



Karakterisasi Parameter Polutan dan Remediasi *Palm Oil Mill Effluent* (POME) menggunakan Busa Komposit PMHS/CNDs

Rohimatush Shofiyah^{1*}, Senki Desta Galuh², Lukman Atmaja³, Sevira Ayu Andini¹, Anastasya Nurrahmi⁴

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jember, Jawa Timur 68121

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jember, Jawa Timur 68121

³Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur 60111

⁴Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jember, Jawa Timur 68121

*Korespondensi: rshofiyah@unmuhjember.ac.id

Abstrak. Limbah cair pabrik kelapa sawit atau Palm Oil Mill Effluent (POME) memiliki kandungan organik tinggi yang berpotensi mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas busa komposit PMHS/CNDs dalam meremediasi kualitas limbah POME melalui uji parameter fisika, kimia, biologis, serta analisis FTIR. Hasil uji menunjukkan bahwa sebelum remediasi, parameter BOD (164 mg/L) dan COD (410,5 mg/L) melebihi baku mutu, sedangkan pH, TSS, Total N, serta minyak dan lemak masih sesuai standar. Setelah remediasi, BOD dan COD berhasil turun signifikan menjadi 72,5 mg/L dan 181,2 mg/L, keduanya berada di bawah baku mutu. Rasio BOD/COD sebesar 0,40 menunjukkan limbah tetap biodegradable. Nilai TSS (18,7 mg/L) dan minyak & lemak (2,03 mg/L) sangat rendah, menandakan efektivitas komposit dalam menyaring partikel dan senyawa hidrofobik. Analisis FTIR menunjukkan bahwa sebelum remediasi terdapat gugus khas backbone siloksan (Si–O–Si, Si–H, Si–CH₃) dengan sifat hidrofobik dan oleofilik kuat. Setelah remediasi, muncul pita baru (1544 cm⁻¹ dan 1629 cm⁻¹) serta O–H (3277 cm⁻¹), yang mengindikasikan adsorpsi senyawa organik dari POME. Peningkatan intensitas Si–O–Si dan dominasi gugus Si–CH₃ membuktikan struktur komposit tetap stabil. Secara keseluruhan, busa komposit PMHS/CNDs terbukti efektif dalam remediasi POME dan berpotensi diaplikasikan pada pengolahan limbah sawit berkelanjutan.

Kata Kunci: busa komposit, PMHS/CNDs, polutan, POME, remediasi

1. PENDAHULUAN

Palm Oil Mill Effluent (POME) merupakan limbah cair hasil proses pengolahan kelapa sawit yang mengandung beragam partikel padat tersuspensi. Jika, dibandingkan limbah domestik, tingkat pencemaran POME mencapai seratus kali lebih tinggi, ditandai dengan nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang sangat besar. Selain itu, POME juga memiliki kadar nitrogen organik, fosfor, dan berbagai senyawa lainnya dalam konsentrasi yang relatif tinggi (Lei dkk., 2019). Pembuangan POME tanpa melalui proses pengolahan yang memadai berpotensi menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan.

Berbagai teknik pengolahan—baik secara biologi, fisika, maupun kimia—telah dilaporkan untuk menurunkan pencemar dalam POME, namun hanya sebagian kecil yang diterapkan secara luas di industri (Li dkk., 2022). Seiring perkembangan penelitian, muncul berbagai metode non-konvensional yang lebih ekonomis, salah satunya memanfaatkan mikroorganisme, sebagai alternatif pengolahan limbah tersebut (Osicka dkk., 2018).

Secara umum, pendekatan non-konvensional dapat dikategorikan dalam lima jalur utama: (1) biologis, melalui biokonversi dan biodegradasi aerob maupun anaerob; (2) fisik, seperti flotasi dan filtrasi membran; (3) kimia, misalnya oksidasi Fenton; (4) fisikokimia, meliputi foto-oksidasi, evaporasi, koagulasi–flokulasi, adsorpsi, serta ultrasonikasi; dan (5) bioelektrokimia, misalnya sel bahan bakar mikroba (Permana dkk., 2024).

Pada penelitian ini dipilih metode non-konvensional berupa pemanfaatan material berbentuk busa yang bersifat hidrofobik untuk menyerap komponen pencemar utama dalam POME, yakni minyak dan lemak. Material tersebut disintesis dengan menginkorporasikan karbon nanodots (CNDs) ke dalam matriks Polimetilhidroksilan (PMHS), sehingga terbentuk struktur busa berpori yang bersifat hidrofobik, disebut PMHS/CNDs. Agar mampu menyerap molekul minyak dan lemak secara optimal, pembentukan material ini memerlukan pengendalian parameter fisikokimia dalam kondisi reaksi tertentu.

Tujuan penelitian ini adalah: 1) menganalisis parameter utama polutan dalam limbah cair POME (COD, BOD, pH, TSS, minyak-lemak, dan nutrien); 2) memperbaiki atau menurunkan kadar polutan dalam POME melalui metode remediasi menggunakan media penyerap busa polimer komposit PMHS/CNDs; 3) mengidentifikasi perubahan gugus fungsi kimia pada struktur PMHS/CNDs sebelum dan sesudah proses remediasi POME.

