

Analisis Perbandingan Efisiensi Adsorpsi Karbon Aktif (Variasi Massa Adsorben) dan Aerasi Untuk Pengolahan Air Limbah di Unit API (*American Petroleum Institute*) II PPSDM MIGAS

Veronika Nirmala Mei Anggraeni^{*}, Nazilla Ayunisa¹, Rieza Mahendra Kusuma²

¹Program Studi Kimia Universitas Diponegoro, Semarang

²Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi, Cepu

INFORMASI NASKAH

Diterima : 18 Juni 2025
Direvisi : 13 September 2025
Disetujui : 24 September 2025
Terbit : 30 September 2025

Email korespondensi:
anggraeniv185@gmail.com

Laman daring:
[https://doi.org/10.37525/
sp/2025-2/1182](https://doi.org/10.37525/sp/2025-2/1182)

ABSTRAK

Air limbah dari industri minyak dan gas bumi (migas) mengandung polutan yang dapat mencemari lingkungan. Penelitian ini membandingkan efektivitas adsorpsi karbon aktif (dengan variasi massa adsorben) dan aerasi dalam mengolah air limbah di Unit API II PPSDM Migas. Sampel air limbah dianalisis untuk parameter COD, sulfida terlarut (H_2S), amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$), fenol, dan pH, kemudian hasilnya dievaluasi berdasarkan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode adsorpsi dengan 400 gram karbon aktif paling efektif menurunkan COD hingga 54,4 mg/L dan fenol hingga 0,133 mg/L, keduanya memenuhi baku mutu. Untuk sulfida, aerasi (0,188 mg/L) sedikit lebih efektif dibanding adsorpsi 400 gram (0,199 mg/L), sementara aerasi juga lebih baik dalam menurunkan kadar amonia (0,1195 mg/L) dibanding adsorpsi. Semua perlakuan menghasilkan pH dalam kisaran baku mutu (6–9). Dengan demikian aerasi lebih unggul dalam menurunkan sulfida dan amonia sedangkan adsorpsi karbon aktif lebih unggul dalam menurunkan COD dan fenol.

Kata kunci : adsorpsi, aerasi, air limbah, karbon aktif, migas



PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi (migas) merupakan sektor utama penyedia energi dunia, namun juga dikenal sebagai penyumbang pencemaran lingkungan yang signifikan, khususnya melalui limbah cair hasil eksplorasi, produksi, dan pengolahan. Limbah cair ini mengandung berbagai senyawa berbahaya seperti Chemical Oxygen Demand (COD), amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$), sulfida (H_2S), dan fenol, yang dapat menimbulkan dampak buruk terhadap kesehatan manusia dan ekosistem perairan (Zhao et al., 2019).

Di Indonesia, tantangan utama dalam pengelolaan limbah industri migas adalah efektivitas sistem pengolahan yang belum mampu menurunkan konsentrasi pencemar secara optimal sesuai baku mutu lingkungan. Salah satu instalasi yang menangani pengolahan limbah tersebut adalah Unit American Petroleum Institute (API) II milik PPSDM Migas di Cepu. Namun, studi terdahulu menunjukkan bahwa metode aerasi yang digunakan di unit ini belum optimal dalam menurunkan kadar COD, fenol, dan parameter lainnya secara konsisten (Oktaviani et al., 2024; Pratiwi et al., 2018).

Aerasi dikenal efektif dalam menurunkan BOD dan sebagian kandungan amonia dengan meningkatkan kadar oksigen terlarut, tetapi kurang efektif terhadap senyawa organik kompleks seperti fenol dan sulfida (Chen et al., 2020). Oleh karena itu, diperlukan alternatif pengolahan lanjutan yang lebih efisien, salah satunya adalah metode adsorpsi. Adsorpsi dengan karbon aktif mampu menghilangkan berbagai jenis polutan karena luas permukaan dan porositasnya yang tinggi (Muhammad et al., 2023). Efektivitas metode ini sangat dipengaruhi oleh massa adsorben yang digunakan (Li et al., 2018; Alatalo et al., 2020).

Beberapa penelitian terbaru melaporkan bahwa karbon aktif dari berbagai bahan alam seperti tempurung kelapa, limbah pertanian, maupun biomassa lainnya memiliki kinerja tinggi dalam menyerap fenol, sulfida, serta COD (Samsuri et al., 2019). Meski demikian, sebagian besar penelitian masih fokus pada penggunaan karbon aktif skala laboratorium tanpa membandingkan langsung efektivitasnya dengan sistem aerasi yang sudah banyak diterapkan di instalasi pengolahan limbah.

Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan membandingkan secara langsung efektivitas metode aerasi yang digunakan pada Unit API II PPSDM Migas dengan metode adsorpsi menggunakan variasi massa karbon aktif terhadap beberapa parameter pencemar utama, yaitu COD, H_2S , $\text{NH}_3\text{-N}$, fenol, dan pH. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi efektivitas masing-masing metode berdasarkan standar baku mutu lingkungan terbaru, tetapi juga memberikan gambaran praktis mengenai strategi peningkatan sistem pengolahan air limbah migas yang lebih efisien dan aplikatif.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi (PPSDM Migas), yang berlokasi di Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah. Fokus penelitian adalah mengevaluasi efektivitas pengolahan air limbah pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), dikhususkan pada unit American Petroleum Institute (API) II sebagai tahap akhir sebelum air limbah dialirkan ke Sungai Bengawan Solo. Pengambilan sampel dilakukan pada tanggal 9 Januari 2025 pukul 09.00 WIB, sedangkan pengujian laboratorium berlangsung dari 1 hingga 31 Januari 2025. Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi Chemical Oxygen Demand (COD), sulfida terlarut (H_2S), amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$), fenol, dan pH.

A. Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan dengan metode *grab sampling* pada tiga titik utama, yaitu inlet Unit API II sebelum proses aerasi, outlet Unit API II setelah aerasi, dan outlet setelah perlakuan adsorpsi karbon aktif. Pemilihan titik-titik ini dimaksudkan untuk membandingkan efektivitas metode aerasi yang digunakan dalam IPAL dengan metode adsorpsi yang diterapkan dalam penelitian. Sampel diambil pada pukul 09.00 WIB menggunakan wadah steril, kemudian diawetkan dengan pendinginan $\pm 4^\circ\text{C}$ agar tidak terjadi perubahan sifat fisikokimia sebelum dianalisis di laboratorium.

B. Proses Aerasi

Aerasi dilakukan pada bak aerasi Unit API II dengan sistem *surface aerator* yang beroperasi secara kontinu. Rata-rata waktu tinggal limbah dalam unit aerasi adalah sekitar enam jam, sehingga kontak



antara limbah dan udara berlangsung cukup lama untuk memungkinkan oksidasi senyawa organik dan peningkatan kadar oksigen terlarut. Mekanisme utama proses ini adalah oksidasi senyawa organik menjadi bentuk yang lebih sederhana, penurunan BOD, serta konversi sebagian amonia menjadi nitrit dan nitrat melalui proses nitrifikasi.

C. Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi dilakukan dengan sistem kolom yang diisi karbon aktif. Setiap kolom dialiri air limbah sebanyak 750 mL dengan variasi massa karbon aktif sebesar 200 gram, 300 gram, dan 400 gram. Setelah sampel dialirkan ke kolom, dilakukan waktu kontak selama 72 jam agar terjadi interaksi maksimal antara polutan dan permukaan karbon aktif. Setelah periode kontak selesai, sampel dianalisis kembali untuk mengevaluasi efektivitas adsorpsi dalam menurunkan kadar COD, sulfida, amonia, fenol, dan pH. Variasi massa adsorben digunakan untuk menentukan jumlah karbon aktif yang paling optimal dalam mengurangi polutan.

D. Analisis COD (*Chemical Oxygen Demand*)

Pengujian COD dilakukan dengan metode titrimetri refluks tertutup sesuai SNI 6989.73-2009. Sampel direfluks bersama kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) dalam suasana asam pada suhu 150 °C selama dua jam. Setelah proses refluks, sisa $K_2Cr_2O_7$ yang tidak bereaksi dititrasi menggunakan Ferro Ammonium Sulfat (FAS) dengan indikator ferroin. Hasil titrasi dihitung untuk menentukan jumlah oksigen yang dibutuhkan dalam oksidasi senyawa organik dalam air limbah.

E. Analisis Sulfida (H_2S)

Analisis sulfida dilakukan dengan metode iodometri sesuai SNI 6989.75-2009. Sampel terlebih dahulu diasamkan dengan HCl untuk mencegah terbentuknya reaksi samping, kemudian ditambahkan larutan iodin berlebih. Kelebihan iodin dititrasi menggunakan larutan natrium tiosulfat ($Na_2S_2O_3$), dan dari volume titran yang digunakan dihitung kadar sulfida dalam sampel.

F. Analisis Amonia (NH_3-N)

Kadar amonia ditentukan menggunakan metode fenat berdasarkan SNI 06-6989.30-2005. Prinsip pengujiannya adalah reaksi Berthelot, di mana amonia bereaksi dengan fenol dan hipoklorit dalam kondisi basa menghasilkan senyawa indofenol biru. Intensitas warna yang terbentuk diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 640 nm, kemudian dikonversi menjadi konsentrasi amonia.

G. Analisis Fenol

Analisis fenol mengacu pada SNI 06-6989.21-2005 dengan metode 4-aminoantipirin. Sampel air limbah terlebih dahulu didistilasi, kemudian distilat direaksikan dengan buffer fosfat, NH_4OH , 4-aminoantipirin, dan $K_3Fe(CN)_6$. Reaksi ini menghasilkan kompleks berwarna yang kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 500 nm.

H. Analisis pH

Pengukuran pH dilakukan sesuai SNI 06-6989.11-2004 menggunakan pH meter digital. Pengukuran dilakukan langsung di lokasi pengambilan sampel untuk menghindari perubahan pH akibat penyimpanan. Parameter ini penting untuk menilai tingkat keasaman atau kebasaan limbah, yang dapat memengaruhi proses pengolahan maupun dampak lingkungan.

I. Evaluasi Data

Seluruh hasil pengukuran dibandingkan dengan baku mutu limbah cair industri migas yang diatur dalam Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 19 Tahun 2010. Evaluasi dilakukan untuk menilai sejauh mana aerasi dan adsorpsi mampu menurunkan kadar polutan hingga memenuhi standar lingkungan.

Seluruh prosedur analisis merujuk pada standar metode analisis air limbah berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), American Public Health Association (APHA), serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 19 Tahun 2010 tentang Baku Mutu Air Limbah untuk Industri Minyak dan Gas Bumi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran akurat mengenai efektivitas IPAL API II dalam memenuhi baku mutu lingkungan serta memberikan masukan terhadap potensi perbaikan sistem pengolahan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

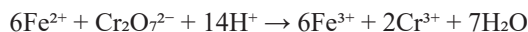
A. Uji *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah parameter yang mengukur jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik dalam air limbah. Senyawa-senyawa tersebut meliputi hidrokarbon aromatik sederhana (benzena, toluena, etilbenzena, dan xilena/BTX), senyawa fenolik dan turunannya, minyak dan lemak (oil and grease), serta senyawa organik volatil (VOCs) seperti aldehida dan alkohol rantai pendek. Keberadaan senyawa organik kompleks ini menyebabkan kebutuhan oksigen kimia dalam limbah migas relatif tinggi. Oleh karena itu, parameter COD menjadi salah satu indikator utama dalam menilai keberhasilan proses pengolahan limbah cair migas (Dai et al., 2022). Pengujian COD dilakukan berdasarkan SNI 6989.73-2009 dengan metode titrimetri refluks tertutup. Prinsipnya, zat organik dalam sampel dioksidasi oleh kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) dalam suasana asam selama 2 jam pada suhu $150^\circ C$, menghasilkan Cr^{3+} . Reaksi utama yang terjadi adalah:



