan oleh kecepatan aliran air dengan maupun tanpa adanya sedimen. Keberadaan MP di lingkungan perairan dapat berpotensi bahaya bagi biota akuatik hingga manusia. Studi ini bertujuan untuk mengkaji mekanisme fragmentasi PP akibat radiasi sinar UV dan kecepatan aliran air. Sumber yang digunakan dalam kajian ini berasal dari berbagai literatur ilmiah. Mekanisme fragmentasi PP diawali dengan abstraksi atom hidrogen tersier pada rantai PP akibat keberadaan oksigen dan energi dari cahaya UV melalui proses fotooksidasi. Hasil akhir dari proses fotooksidasi tersebut yakni terbentuknya gugus karbonil dan hidroksil pada rantai PP. Kedua gugus tersebut tidak stabil dan menyebabkan PP menjadi rapuh. PP yang rapuh tersebut rentan mengalami fragmentasi akibat degradasi mekanik oleh kecepatan aliran air. Hasil fragmentasi PP dapat dilihat dari perubahan fisik, kimia, maupun mekaniknya. Perubahan fisik ditunjukkan dari retakan yang muncul pada permukaan PP serta dapat diamati dari jumlah partikel MP yang dihasilkan. Perubahan kimia berdasarkan hasil analisis FTIR ditunjukkan dari puncak gugus karbonil dan hidroksil baru yang muncul pada spektra FTIR. Sedangkan perubahan mekanik ditunjukkan dari perubahan kekuatan tensil dan elongasi PP.

Kata Kunci—Fragmentasi, Kecepatan Aliran Air, Mikroplastik, PP, Radiasi Sinar UV.

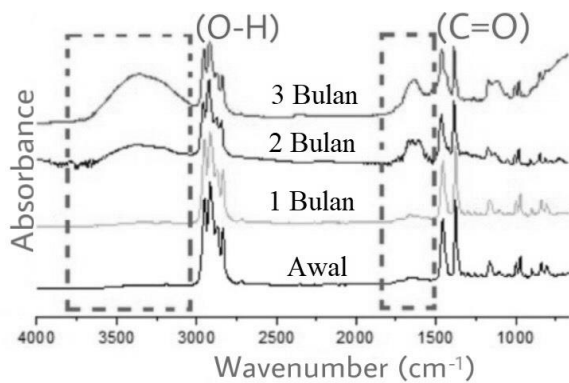
I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara penghasil sampah plastik terbesar kedua di dunia setelah China [1]. Polipropilena (PP) merupakan jenis plastik terbesar ketiga di Indonesia yang digunakan sebagai kemasan dengan persentase sebesar 19% [2]. Plastik berukuran kurang dari 5 mm disebut sebagai mikroplastik (MP) [3]. Kelimpahan MP telah ditemukan di Kali Surabaya dengan kelimpahan tertinggi pada Kecamatan Diriyorejo berada pada permukaan sungai sebanyak 13,33 partikel/m³. Sedangkan di Kecamatan Karang Pilang kelimpahan tertinggi berada pada setengah kedalaman sungai sebanyak 5,992 partikel/m³ [4]. PP dengan kelimpahan sebesar 18–41% merupakan jenis MP terbanyak kedua yang ditemukan di Kali Surabaya. MP berjenis PP tersebut banyak ditemukan di permukaan Kali Surabaya pada kedalaman 16–30 cm, serta banyak ditemukan dalam bentuk film [5]. MP berbentuk film berasal dari sumber sekunder yang dihasilkan dari proses degradasi plastik [6]. MP memiliki kemampuan untuk berikatan dengan polutan organik lainnya, sehingga akumulasi MP berpotensi membahayakan kehidupan biota akuatik hingga manusia [7]. MP dapat dihasilkan dari plastik

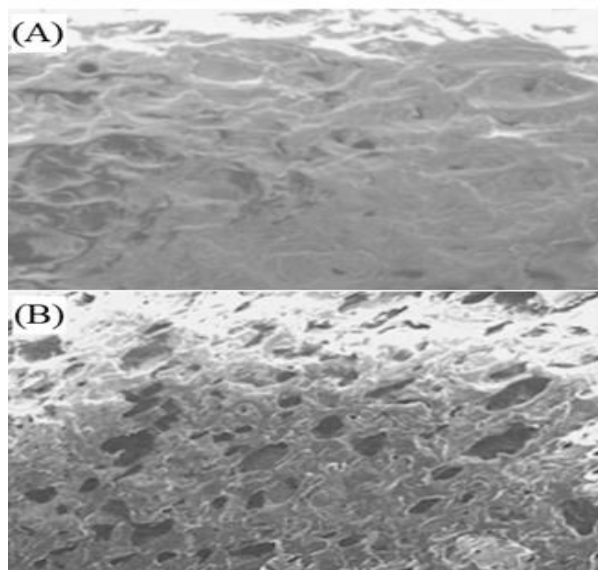


Gambar 1. Hasil analisis SEM *pellet* PP setelah (a) satu bulan; (b) dua bulan; (c) tiga bulan terpapar radiasi sinar.

