

Analisis Emisi Pembakaran Boiler dengan Bahan Bakar Kayu Menggunakan Metode Stoikiometri pada Industri Pengolahan Kayu di Kabupaten Gresik

Muhammad Elvan Akmaladi Adil¹⁾, Praditya Sigit Ardisty Sitogasa^{1)*}

¹⁾Program Studi Teknik Lingkungan, UPN Veteran Jawa Timur, Jl Rungkut Madya, Surabaya

*Email: praditya.s.tl@upnjatim.ac.id

Abstrak

Penggunaan boiler memiliki peran yang sangat penting dalam menunjang proses produksi pada berbagai industri, salah satunya industri kayu. Boiler menghasilkan panas dari perebusan air yang kemudian menghasilkan uap panas, yang dialirkan ke berbagai unit produksi yang memerlukan energi panas. Penelitian ini menganalisis emisi gas buang dari pembakaran limbah kayu pada boiler di salah satu industri pengolahan kayu di Gresik, Jawa Timur, dengan pendekatan perhitungan stoikiometrik. Kayu bakar yang digunakan memiliki komposisi kimia dominan berupa karbon (43,43%), oksigen (48,21%), dan hidrogen (6,58%). Teknik pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan data primer, yaitu berdasarkan data aktual tahun 2024 yang diperoleh dari rekap jumlah bahan baku kayu yang digunakan dan limbah kayu yang dihasilkan oleh industri pada saat melakukan proses produksi. Proses pembakaran dianalisis berdasarkan neraca massa dan kebutuhan oksigen untuk memperkirakan laju alir mol serta konsentrasi emisi yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi yang dihasilkan, seperti partikulat ($124,258 \text{ mg/Nm}^3$), SO_2 ($87,712 \text{ mg/Nm}^3$), dan NO_2 ($160,109 \text{ mg/Nm}^3$), masih berada jauh di bawah ambang batas yang ditetapkan dalam Permen LH No. 7 Tahun 2007. Dengan demikian, proses pembakaran limbah kayu pada boiler ini dapat dikategorikan aman bagi lingkungan.

Kata kunci: boiler, emisi, stoikiometri

Abstract

The use of boilers plays a crucial role in supporting production processes across various industries, including the wood processing industry. Boilers generate heat from the boiling of water, which subsequently produces steam that is distributed to several production units requiring thermal energy. This study analyzes exhaust gas emissions from wood waste combustion in the boiler of a wood processing industry located in Gresik, East Java, using a stoichiometry calculation approach. The firewood used primarily consists of carbon (43,43%), oxygen (48,21%), and hydrogen (6,58%). Data collection was conducted using primary data, obtained from actual records in 2024 on the amount of raw wood used and wood waste generated during the production process. The combustion process was evaluated based on a mass balance and oxygen demand calculations to estimate the molar flow rate and emission concentrations produced. The results showed that the emissions, including particulates ($124,258 \text{ mg/Nm}^3$), SO_2 ($87,712 \text{ mg/Nm}^3$), and NO_2 ($160,109 \text{ mg/Nm}^3$), were well below the threshold limits set by the Indonesian Ministry of Environment Regulation No. 7 of 2007. Therefore, the combustion process of wood waste in this boiler can be categorized as environmentally safe.

Keywords: boiler, emission, stoichiometry

1. PENDAHULUAN

Peran boiler dalam proses produksi suatu industri sangatlah krusial. Hal ini dikarenakan boiler menjadi salah satu pondasi utama untuk menjaga kelancaran sebuah proses produksi (Putra & Wibisono, 2025). Boiler merupakan suatu sistem pemanasan yang umum nya digunakan dalam berbagai aplikasi industri yang menghasilkan uap panas dari berbagai bahan bakar (Aprilia & Hardjono, 2023). Salah satu pengaplikasian *boiler* pada proses produksi

