

Artikel Riset

Evaluasi Kinerja Alat Pengendali Partikulat Cyclone dan Wet Scrubber Unit Paper Mill 7/8 PT. Pura Nusapersada Kudus

Performance Evaluation of Cyclone Particulate Controller and Wet Scrubber Unit in Paper Mill 7/8 PT. Pura Nusapersada Kudus

Fauziah Rahmawati^{*}, Budi Prasetyo Samadikun¹, Mochtar Hadiwidodo¹

¹Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*} Penulis korespondensi, e-mail: fauziahrahmawati70@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan yang semakin meningkat sejalan dengan tingginya permintaan pasar terhadap suatu produk. Salah satu produk yang banyak digunakan yaitu kertas. Salah satu industri kertas daur ulang adalah PT. Pura Nusapersada Unit Paper Mill 7/8 dimana proses produksinya menggunakan uap air dari boiler yang berbahan bakar batubara. Proses tersebut berpotensi menghasilkan ash yang dapat mencemari udara sehingga diperlukan alat pengendali pencemar udara seperti cyclone dan wet scrubber. Diperlukan evaluasi terhadap efisiensi cyclone dan wet scrubber dengan mengetahui spesifikasi dan prinsip kerja alat, emisi yang dihasilkan, efisiensi alat, faktor yang mempengaruhi, permasalahan, operasi, dan pemeliharaannya. Metode yang digunakan yaitu pengamatan secara langsung, wawancara, data berupa dokumen, referensi, dan laporan rutin. Cyclone yang digunakan berjenis multicyclone dan wet scrubber berjenis venturi scrubber. Dari perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan efisiensi Boiler Hitachi 94,195% dan Boiler Hamada II 96,844%. Boiler tersebut menghasilkan emisi yang telah memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007. Perhitungan efisiensi sebaiknya setahun sekali agar kualitas alat terpantau dan tidak mencemari kualitas udara di sekitarnya.

Kata Kunci: Pengendalian pencemaran udara; cyclone, wet scrubber; industri kertas daur ulang.

Abstract

The need is increasing in line with the high market demand for a product. One product that is widely used is paper. One of the recycled paper industries is PT. Pura Nusapersada Unit Paper Mill 7/8, where the production process uses water vapor from a coal-fired boiler. This process can produce ash that can pollute the air so that air pollutant control devices such as cyclones and wet scrubbers are needed. It is necessary to evaluate the efficiency of the cyclone and wet scrubber by knowing the specifications and working principles of the tool, the emissions produced, the effectiveness of the equipment, the factors that influence, problems, operation, and maintenance. The method used is direct observation, interviews, data in the form of documents, references, and routine reports. The cyclone used is a multi-cyclone type, and the wet scrubber is a venturi scrubber type. From the calculations that have been done, the efficiency of the Hitachi Boiler is 94.195%, and the Hamada II Boiler is 96.844%. The boiler produces emissions that meet quality standards for the Minister of Environment Regulation No. 07/2007. The efficiency calculation should be done once a year so that the quality of the equipment is monitored and does not pollute the surrounding air quality.

Keywords: Air pollution control; cyclone, wet scrubber; recycled paper industry.

1. Pendahuluan

Perkembangan industri di Indonesia yang disertai dengan revolusi industri 4.0 telah mendorong inovasi-inovasi teknologi yang memberikan dampak perubahan terhadap kehidupan masyarakat. Hal ini membawa peluang bagi masyarakat, yaitu terpenuhinya kebutuhan manusia yang terus meningkat. Kebutuhan tersebut sejalan dengan tingginya permintaan pasar terhadap suatu produk. Untuk itu, maka penggunaan bahan baku yang semakin banyak akan menghasilkan limbah yang banyak juga diantaranya sampah padat, limbah cair, dan udara (Sulistyanto, 2006).