yang mengalami degradasi akibat radiasi sinar ultraviolet (UV) dan degradasi secara mekanik [8]. Radiasi sinar UV dalam sinar matahari dapat mengakibatkan oksidasi pada matriks polimer yang menyebabkan pembelahan ikatan polimer [9]. PP setelah 3 bulan terpapar radiasi sinar UV mengalami keretakan serta terdapat serpihan pada bagian permukaannya [10]. Retakan dan serpihan tersebut merupakan hasil dari degradasi akibat radiasi sinar UV. Polimer dapat mengalami degradasi secara mekanik akibat gerakan air, angin, maupun abrasi oleh padatan [11]. Plastik akan semakin rentan mengalami fragmentasi akibat turbulensi aliran air [9]. Plastik yang memiliki retakan



Gambar 2. Hasil spektra FTIR *pellet* PP setelah tiga bulan terpapar radiasi sinar UV pada kondisi tanpa air.



Gambar 3. Hasil SEM PP+30% selulosa (a) sebelum dan (b) sesudah terpapar radiasi sinar UV selama 10 jam.

dan/atau serpihan pada permukaannya rentan mengalami fragmentasi lebih lanjut akibat adanya degradasi secara mekanik. Tujuan penulisan artikel ini adalah untuk mengkaji mekanisme fragmentasi PP akibat radiasi sinar UV dan kecepatan aliran air.

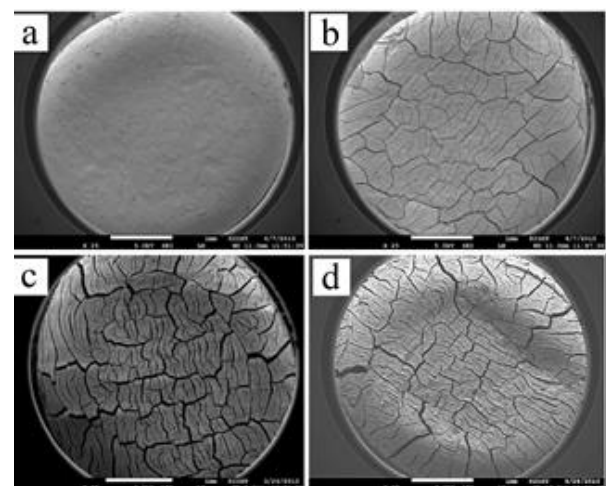
II. METODE STUDI

Pembahasan pada artikel ini disusun dari penelitian-penelitian yang dipublikasikan pada berbagai literatur ilmiah. Sumber literatur yang digunakan berasal dari jurnal nasional maupun internasional, buku, dan prosiding yang berkaitan dengan fragmentasi PP akibat radiasi sinar UV dan kecepatan aliran air. Pembahasan pertama mengenai mekanisme fragmentasi PP akibat radiasi sinar UV yang dibahas pada kondisi tanpa air, air murni, air laut buatan, dan tanah. Sedangkan pembahasan kedua mengenai degradasi PP akibat radiasi sinar UV dan kecepatan aliran dengan adanya sedimen dan tanpa adanya sedimen.

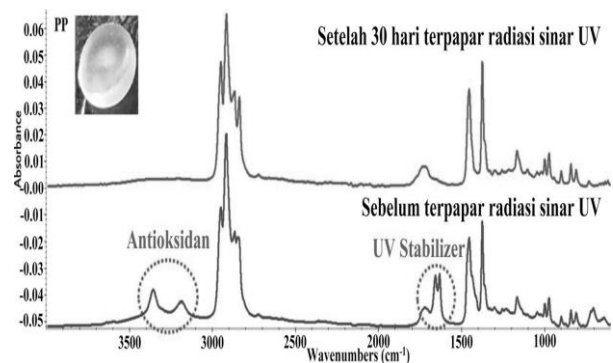
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Mekanisme Fragmentasi PP akibat Radiasi Sinar UV

Cai *et al.* membahas mengenai degradasi PP akibat radiasi sinar UV di tiga lingkungan berbeda, yaitu: kondisi tanpa air, air murni, dan air laut buatan. *Pellet* PP pada cawan petri dipapari lampu UVA-340 pada jarak 30 cm selama tiga bulan.