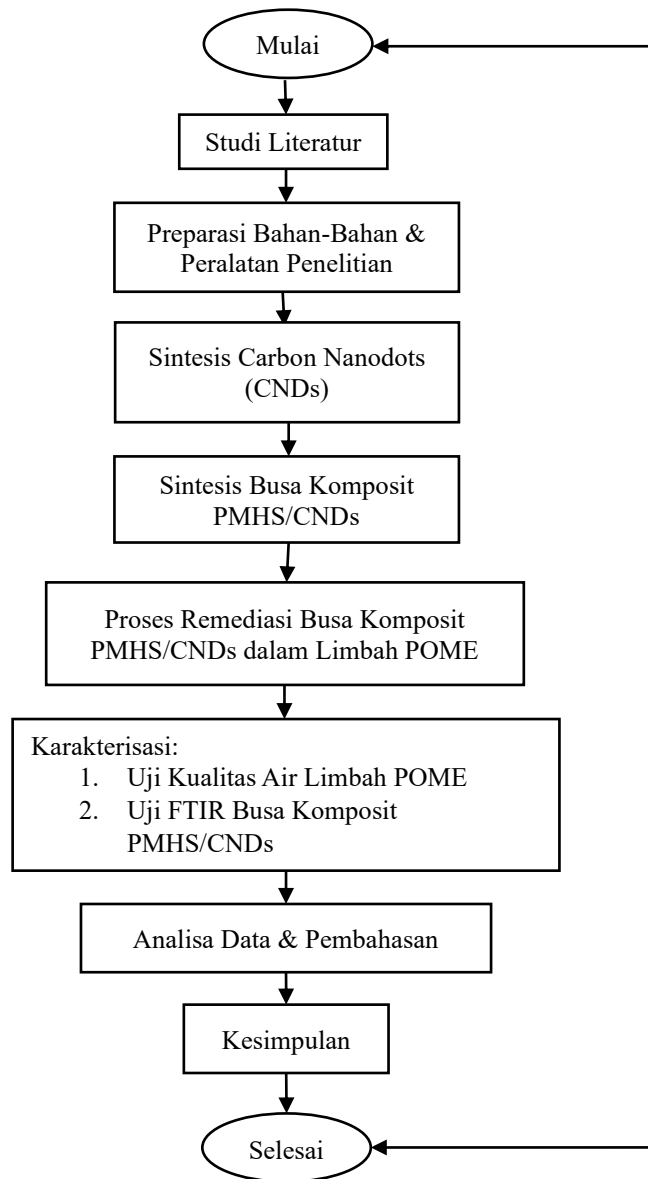
2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME) yang berasal dari proses pengolahan kelapa sawit di pabrik kelapa sawit Sulawesi Tenggara, kertas bekas, H_2SO_4 , NaOH 2 M, Benzoin Klorida, Diphenyl Glyoxal Peroxide (DGP) Triethylamine, Tetrahydrofuran, Etanol, Aseton, Toluena, Polyethylene Glycol (PEG), gula merah, Carbon Nanodots (CND), Polimetilhidroksilan (PMHS), aquades, dan bahan lainnya. Alat-alat yang digunakan dalam penelitian adalah hot plate, oven, magnetic stirrer, furnace, beaker glass, spatula, gelas ukur, neraca digital, alat penyangga busa komposit, corong, alat penyaring, kertas saring, dan botol plastik.

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memperoleh dasar teori, dilanjutkan dengan preparasi bahan dan peralatan. Tahap berikutnya adalah sintesis carbon nanodots (CNDs) serta sintesis busa komposit PMHS/CNDs. Material yang dihasilkan kemudian diaplikasikan dalam proses remediasi limbah POME. Selanjutnya dilakukan karakterisasi, meliputi uji kualitas air limbah POME dan uji FTIR busa komposit. Data yang diperoleh dianalisis pada tahap analisa dan pembahasan, hingga akhirnya ditarik kesimpulan mengenai efektivitas remediasi. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk mengkarakterisasi parameter polutan pada Palm Oil Mill Effluent (POME), dan mengevaluasi efektivitas remediasi menggunakan busa komposit PMHS/CNDs. Tahapan penelitian meliputi: 1) pengambilan sampel POME, yang dilakukan secara komposit pada outlet kolam limbah pabrik kelapa sawit Sulawesi Tenggara, 2) karakterisasi polutan awal, meliputi parameter COD, BOD, TSS, pH, suhu, minyak dan lemak, serta menggunakan metode spektrofotometri dan gravimetri, 3) sintesis dan preparasi busa komposit PMHS/CNDs, yang dilakukan melalui proses sintesis filler *carbon nanodots* (CND) untuk menghasilkan material berpori dengan luas permukaan tinggi, 4) uji remediasi, dengan mengontakkan busa komposit ke dalam sampel POME dalam variasi waktu kontak dan dosis adsorben, kemudian dianalisis efisiensi

penurunan parameter polutan; dan 5) analisis data, yang dilakukan dengan menghitung persentase penurunan konsentrasi polutan, serta membandingkan efektivitas busa komposit dengan standar baku mutu limbah cair industri kelapa sawit berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014.

2.2.1 Tahap I

Sintesis *carbon nanodots* (CNDs) dilakukan melalui metode *top-down* dengan memanfaatkan kertas bekas sebagai sumber karbon. Kertas bekas dipotong kecil-kecil lalu ditimbang sebanyak 5 gram dan ditambahkan H_2SO_4 . Setelah itu, pH larutan disesuaikan dengan penambahan NaOH 2 M, kemudian campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga kertas berubah menjadi bubur. Selanjutnya, campuran ditambah urea sebanyak 1–4 gram, waktu sintesis 20–50 menit, dan suhu 150–300°C. Pada variasi urea dan waktu, suhu dikontrol pada 300°C. Pada variasi waktu dan suhu, urea dikontrol pada 3 gram. Pada variasi urea dan suhu, waktu dikontrol selama 30 menit (Fadllan, Andi, dkk., 2016). Proses reaksi hidrotermal dilakukan pada suhu 220 °C selama 12 jam. Hasil campuran selanjutnya disaring untuk memperoleh filtrat. CNDs yang diperoleh berwarna hitam pekat, lalu diencerkan hingga warnanya berubah menjadi kuning bening. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya mengenai sintesis CNDs berbasis prekursor selulosa (Permana dkk., 2024) dan urea (Rahmayanti dkk., 2015).