Kertas merupakan salah satu produk yang banyak digunakan oleh berbagai macam aktivitas manusia. Kertas dapat dijadikan untuk kebutuhan sekolah, kebutuhan kantor, pembungkus produk, dan sebagainya. Namun kertas dapat di daur ulang untuk menjadi produk kertas kembali. Selain mengurangi jumlah timbulan sampah padat daur ulang kertas akan menghemat bahan baku utama yaitu kayu yang diolah menjadi bubur kertas atau *pulp*. Karena kayu sendiri merupakan bahan yang berasal dari alam dan jika diambil secara terus-menerus akan mengakibatkan bencana alam yang cukup serius (Junaedi, 2014).

Industri kertas yang berdiri di Indonesia salah satunya adalah PT. Pura Group yang memiliki anak perusahaan yang bergerak pada daur ulang kertas yaitu PT. Pura Nusapersada, dimana memiliki dua unit daur ulang kertas yaitu *Paper Mill 7* dan *Paper Mill 8*. Pada unit *Paper Mill 7* menghasilkan produk berupa kertas *multilayer* dan pada unit *Paper Mill 8* menghasilkan produk berupa *singlelayer*. Produk yang dihasilkan berasal dari daur ulang kertas yang ditambahkan *pulp* yang kemudian dijadikan bubur dan dicetak untuk menjadi lembaran kertas lalu dikeringkan. Pada proses pengeringan dibutuhkan panas yang cukup tinggi agar proses pengeringan cepat. Maka dibutuhkan *boiler* yang menghasilkan uap air atau *steam* yang akan mengeringkan kertas tersebut (Panjaitan, 2017).

Pada *boiler* bahan bakar yang digunakan yaitu batubara, dimana pada proses pembakarannya akan menghasilkan *ash* atau abu. Dari jumlah *ash* akibat pembakaran batubara sekitar 80% merupakan *fly ash* dan 20% adalah *bottom ash* (Munir, 2008). *Fly ash* batubara adalah material yang memiliki ukuran butiran yang halus berwarna keabu-abuan dan diperoleh dari hasil pembakaran batubara (Wardani, 2008). *Fly ash* jika tidak ditanggulangi dapat berbahaya terutama partikulat. Menurut WHO partikulat yang berukuran 0,1-10 μm , ukuran ini berbahaya bagi kesehatan manusia (Pudjiastuti, 2002). Oleh sebab itu, dibutuhkan alat pengendali partikulat agar partikulat yang dibuang ke lingkungan dapat sesuai dengan baku mutu yang ditetapkan.

PT. Pura Nusapersada Unit *Paper Mill 7/8* menggunakan alat pengendali partikulat *cyclone* dan *wet scrubber*. *Cyclone* berfungsi untuk menyisahkan partikulat dengan ukuran yang lebih dari 10 mikron yang dihasilkan oleh *boiler*. Kemudian buangan dari *cyclone* akan ditangkap oleh *wet scrubber* yang bekerja dengan menyemprotkan air dan mengendapkan partikel dari aliran gas dan dapat menyisahkan partikulat dengan ukuran kurang dari 10 mikron (Wardani, 2008).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui spesifikasi dan prinsip kerja *cyclone* dan *wet scrubber*, melakukan evaluasi data hasil pengukuran emisi partikulat, menganalisis alat pengendali partikulat *cyclone* dan *wet scrubber*, mengetahui faktor apa saja yang mempengaruhi kinerja *cyclone* dan *wet scrubber*, mengetahui permasalahan-permasalahan yang terjadi pada *cyclone* dan *wet scrubber*, dan mengetahui pemeliharaan yang dilakukan PT. Pura Nusapersada untuk *cyclone* dan *wet scrubber* di Unit *Paper Mill 7/8*. Penelitian ini belum pernah dilakukan sebelumnya sehingga perlu untuk dilakukan sebagai dasar dari perencanaan dan evaluasi alat-alat pengendali partikulat lainnya.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT. Pura Nusapersada Unit *Paper Mill 7/8* selama tiga puluh hari, dimulai pada tanggal 2 Januari 2020 dan berakhir pada tanggal 31 Januari 2020. Pada tahap persiapan dilakukan persiapan-persiapan administrasi dan studi literatur di perpustakaan. Pada tahap pelaksanaan dilakukan pengamatan terhadap kondisi lapangan, metode yang dipakai dalam pengambilan data dibagi menjadi dua, yaitu data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari hasil observasi lapangan di PT. Pura Nusapersada, Kudus serta wawancara secara langsung kepada pihak terkait kemudian data tersebut