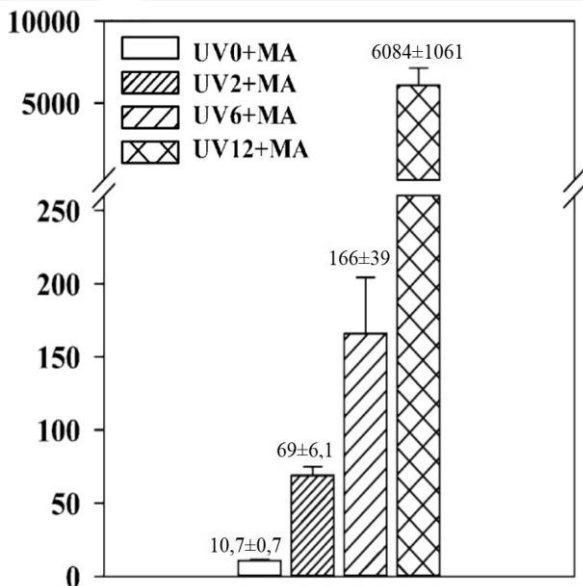
Gambar 4. Hasil SEM *pellet* PP setelah terpapar radiasi sinar UV selama (a) 0; (b) 2; (c) 6; dan 12 bulan.



Gambar 5. Hasil FTIR *pellet* PP setelah terpapar radiasi sinar UV selama 30 hari.

Perubahan fisik diamati dengan analisis *scanning electron microscope* (SEM) sedangkan perubahan kimia dengan analisis *fourier transform infrared* (FTIR) [10]. Setelah satu bulan terpapar radiasi sinar UV, *pellet* PP mengalami perubahan fisik berupa retakan dan serpihan yang muncul pada permukaan. Retakan dan serpihan yang dihasilkan meningkat jumlahnya seiring dengan lamanya paparan radiasi sinar UV. Gambar 1 menunjukkan hasil analisis SEM *pellet* PP setelah terpapar radiasi sinar UV pada kondisi tanpa air. Pada bulan pertama muncul retakan namun masih sedikit (Gambar 1A). Setelah dua bulan pemaparan terdapat retakan namun masih tipis disertai dengan serpihan (Gambar 1B). Pada bulan ketiga retakan yang dihasilkan semakin tebal dan jumlah serpihan semakin banyak (Gambar 1C). Pada kondisi tanpa air terjadi retakan paling tebal serta jumlah serpihan paling banyak dibandingkan pada dua kondisi lingkungan lainnya. Kondisi lingkungan yang menghasilkan retakan paling sedikit adalah pada kondisi air laut buatan.

Perubahan kimia pada *pellet* PP dilihat dari puncak absorpsi baru spektrum FTIR, yang terbentuk pada bilangan gelombang sekitar 3300 cm⁻¹ dan 1712 cm⁻¹. Bilangan gelombang 3300 cm⁻¹ mengindikasikan gugus hidroksil (O-H) sedangkan bilangan gelombang 1712 cm⁻¹ mengindikasikan gugus karbonil (C=O) [12]. Gambar 2 merupakan hasil analisis FTIR *pellet* PP setelah tiga bulan terpapar radiasi sinar UV pada kondisi tanpa air. Puncak absorpsi yang dihasilkan meningkat seiring dengan lamanya paparan radiasi sinar UV. Nilai puncak absorpsi gugus O-H pada bulan pertama, kedua, dan ketiga berturut-turut adalah sebesar 0,006, 0,03, dan 0,06. Sedangkan nilai puncak



Gambar 6. Jumlah fragmen yang dihasilkan setelah 0, 2, 6, dan 12 bulan terpapar radiasi sinar UV dan 2 bulan MA.

Tabel 1.

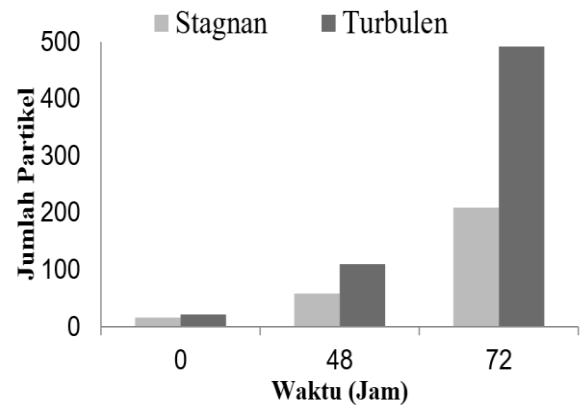
Persen volume *pellet* PP setelah terpapar radiasi sinar UV selama 0, 2, 6, dan 12 bulan diikuti dengan 2 bulan MA

Perlakuan	Volume <i>Pellet</i> PP Induk (%)	Volume Fragmen yang Terhitung (%)	Volume Partikel yang Tidak Terhitung (%)
Awal	100	0	0
UV 0 bulan + 2 bulan MA	98	0,4	1,6
UV 2 bulan + 2 bulan MA	96	-	4,2
UV 6 bulan + 2 bulan MA	81	1,2	17,8
UV 12 bulan + 2 bulan MA	81	2,1	16,9