(Rosmalina et al., 2023)

Setelah pemanasan, sisa $K_2Cr_2O_7$ yang tidak bereaksi dititrasi menggunakan Ferro Ammonium Sulfat (FAS) dengan indikator ferroin. Perubahan warna dari hijau ke merah menandakan titik ekuivalen, dengan reaksi sebagai berikut:



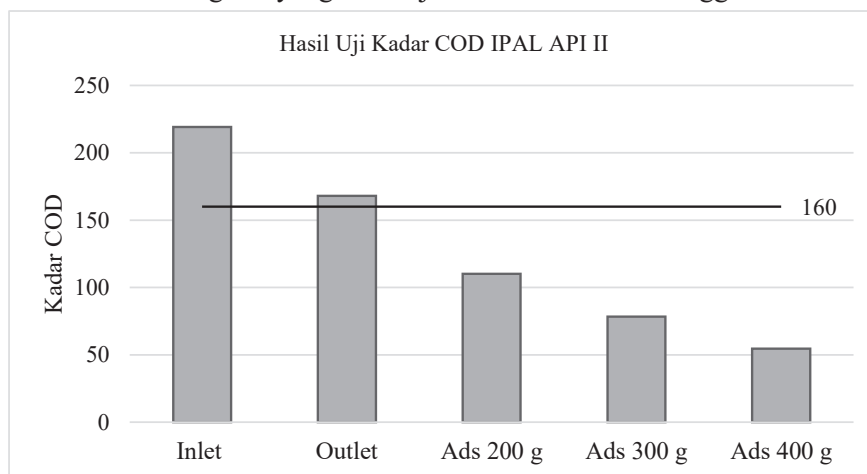
(Rosmalina et al., 2023)

Berikut merupakan tabel hasil pengukuran COD pada inlet, outlet setelah aerasi, dan setelah perlakuan adsorpsi karbon aktif.

Tabel 1. Hasil Pengukuran COD pada Inlet, Outlet Aerasi, dan Setelah Adsorpsi Karbon Aktif

Sampel	V_1 (mL)	V_2 (mL)	$V_{rata-rata}$ (mL)	Kadar COD (mg/L)
Blanko	3,26	3,40	3,33	0
Inlet	2,01	1,91	1,96	219,2
Adsorpsi 200 gr	2,80	2,48	2,64	110,4
Adsorpsi 300 gr	2,80	2,88	2,84	78,4
Adsorpsi 400 gr	3,02	2,96	2,99	54,4
Outlet	2,05	2,52	2,28	168

Pengujian dilakukan dengan dua metode, yaitu aerasi dan adsorpsi menggunakan karbon aktif dalam variasi 200 gram, 300 gram, dan 400 gram. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar COD pada inlet IPAL API II tanpa adsorpsi adalah 219,2 mg/L, sementara pada outlet dengan aerasi adalah 168 mg/L. Perlakuan adsorpsi menggunakan adsorben 200 gram, 300 gram dan 400 gram berhasil menurunkan kadar COD dalam air limbah sebesar masing-masing menjadi 110,2 mg/L, 78,4 mg/L, dan 54,4 mg/L. Berdasarkan PERMEN LH No. 18 Tahun 2010, batas maksimum COD dalam air limbah adalah 160 mg/L. Sampel tanpa adsorpsi tidak memenuhi baku mutu, sedangkan sampel dengan adsorpsi memenuhi standar, terutama adsorben 400 gram yang menunjukkan efektivitas tertinggi.



Gambar 1. Hasil Uji Kadar COD IPAL API II



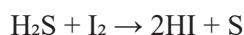
Penurunan nilai COD setelah proses adsorpsi terjadi karena berkurangnya konsentrasi senyawa organik yang terkandung dalam air limbah. Karbon aktif memiliki luas permukaan spesifik dan porositas yang tinggi sehingga mampu menyerap molekul organik melalui mekanisme difusi ke dalam pori-pori serta interaksi fisik dan kimia pada permukaannya. Senyawa organik utama yang teradsorpsi meliputi hidrokarbon aromatik sederhana seperti benzena, toluena, etilbenzena, dan xilena (BTX), senyawa fenolik, minyak dan lemak (oil and grease), senyawa organik volatil (VOCs) seperti aldehida dan alkohol rantai pendek, serta sebagian asam organik. Molekul-molekul tersebut berkontribusi besar terhadap nilai COD karena membutuhkan oksigen dalam jumlah tinggi untuk proses oksidasi kimia. Dengan terikatnya senyawa-senyawa tersebut pada permukaan karbon aktif, konsentrasi organik dalam larutan menurun sehingga nilai COD juga berkurang secara signifikan (Safitri, 2018). Efektivitas karbon aktif dalam menurunkan COD bergantung pada luas permukaan spesifik, ukuran pori, dan waktu kontak dengan limbah. Semakin banyak karbon aktif yang digunakan, semakin luas area adsorpsi dan semakin efektif proses penurunan COD (Fitrianingsih et al., 2025).

Dibandingkan aerasi yang menghasilkan COD 168 mg/L, adsorpsi dengan 300 gram dan 400 gram adsorben lebih efektif karena mampu menurunkan COD hingga 78,4 mg/L dan 54,4 mg/L. Namun, aerasi lebih efektif dibandingkan adsorpsi 200 gram, yang hanya menurunkan COD hingga 110,2 mg/L. Secara keseluruhan, metode adsorpsi dengan 400 gram karbon aktif adalah teknik terbaik dalam menurunkan COD hingga di bawah baku mutu. Oleh karena itu, adsorpsi karbon aktif direkomendasikan sebagai metode yang lebih efektif dibandingkan aerasi dalam mengolah limbah cair dengan kadar COD tinggi.