terdapat pada proses *kiln dry* atau proses pengeringan kayu. Boiler akan mengaliri panas menuju heater dalam suatu sistem, panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal untuk pengeringan kayu pada *kiln dry* (Dewi, Effendi, & Alfian, 2022). Pengaplikasian boiler pada proses *kiln dry* ini juga digunakan oleh salah satu industri pengolahan kayu yang ada di Kecamatan Kebomas, Kabupaten Gresik. Boiler yang digunakan menggunakan bahan bakar limbah kayu hasil dari proses *sawmill* atau penggergajian. *Sawmill* atau penggergajian adalah proses mengolah kayu menjadi bentuk yang dapat diolah dengan mudah (Laksono, Susdiyanti, & Bintani, 2016). Kayu yang digunakan sebagai bahan bakar boiler memiliki kandungan komposisi berupa 43,43% karbon (C), 6,58% hidrogen (H), 0,36% sulfur (S), 48,21% oksigen (O), 0,4% nitrogen (N) serta komponen lain (Pane, Ismail, Hartantrie, & Rifki, 2022)

Hasil pembakaran pada boiler akan menghasilkan emisi yang nantinya dialirkan melalui sebuah cerobong. Cerobong boiler merupakan alat ventilasi yang terbuat dari besi baja atau stainless yang dirakit untuk mengeluarkan gas buang beracun ke udara ambien (Kurniawati, 2019). Emisi yang dikeluarkan dari cerobong asap, terutama dalam bentuk gas akan larut di udara dan dapat langsung masuk ke paru-paru manusia, kemudian diserap ke dalam sistem peredaran darah (Aprilia & Hardjono, 2023) Hal ini menyebabkan gangguan fungsi paru-paru dan dapat mempengaruhi kesehatan masyarakat, terutama anak-anak dan orang tua. Sehingga untuk mengurangi dampak buruk emisi yang dihasilkan dari proses tersebut dibuatlah baku mutu boiler atau ketel uap (Nurfadillah & Petasule, 2022)

Baku mutu boiler atau ketel uap diatur dalam Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2007 Tentang Baku Mutu Emisi Pada Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap. Pada ketentuan tersebut, boiler dengan bahan bakar biomassa kayu memiliki beberapa parameter polutan seperti partikulat sebesar 350 mg/Nm³, SO₂ sebesar 800 mg/Nm³, NO₂ sebesar 1000 mg/Nm³ dan beberapa parameter lainnya yang terkandung dalam hasil pembakaran biomassa kayu. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kadar konsentrasi polutan yang dihasilkan pada proses pembakaran boiler berbahan bakar kayu. Studi ini dilakukan dengan melakukan analisis polutan yang dihasilkan berdasarkan kapasitas dan proses produksi industri pengolahan kayu. Selain itu, untuk mengetahui kadar konsentrasi emisi yang dihasilkan oleh pembakaran boiler secara lebih detail, analisis tambahan dilakukan dengan menggunakan metode stoikiometri untuk mengetahui kadar konsentrasi emisi secara rinci berdasarkan reaksi kimia yang terjadi akibat proses pembakaran yang terjadi di dalam boiler.

2. BAHAN DAN METODE

Terdapat beberapa metode yang kami gunakan dalam penelitian ini. Pengumpulan data kami lakukan dengan melakukan kegiatan observasi dan pencatatan data primer. Setelah data primer didapatkan nantinya dilakukan analisis stoikiometri untuk mengetahui besaran emisi yang dihasilkan pada proses produksi industri kayu. Pada tahapan pengumpulan data, dilakukan observasi dan pencatatan data primer berdasarkan kegiatan produksi yang dilakukan oleh industri kayu di Kabupaten Gresik. Pendataan dilakukan pada unit *sawmill* pada periode bulan Januari-Desember tahun 2024. Berikut ini adalah jumlah limbah kayu yang dihasilkan pada proses *sawmill* berdasarkan neraca massa produksi Industri Pengolahan Kayu yang ada di Gresik.

Tabel 1. Neraca Massa Proses *Sawmill* Industri Pengolahan Kayu Periode Januari-Desember 2024

Input		Proses	Output			
Bahan	ton/tahun		Produk	ton/tahun	Non Produk	ton/tahun
Potongan Kayu	14.806,25	Saw Mill	Kayu Potong	12.141,13	Limbah Kayu	2.132,10
					Partikulat debu	373,12
					Partikulat debu	106,61

Setelah melakukan identifikasi terhadap jumlah limbah kayu yang dihasilkan dalam proses *sawmill*, dilakukan studi literatur untuk mengetahui komposisi kayu yang digunakan berdasarkan *Ultimate* dan *Proximate Analysis*. Jenis kayu yang umumnya digunakan pada Industri Pengolahan Kayu adalah Kayu Albasia atau Sengon. Berikut ini adalah komposisi Kayu Albasia berdasarkan *Ultimate* dan *Proximate Analysis*.