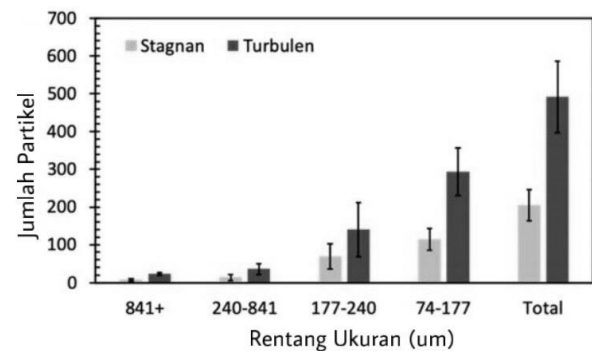
absorpsi gugus C=O pada bulan pertama, kedua, dan ketiga berturut-turut adalah sebesar 0,016, 0,038, dan 0,046. Puncak absorpsi pada kondisi tanpa air memiliki nilai paling tinggi daripada kondisi lainnya. Sedangkan puncak absorpsi paling rendah dihasilkan pada kondisi air laut buatan, yang hanya muncul pada bilangan gelombang 1712 cm⁻¹.

Kondisi lingkungan tanpa air menyebabkan *pellet* PP menerima paparan oksigen dan UV paling maksimum daripada dua kondisi lainnya. Hal tersebut mengakibatkan *pellet* PP mengalami tingkat degradasi yang paling tinggi. Tingkat degradasi *pellet* PP paling rendah berada pada kondisi air laut buatan. Paparan UV yang diterima oleh *pellet* PP pada air laut buatan lebih rendah dibandingkan pada kondisi tanpa air dan kondisi air murni. Hal ini dikarenakan indeks bias air meningkat seiring dengan tingkat salinitasnya [13].

Mekanisme degradasi *pellet* PP diawali dengan energi dari radiasi sinar UV yang dapat memotong ikatan C-C (375 kJ/mol) dan ikatan C-H (420 kJ/mol). Selain itu, reaksi kimia yang diinisiasi oleh radiasi sinar UV juga terjadi pada beberapa kelompok kromofor yang mengandung monomer (C=C), gugus karbonil, dan hidroperoksida [14]. Reaksi kimia tersebut menghasilkan radikal bebas yang pada akhirnya membentuk gugus karbonil (C=O) dan hidroksil (O-H) pada rantai PP setelah mengalami fotooksidasi. Gugus O-



Gambar 7. MP yang dihasilkan setelah terpapar radiasi sinar UV selama 0, 48, dan 72 jam pada kondisi aliran stagnan dan turbulen selama 7 hari.



Gambar 8. Jumlah partikel MP yang dihasilkan setelah terpapar radiasi sinar UV selama 72 jam pada kondisi aliran air stagnan dan turbulen selama 7 hari.

H terbentuk sebagai gugus hidroperoksida, alkohol, dan asam karboksilat dalam rantai PP [15]. Hidroperoksida merupakan produk pertama yang terbentuk pada proses fotooksidasi. Senyawa tersebut tidak stabil serta akan terurai dan membentuk senyawa karbonil. Konsentrasi C=O dan O-H yang dihasilkan merupakan indikator degradasi yang berhubungan dengan lamanya waktu paparan UV [16]. Lama waktu paparan radiasi sinar UV merupakan salah satu faktor penting dari proses degradasi. Serpihan dan retakan yang dihasilkan cenderung akan mengalami fragmentasi lebih lanjut di lingkungan hingga menghasilkan MP dan nanoplastik.

Kaczmarek *et al.* melakukan penelitian serupa pada lingkungan tanah [17]. Tujuan dari penelitian tersebut adalah mempelajari pengaruh reaksi fotokimia terhadap biodegradasi pada komposisi campuran PP. Material PP yang digunakan dicampur dengan selulosa dengan kadar 5–30%. Material uji dipaparkan UV selama 10 jam kemudian dilanjutkan dengan menguburkannya dalam tanah dengan kedalaman 10 cm selama 6 bulan. Lampu UV yang digunakan adalah lampu Philip TUV 30W dengan panjang gelombang 254 nm dan intensitas sebesar 3,5 mW/cm². Energi total radiasi sinar UV yang dipancarkan adalah sebesar 25,2 kJ. Mekanisme fragmentasinya diamati dari perubahan fisik, kimia, dan mekaniknya.

Perubahan fisik yang terjadi setelah terpapar radiasi sinar UV selama 10 jam yakni munculnya lubang-lubang berukuran 10-200 μm pada permukaan PP (Gambar 3). Hal tersebut juga terjadi pada permukaan PP setelah terpapar radiasi sinar UV diikuti dengan biodegradasi selama 6 bulan.