B. Sulfida (H₂S)

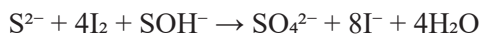
Sulfida terlarut (H₂S) yang terkandung dalam limbah cair migas memiliki potensi toksik bagi mikroorganisme dan ekosistem perairan apabila kadarnya melebihi baku mutu. Berdasarkan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010, batas maksimal sulfida dalam air limbah kegiatan minyak dan gas ditetapkan $\leq 0,5$ mg/L. Penelitian di kilang PPSDM Migas Cepu menemukan bahwa kadar H₂S belum selalu memenuhi baku mutu tersebut, terutama bila limbah berasal dari proses pengolahan minyak yang mengandung sulfur tinggi seperti desulfurisasi, pemecahan (cracking), atau dari kontaminasi minyak dan agregat sulfidik yang terlarut (Kumala et al., 2024). Tingginya H₂S juga dapat muncul akibat proses anaerobik di bagian instalasi pengolahan dimana oksigen rendah, sehingga bakteri sulfat-reduksi membentuk H₂S dari sulfat dan bahan organik bersulfur.

Pengujian kadar sulfida dilakukan dengan metode iodometri berdasarkan SNI 6989.75-2009. Prinsip metode ini adalah penambahan iodin berlebih ke dalam sampel yang mengandung sulfida, diikuti dengan titrasi menggunakan larutan natrium tiosulfat (Na₂S₂O₃) untuk menentukan kadar sulfida yang tersisa. Reaksi utama yang terjadi dalam metode ini adalah:



(Yani, 2025)

Namun, jika sampel memiliki pH 9-13, terjadi reaksi sampingan yang mengubah sulfida menjadi sulfat:



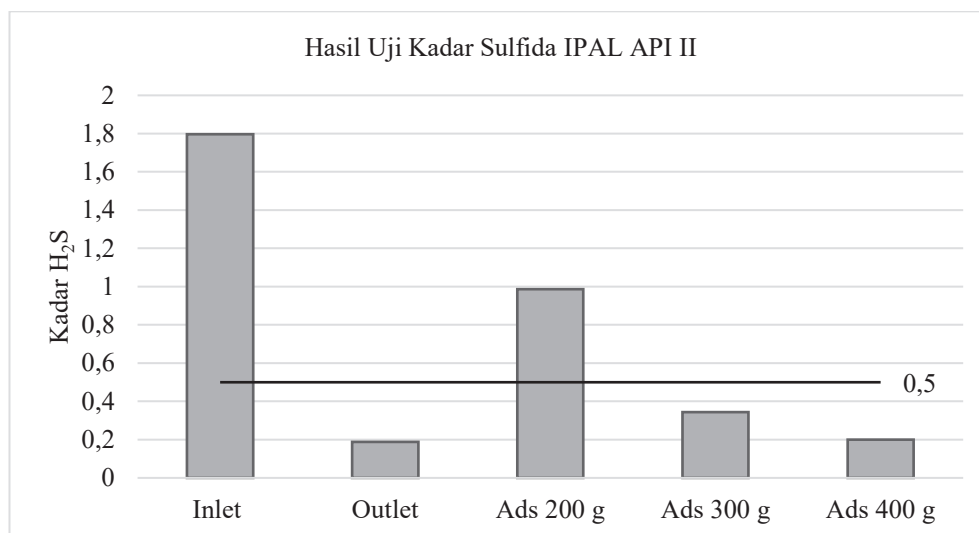
(Yani, 2025)

Untuk mencegah reaksi sampingan ini, larutan sulfida harus diasamkan terlebih dahulu dengan HCl sebelum penambahan iodin. Berikut merupakan tabel yang menyajikan hasil perhitungan kadar sulfida pada berbagai perlakuan pengolahan air limbah di IPAL API II.

Tabel 2. Hasil Analisis Kadar Sulfida pada Inlet, Outlet Aerasi, dan Setelah Adsorpsi Karbon Aktif.

Sampel	Iodin 0,0310N (mL)	Na ₂ S ₂ O ₃ 0,0262N (mL)	Volume sampel (mL)	Kadar Sulfida (mg/L S ²⁻)
Inlet	5	4,62	302,4	1,796
Adsorpsi 200 g	5	5,64	117,24	0,986
Adsorpsi 300 g	5	5,82	117,32	0,343
Adsorpsi 400 g	5	5,86	117,52	0,199
Outlet	5	5,78	303	0,188

Pengujian dilakukan dengan dua perlakuan, yaitu tanpa adsorpsi dan dengan adsorpsi menggunakan variasi massa adsorben (200 gram, 300 gram, dan 400 gram). Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar sulfida terlarut pada inlet dan outlet IPAL API II tanpa adsorpsi adalah 1,796 mg/L S^{2-} dan 0,188 mg/L S^{2-} . Sementara itu, dengan adsorpsi 200 gram, 300 gram, dan 400 gram, kadar sulfida menurun menjadi 0,986 mg/L S^{2-} , 0,343 mg/L S^{2-} , dan 0,199 mg/L S^{2-} . Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010, batas maksimum sulfida terlarut yang diperbolehkan adalah 0,5 mg/L. Oleh karena itu, sampel inlet tanpa adsorpsi dan dengan adsorpsi 200 gram tidak memenuhi baku mutu, sedangkan sampel dengan adsorpsi 300 gram dan 400 gram, serta sampel outlet dengan aerasi, memenuhi standar.



Gambar 2. Hasil Uji Kadar Sulfida IPAL API II

Efektivitas adsorpsi dalam menurunkan kadar sulfida terlarut bergantung pada luas permukaan dan jumlah pori karbon aktif. Adsorben 400 gram menunjukkan kinerja terbaik dengan penurunan kadar sulfida hingga 0,199 mg/L S^{2-} , sedangkan adsorben 300 gram juga efektif dengan hasil 0,343 mg/L S^{2-} . Namun, adsorben 200 gram belum cukup efektif karena kadar sulfida masih di atas ambang batas, yaitu 0,986 mg/L S^{2-} . Peningkatan jumlah karbon aktif meningkatkan luas permukaan dan jumlah pori yang tersedia untuk menyerap sulfida, sehingga proses adsorpsi menjadi lebih optimal.