Penelitian dilakukan menggunakan data kuantitatif. Data kuantitatif yang digunakan antara lain konsentrasi beban emisi yang dikeluarkan dari boiler dan nilai efisiensi alat pengendali terhadap parameter baku mutu emisi. Parameter pencemar udara pada penelitian ini adalah gas SO₂, NO₂ dan partikulat. Prinsip perhitungan beban emisi SO₂, NO₂ dan partikulat adalah dengan metode stoikiometri.

Tabel 2. *Ultimate dan Proximate Analysis Kayu Albasia*

Analisis	Parameter	Konsentrasi
Nilai Kalor	<i>Gross Calorific Value</i>	4002 kkal/kg
<i>Proximate (%) adb</i>	Kadar Air	12,78%
	Kadar Abu	1,02%
	<i>Volatile Matter</i>	71,51%
	<i>Fixed Carbon</i>	14,69%
<i>Ultimate (%) adb</i>	Sulphur	0,36%
	Karbon	43,43%
	Hidrogen	6,58%
	Nitrogen	0,4%
	Oksigen	48,21%

Sumber: (Pane, Ismail, Hartantrie, & Rifki, 2022)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Limbah kayu yang digunakan pada proses pembakaran menggunakan boiler ini menggunakan bahan bakar kayu dengan jumlah 2.132,10 ton/ tahun atau sekitar 172,3 kg/jam dengan memperhatikan jumlah hari kerja dalam 1 tahun dan jam kerja sebanyak 8 jam/hari. Boiler yang digunakan oleh Industri ini berguna untuk menunjang proses *kiln dry* yang ada di industri pengolahan kayu ini (Putra & Wibisono, 2025)

Untuk menggunakan metode stoikiometri perlu diketahui terkait dengan laju alir mol yang ada pada setiap unsur dan komposisi yang ada di dalam kandungan emisi yang dihasilkan dari hasil pembakaran limbah kayu (Wibisono & Hendrasarie, 2024). Berikut ini adalah data laju alir mol yang dihasilkan dari hasil pembakaran boiler Industri Pengolahan Kayu.

Tabel 3. Perhitungan Laju Alir Mol

Unsur	Berat *)	Laju Alir Massa (Kg/jam)	Berat Molekul Kg/Kmol)	Laju Alir Mol (Kmol/jam)
C	43.43%	74.825964	12	6.235497
H	6.6%	11.336745	1	11.336745
O	48.21%	83.061472	16	5.191342
N	0.40%	0.689164	14	0.049226
S	0.36%	0.620247	32	0.019383
Abu	1.02%	1.757368	-	-

Sumber : (Wibisono & Hendrasarie, 2024)

Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan laju alir mol dari unsur-unsur utama penyusun limbah kayu yang digunakan sebagai bahan bakar pada boiler. Unsur dengan persentase tertinggi adalah oksigen sebesar 48,21% dengan laju alir mol 5,1913 kmol/jam, diikuti karbon sebesar 43,43% dengan laju alir mol 6,2355 kmol/jam, dan hidrogen sebesar 6,6% dengan laju alir mol 11,3367 kmol/jam. Sementara itu, nitrogen dan sulfur masing-masing memiliki kandungan rendah sebesar 0,40% dan 0,36%, dengan laju alir mol 0,0492 kmol/jam dan 0,0194 kmol/jam. Abu sebesar 1,02% tidak dihitung dalam laju alir mol karena bersifat non-reaktif. Data ini menjadi dasar dalam analisis kebutuhan oksigen dan emisi hasil pembakaran. Berdasarkan laju alir mol maka kita dapat menentukan kadar laju alir pada setiap reaksi yang dihasilkan pada proses kimia yang terjadi pada pembakaran boiler.