2.2.2 Tahap II

Sintesis *carbon nanodots* (CNDs) dilakukan melalui metode *top-down* dengan memanfaatkan kertas bekas sebagai Sintesis busa komposit PMHS/CNDs dilakukan melalui tahap preparasi PMHS/CNDs (Polidimetilsiloksan / Carbon Nanodots). Pada tahap ini, CNDs diinkorporasikan ke dalam matriks polimer PMHS melalui metode modifikasi permukaan (Suhail, B., et.al., 2022). Proses tersebut menghasilkan komposit PMHS/CNDs berbentuk busa dengan sifat hidrofobik.

2.2.3 Tahap III

Proses preparasi perlakuan limbah POME 1 (melalui treatment) dan POME 2 (tanpa treatment) terhadap busa komposit PMHS/CNDs. Proses remediasi busa komposit PMHS/CNDs dalam limbah POME 1 dan 2 melalui mekanisme adsorpsi selama 24 jam. Setiap 1 cm³ busa direndam ke dalam 200 mL POME. Busa yang digunakan berulang dua kali pada 200 mL limbah selama 2×24 jam mengalami kerusakan (rapuh/hancur), sedangkan busa yang digunakan sekali tidak mengalami kerusakan.

2.2.4 Tahap IV

Limbah POME yang melalui treatment dan tanpa treatment diuji kualitasnya dengan parameter berikut: pH, Suhu, BOD, COD, TSS, Total Nitrogen, minyak dan lemak di UPTD Laboratorium Lingkungan DLH Mojokerto. Selanjutnya limbah POME yang telah melalui tahap remediasi diuji kualitas dengan 7 parameter Kimia dan Fisika (pH, Suhu, BOD, COD, TSS, Total Nitrogen, minyak dan lemak). Busa komposit yang tanpa remediasi dan yang telah melalui remediasi diuji FTIR di Laboratorium Kimia FMIPA Universitas Negeri Jember.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Sintesis Carbon Nanodots (CNDs)

Sintesis CNDs dilakukan menggunakan metode top-down dengan memanfaatkan kertas bekas sebagai sumber karbon. Kertas dipotong kecil lalu ditimbang sebanyak 5 gram. Selanjutnya ditambahkan H_2SO_4 yang berperan sebagai agen dehidrasi sekaligus merusak struktur selulosa. pH larutan kemudian dinetralkan dengan NaOH 2 M sambil diaduk menggunakan *stirrer* hingga kertas berubah menjadi bubur. Urea ditambahkan sebagai agen pasivasi untuk memberikan gugus fungsi pada permukaan nanomaterial, sekaligus mencegah terjadinya reaksi samping yang tidak diinginkan maupun aglomerasi (Sharma & Chowdhury, 2024). Proses hidrotermal dijalankan pada suhu 220°C selama 12 jam. Campuran hasil reaksi kemudian disaring guna memperoleh filtrat. CNDs yang dihasilkan tampak berwarna hitam pekat, lalu diencerkan hingga berwarna kuning bening (Gambar 2). Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya mengenai sintesis CNDs dari prekursor berbasis selulosa (Permana dkk., 2024) dan penggunaan urea sebagai agen fungsionalisasi (Rahmayanti dkk., 2015).



Gambar 2. Hasil Sintesis CNDs

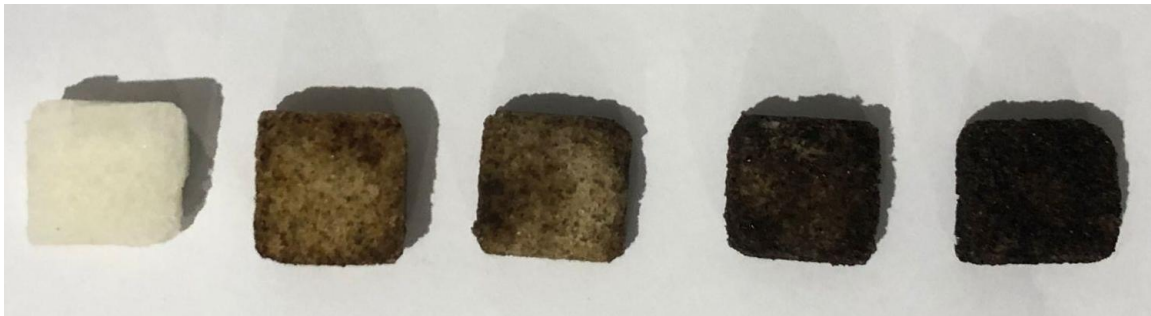
3.2 Sintesis Komposit PDMS/CNDs

Sintesis Polymethylhydrosiloxane (PMHS) merupakan polimer berbasis silikon yang berperan sebagai bahan utama dalam pembuatan busa hidrofobik. Material ini dikenal memiliki sifat superhidrofobik dengan sudut kontak air lebih dari 150° dan superoleofilik, yaitu kemampuan untuk menyerap minyak secara menyeluruh (Sakthivel dkk., 2024; Putri, 2020). Karakteristik tersebut menjadikan PMHS berpotensi besar digunakan sebagai material pemisahan air-minyak. Pembuatan komposit dimulai dengan menyiapkan busa PMHS melalui proses polimerisasi. Campuran prepolimer PMHS ditambahkan dengan benzoil peroksida sebagai thermal curing agent. Pada suhu 75°C , benzoil peroksida terdegradasi menghasilkan radikal bebas yang kemudian bereaksi dengan gugus metil PMHS dan hydrogen, sehingga memicu pembentukan ikatan silang ($-\text{CH}_2-$). Busa komposit PMHS/CNDs dibuat dengan metode template, menggunakan gula kubus sebagai media. Gula direndam dalam larutan PMHS, sehingga larutan berdifusi ke pori-pori. Selanjutnya, sampel dioven untuk menyempurnakan proses polimerisasi.