diolah dan dianalisis secara deskriptif untuk mendapatkan data-data sekunder. Data sekunder didapatkan melalui data-data dari pihak PT. Pura Nusapersada, Kudus. Data-data yang didapatkan dari tiap unit pekerjaan diolah dan dibahas secara deskriptif, kualitatif, dan kuantitatif. Metode perhitungan yang dipakai digunakan untuk menghitung konsentrasi partikulat menurut Cooper dan Alley (1994) yang akan dibandingkan dengan baku mutu yang dipakai yaitu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Spesifikasi dan prinsip kerja cyclone dan wet scrubber

3.1.1. Cyclone

Jenis *cyclone* yang digunakan PT. Pura Nusapersada Unit Paper Mill 7/8 yaitu *multicyclone* dengan jumlah buah pada boiler Hitachi sebanyak 30 buah *cyclone*, boiler Hamada I sebanyak 24 buah *cyclone*, dan Hamada II sebanyak 12 buah *cyclone*. Bahan yang digunakan adalah plat baja tahan karat. Partikulat yang berhasil disisihkan akan keluar dari *cone* dan partikulat yang lolos akan dikeluarkan melalui *outlet*. Prinsip kerja *cyclone* adalah memisahkan dan mengumpulkan debu kering dari aliran gas dengan menggunakan gaya sentrifugal. Sebuah *cyclone* mempunyai satu inlet tangensial menuju badan silinder, yang menyebabkan aliran gas menjadi berputar-putar. Partikel – partikel kemudian terlempar menuju dinding pada badan *cyclone*. Ketika partikel mencapai lapisan batas yang stagnan pada dinding, kemudian partikel – partikel tersebut meninggalkan arus aliran gas dan akhirnya jatuh dari dinding. Seiring dengan kehilangan energi pada gas di pusat pusaran, gas mulai berputar di dalam *vortex* dan menuju ke bagian atas, dan partikel halus yang masih terikat tersangkut di *vortex finder* sementara aliran udara bersihnya terikat tarikan ID Fan keluar menuju cerobong.

3.1.2. Wet scrubber

PT. Pura Nusapersada PM 7/8 Kudus menggunakan *wet scrubber* jenis *venturi scrubber* yang dilengkapi dengan *spray cyclone separator*. Alat ini dipasang karena masih kurangnya efisiensi pengumpulan partikel pada *cyclone* agar dapat memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007 dengan standard maksimum kadar partikulat 230 mg/Nm². Partikulat yang ditangkap berupa *fly ash* dengan ukuran dibawah 10 µm. *Venturi* didesain dengan ukuran diameter yang sempit pada bagian tengahnya dengan tujuan untuk mempercepat aliran gas *inlet*. Dalam *venturi* juga dilengkapi *shower* yang berfungsi untuk menyemprotkan air ke gas *inlet* agar terbentuk butiran-butiran air. Bagian utama *venturi scrubber* adalah badan *scrubber*. Berbentuk seperti tabung dengan bentuk kerucut pada bagian bawahnya. Dibagian bawah *scrubber* terdapat bak penampung yang berukuran 3,5 m x 1,5 m yang berfungsi untuk menampung partikel dan air yang berhasil dikumpulkan.