Reaksi	1	$C_{(s)}$	+	1	$O_{2(g)}$	$\longrightarrow$	1	$CO_{2(g)}$	
Laju Alir Massa (Kg/jam)		59.861			159.629			219.489	
AR (kg/kmol)		12			32			44	
Laju Alir Mol (Kmol/jam)		4.988			4.988			4.988	
Reaksi	1	$C_{(s)}$	+	0.5	$O_{2(g)}$	$\longrightarrow$	1	$CO_{(g)}$	
Laju Alir Massa (Kg/jam)		14.965			19.954			34.919	
AR (kg/kmol)		12			32			28	
Laju Alir Mol (Kmol/jam)		1.247			0.624			1.247	
Reaksi	2	$H_{(s)}$	+	0.5	$O_{2(g)}$	$\longrightarrow$	1	$H_2O_{(g)}$	
Laju Alir Massa (Kg/jam)		11.337			90.694			102.031	
AR (kg/kmol)		1			32			18	
Laju Alir Mol (Kmol/jam)		11.337			2.834			5.668	
Reaksi				2	$O_{(g)}$	$\longrightarrow$	1	$O_{2(g)}$	
Laju Alir Massa (Kg/jam)					83.061			83.061	
AR (kg/kmol)					16			32	
Laju Alir Mol (Kmol/jam)					5.191			2.596	
Reaksi	1.0	$N_{(s)}$	+	1	$O_{2(g)}$	$\longrightarrow$	1	$NO_{2(g)}$	
Laju Alir Massa (Kg/jam)		0.68916			1.57523			2.26440	
AR (kg/kmol)		14			32			46	
Laju Alir Mol (Kmol/jam)		0.04923			0.04923			0.04923	
Reaksi	1	$S_{(s)}$	+	1	$O_{2(g)}$	$\longrightarrow$	1	$SO_{2(g)}$	
Laju Alir Massa (Kg/jam)		0.62025			0.62025			1.24049	
AR (kg/kmol)		32			32			64	
Laju Alir Mol (Kmol/jam)		0.01938			0.01938			0.01938	
Reaksi	1.0	$Cl_{(s)}$	+	1	$H_2O_{(g)}$	+	Energi	$\longrightarrow$	1 $HCl_{(g)}$ + 1 OH^-
Laju Alir Massa (Kg/jam)		0.0000			0.0000			0.0000	0.0000
AR (kg/kmol)		35.5			18.0			36.5	17.0
Laju Alir Mol (Kmol/jam)		0.0000			0.0000			0.0000	0.0000
Reaksi	2.0	$HCl_{(g)}$	+	0.5	$O_{2(g)}$	$\longrightarrow$	1	$H_2O_{(g)}$	+ 1 $Cl_2_{(g)}$
Laju Alir Massa (Kg/jam)		0.000			0.000			0.000	0.000
AR (kg/kmol)		36.5			32.0			18.0	71.0
Laju Alir Mol (Kmol/jam)		0.000			0.000			0.000	0.000

Gambar 1. Hasil Analisis Stoikiometri Proses Pembakaran Boiler

Sumber : (Loo & Koppejan, 2008)

Setelah melakukan analisis terkait dengan proses kimia pembakaran kayu bakar yang ada di dalam boiler dengan menggunakan metode stoikiometri, dilakukan analisis lanjutan untuk mengetahui jumlah kebutuhan oksigen yang ada di dalam proses kimia ini. Dalam proses kimia ini dapat diketahui jumlah unsur O atau oksigen yang digunakan dalam proses

pembakaran unsur C, H, N, dan S. Kandungan O dan N memiliki persentase sebanyak 21% dan 79% (Mawardi, Hartulistiyoso, & Yulianto, 2024). Kebutuhan oksigen teoritis adalah perhitungan ideal yang didasarkan pada stoikiometri teoritis dari reaksi kimia, disajikan sebagai berikut:

Tabel 4. Kebutuhan Oksigen Teoritis Boiler Kayu

Oksigen Pembakaran	Laju Alir (Kmol/jam)
Pembakaran C	5.6119
Pembakaran H	2.8342
Pembakaran N	0.04923
Pembakaran S	0.01938
O ₂ proses	-2.5957
Total O ₂ Reaksi (21%)	5.9191
Total N ₂ Reaksi (79%)	22.2670
Total Udara Stoikiometri	28.1861
Udara Excess (+20%)	33.8233
Total O ₂ (21%)	7.1029
Total N ₂ (79%)	26.7204