Jika dibandingkan dengan proses aerasi pada outlet IPAL API II, yang menghasilkan kadar sulfida terlarut sebesar 0,188 mg/L S^{2-} , selisihnya dengan adsorpsi 400 gram sangat kecil, yaitu hanya 0,011 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun adsorpsi cukup efektif, aerasi tetap menjadi metode yang lebih stabil dalam menurunkan kadar sulfida. Stabilitas aerasi disebabkan karena proses ini mampu mengoksidasi H_2S menjadi bentuk yang kurang toksik seperti sulfat (SO_4^{2-}) atau elemental sulfur (S^0), sehingga kadar sulfida dapat ditekan secara konsisten tanpa sangat bergantung pada dosis adsorben (Kumala et al., 2024). Di sisi lain, adsorpsi dengan karbon aktif lebih dipengaruhi oleh kapasitas adsorben dan cenderung menurun efektivitasnya ketika pori-pori jenuh. Oleh karena itu, kombinasi antara aerasi yang memberikan kestabilan oksidasi dan adsorpsi yang mampu menyerap sisa senyawa sulfida menjadi strategi terbaik untuk memastikan air limbah yang dihasilkan memenuhi standar lingkungan sebelum dibuang ke perairan (Yani, 2025).

C. Uji Amonia

Air limbah mengandung nitrogen dalam bentuk organik yang diubah oleh bakteri menjadi amonia (NH_3). Dalam kondisi aerobik, bakteri dapat mengoksidasi amonia menjadi nitrit dan nitrat. Pengukuran kadar amonia dilakukan menggunakan metode spektrofotometri fenat berdasarkan SNI 06-6989.30-2005, yang didasarkan pada Reaksi Berthelot. Reaksi ini terjadi antara amonia, fenol, dan hipoklorit (OCl^-) dalam kondisi basa, menghasilkan senyawa indofenol berwarna biru yang dapat dideteksi pada panjang gelombang 640 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Tahap awal reaksi ini adalah reaksi



kloroaminasi:



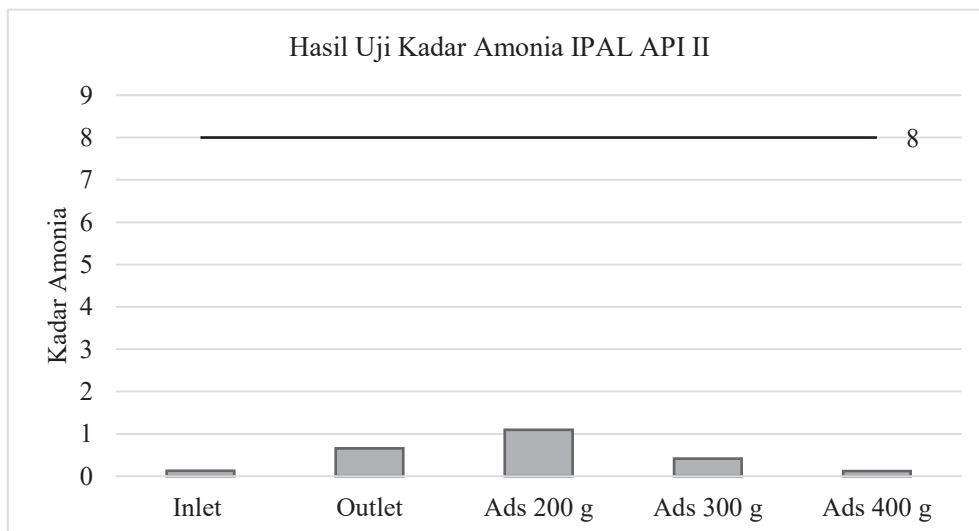
(Wulandari et al., 2023)

Monokloroamin (NH_2Cl) yang terbentuk kemudian bereaksi dengan fenol, menghasilkan indofenol biru dalam reaksi berikutnya. Berikut merupakan tabel yang menyajikan hasil perhitungan kadar amonia pada berbagai perlakuan pengolahan air limbah di IPAL API I.

Tabel 3. Hasil Analisis Kadar Amonia pada Inlet, Outlet Aerasi, dan Setelah Adsorpsi Karbon Aktif

Sampel	Absorbansi (nm)		Konsentrasi		Absorbansi rata-rata(nm)	Konsentrasi rata (mg/L)
	1	2	1	2		
Inlet	0,013	0,014	0,128	0,133	0,0135	0,1305
Ads 200 g	0,076	0,078	0,647	0,662	0,077	0,6545
Ads 300 g	0,130	0,129	1,095	1,093	0,1295	1,094
Ads 400 g	0,047	0,049	0,410	0,428	0,048	0,419
Outlet	0,11	0,13	0,111	0,128	0,012	0,1195

Pengujian dilakukan dengan dua perlakuan, yaitu tanpa adsorpsi dan dengan adsorpsi menggunakan variasi adsorben karbon aktif (200 gram, 300 gram, dan 400 gram). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi amonia pada inlet IPAL API II tanpa adsorpsi adalah 0,1305 mg/L, sementara pada outlet dengan aerasi adalah 0,1195 mg/L. Setelah perlakuan adsorpsi, kadar amonia meningkat menjadi 0,6545 mg/L (200 gram), 1,094 mg/L (300 gram), dan 0,419 mg/L (400 gram). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010, baku mutu amonia dalam air limbah adalah 10 mg/L, sehingga semua sampel masih berada dalam batas aman. Namun, peningkatan kadar amonia setelah adsorpsi menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak selalu efektif dalam menurunkan kadar amonia.