Prinsip kerja *wet scrubber* yaitu gas akan masuk ke dalam *venturi*. Dalam *venturi* terdapat *shower* yang berfungsi untuk menyemprotkan air ke gas. Dengan semakin kecilnya *venturi* pada bagian tengah, menyebabkan aliran gas semakin cepat, sehingga air *shower* yang terkena udara dengan kecepatan tinggi akan membentuk butiran-butiran air yang sangat kecil dalam jumlah yang sangat banyak. Pada bagian ini (terutama pada bagian leher yang paling kecil diameternya = *throat*) sebagian besar partikel polutan ditangkap. Setelah melalui *venturi*, udara mengalir ke *cyclone separator*. Prinsip kerjanya sama seperti *cyclone* dengan menggunakan gaya sentrifugal. Air dan partikel yang tertangkap akan terlempar ke dinding dan jatuh ke bawah membentuk *sludge* dan di tampung di dalam bak akan melewati saringan. Air yang sudah disaring akan di pompa menuju ke *venturi* kembali sebagai *supply* air untuk *shower*. Sedangkan untuk partikel yang tersisihkan dibuang ke TPS B₃ yang akan di ambil oleh pihak ketiga.

3.2. Data hasil pengukuran partikulat

Berdasarkan data hasil pengukuran emisi cerobong terakhir pada tanggal 26 September 2019 didapatkan konsentrasi partikulat Boiler Hitachi 109,3 mg/Nm² dan Boiler Hamada II sebesar 75,6 mg/Nm². Pengukuran emisi tersebut mengacu pada standar baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan

Hidup Nomor 07 Tahun 2007 dengan standard maksimum kadar partikulat 230 mg/Nm². Berdasarkan standard baku mutu tersebut, emisi partikulat yang dihasilkan kedua cerobong sudah memenuhi baku mutu. Dengan demikian, hasil kinerja alat pengendali partikulat pada kedua jenis boiler ini sudah berjalan dengan baik.

3.3. Perhitungan efisiensi cyclone dan wet scrubber

Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui tingkat efisiensi alat pengendali partikulat apakah masih bekerja dengan baik untuk mengendalikan emisi partikulat yang keluar dari cerobong. Untuk menghitung debit yang keluar dari boiler maka pembakaran setiap kg batubara, diperlukan udara 7,9 kg (Cooper dan Alley, 2011). Dalam hal ini efisiensi yang dihitung adalah efisiensi boiler Hitachi dan boiler Hamada II.

3.3.1. Boiler Hitachi

Perhitungan ini akan dihasilkan efisiensi dari masing-masing alat sehingga dapat diketahui kadar partikulat yang lolos dan dibandingkan dengan baku mutu yang berlaku. Perhitungan dimulai dengan menghitung debit yang keluar dari smoke boiler, perhitungan konsentrasi setiap boiler dan perhitungan efisiensi cyclone dan wet scrubber untuk mengetahui kadar partikulat yang masih lolos dan terkumpul.

Debit smoke dari boiler :

- Batubara yang digunakan yaitu rata rata 3 bulan terakhir (Oktober – Desember 2019)
 = 24.796 kg/hari = 1,033 ton/jam = 1.033 kg/jam
- Udara = 7,9 kg x 1.033 kg/jam = 8.161 kg/jam
- Ash / abu = 2.995 Kg/hari = 124,8 kg/jam

(Sumber: Laporan Boiler PT. Pura Nusapersada PM 7/8, 2020)

$$\begin{aligned} \text{Batubara + Udara} &= \text{smoke} + \text{abu} \\ 1.033 \text{ kg/jam} + 8.161 \text{ kg/jam} &= \text{smoke} + 124,8 \text{ kg/jam} \\ \text{Smoke} &= 9062,2 \text{ kg/jam} : \rho_g \\ &= 9062,2 \text{ kg/jam} : 1,01 \text{ kg/m}^3 \\ Q \text{ keluar dari boiler} &= 8979,4 \text{ m}^3/\text{jam} \end{aligned}$$