Sumber : (Mawardi, Hartulistiyoso, & Yulianto, 2024)

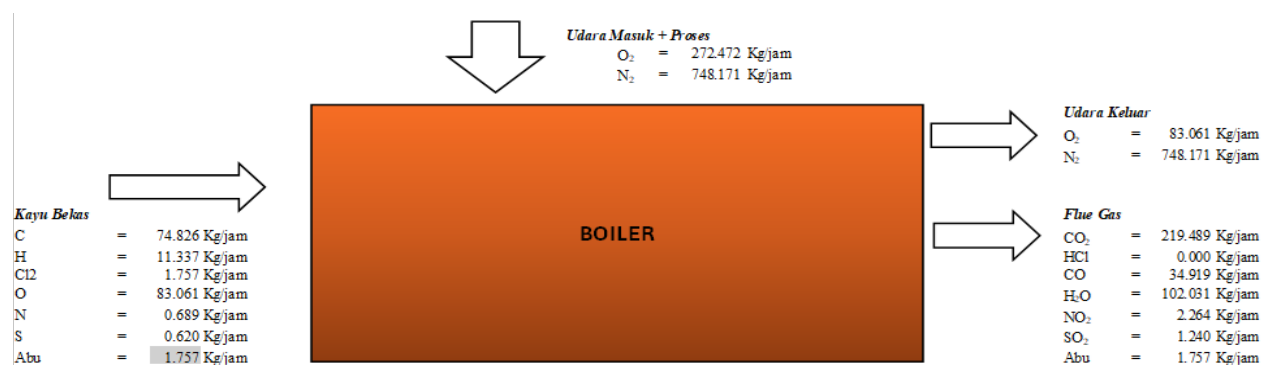
Tabel 4 menunjukkan kebutuhan oksigen teoritis untuk pembakaran limbah kayu pada boiler. Pembakaran unsur utama seperti karbon, hidrogen, nitrogen, dan sulfur masing-masing memerlukan oksigen sebesar 5,6119; 2,8342; 0,04923; dan 0,01938 kmol/jam. Sementara itu, kandungan oksigen dalam kayu sendiri mengurangi kebutuhan oksigen eksternal sebesar – 2,5957 kmol/jam. Total kebutuhan oksigen secara stoikiometrik adalah 5,9191 kmol/jam, dengan total udara sebesar 28,1861 kmol/jam. Setelah ditambahkan 20% excess air, total udara yang dibutuhkan menjadi 33,8233 kmol/jam, terdiri dari 7,1029 kmol/jam oksigen dan 26,7204 kmol/jam nitrogen.

Setelah mengetahui kebutuhan oksigen perlu dilakukan analisis lanjutan terkait neraca massa dari unsur-unsur yang ada di dalam reaksi kimia pembakaran Neraca massa unsur - unsur dalam bahan bakar yang digunakan merujuk pada perhitungan jumlah masing - masing unsur dalam bahan bakar, baik sebelum maupun setelah reaksi atau proses tertentu (Nur’Aini, 2024). Ini adalah cara untuk memastikan jumlah masing - masing komponen kimia yang berubah selama reaksi atau proses yang terjadi.

Tabel 5. Perhitungan Kestimbangan Massa Pembakaran Boiler Kayu

Komponen	Input (Kg/jam)			Output (Kg/jam)	Keterangan
	Produk	Udara	Proses		
C	74.826	-	-	-	Terbakar Habis
H	11.337	-	-	-	Terbakar Habis
O	83.061	-	-	-	Terbakar Habis
N	0.6892	-	-	-	Terbakar Habis
S	0.6202	-	-	-	Terbakar Habis
Cl	0.000	-	-	-	Terbakar Habis
Abu	1.757	-	-	1.757	Inert
O ₂	-	272.472	-	83.061	Hasil Reaksi
N	-	-	748.171	748.171	Inert
CO	-	-	-	219.489	Hasil Reaksi
CO	-	-	-	34.919	Hasil Reaksi
HO	-	-	0.000	102.031	Uap
NO	-	-	-	2.264	Hasil Reaksi
SO	-	-	-	1.240	Hasil Reaksi
HCl	-	-	0.000	0.000	Hasil Reaksi
Cl	-	-	-	0.000	Hasil Reaksi
OH ⁻	-	-	-	0.000	Uap
Total	172.291	272.472	748.171	1192.933	Balance

Dari hasil analisa neraca massa yang seimbang, menunjukkan bahwa jumlah masing - masing unsur yang masuk ke dalam proses (input) sama dengan jumlah masing - masing unsur yang keluar dari proses (output). Hal ini penting untuk memahami bagaimana proses mempengaruhi komposisi bahan bakar, serta untuk memantau efisiensi proses dan mengukur keseimbangan antara input dan output dalam suatu sistem.