Gambar 3. Hasil Uji Kadar Amonia IPAL API II

Hasil percobaan menunjukkan bahwa adsorpsi dengan 400 gram karbon aktif memberikan hasil terbaik dibandingkan variasi lainnya, tetapi masih lebih tinggi daripada metode aerasi. Peningkatan kadar amonia setelah adsorpsi dapat disebabkan oleh kandungan nitrogen dalam bahan baku karbon aktif atau proses aktivasi yang kurang optimal. Jika karbon aktif berasal dari bahan dengan kandungan nitrogen tinggi (seperti batubara atau limbah pertanian), maka nitrogen organik dalam bahan tersebut dapat terurai menjadi amonia selama proses adsorpsi. Selain itu, residu senyawa nitrogen dalam karbon aktif yang tidak diaktifasi dengan baik juga dapat larut ke dalam air, sehingga meningkatkan kadar amonia (Oktaviansyah, 2024).

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa sistem IPAL API II telah bekerja dengan baik dalam menurunkan kadar amonia hingga jauh di bawah baku mutu yang ditetapkan. Meskipun adsorpsi dengan 400 gram karbon aktif memberikan hasil terbaik dalam kelompok adsorpsi, metode ini masih kurang efektif dibandingkan aerasi. Mekanisme penurunan amonia melalui proses aerasi terutama terjadi karena dua jalur utama, yaitu volatilisasi amonia dan nitrifikasi biologis. Pada kondisi pH basa, amonium (NH_4^+) dalam air berada dalam kesetimbangan dengan amonia bebas (NH_3). Proses aerasi meningkatkan transfer gas sehingga NH_3 bebas mudah terlepas ke udara (volatilisasi). Selain itu, aerasi juga memperkaya oksigen terlarut (DO) yang mendukung pertumbuhan bakteri nitrifikasi, terutama *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*. Bakteri ini mengoksidasi amonia menjadi nitrit (NO_2^-) dan kemudian menjadi nitrat (NO_3^-), sehingga konsentrasi amonia dalam air limbah berkurang signifikan (Pratiwi et al., 2019). Oleh karena itu, aerasi tetap menjadi metode yang lebih direkomendasikan untuk pengolahan amonia dalam air limbah karena menghasilkan kadar amonia yang lebih rendah dibandingkan metode adsorpsi.

D. Uji Fenol

Fenol merupakan senyawa organik yang banyak ditemukan dalam air limbah industri dan bersifat berbahaya karena karsinogenik serta dapat mencemari lingkungan perairan. Senyawa ini dapat menyebabkan bau tidak sedap, beracun bagi organisme perairan, dan sulit terurai secara alami karena toksisitasnya (Oktaviani & Purnamasari, 2024). Oleh karena itu, pengujian kadar fenol dalam air limbah menjadi penting untuk memastikan bahwa kandungan fenol tidak melebihi baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 19 Tahun 2010, yaitu 0,8 mg/L. Pengujian kadar fenol dalam penelitian ini menggunakan metode spektrofotometri berdasarkan SNI 06-6989.21.212005, yang memanfaatkan reaksi fenol dengan 4-aminoantipirin dalam suasana basa untuk menghasilkan kompleks berwarna yang dapat dianalisis pada panjang gelombang 500 nm.

Proses pengujian dilakukan dengan dua metode perlakuan, yaitu dengan aerasi dan adsorpsi menggunakan karbon aktif sebagai adsorben. Adsorpsi dilakukan dengan tiga variasi massa adsorben, yaitu 200 gram, 300 gram, dan 400 gram, untuk melihat efektivitasnya dalam menurunkan kadar fenol. Tahap awal melibatkan distilasi sampel air limbah untuk memurnikan fenol dari zat pengotor yang tidak mudah menguap. Setelah itu, larutan distilat dianalisis dengan metode spektrofotometri setelah ditambahkan larutan buffer fosfat, NH_4OH , 4-aminoantipirin, dan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ untuk menghasilkan kompleks berwarna. Semakin tinggi intensitas warna kompleks yang terbentuk, semakin tinggi pula kandungan fenol dalam sampel.

Berikut merupakan tabel yang menyajikan hasil perhitungan kadar fenol pada berbagai perlakuan pengolahan air limbah di IPAL API II.

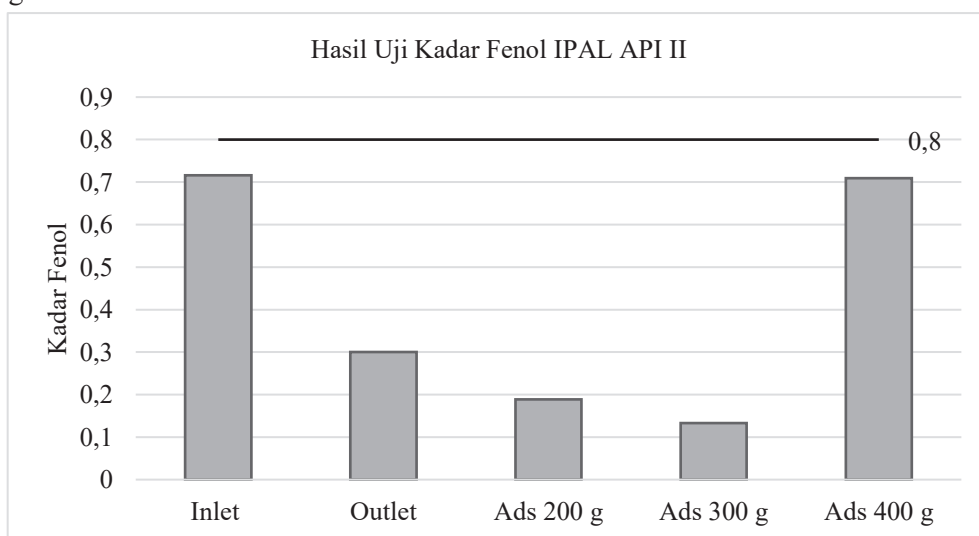
Tabel 4. Hasil Analisis Kadar Fenol pada Inlet, Outlet Aerasi, dan Setelah Adsorpsi Karbon Aktif