Perhitungan Konsentrasi

$$\begin{aligned} \text{Tingkat Emisi Partikulat} &= \text{faktor emisi lb/ton} \times \text{penggunaan batubara ton/jam} \quad (1) \\ &= (5 \times 12) \text{ lb/ton} \times 1,033 \text{ ton/jam} \\ &= 61,98 \text{ lb/jam} = 0,03 \text{ ton/jam} \end{aligned}$$

$$\text{Beban konsentrasi partikulat} = 0,03 \times 10^9 \times 1/3600 = 8333,33 \text{ mg/s}$$

$$V_{std} = V_s \times \frac{p_s}{p_{std}} \times \frac{T_{std}}{T_s} = 1 \text{ m}^3 \times \frac{15 \times 10^3 \text{ mBar}}{1013,25 \text{ mBar}} \times \frac{298}{423} = 10,4 \text{ Nm}^3 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi partikulat} &= 8333,3 \text{ mg/s} \times \frac{1}{1,5 \text{ m}^3/\text{s}} \times \frac{1}{10,4 \text{ Nm}^3} \\ &= 534,19 \text{ mg/Nm}^3 = 534,19 \text{ mg/m}^3 \end{aligned}$$

a. Cyclone

Debit yang dikeluarkan dari boiler adalah 8979,4 m³/jam. Sedangkan debit untuk 1 cyclone = 8979,4 m³/jam : 30 = 299,31 m³/jam = 4,98 m³/menit

- Menghitung Kecepatan Masuk

$$V_i = Q/A = 4,98 \text{ m}^3/\text{menit} \times \frac{1}{10,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 474,3 \text{ m/menit} = 7,9 \text{ m/s} \quad (3)$$

- Menghitung Nilai Tetapan Ne

$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b + \frac{L_c}{2} \right] = \frac{1}{150} \left[504 + \frac{200}{2} \right] = 4,02 = 4 \quad (4)$$

- Menghitung Besar Diameter Partikel yang Tersisihkan (d_{pc})

$$d_{pc} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e v_i (\rho_p - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{9 \left(\frac{0,075 \text{ kg}}{\text{m}} \cdot \text{hr} \right) (0,007)}{2\pi (4) \left(474,3 \frac{\text{m}}{\text{menit}} \right) \left(60 \frac{\text{menit}}{\text{hari}} \right) (1600 - 1,01) \text{ kg/m}^3} \right]^{\frac{1}{2}} = 6,43 \times 10^{-6} \text{ m} = 6,43 \mu\text{m} \quad (5)$$

- Menghitung Efisiensi Pengumpulan Partikulat

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (d_{pc}/d_{pf})^2} \quad (6)$$

Tabel 1. Efisiensi cyclone boiler hitachi

No	d_{pf} (m)	d_{pc}/d_{pf}	n_f	m_f (%)	$n_f \cdot m_f$ (%)
1	1	6,430	0,024	23	0,543
2	2	3,215	0,088	17	1,500
3	2,5	2,572	0,131	5	0,657
4	3	2,143	0,179	5	0,894
5	4	1,608	0,279	8	2,232
6	5	1,286	0,377	6	2,261
7	6	1,072	0,465	6	2,793
8	10	0,643	0,707	9	6,367
9	>10 (50)	0,129	0,984	21	20,658
$\Sigma =$					37,905

Persentase (%) yang terkumpul adalah 37,905% sedangkan untuk yang masih terlepas dari cyclone = 100% - 37,905% = 62,095%. Untuk cyclone ini hanya terbagi dalam 1 kali tahap pemisahan partikel karena jenis susunan cyclone-nya berpararel. Dengan demikian konsentrasi setelah cyclone dapat dihitung. Perhitungannya sebagai berikut:

$$\text{Konsentrasi yang terkumpul} = 37,905\% \times 534,19 \text{ mg/m}^3 = 202,48 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Konsentrasi yang terlepas} = 62,095\% \times 534,19 \text{ mg/m}^3 = 331,7 \text{ mg/m}^3$$

b. Wet Scrubber

Menurut Cooper dan Alley (1994) dan Nevers (2000), diameter butiran air yaitu $d_d = 116,06 \mu\text{m} = 0,0116 \text{ cm}$ dan Faktor tumbukan (K_p) = 2,63).