Gambar 2. Input dan Output Sistem Boiler Berdasarkan Metode Stoikiometri

Setelah melakukan analisis menggunakan metode stoikiometri untuk menentukan kadar *flue gas* yang dihasilkan dalam proses pembakaran, kadar konsentrasi dapat diketahui sehingga dapat dibandingkan dengan baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah. Sesuai dengan Permenlh 7 tahun 2007 Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap, emisi yang kami analisis adalah Partikulat, SO₂, dan NO₂. Parameter lainnya seperti Karbon dioksida dan Karbon Monoksida tidak kami teliti karena baku mutu kedua gas tersebut tidak diatur kedalam baku mutu ketel uap / *boiler* yang menggunakan bahan bakar kayu. Berikut ini hasil analisis konsentrasi emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran boiler dengan bahan bakar kayu yang digunakan untuk menunjang proses produksi Industri Pengolahan Kayu.

Tabel 6. Perhitungan Konsentrasi Emisi Hasil Pembakaran Boiler Kayu

Nama Emisi	Kg/jam	Diameter	Luas (m ²)	Kecepatan (m/dtk)	Debit (m ³ /jam)	mg/jam	konsentrasi (mg/Nm ³)	Baku Mutu
Partikulat	1.757	0.5	0.196	20	14142.857	1757368	124.258	350
NO ₂	2.264	0.5	0.196	20	14142.857	2264395	160.109	1000
SO ₂	1.240	0.5	0.196	20	14142.857	1240495	87.712	800

Berdasarkan hasil analisis konsentrasi emisi yang dihitung berdasarkan jumlah *flue gas* dari proses pembakaran, diketahui bahwa konsentrasi partikulat yang dihasilkan adalah 124,258 mg/Nm³, SO₂ sebesar 160,109 mg/Nm³, dan NO₂ sebesar 87,712 mg/Nm³. Nilai ini masih jauh di bawah baku mutu emisi yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007, yakni masing-masing sebesar 350 mg/Nm³ untuk partikulat, 800 mg/Nm³ untuk SO₂, dan 1000 mg/Nm³ untuk NO₂. Jika dibandingkan dengan studi terdahulu oleh Wibisono & Hendrasarie (2024), emisi yang dihasilkan oleh industri PT.X justru jauh lebih tinggi, dengan SO₂ mencapai 955,91 mg/Nm³, NO₂ sebesar 1.744,92 mg/Nm³, dan partikulat sebesar 1.354,21 mg/Nm³. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti karakteristik bahan bakar, efisiensi pembakaran, desain dan kondisi boiler, serta keberadaan atau tidaknya alat pengendali pencemaran udara. Dalam penelitian ini, rendahnya nilai emisi yang dihasilkan diduga karena proses pembakaran berlangsung optimal dan belum menggunakan alat bantu pengendali seperti *Dust Collector* atau *Cyclone*. Hal ini memperlihatkan bahwa karakteristik limbah kayu sebagai bahan bakar memiliki potensi emisi yang relatif rendah bila dilakukan dengan kontrol pembakaran yang baik. Namun demikian, perlu dilakukan pengujian lebih lanjut terkait variasi kadar kelembaban bahan bakar, laju udara pembakaran, serta umur dan efisiensi unit boiler untuk memastikan konsistensi

rendahnya emisi. Dengan membandingkan hasil ini dengan studi sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa pengelolaan bahan bakar biomassa yang tepat serta pengendalian proses pembakaran merupakan kunci utama dalam meminimalkan emisi.