Sampel	Absorbansi		Konsentrasi		Absorbansi rata-rata	Konsentrasi rata (mg/L)
	1	2	1	2		
Inlet	0,073	0,072	0,721	0,711	0,0725	0,716
Adsorpsi 200 gr	0,021	0,020	0,304	0,296	0,0205	0,3
Adsorpsi 300 gr	0,006	0,008	0,182	0,196	0,007	0,189
Adsorpsi 400 gr	0,001	0,001	0,125	0,141	0,001	0,133
Outlet	0,071	0,72	0,708	0,710	0,0715	0,709

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi fenol pada inlet IPAL API II tanpa adsorpsi adalah 0,716 mg/L, sedangkan pada outlet tanpa adsorpsi adalah 0,709 mg/L, yang menunjukkan bahwa sistem IPAL dengan aerasi kurang efektif dalam menurunkan kadar fenol. Dengan perlakuan adsorpsi, konsentrasi fenol turun secara signifikan, yaitu menjadi 0,3 mg/L untuk 200 gram adsorben, 0,189 mg/L untuk 300 gram, dan 0,133 mg/L untuk 400 gram. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak adsorben yang digunakan, semakin efektif proses adsorpsi dalam menurunkan kadar fenol. Proses ini terjadi melalui mekanisme adsorpsi fisik dan kimia, di mana molekul fenol menempel pada permukaan



dan pori-pori karbon aktif, baik melalui gaya Van der Waals maupun pembentukan ikatan kimia dengan gugus fungsional karbon aktif.



Gambar 4. Hasil Uji Kadar Fenol IPAL API II

Dari hasil perbandingan antara metode adsorpsi dan aerasi, terbukti bahwa adsorpsi dengan karbon aktif lebih efektif dibandingkan sistem aerasi. Meskipun sistem IPAL dengan aerasi tetap dapat memenuhi baku mutu, adsorpsi dengan 400 gram karbon aktif memberikan hasil terbaik dalam menurunkan kadar fenol hingga 0,133 mg/L. Hal ini disebabkan oleh luas permukaan karbon aktif yang besar, ukuran pori yang sesuai, serta waktu kontak yang cukup untuk mengikat molekul fenol. Dengan demikian, metode adsorpsi dapat menjadi alternatif yang lebih efisien untuk pengolahan air limbah industri yang mengandung fenol dibandingkan sistem aerasi konvensional (Yusuf et al., 2024).

E. Uji pH

Tingkat keasaman (pH) merupakan parameter penting dalam menilai kualitas air limbah, karena pH yang terlalu tinggi atau rendah dapat menyebabkan pencemaran dan membahayakan lingkungan. Pengukuran pH dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan SNI-06-6989.11-2004 menggunakan pH meter, yang bekerja dengan prinsip potensiometri untuk mengukur aktivitas ion hidrogen dalam larutan. Pengukuran dilakukan langsung di lokasi pengambilan sampel guna menghindari perubahan pH akibat faktor eksternal yang dapat memengaruhi hasil.

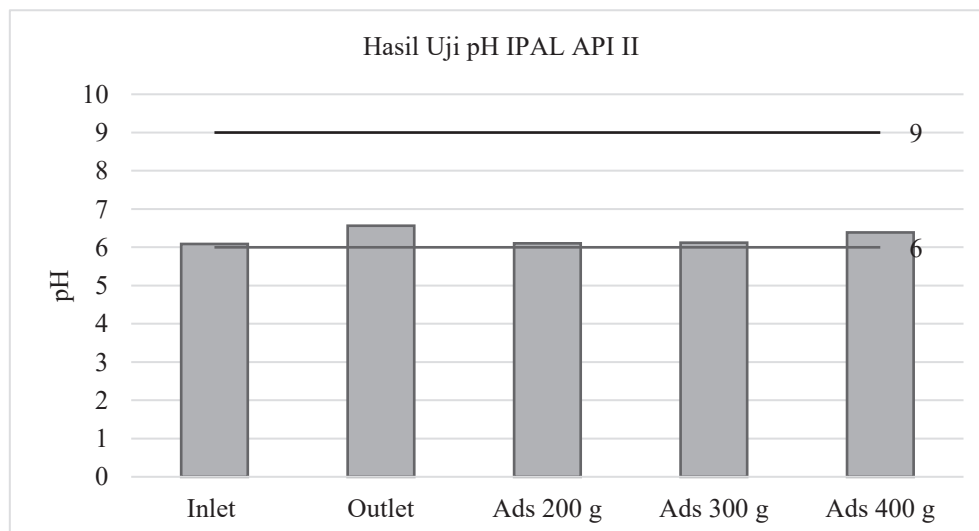
Berikut merupakan tabel yang menyajikan hasil perhitungan kadar pH pada berbagai perlakuan pengolahan air limbah di IPAL API II.

Tabel 5. Hasil Analisis Kadar pH pada Inlet, Outlet Aerasi, dan Setelah Adsorpsi Karbon Aktif.

Sampel	pH
Inlet	6,09
Inlet Adsorpsi 200 g	6,10
Inlet Adsorpsi 300 g	6,12
Inlet Adsorpsi 400 g	6,39
Outlet	6,56

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh sampel air limbah dari IPAL API II berada dalam rentang yang diperbolehkan menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 19 Tahun 2010, yaitu antara pH 6-9. pH awal pada inlet tercatat sebesar 6,09 yang sedikit asam dan pH outlet 6,56. Setelah proses adsorpsi dengan karbon aktif, terjadi peningkatan pH secara bertahap, di mana variasi 200 gram adsorben meningkatkan pH menjadi 6,10, sedangkan variasi 300 gram dan 400 gram meningkatkan pH masing-masing menjadi 6,12 dan 6,39. Peningkatan pH setelah penambahan karbon aktif umumnya

disebabkan oleh adanya gugus basa dan mineral alkali yang masih melekat pada permukaan adsorben. Karbon aktif yang berasal dari biomassa atau batubara biasanya mengandung abu, terutama berupa kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), atau sisa senyawa karbonat, yang dapat terlarut perlahan dalam air dan melepaskan ion hidroksida (OH⁻). Ion OH⁻ inilah yang menyebabkan kenaikan pH. Selain itu, proses adsorpsi juga dapat mengurangi kandungan senyawa organik asam dalam limbah, sehingga pH larutan bergeser ke arah netral (Khairuddin et al., 2022).