Proses penambahan CNDs (Carbon Nanodots) pada busa PMHS dilakukan dengan teknik ultrasonikasi, yang berfungsi sebagai gaya pendorong untuk membantu penetrasi partikel. Pemberian gelombang ultrasonik menyebabkan molekul PMHS dalam larutan berosilasi, sehingga timbul regangan dan rapatan. Jika intensitas cukup tinggi, gas terlarut terperangkap dan menghasilkan gelembung yang dikenal sebagai efek kavitasi. Gelembung ini akan runtuh ketika bertumbukan dengan nanopartikel CNDs, melepaskan semburan berkecepatan tinggi serta

gelombang kejut. Efek tersebut mendorong CNDs menumbuk permukaan busa PMHS, sehingga terjadi interaksi antarmuka yang memungkinkan partikel tersubstitusi dalam matrik PMHS (Huang et.al., 2020; Wang, dkk., 2019; Zainul, 2015; Gao dkk., 2020).

Proses homogenisasi pada filler CNDs agar terdispersi merata dan tidak mengalami aglomerasi, digunakan THF (tetrahidrofuran) sebagai pelarut. THF membantu menurunkan viskositas suspensi, sekaligus menghasilkan ukuran partikel lebih kecil dan homogen. Dengan demikian, distribusi CNDs pada matrik PMHS menjadi lebih efektif. Pada Gambar 3 menunjukkan hasil sintesis busa komposit PMHS/CNDs.



Gambar 3. Busa Komposit PMHS/CNDs

3.3 Analisis Uji Kualitas Limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME)

Limbah POME didapatkan dari pabrik pengolahan kelapa sawit Provinsi Sulawesi Tenggara dalam kondisi sudah dilakukan treatment tertentu dari hasil output pengolahan kelapa sawit. Pada penelitian ini limbah POME diuji kualitas dan tingkat pencemarannya melalui uji parameter Fisika (TSS dan Temperatur), uji parameter Kimia (COD, pH, Total Nitrogen, Minyak & Lemak), dan uji parameter biologis (BOD) di Laboratorium Lingkungan DLH Mojokerto.



Gambar 4. Limbah POME Sebelum dan Setelah Remediasi

Tabel 1 menunjukkan hasil uji parameter kimia, fisika, dan biologis pada limbah POME sebelum proses remediasi. Sedangkan, pada Tabel 2 menunjukkan Baku Mutu Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Minyak Sawit berdasarkan PerMen LH No. 5 tahun 2014.

Tabel 1. Hasil Uji Kualitas Limbah POME sebelum Remediasi

No.	Parameter	Metode Pengujian	Unit	Hasil Pengujian
1.	pH	SNI 6989.11-2019	-	6,81
2.	Temperatur	SNI 06.6989.23-2005	°C	29,0
3.	TSS	SNI 6989.3-2019	mg/L	25,8
4.	BOD	SNI 6989.72-2009	mg/L	164,0
5.	COD	SNI 6989.2-2019	mg/L	410,5
6.	Total Nitrogen	IK-81/06/00 (Spektrofotometri)	mg/L	1,22
7.	Minyak dan lemak	SNI 06.6989.10-2011	mg/L	2,98

Sumber: DLH Mojokerto (2024)

Tabel 2. Baku Mutu Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Minyak Sawit

No.	Parameter	Kadar Tertinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Tertinggi (kg/ton)
1.	BOD ₅	100	0,25
2.	COD	350	0,88
3.	TSS	250	0,63
4.	Minyak dan Lemak	25	0,063
5.	Nitrogen Total	50	0,125
6.	pH	6,0 – 9,0	
7.	Debit limbah paling tinggi	2,5 m ³ per ton produk minyak sawit (CPO)	

Sumber: PerMen LH No. 5 Tahun 2014 (Kementerian Lingkungan Hidup, 2014)

Berdasarkan perbandingan data pada Tabel 1 terhadap baku mutu pada Tabel 2, nilai pH, TSS, Total N, serta Minyak & Lemak telah memenuhi baku mutu. Sementara itu, nilai BOD (164 > 100 mg/L) dan COD (410,5 > 350 mg/L) tidak memenuhi baku mutu. Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) No. 80 Tahun 2019, tidak ada pengaturan suhu 29 °C secara spesifik untuk limbah POME (*palm oil mill effluent*) atau air limbah industri lainnya. Pengaturan baku mutu air limbah fokus pada dampak pencemaran yang ditimbulkan oleh limbah, seperti penurunan kualitas air akibat zat-zat pencemar dan bukan pada suhu absolut limbah itu sendiri, kecuali jika suhu sangat tinggi bisa mempengaruhi kehidupan akuatik secara langsung. Air yang mengandung polutan organik, seperti residu makanan, akan mengalami proses penguraian di dalam perairan. Dekomposisi tersebut berlangsung melalui aktivitas mikroorganisme yang memanfaatkan oksigen sebagai sumber kehidupan sekaligus untuk melaksanakan fungsi biodegradasinya. Oleh karena itu, kebutuhan oksigen menjadi salah satu parameter penting yang harus diperhatikan dalam analisis kualitas air limbah. Semakin tinggi tingkat BOD pada limbah air, semakin tinggi pula kadar oksigen dalam air yang akan berkurang. Proses penguraian tidak hanya berlangsung melalui aktivitas organisme seperti bakteri dan jamur, tetapi juga melibatkan reaksi kimia tertentu yang terdapat di dalam air. Reaksi kimia tersebut dikenal sebagai proses oksidasi. Sama halnya dengan BOD, tingginya nilai COD juga berpotensi menurunkan kadar oksigen terlarut di perairan (Daya, 2022).