Lubang-lubang paling banyak dihasilkan pada PP dengan 30% campuran selulosa. Kerusakan pada permukaan PP tersebut mengindikasikan terjadinya proses degradasi.

Perubahan kimia pada PP+30% selulosa setelah biodegradasi selama 6 bulan, berdasarkan hasil analisis FTIR, yakni dihasilkannya gugus O-H dan C=O. Puncak absorpsi gugus O-H muncul pada bilangan gelombang 3000-3500 cm^{-1} sedangkan gugus C=O pada bilangan gelombang 1500-1700 cm^{-1} . Hasil tersebut tidak berbeda jauh dengan hasil FTIR PP+30% selulosa yang mengalami biodegradasi dengan paparan radiasi sinar UV sebelumnya. Perubahan mekanik ditinjau dari kekuatan tensil dan elongasinya. PP murni atau PP+0% selulosa setelah terpapar radiasi sinar UV mengalami penurunan kekuatan tensil sekitar 5%. Sedangkan penurunan kekuatan elongasinya adalah sebesar 53–58%. Penurunan sifat mekanik ini diakibatkan oleh perubahan pada kristalinitas serta pemotongan rantai akibat radiasi sinar UV, sehingga menyebabkan meningkatnya konsentrasi tegangan polimer [18].

B. Mekanisme Fragmentasi PP akibat Radiasi Sinar UV dan Kecepatan Aliran Air (Dengan Adanya Pengaruh Sedimen)

Di lingkungan laut, kecepatan aliran air disebabkan oleh perbedaan densitas air laut, pasang surut, dan tiupan angin yang menghasilkan gerakan ombak [19]. Kecepatan aliran air tersebut membawa pasir/batuan yang dapat menyebabkan abrasi pada PP, yang dapat diikuti dengan terjadinya proses degradasi secara mekanik [20]. Song *et al.* melakukan penelitian mengenai fragmentasi pada *pellet* PP akibat radiasi sinar UV dan *mechanical abrasion* (MA) [21]. *Pellet* PP yang digunakan masing-masing berjumlah sepuluh buah dengan volume $19 \pm 0,9 \text{ mm}^3$. *Pellet* PP tersebut mengandung zat aditif berupa antioksidan dan UV *stabilizer*. Radiasi sinar UV berasal dari *metal halide lamp* dengan kandungan UV-A ($11,01 \text{ W/m}^2$), UV-B ($0,12 \text{ W/m}^2$), dan UV-C ($0,04 \text{ W/m}^2$). Temperatur reaktor UV tersebut adalah sebesar 43–45°C. Simulasi MA dilakukan dengan menggunakan pasir pantai sebanyak 50 g yang telah dibersihkan dari pengotor. *Pellet* PP bersama pasir tersebut dimasukkan ke dalam *amber bottle* berukuran 60 mL, yang kemudian dirotasi dengan *roller mixer* dengan kecepatan 37 rpm. Pemaparan radiasi sinar UV dilakukan selama 12 bulan sedangkan MA selama 2 bulan. Hasil analisis dilihat dari perubahan fisiknya berupa keretakan pada permukaan PP serta jumlah fragmen yang dihasilkan *pellet* PP setelah eksperimen.

Berdasarkan dari hasil analisis SEM dengan perbesaran 25x (Gambar 4), *pellet* PP mulai mengalami keretakan pada permukaannya setelah terpapar radiasi sinar UV selama 2 bulan (Gambar 4b). Setelah 6 bulan terpapar radiasi sinar UV retakkan yang dihasilkan semakin tebal dan terhubung (Gambar 4c). Retakkan paling tebal ditemukan pada *pellet* PP yang terpapar radiasi sinar UV selama 12 bulan (Gambar 4d). Keretakan yang dihasilkan pada *pellet* PP tersebut semakin parah seiring dengan lamanya paparan radiasi sinar UV. Hal tersebut menunjukkan bahwa radiasi sinar UV berperan penting dalam menyebabkan kerapuhan pada permukaan *pellet* PP.

Perubahan kimia *pellet* PP setelah terpapar radiasi sinar UV diamati berdasarkan hasil analisis FTIR (Gambar 5). Zat aditif pada *pellet* PP berupa antioksidan terdeteksi pada

spektra FTIR di bilangan gelombang sekitar 3100–3400 cm^{-1} . Sedangkan zat aditif berupa UV *stabilizer* terdeteksi pada bilangan gelombang sekitar 1500–1800 cm^{-1} . Keberadaan zat aditif tersebut menghambat terjadinya proses fotodegradasi [22]. Kandungan zat aditif pada *pellet* PP hilang setelah terpapar radiasi sinar UV selama 1 bulan. Hal tersebut ditunjukkan dari hilangnya puncak pada bilangan gelombang zat aditif. Sehingga *pellet* PP mulai mengalami fotodegradasi secara efektif setelah satu bulan terpapar radiasi sinar UV. Hal tersebut yang mengakibatkan retakan pada permukaan *pellet* PP mulai muncul setelah dua bulan terpapar radiasi sinar UV.