Gambar 5. Hasil Uji pH IPAL API II

Peningkatan pH yang lebih signifikan terjadi setelah proses aerasi pada outlet, dengan pH mencapai 6,56 yang mendekati kondisi netral. Hal ini menunjukkan bahwa aerasi lebih efektif dibandingkan adsorpsi dalam menstabilkan pH air limbah, yaitu menjaga agar pH air limbah tetap berada dalam rentang aman (6–9) sesuai baku mutu lingkungan sehingga tidak bersifat asam maupun basa ekstrem yang dapat membahayakan biota perairan maupun merusak instalasi pengolahan. Selain meningkatkan pH, aerasi juga membantu memperbaiki kualitas air limbah sebelum dibuang ke lingkungan, sehingga sistem IPAL API II dapat berfungsi lebih optimal dalam menjaga standar baku mutu lingkungan (Nurhasni et al., 2019).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, IPAL API II mampu menurunkan kadar pencemar utama dalam air limbah hingga memenuhi baku mutu. Aerasi terbukti lebih efektif untuk menurunkan amonia dan sulfida, sedangkan adsorpsi karbon aktif lebih unggul dalam mengurangi COD dan fenol. Dengan demikian, kombinasi aerasi dan adsorpsi merupakan metode pengolahan yang paling optimal untuk memastikan kualitas air limbah sesuai standar lingkungan sebelum dibuang ke perairan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alatalo, S. M., Thomas, R. G., Ojala, S., & Keiski, R. L. (2020). Activated carbon-based materials for water treatment: Recent advances and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104303. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104303>
- Chen, Y., Zhang, L., & Chen, G. (2020). Removal of phenol and organic pollutants in wastewater using adsorption and oxidation technologies: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104423. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104423>
- Dai, L., Zhu, W., Liu, R., Yang, S., & Ni, J. (2022). Biomass-derived porous carbon for efficient adsorption of organic pollutants in wastewater. *Chemosphere*, 292, 133379. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133379>
- Fitrianingsih, G., Adzillah, W. N., & Ratnawati, K. (2025). Evaluasi efisiensi adsorpsi COD dan fosfat



- pada limbah laundry menggunakan karbon aktif tempurung kelapa. *Jurnal Analisis Industri*, 20(1), 55–63.
- Khairuddin, R., Ruslan, M. R., Puspitasari, D. J., Indriani, Sosidi, H., Prismawiryanti, & Mirzan, M. (2022). Penurunan kadar COD pada limbah cair industri tahu menggunakan arang aktif dari pelepah kelapa sawit (*Elaeis guenensis* Jacq.). *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 8(2), 171–177. <https://doi.org/10.22487/kovalen.2022.v8.i2.17177>
- Kumala, E. C., Jasmine, M. F., Rimansa, S. A. P., Amalia, F., Mulyanti, H., & Kusuma, R. M. (2024). Analisis kualitas buangan air limbah unit pengolahan migas (kilang) PPSDM Migas Cepu. *Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, 7(2), 21–32.
- Muhammad, A., Sari, D. P., & Handayani, N. (2023). Analisis efektivitas karbon aktif dalam menurunkan kadar pencemar air limbah domestik. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 15(3), 145–154.
- Nurhasni, N., Oktiarni, D., & Asmadi, A. (2019). Pengaruh aktivasi karbon aktif tempurung kelapa terhadap sifat kimia dan fisika serta aplikasinya untuk penjernihan air. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 13(1), 9–18.
- Oktaviani, T., & Purnamasari, E. S. (2024). Analisis kadar fenol dalam air limbah domestik pada outlet IPAL Bojongsoang menggunakan spektrofotometri sinar tampak. *JSChemica*, 1(1), 33–40.
- Oktaviansyah, I. (2024). Pengaruh karbon aktif tempurung kelapa dan karbon aktif industrial terhadap parameter amonia pada Danau Sipin. *Jurnal Redoks*, 9(2), 137–146.
- Pratiwi, I. A., Rahman, A., & Fajar, R. (2019). Efisiensi aerasi dalam menurunkan kadar amonia pada limbah cair domestik. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 25(2), 89–96. Universitas Hasanuddin.
- Rosmalina, D., Putri, M. A., & Yuliani, T. (2023). Analisis COD dengan metode refluks tertutup pada limbah cair industri. *Jurnal Analisis Kimia*, 9(2), 55–62.
- Safitri, N. (2018). Studi adsorpsi senyawa organik dalam limbah cair menggunakan karbon aktif. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(1), 15–22.
- Wulandari, D., Pradana, A., & Fitriyah, L. (2023). Pengujian analisis kadar amonia dalam air sungai di daerah industri SIER Surabaya menggunakan metode fenat secara spektrofotometri visible. *Jurnal Ilmiah Teknosains*, 9(2), 55–62.
- Yani, S. N. D. (2025). Penurunan kadar H₂S pada air limbah kilang PPSDM Migas Cepu dengan metode adsorpsi. *Jurnal Distilat*, 11(1), 45–53. Polinema.
- Yusuf, Z., Fadhilah, S. N., & Zein, R. (2024). Degradasi fenol menggunakan TiO₂/Zeolit secara fotolisis dan aplikasinya pada air limbah karet. *Jurnal Riset dan Eksperimen Kimia (JREC)*, 6(1), 55–64. [https://doi.org/10.25299/jrec.2024.vol6\(1\).17258](https://doi.org/10.25299/jrec.2024.vol6(1).17258)
- Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A., & Chen, H. (2020). Removal of COD, NH₄-N, and perfluorinated compounds from wastewater using ZnO-coated activated carbon. *Water Science and Technology*, 81(11), 2459–2470. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.215>