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai pH = 6,76 masih sesuai standar baku mutu, temperatur = 31 °C masih aman, TSS = 18,7 mg/L jauh di bawah batas, BOD = 60,4 mg/L masih memenuhi standar, COD = 149,9 mg/L sangat rendah, jauh di bawah batas, Total Nitrogen = 0,806 mg/L sangat aman, Minyak & Lemak = 2,03 mg/L sudah memenuhi standar. Efektivitas Remediasi, hasil menunjukkan bahwa busa komposit PMHS/CNDs sangat efektif dalam menurunkan polutan utama POME. Hampir semua parameter berada jauh di bawah ambang baku mutu. Parameter organik (BOD & COD), nilai BOD = 60,4 mg/L dan COD = 149,9 mg/L, keduanya telah berkurang signifikan dibandingkan kondisi awal POME yang biasanya sangat tinggi (>2000 mg/L). Rasio BOD/COD = 0,40 menunjukkan limbah masih biodegradable dan mudah diolah secara biologis bila diperlukan. TSS & Minyak/Lemak, hasil TSS (18,7 mg/L) dan minyak/lemak (2,03 mg/L) sangat rendah, menandakan bahwa busa komposit efektif juga sebagai adsorben maupun penyaring partikel dan senyawa hidrofobik. Nutrien (Total Nitrogen): Nilai 0,806 mg/L jauh di bawah ambang batas, artinya potensi eutrofikasi perairan penerima dapat ditekan. Secara keseluruhan, hasil uji membuktikan bahwa remediasi PMHS/CNDs berhasil meningkatkan kualitas limbah POME hingga sesuai standar lingkungan dan berpotensi diterapkan sebagai teknologi alternatif pengolahan limbah sawit berkelanjutan (Kementerian Lingkungan Hidup, 2014; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2016).

Tabel 3. Hasil Uji Kualitas Limbah POME setelah Remediasi Busa Komposit PDMS/NCDs

No.	Parameter	Metode Pengujian	Unit	Hasil Pengujian
1.	pH	SNI 6989.11-2019	-	6,76
2.	Temperatur	SNI 06.6989.23-2005	°C	31,0
3.	TSS	SNI 6989.3-2019	mg/L	18,7
4.	BOD	SNI 6989.72-2009	mg/L	60,4
5.	COD	SNI 6989.2-2019	mg/L	149,9
6.	Total Nitrogen	IK-81/06/00 (Spektrofotometri)	mg/L	0,806
7.	Minyak dan lemak	SNI 06.6989.10-2011	mg/L	2,03

Sumber: DLH Mojokerto (2024)

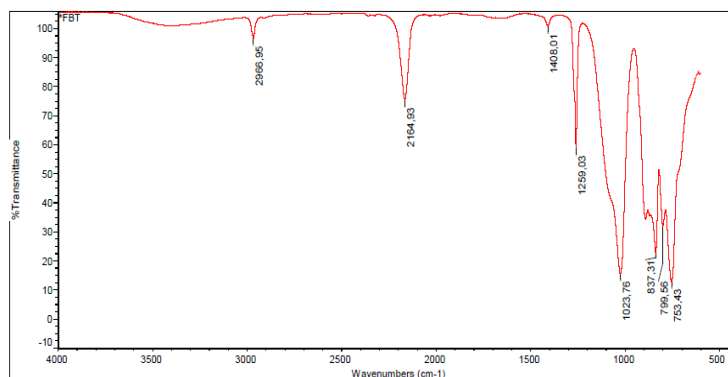
3.4 Analisis Uji FTIR PMHS/CNDs Sebelum dan Setelah Remediasi Air Limbah POME

Setelah proses sintesis busa komposit PMHS/CNDs selesai, tahap selanjutnya adalah proses remediasi busa komposit PMHS/CNDs dalam limbah POME 200 ml selama 24 jam. Pada penelitian ini telah dilakukan uji FTIR pada 2 sampel busa komposit PMHS/CNDs, sampel yang belum diremediasi dan yang telah diremediasi. Uji FTIR ini dilakukan untuk (1) mengidentifikasi gugus fungsional khas pada material busa komposit PMHS/CNDs sebelum digunakan. Memberikan data spektrum awal (baseline) tentang ikatan kimia (Si-H, Si-O-Si, C-H, C=O, O-H, dan lainnya.) yang membentuk struktur busa; (2) memantau interaksi dengan polutan POME, sedangkan uji FTIR pada busa komposit yang sudah diremediasi adalah untuk melihat adanya perubahan intensitas, pergeseran, atau hilangnya pita serapan tertentu. Hal ini menunjukkan adanya interaksi atau ikatan antara gugus fungsional pada busa komposit dengan senyawa organik/anorganik dalam POME (misalnya asam lemak, fenol, protein, minyak, dll.); (3) mengevaluasi mekanisme adsorpsi/remediasi dengan menganalisa perubahan spektrum; (4) menilai efektivitas remediasi dengan membandingkan spektrum sebelum dan sesudah remediasi, analisa degradasi pada busa komposit, modifikasi permukaan, dan stabilitas struktur busa komposit setelah remediasi. Hal ini juga dapat digunakan untuk mengukur daya tahan material komposit dan

kelayakan aplikasinya dalam pengolahan limbah; (5) validasi keberhasilan modifikasi komposit, yaitu dengan mengidentifikasi adanya pergeseran pita khas (misalnya melemahnya pita Si–H atau munculnya pita baru terkait C=O/O–H dari polutan), maka hal ini mengindikasikan keberhasilan komposit dalam menangkap polutan POME.