Pellet PP yang telah rapuh akibat terpapar radiasi sinar UV kemudian mengalami degradasi secara mekanik akibat MA oleh pasir. Hal tersebut mengakibatkan *pellet* PP mengalami fragmentasi yang ditunjukkan dari fragmen-fragmen baru yang dihasilkan. Jumlah fragmen yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 6. Fragmen-fragmen yang dihasilkan jumlahnya meningkat seiring dengan lamanya waktu paparan radiasi sinar UV diikuti dengan MA. Jumlah fragmen yang dihasilkan setelah terpapar radiasi sinar UV selama 0, 2, 6, 12 bulan dan 2 bulan MA berturut-turut adalah sebesar $10,7 \pm 0,7$, $69 \pm 6,1$, 166 ± 39 , dan 6084 ± 1061 partikel/*pellet*.

Fragmentasi *pellet* PP juga diamati dari perubahan volume *pellet* PP. Volume total *pellet* PP dihitung dari volume *pellet* PP induk yang terfragmentasi ditambah dengan total volume fragmen yang terbentuk. Volume induk didapatkan dari diameter rata-ratanya. Sedangkan volume fragmen didapatkan dari asumsi semua partikel yang terbentuk dengan ukuran diameter yang masuk ke dalam kategori ukuran yang dihitung. Ukuran fragmen yang dihitung berada pada rentang 50–1000 μm .

Pellet PP mengalami penurunan volume hingga 2% dan menghasilkan fragmen dengan volume total sebesar 0,4% setelah perlakuan MA selama 2 bulan. Penurunan volume *pellet* PP setelah terpapar radiasi sinar UV selama 2 bulan diikuti dengan MA selama 2 bulan adalah sebesar 4%. Fragmen yang dihasilkan pada perlakuan tersebut memiliki ukuran yang tidak masuk ke dalam kategori. Setelah terpapar radiasi sinar UV selama 6 bulan diikuti dengan MA selama 2 bulan, volume *pellet* PP menurun hingga 19%. Persen penurunan tersebut juga sama dengan *pellet* PP yang terpapar radiasi sinar UV selama 12 bulan dan MA selama 2 bulan. Perbedaan dari kedua perlakuan tersebut terletak pada persen volume total fragmen yang dihitung. Persen volume total fragmen terhitung yang dihasilkan setelah terpapar radiasi sinar UV selama 6 bulan + 2 bulan MA adalah sebesar 1,2%. Sedangkan volume total fragmen terhitung yang dihasilkan setelah terpapar radiasi sinar UV selama 12 bulan + 2 bulan MA adalah sebesar 2,1%.

C. Mekanisme Fragmentasi PP akibat Radiasi Sinar UV dan Kecepatan Aliran Air (Tanpa Adanya Pengaruh Sedimen)

Berdasarkan rumus bilangan Reynold, kecepatan aliran air merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi turbulen atau tidaknya suatu aliran [23]. Turbulensi aliran air dapat mengakibatkan *hydro-abrasion* [24] serta meningkatkan kadar oksigen dalam air [25]. Ketersediaan oksigen merupakan salah satu syarat terjadinya proses fotooksidasi [22]. Sehingga kondisi aliran air yang turbulen dapat

mempercepat terjadinya fragmentasi pada PP. Hebnner dan Maurer-Jones melakukan penelitian mengenai fragmentasi PP akibat radiasi sinar UV dan turbulensi aliran air [11]. Material PP yang digunakan merupakan PP murni (tanpa *UV stabilizer*) berbentuk film dengan ketebalan 0,025 mm. Lampu UV dengan panjang gelombang 254 nm dan intensitas sebesar 2,52 W/m² dipaparkan pada PP selama 72 jam. Selanjutnya PP tersebut diberi perlakuan mekanik dengan aliran turbulen dengan kecepatan 0,13 m/detik selama 7 hari. PP tersebut juga diuji pada aliran stagnan sebagai pembandingan.