Perhitungan Efisiensi Pengumpulan

$$P_{td} = 1 - \eta_d \rightarrow \eta_d = (1 - P_{td}) \times 100\% \quad (7)$$

Tabel 2. Efisiensi wet scrubber boiler hitachi

d_a (μm)	d_a (cm)	d_d (cm)	K_p	P_{td}	η (%)	% massa	massa	$\eta \times m$ (%)
1	0,0001	0,0116	2,63	0,859	14,1	23	0,23	3,235
2	0,0002	0,0116	10,54	0,579	42,1	17	0,17	7,153
2,5	0,00025	0,0116	16,46	0,495	50,5	5	0,05	2,523
3	0,0003	0,0116	23,71	0,438	56,2	5	0,05	2,809
4	0,0004	0,0116	42,15	0,370	63,0	8	0,08	5,044
5	0,0005	0,0116	65,85	0,332	66,8	6	0,06	4,010
6	0,0006	0,0116	94,83	0,309	69,1	6	0,06	4,148
10	0,001	0,0116	263,41	0,269	73,1	9	0,09	6,575
>10.0		0,0116			99,0	21	0,21	20,790
$\Sigma =$								56,29

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh efisiensi pengumpulan partikulat keseluruhan secara teoritis adalah 56,29% dan yang masih terlepas adalah $(100 - 56,29) = 43,71\%$. Beban partikulat yang dihisap oleh venturi scrubber adalah $331,7 \text{ mg/m}^3$. Berdasarkan perhitungan efisiensi partikulat diatas, diperoleh persentase partikulat yang terkumpul dan masih lolos adalah sebagai berikut

$$\text{Partikulat yang terkumpul} = 56,29\% \times 331,7 \text{ mg/m}^3 = 186,71 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Partikulat yang masih lolos} = 43,71\% \times 331,7 \text{ mg/m}^3 = 144,98 \text{ mg/m}^3$$

3.3.2. Boiler Hamada II

Pada boiler Hamada II perhitungan hamper sama yang membedakan dari perhitungan boiler Hitachi yaitu kapasitas masing-masing boiler yang berbeda dan banyaknya pemakaian batubara yang digunakan.

Debit smoke dari boiler :

- Batubara yang digunakan yaitu rata rata 3 bulan terakhir (Oktober – Desember 2019)
 = 12.803 kg/hari = 0,533 ton/jam=533,46 kg/jam
- Udara = 7,9 kg x 533,46 kg/jam = 4214,33 kg/jam
- Ash / abu = 1.596 Kg/hari = 66,5 kg/jam

(Sumber: Laporan Boiler PT. Pura Nusapersada PM 7/8, 2020)

$$\begin{aligned} \text{Batubara + Udara} &= \text{smoke} + \text{abu} \\ 533,46 \text{ kg/jam} + 4214,33 \text{ kg/jam} &= \text{smoke} + 66,5 \text{ kg/jam} \\ \text{Smoke} &= 4681,3 \text{ kg/jam} : \rho_g = 4681,3 \text{ kg/jam} : 1,01 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Q keluar dari boiler} &= 4634,9 \text{ m}^3/\text{jam} \end{aligned}$$