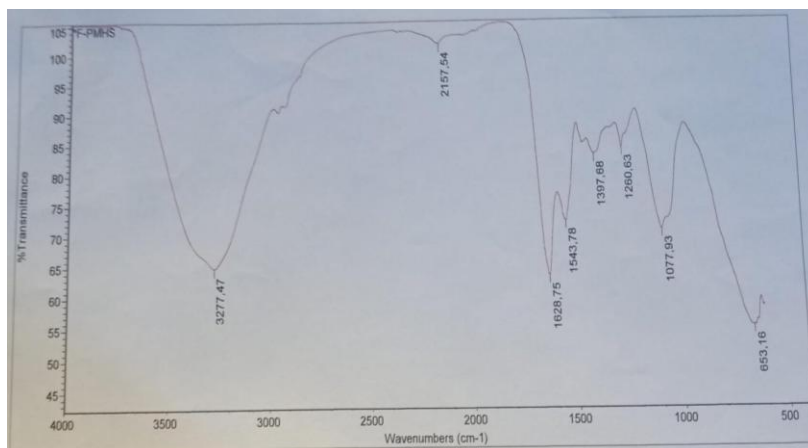
Berdasarkan Gambar 5 analisa spektrum FTIR komposit PMHS/CNDs sebelum remediasi, yaitu: (1) $753,43\text{ cm}^{-1}$ (Int. 12,694), pita ini mengindikasikan getaran tekuk (bending) Si–C atau deformasi dari ikatan $\text{CH}_2\text{--Si}$ yang khas pada polimer berbasis siloksan. Kehadiran puncak ini menunjukkan adanya kerangka dasar PMHS. (2) $799,56\text{ cm}^{-1}$ (Int. 32,011) merupakan pita khas Si–O–Si stretching (rocking atau symmetric stretching), yang menjadi ciri utama jaringan polimer siloksan. (3) $837,31\text{ cm}^{-1}$ (Int. 22,554) berhubungan dengan vibrasi Si–H stretching pada PMHS. Pita ini penting karena gugus Si–H merupakan sumber reaktivitas dalam proses ikatan silang maupun interaksi dengan nanopartikel CNDs. (4) $1023,76\text{ cm}^{-1}$ (Int. 15,411) mengindikasikan vibrasi Si–O–Si asymmetric stretching, ciri khas kuat dari backbone silikon oksida dalam PMHS. (5) $1259,03\text{ cm}^{-1}$ (Int. 58,958) berhubungan dengan vibrasi Si– CH_3 bending (symmetric deformation), yang menandakan adanya gugus metil pada struktur PMHS. Gugus ini juga memberikan sifat hidrofobik. (6) $1408,01\text{ cm}^{-1}$ (Int. 100,816) merupakan pita intens kuat yang mengindikasikan deformasi C–H bending dari gugus metil ($-\text{CH}_3$). Kehadiran intensitas tinggi menandakan dominasi gugus metil dalam struktur PMHS. (7) $2164,93\text{ cm}^{-1}$ (Int. 75,629) puncak khas Si–H stretching, memperkuat bukti bahwa komposit masih mengandung gugus Si–H aktif yang dapat berpartisipasi dalam reaksi lebih lanjut. (8) $2966,95\text{ cm}^{-1}$ (Int. 96,642) Puncak kuat ini berasal dari C–H stretching pada gugus metil ($-\text{CH}_3$) dan metilen ($-\text{CH}_2-$). Pita ini juga sering dikaitkan dengan keberadaan fragmen karbon dari CNDs.

Spektrum FTIR komposit PMHS/CNDs sebelum remediasi menunjukkan bahwa struktur dasar PMHS dengan gugus Si–O–Si, Si–H, dan Si– CH_3 teridentifikasi jelas. Kehadiran puncak C–H stretching (2966 cm^{-1}) yang kuat mengindikasikan integrasi gugus organik serta adanya kontribusi karbon dari CNDs. Intensitas tinggi pada pita metil (1408 cm^{-1} dan 2966 cm^{-1}) memperlihatkan sifat hidrofobik yang kuat, selaras dengan karakteristik awal PMHS. Gugus Si–H pada 837 dan 2165 cm^{-1} menunjukkan masih tersedianya situs aktif yang dapat berperan penting dalam proses adsorpsi polutan selama remediasi. Dengan demikian, spektrum ini dapat dijadikan baseline untuk membandingkan perubahan struktur kimia setelah komposit digunakan dalam remediasi limbah POME.



Gambar 5. Hasil Uji FTIR Busa Komposit PMHS/CNDs sebelum Remediasi

Berdasarkan Gambar 6, analisis spektrum FTIR komposit PMHS/CNDs setelah remediasi, yaitu: (1) $653,16\text{ cm}^{-1}$ (Int. 54,784), menunjukkan vibrasi bending dari ikatan Si–C atau kemungkinan deformasi ikatan Si–O. Pergeseran ini dapat dikaitkan dengan perubahan struktur akibat interaksi dengan senyawa anorganik dalam POME. (2) $1077,93\text{ cm}^{-1}$ (Int. 70,551); puncak khas Si–O–Si asymmetric stretching. Intensitas yang lebih tinggi dibandingkan sebelum remediasi menunjukkan adanya penguatan ikatan atau adsorpsi molekul polar (seperti asam lemak atau senyawa oksigen lain dalam POME) ke permukaan komposit; (3) $1260,63\text{ cm}^{-1}$ (Int. 84,020), mengindikasikan vibrasi Si–CH₃ bending. Kenaikan intensitas memperlihatkan masih dominannya gugus metil, yang tetap menjaga sifat hidrofobik PMHS meskipun telah kontak dengan POME; (4) $1397,68\text{ cm}^{-1}$ (Int. 83,054). Pita ini terkait deformasi C–H bending. Adanya puncak kuat di sini bisa menandakan penyerapan senyawa organik dari POME (misalnya asam lemak atau fenolik) yang berinteraksi dengan gugus C–H pada komposit; (5) $1543,78\text{ cm}^{-1}$ (Int. 72,153), munculnya pita baru yang tidak dominan pada spektrum awal. Posisi ini umumnya dikaitkan dengan C=C stretching (aromatik/alifatik) atau amide II. Hal ini mengindikasikan adanya adsorpsi senyawa organik kompleks seperti protein atau residu fenol dari POME; (6) $1628,75\text{ cm}^{-1}$ (Int. 63,352). Puncak ini khas C=O stretching atau vibrasi N–H bending (amide I). Kehadirannya menandakan bahwa gugus karbonil dari senyawa organik (asam lemak, ester, atau protein) telah teradsorpsi pada komposit; (7) $2157,54\text{ cm}^{-1}$ (Int. 101,697), masih terlihat pita khas Si–H stretching, menandakan sebagian gugus Si–H tetap aktif setelah remediasi. Namun intensitasnya berubah, yang berarti sebagian gugus ini ikut bereaksi atau berinteraksi dengan kontaminan; (8) $3277,47\text{ cm}^{-1}$ (Int. 64,866), puncak broad khas O–H stretching. Kehadirannya menunjukkan adanya air terikat atau senyawa hidroksil dari POME yang berinteraksi dengan komposit.