Gambar 7 menunjukkan grafik perbandingan MP yang dihasilkan setelah terpapar radiasi sinar UV pada aliran stagnan dan turbulen. MP yang dihasilkan setelah 0 jam terpapar UV adalah sebanyak 16 partikel pada aliran stagnan dan 22 partikel pada aliran turbulen. Pemaparan selama 48 jam dengan kondisi aliran stagnan menghasilkan MP sebanyak 58 partikel sedangkan pada aliran turbulen sebanyak 110 partikel. Pemaparan UV selama 72 jam pada kondisi aliran air turbulen menghasilkan MP yang paling banyak. Pada aliran stagnan MP yang dihasilkan adalah sebanyak 209 partikel sedangkan pada aliran turbulen adalah sebanyak 492 partikel.

Pada kondisi aliran stagnan, peningkatan jumlah MP dari 0 hingga 48 jam dan 48 hingga 72 jam pemaparan sinar UV masing-masing adalah sebesar 42 dan 151 partikel. Sedangkan pada kondisi aliran turbulen, peningkatan jumlah MP-nya masing-masing adalah sebesar 88 dan 382 partikel. Peningkatan jumlah MP yang dihasilkan akibat kondisi alirannya setelah 0, 48, dan 72 jam pemaparan sinar UV, masing-masing adalah sebesar 6, 52, dan 283 partikel. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin lama paparan radiasi sinar UV maka semakin banyak MP yang terbentuk. Selain itu turbulensi aliran air juga mempengaruhi banyaknya MP yang terbentuk.

Fragmentasi MP diamati lebih lanjut pada ukuran MP yang dihasilkan setelah terpapar radiasi sinar UV selama 72 jam (Gambar 8). MP yang dihitung merupakan MP dengan ukuran yang masuk ke dalam empat kategori yang telah ditentukan. Keempat kategori ukuran tersebut diantaranya adalah 74–177, 177–240, 240–841, dan >841 μm . MP berukuran 74–177 μm pada aliran turbulen dihasilkan sebanyak 293 partikel, sedangkan pada aliran stagnan sebanyak 106 partikel. MP dengan ukuran 177–240 μm pada aliran turbulen berjumlah 140 partikel sedangkan pada aliran stagnan terdapat 75 partikel. MP berukuran 240–841 μm pada aliran turbulen dihasilkan sebanyak 36 partikel, sedangkan pada aliran stagnan adalah sebanyak 19 partikel. MP dengan ukuran >841 μm pada aliran turbulen dihasilkan sebanyak 23 partikel, sedangkan pada aliran stagnan terdapat 9 partikel. MP yang paling banyak dihasilkan berada pada rentang ukuran paling kecil (74–177 μm). Ukuran MP yang semakin kecil memiliki luas permukaan yang semakin besar, sehingga kemungkinan bahan kimia yang dapat diabsorpsi oleh MP juga semakin besar [26].

Mekanisme degradasi secara mekanik tidak seperti mekanisme degradasi lainnya seperti fotodegradasi dan biodegradasi yang menghasilkan kerusakan pada ikatan kimia tertentu. Mekanisme degradasi secara mekanik diawali dengan perubahan serta rapuhnya sifat mekanik material akibat proses degradasi oksidatif atau hidrolisis hingga

menghasilkan MP [20]. Material yang rapuh tersebut dapat terfragmentasi menjadi MP akibat kekuatan mekanik seperti abrasi oleh pasir dan aliran air yang turbulen [11]. Sehingga, degradasi secara mekanik ini dapat terjadi apabila PP sebelumnya mengalami fotooksidasi yang merupakan inisiator proses degradasi [27].