Perhitungan Konsentrasi

$$\begin{aligned} \text{Tingkat Emisi Partikulat} &= \text{faktor emisi lb/ton} \times \text{penggunaan batubara ton/jam} \quad (8) \\ &= (5 \times 12) \text{ lb/ton} \times 0,533 \text{ ton/jam} \\ &= 31,98 \text{ lb/jam} = 0,016 \text{ ton/jam} \end{aligned}$$

$$\text{Beban konsentrasi partikulat} = 0,016 \times 10^9 \times 1/3600 = 4.444,4 \text{ mg/s}$$

$$V_{std} = V_s \times \frac{p_s}{p_{std}} \times \frac{T_{std}}{T_s} = 1 \text{ m}^3 \frac{15 \times 10^3 \text{ mBar}}{1013,25 \text{ mBar}} \times \frac{298}{423} = 10,4 \text{ Nm}^3 \quad (9)$$

$$\text{Konsentrasi partikulat} = 4.444,4 \text{ mg/s} \times \frac{1}{1,5 \text{ m}^3/\text{s}} \times \frac{1}{10,4 \text{ Nm}^3} = 284,9 \text{ mg/Nm}^3$$

a. Cyclone

Debit yang dikeluarkan dari boiler adalah 4634,9 m³/jam. Sedangkan debit untuk 1 cyclone = 4634,9 m³/jam : 12 = 386,24 m³/jam = 6,44 m³/menit

- Menghitung Kecepatan Masuk

$$V_i = Q/A = 6,44 \text{ m}^3/\text{menit} \times \frac{1}{10,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 613,3 \text{ m/menit} = 10,2 \text{ m/s} \quad (9)$$

- Menghitung Nilai Tetapan Ne

$$N_e = \frac{1}{H} [L_b + \frac{L_c}{2}] = \frac{1}{150} [504 + \frac{200}{2}] = 4,02 = 4 \quad (10)$$

- Menghitung Besar Diameter Partikel yang Tersisihkan (d_{pc})

$$d_{pc} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e v_i (\rho_p - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{9 \left(\frac{0,075 \text{ kg}}{\text{m}} \right) (0,007)}{2\pi (4) \left(\frac{474,3 \text{ m}}{\text{menit}} \right) \left(\frac{60 \text{ menit}}{\text{hari}} \right) (1600 - 1,01) \text{ kg/m}^3} \right]^{\frac{1}{2}} = 5,65 \times 10^{-6} \text{ m} = 5,65 \mu\text{m} \quad (11)$$

- Menghitung Efisiensi Pengumpulan Partikulat

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (d_{pc}/d_{pi})^2} \quad (12)$$

Tabel 3. Efisiensi cyclone boiler Hamada II

No	d _{pf} (m)	d _{pc} /d _{pf}	n _f	m _f (%)	n _f . m _f (%)
1	1	5,650	0,030	23	0,699
2	2	2,825	0,111	17	1,893
3	2,5	2,260	0,164	5	0,819
4	3	1,883	0,220	5	1,100
5	4	1,413	0,334	8	2,671
6	5	1,130	0,439	6	2,635
7	6	0,942	0,530	6	3,180
8	10	0,565	0,758	9	6,822
9	>10 (50)	0,113	0,987	21	20,735
Σ =					40,554

Persentase (%) yang terkumpul adalah 40,554% sedangkan untuk yang masih terlepas dari cyclone = 100% - 40,554% = 59,446%. Untuk cyclone ini hanya terbagi dalam 1 kali tahap pemisahan partikel karena jenis susunan cyclone-nya berpararel.

Dengan demikian konsentrasi setelah cyclone dapat dihitung. Perhitungannya sebagai berikut:

$$\text{Konsentrasi yang terkumpul} = 40,554 \% \times 284,9 \text{ mg/m}^3 = 115,54 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Konsentrasi yang terlepas} = 59,446\% \times 284,9 \text{ mg/m}^3 = 169,36 \text{ mg/m}^3$$

b. Wet Scrubber

Menurut Cooper dan Alley (1994) Nevers (2000), diameter butiran air yaitu $d_d = 116,06 \mu\text{m} = 0,0116 \text{ cm}$ dan Faktor tumbukan (K_p) = 2,63).