Gambar 6. Hasil Uji FTIR Busa Komposit PMHS/CNDs setelah Remediasi

Spektrum FTIR setelah remediasi memperlihatkan bahwa perubahan signifikan pada pita 1544 cm^{-1} dan 1629 cm^{-1} yang tidak dominan sebelumnya mengindikasikan adsorpsi senyawa organik POME (asam lemak, protein, fenol). Munculnya pita O–H (3277 cm^{-1}) menunjukkan adanya interaksi dengan molekul air atau gugus hidroksil dari POME. Intensitas pita Si–O–Si (1077 cm^{-1}) meningkat, menandakan penguatan interaksi antara backbone siloksan dan senyawa polar. Gugus metil ($1259\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$) tetap kuat, artinya sifat hidrofobik komposit tetap terjaga walaupun terjadi adsorpsi polutan. Gugus Si–H masih terdeteksi, tetapi intensitasnya berubah,

mengindikasikan sebagian gugus aktif terlibat dalam remediasi. Hasil FTIR setelah remediasi menunjukkan bahwa komposit PMHS/CNDs mampu mengadsorpsi senyawa organik kompleks dari POME, ditandai dengan munculnya pita C=O, C=C, dan O-H baru. Meski demikian, gugus hidrofobik (Si-CH₃) masih dominan sehingga struktur dan sifat utama komposit tetap stabil. Afinitas terhadap minyak/lemak POME tinggi: backbone siloksan + gugus metil mendukung sifat oleofilik yang bermanfaat untuk menyerap fase minyak/fatty components dari POME. Permukaan CNDs yang fungsional dapat meningkatkan adsorpsi senyawa polar (asam lemak, fenolik) melalui interaksi H-bond atau interaksi polar (Yudono, 2017).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan penelitian, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Sebelum remediasi, parameter BOD (164 mg/L) dan COD (410,5 mg/L) melebihi baku mutu, sedangkan pH, TSS, Total N, Minyak & Lemak masih sesuai standar.
2. Setelah remediasi menggunakan busa komposit PMHS/CNDs, seluruh parameter termasuk BOD (72,5 mg/L) dan COD (181,2 mg/L) berhasil turun signifikan hingga di bawah baku mutu.
3. Rasio BOD/COD = 0,40 menunjukkan limbah masih biodegradable dan dapat diolah lebih lanjut secara biologis.
4. Nilai TSS (18,7 mg/L) dan Minyak & Lemak (2,03 mg/L) sangat rendah, menegaskan efektivitas komposit dalam menyaring partikel dan senyawa hidrofobik.
5. Secara keseluruhan, remediasi dengan PMHS/CNDs sangat efektif menurunkan polutan utama POME dan meningkatkan kualitas limbah sesuai baku mutu lingkungan.
6. Sebelum remediasi, spektrum menunjukkan gugus khas backbone siloksan (Si-O-Si, Si-H, Si-CH₃) dengan intensitas tinggi, menandakan sifat hidrofobik dan oleofilik serta adanya gugus aktif yang siap berinteraksi dengan polutan.
7. Setelah remediasi, terjadi perubahan signifikan: muncul pita baru 1544 cm⁻¹ (C=C/amide II) dan 1629 cm⁻¹ (C=O/N-H/amide I) mengindikasikan adsorpsi senyawa organik (asam lemak, protein, fenol). Pita O-H (3277 cm⁻¹) menandakan interaksi dengan molekul air/hidroksil dari POME. Peningkatan intensitas Si-O-Si (1077 cm⁻¹) menunjukkan penguatan interaksi dengan senyawa polar. Gugus Si-CH₃ tetap dominan menunjukkan sifat hidrofobik komposit tetap stabil. Gugus Si-H masih terdeteksi meski berkurang menunjukkan sebagian gugus aktif telah berinteraksi dengan polutan.
8. Secara keseluruhan, FTIR membuktikan bahwa busa komposit PMHS/CNDs efektif dalam mengadsorpsi polutan POME tanpa merusak stabilitas strukturnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pemberi Hibah Penelitian Eksternal Program Kemitraan, yaitu Lembaga Kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, atas dukungan pendanaan dan fasilitas penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Tim Dosen Kimia FSAD ITS dan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jember atas kerjasama penelitian yang baik. Apresiasi diberikan kepada Kepala Laboratorium Kimia FSAD ITS, Kepala Laboratorium Teknik Mesin, Kepala Laboratorium Kimia Dasar dan para Laboran Universitas Muhammadiyah Jember, yang telah memberikan bantuan fasilitas, bimbingan, dan dukungan teknis selama penelitian berlangsung. Ucapan terima kasih