IV. KESIMPULAN

Radiasi sinar UV serta keberadaan oksigen dapat mengakibatkan terjadinya proses fotooksidasi pada PP. Energi pada UV mengakibatkan pemutusan ikatan pada rantai PP hingga membentuk gugus hidroksil (O-H) dan karbonil (C=O). Kedua gugus tersebut merupakan indikator terjadinya degradasi karena sifatnya yang tidak stabil dan reaktif, sehingga menyebabkan permukaan PP menjadi rapuh. Keretakan dan serpihan pada permukaan PP serta perubahan kekuatan tensil dan elongasinya menunjukkan kerapuhan yang terjadi pada PP. PP yang rapuh rentan mengalami fragmentasi lebih lanjut akibat degradasi secara mekanik. Kecepatan aliran air dapat mengakibatkan degradasi secara mekanik pada PP. Kecepatan aliran air tersebut dapat mengakibatkan fragmentasi PP akibat dari abrasi oleh sedimen. Selain itu kecepatan aliran air yang tinggi menyebabkan aliran air menjadi turbulen. Turbulensi aliran air juga mengakibatkan terjadinya fragmentasi pada PP. Fragmentasi pada PP dapat dilihat dari fragmen-fragmen baru yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. R. Jambeck *et al.*, "Plastic waste inputs from land into the ocean.," *Science* (80-.), vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, Feb. 2015, doi: 10.1126/science.1260352.
- [2] Y. A. Hidayat, S. Kiranamahsa, and M. A. Zamal, "A study of plastic waste management effectiveness in indonesia industries.," *AIMS Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 350–370, 2019, doi: 10.3934/ENERGY.2019.3.350.
- [3] M. Wagner *et al.*, "Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know.," *Environ. Sci. Eur.*, vol. 26, no. 12, pp. 29–30, 2014, doi: 10.1016/0163-8343(83)90040-3.
- [4] Y. Wajaya, Bagas Ari; Trihadiningrum, "Pencemaran meso- dan mikroplastik di kali surabaya pada segmen dryorejo hingga karang pilang.," vol. 8, no. 2, pp. 2–7, 2019.
- [5] 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.
- [6] S. Fitri and M. P. Patria, "Microplastic contamination on anadara granosa linnaeus 1758 in pangkal babu mangrove forest area, tanjung jabung barat district, jambi.," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1282, no. 1, p. 12109, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1282/1/012109.
- [7] D. Yona, S. H. J. Sari, F. Iranawati, S. Bachri, and W. C. Ayuningtyas, "Microplastics in the surface sediments from the eastern waters of java sea, indonesia.," *F1000Research*, vol. 8, no. May, pp. 1–14, 2019, doi: 10.12688/f1000research.17103.1.
- [8] M. R. Cordova and A. J. Wahyudi, "Microplastic in the deep-sea sediment of southwestern sumatran waters.," *Mar. Res. Indones.*, vol. 41, no. 1, pp. 27–35, 2016, doi: 10.14203/mri.v41i1.99.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] T. S. Hebnner 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.

- [12] S. A. Khan, S. B. Khan, L. U. Khan, A. Farooq, K. Akhtar, and A. M. Asiri, "Fourier transform infrared spectroscopy: fundamentals and application in functional groups and nanomaterials characterization," *Handb. Mater. Charact.*, pp. 317–344, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-92955-2_9.
- [13] X. Quan and E. S. Fry, "Empirical equation for the index of refraction of seawater," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 18, p. 3477, 1995, doi: 10.1364/ao.34.003477.
- [14] B. Singh and N. Sharma, "Mechanistic implications of plastic degradation," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, no. 3, pp. 561–584, 2008, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008.
- [15] K. Rajakumar, V. Sarasvathy, A. thamarai chelvan, r. chitra, and c. t. vijayakumar, "natural weathering studies of polypropylene," *J. Polym. Environ.*, vol. 17, no. 3, pp. 191–202, 2009, doi: 10.1007/s10924-009-0138-7.
- [16] C. T. Vijayakumar, R. Chitra, R. Surender, G. Pitchaimari, and K. Rajakumar, "Development of photodegradable environment," *Plast. Polym. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 22–37, 2013.
- [17] H. Kaczmarek, D. Ołdak, P. Malanowski, and H. Chaberska, "Effect of short wavelength uv-irradiation on ageing of polypropylene/cellulose compositions," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 88, no. 2, pp. 189–198, May 2005, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.04.017.
- [18] J. Jin, S. Chen, and J. Zhang, "Uv aging behaviour of ethylene-vinyl acetate copolymers (eva) with different vinyl acetate contents," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 95, no. 5, pp. 725–732, 2010, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.02.020.
- [19] M. Minipile, D. I. Kawasan, and P. Parangtritis, "Studi drag force gelombang air laut terhadap fondasi tiang mini (miniple) di kawasan pantai parangtritis," *J. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 28–35, 2015.
- [20] M. Andy M. Booth, Stephan Kubowicz, CJ Beegle-Krause, Jørgen Skancke, Tor Nordam, Eva Landsem and S. J. Throne-Holst, "Microplastic in global and norwegian marine environments: distributions, degradation mechanisms and transport," 2018.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] M. H. Chaudhry, *Open-Channel Flow*, 2nd ed. New York: Springer Science & Business Media, 2007.
- [24] D. Demiral, "Mean and turbulent flow characteristics in supercritical narrow open channel flows," in *Effect of Froude Number*, 38th International Association of Hydro-Environmental Engineering and Research World Congress (IAHR), 2019, pp. 0–11.
- [25] T. J. Suhrhoff and B. M. Scholz-Böttcher, "Qualitative impact of salinity, uv radiation and turbulence on leaching of organic plastic additives from four common plastics – a lab experiment," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 102, no. 1, pp. 84–94, 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.11.054.
- [26] O. S. Alimi, J. Farner Budarz, L. M. Hernandez, and N. Tufenkji, "Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 4, pp. 1704–1724, 2018, doi: 10.1021/acs.est.7b05559.
- [27] S. Klein, I. K. Dimzon, J. Eubeler, and T. P. Knepper, *Analysis, occurrence, and degradation of microplastics in the aqueous environment*. 2018.