4. KESIMPULAN

Industri pengolahan kayu yang ada di Kabupaten Gresik menggunakan limbah kayu yang mereka hasilkan pada proses *sawmill* menjadi bahan bakar unit boiler yang digunakan untuk menunjang proses produksi pengolahan kayu. Kayu yang digunakan memiliki karakteristik berupa 43,43% karbon (C), 6,58% hidrogen (H), 0,36% sulfur (S), 48,21% oksigen (O), 0,4% nitrogen (N) serta komponen lain. Penggunaan limbah kayu tersebut menghasilkan emisi Partikulat sebesar 124.258 mg/Nm³, SO₂ sebesar 160.109 mg/Nm³, dan NO₂ sebesar 87,712 mg/Nm³. Kandungan emisi yang dihasilkan memiliki kadar yang jauh dibawah baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah melalui Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2007 yaitu partikulat sebesar 350 mg/Nm³, SO₂ sebesar 800 mg/Nm³, dan NO₂ sebesar 1000 mg/Nm³. Dari hasil perbandingan tersebut dapat disimpulkan bahwa emisi yang dihasilkan masih tergolong aman jika dibuang ke udara tanpa menggunakan alat pengendali pencemaran udara. Tetapi industri pengolahan kayu disarankan tetap melakukan pemantauan emisi secara berkala untuk memastikan bahwa tingkat emisi tetap konsisten dan tidak meningkat akibat perubahan kualitas bahan bakar, beban operasi, atau kondisi teknis unit boiler. Selain itu, pemasangan alat pengendali emisi seperti cyclone atau wet scrubber tetap direkomendasikan sebagai bentuk kehati-hatian dan upaya pemenuhan prinsip kehati-hatian dalam pengelolaan lingkungan hidup. Adapun untuk pengembangan penelitian ke depan, dapat dilakukan kajian mengenai efektivitas alat pengendali pencemaran udara terhadap perubahan komposisi bahan bakar biomassa, atau penelitian lebih lanjut terhadap dampak emisi terhadap kualitas udara ambien di sekitar industri. Selain itu, pendekatan *life cycle assessment* (LCA) juga dapat digunakan untuk menilai aspek keberlanjutan dari penggunaan limbah kayu sebagai bahan bakar di sektor industri pengolahan kayu.

DAFTAR PUSTAKA

Aprilia, D., & Hardjono, H. (2023). Penentuan efisiensi boiler dengan menggunakan metode langsung di PT X Lumajang. *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, 421-426.

- Dewi, Effendi, & Alfian. (2022). Analisa sistem manajemen pengoperasian bahan bakar boiler. *RELE (Rekayasa Elektro dan Energi)*, 1-6.
- Koppejan, J., van Loo, S., & (2008). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. London: Earthscan.
- Laksono, A. D., Susdiyanti, T., & Bintani, K. (2016). Produktivitas dan rendemen industri. *Nusa Sylva*, 50-58.
- Mawardi, H., Hartulistiyoso, E., & Yulianto, M. (2024). Studi teoritis karakteristik termal pembakaran biomassa tanaman energi pada berbagai kondisi udara dalam tungku adiabatik. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 254-271.
- Nur'Aini, S. D. (2024). Menghitung neraca massa, neraca panas, dan efisiensi termal pada boiler unit 1 kapasitas 400 mw pt pln indonesia power ubp surabaya. Yogyakarta: UPN Veteran Yogyakarta.
- Nurfadillah, R. A., & Petasule, S. (2022). Environmental health risk analysis (SO₂, NO₂, CO and TSP) in the bone bolango area road segment. *Journal Health and Science Community*, 76-89.
- Pane, E., Ismail, L. I., Hartantrie, & Rifki, D. (2022). Pengaruh proses terofaksi terhadap kualitas serbuk kayu. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 11-20.
- Putra, R. R., & Wibisono, A. Y. (2025). Analisis perbaikan kinerja heater pada sistem kiln dry di pt. Sejin lestari furniture. *JITET (Jurnal Informasi dan Teknik Elektro Terapan)*, 1523-1528.
- Wibisono, N. I., & Hendrasarie, N. (2024). Kajian beban emisi SO₂, NO₂ dan Partikulat dari cerobong boiler dengan bahan bakar kayu pada PT X. *Jurnal Serambi Engineering*, 9379-9389.