juga disampaikan kepada Kepala Laboratorium Kimia FMIPA Universitas Jember (UNEJ) dan para Laboran, serta Kepala Laboratorium Lingkungan DLH Mojokerto, yang telah mendukung pelaksanaan uji sampel dan analisis data penelitian ini. Ucapan terima kasih kepada para mahasiswa Tim UM Jember dan ITS yang sudah berkontribusi pada penelitian ini. Dukungan dan kerjasama dari berbagai pihak tersebut sangat membantu kelancaran penelitian ini sehingga terselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- Daya, A.T. (2022) *7 parameter baku mutu air limbah sebelum aman dibuang*. 2 Desember. Tersedia pada: <https://www.adikadaya.com/7-parameter-baku-mutu-air-limbah-sebelum-aman-dibuang> (Diakses 8 September 2025).
- Fadllan, A., Saptasari, M., Sunaryono, S. dan Taufiq, A. (2016) 'Synthesis of carbon nanodots from waste paper with hydrothermal method', *AIP Conference Proceedings*, 1788(1), p. 030069. doi: 10.1063/1.4968322.
- Gao, J., Wang, L., Guo, Z., Li, B., Wang, H., Luo, J., Huang, X. dan Xue, H. (2020) 'Flexible, superhydrophobic, and electrically conductive polymer nanofiber composite for multifunctional sensing applications', *Chemical Engineering Journal*, 381, p. 122778. doi: 10.1016/j.cej.2019.122778
- Huang, X., Zhang, S., Xiao, W., Luo, J., Li, B., Wang, L., Xue, H. dan Gao, J. (2020) 'Flexible PDA@ACNTs decorated polymer nanofiber composite with superhydrophilicity and underwater superoleophobicity for efficient separation of oil-in-water emulsion', *Journal of Membrane Science*, 614, p. 118500. doi: 10.1016/j.memsci.2020.118500.
- Kementerian Lingkungan Hidup (2014) *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2016) *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.68/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.
- Lei, S., Zeng, M., Huang, D., Wang, L., Zhang, L., Xi, B., Ma, W., Chen, G. dan Cheng, Z. (2019) 'Synergistic High-flux Oil–Saltwater Separation and Membrane Desalination with Carbon Quantum Dots Functionalized Membrane', *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(16), pp. 13708–13716. doi: 10.1021/acssuschemeng.9b01073.
- Li, W., Liu, K., Zhang, Y., Guo, S., Li, Z. dan Tan, S.C. (2022) 'A facile strategy to prepare robust self-healable superhydrophobic fabrics with self-cleaning, anti-icing, UV resistance, and antibacterial properties', *Chemical Engineering Journal*, 446(3), p. 137195. doi: 10.1016/j.cej.2022.137195.
- Osicka, J., Mrlik, M., Ilcikova, M., Hanulikova, B., Urbanek, P., Sedlacik, M. dan Mosnacek, J. (2018) 'Reversible Actuation Ability upon Light Stimulation of the Smart Systems with Controllably Grafted Graphene Oxide with Poly (Glycidyl Methacrylate) and PDMS Elastomer: Effect of Compatibility and Graphene Oxide Reduction on the Photo-Actuation Performance', *Polymers*, 10(8), p. 832. doi: 10.3390/polym10080832.
- Permana, D., Atmaja, L., Priyanga, A., Kedang, Y.I. dan Santoso, M. (2024) 'Utilization of cellulose-based carbon nanodots in sulfonated polysulfone based membrane for direct

- methanol fuel cell', *South African Journal of Chemical Engineering*, 48, pp. 265–275. doi: 10.1016/j.sajce.2024.02.009.
- Putri, N.A.E. (2020) *Analisis sifat superhidrofobik-superoleofilik pada modifikasi material spons polyurethane sebagai pemisah minyak dan air secara selektif*. Skripsi. Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta. Tersedia pada: <https://repository.uinjkt.ac.id/dspace/handle/123456789/55114>.
- Rahmayanti, H.D., Aji, M.P. dan Sulhadi, S. (2015) 'Sintesis carbon nanodots sulfur (C-dots sulfur) dengan metode microwave', *Unnes Physics Journal*, 4(1). Tersedia pada: <https://journal.unnes.ac.id/sju/upj/article/view/7009>.
- Sakthivel, R., Kulandaivel, T., Savunthari, K.V., Mohanraj, K., Dahms, H.U., Anbalagan, A.K., Rangasamy, M. dan Kong, K.V. (2024) 'Rapid oil-water separation using modified nonwoven viscose fabrics', *Materials Chemistry and Physics*, 312, p. 128645. doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.128645.
- Sharma, S. dan Chowdhury, P. (2024) 'Tunable dual photoluminescence from synthesized urea-based carbon quantum dots', *Optical Materials*, 153, 115617. doi:10.1016/j.optmat.2024.115617.
- Suhail, B., Bajpai, S.K., dan Souza, A.D. (2022) 'Microwave assisted facile green synthesis of carrageenan carbon dots (CDs) and their interaction with Hisbiscus Rosa sinensis leaf cells', *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(12), pp. 2697–2713. doi:10.1080/03067319.2020.1759563.
- Wang, L., Chen, Y., Lin, L., Wang, H., Huang, X., Xue, H. dan Gao, J. (2019) 'Highly stretchable, anti-corrosive and wearable strain sensors based on the PDMS/CNTs decorated elastomer nanofiber composite', *Chemical Engineering Journal*, 362, pp. 89–98. doi: 10.1016/j.cej.2019.01.014.
- Yudono, B. (2017) *Spektrometri*. Edited by A.A. Bama. Palembang: SIMETRI.
- Zainul, R., Alif, A., Aziz, H., Arief, S., Syukri dan Yasthopi, A. (2015) 'Photoelectrospinning water for hydrogen production using illumination of indoor lights', *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(11), pp. 57–67.