Perhitungan Efisiensi Pengumpulan

$$P_{td} = 1 - \eta_d \rightarrow \eta_d = (1 - P_{td}) \times 100\% \tag{13}$$

Contoh perhitungan untuk partikel berdiameter 1 μm

$$\eta = (1 - 0.859) \times 100\% = 14.1\% \tag{14}$$

Tabel 4 Efisiensi *wet scrubber* Hamada II

$d_a (\mu\text{m})$	$d_a (\text{cm})$	$d_d (\text{cm})$	K_p	P_{td}	$\eta (\%)$	% massa	massa	$\eta \times m (\%)$
1	0,0001	0,0116	2,63	0,859	14,1	23	0,23	3,235
2	0,0002	0,0116	10,54	0,579	42,1	17	0,17	7,153
2,5	0,00025	0,0116	16,46	0,495	50,5	5	0,05	2,523
3	0,0003	0,0116	23,71	0,438	56,2	5	0,05	2,809
4	0,0004	0,0116	42,15	0,370	63,0	8	0,08	5,044
5	0,0005	0,0116	65,85	0,332	66,8	6	0,06	4,010
6	0,0006	0,0116	94,83	0,309	69,1	6	0,06	4,148
10	0,001	0,0116	263,41	0,269	73,1	9	0,09	6,575
>10.0		0,0116			99,0	21	0,21	20,790
							$\Sigma =$	56,29

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh efisiensi pengumpulan partikulat keseluruhan secara teoritis adalah 56,29% dan yang masih terlepas adalah $(100 - 56,29) = 43,71\%$. Beban partikulat yang dihisap oleh *venturi scrubber* adalah $331,7 \text{ mg}/\text{m}^3$. Berdasarkan perhitungan efisiensi partikulat diatas, diperoleh presentase partikulat yang terkumpul dan masih lolos adalah sebagai berikut

$$\text{Partikulat yang terkumpul} = 56,29\% \times 169,36 \text{ mg}/\text{m}^3 = 95,33 \text{ mg}/\text{m}^3$$

$$\text{Partikulat yang masih lolos} = 43,71\% \times 169,36 \text{ mg}/\text{m}^3 = 74,03 \text{ mg}/\text{m}^3$$

Total efisiensi yang dihasilkan oleh kedua boiler yaitu:

$$\text{Boiler Hitachi} = \text{Cyclone} + \text{Wet scrubber} = 37,905\% + 56,29\% = 94,195\%$$

$$\text{Boiler Hamada II} = \text{Cyclone} + \text{Wet scrubber} = 40,554\% + 56,29\% = 96,844\%$$

3.4. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja cyclone dan wet scrubber

3.4.1. Cyclone

1. Kecepatan gas inlet

Menurut Lapple (1951), kecepatan optimum yang masuk ke inlet berkisar antara 15 m/s – 30 m/s. semakin besar kecepatan inlet maka efisiensi pemisahan pun akan semakin meningkat, karena kecepatan berpengaruh langsung pada perhitungan dan berbanding lurus dengan efisiensi. Namun kecepatan inlet yang besar juga harus memperhatikan *pressure drop* yang dihasilkan (Coker, 2007).

2. Ukuran partikel

Semakin besar ukuran partikel debu yang masuk maka akan semakin mudah untuk dipisahkan dari gas sehingga efisiensi dari *cyclone* akan meningkat karena *cyclone* merupakan alat pengendali pencemaran udara yang efektif memisahkan gas dari debu yang diameternya berukuran lebih besar dari 10 μm (Goodfellow, 2001).

3. *Dust-loading*

Dust-loading adalah banyaknya debu/partikel dalam gas yang masuk ke dalam *cyclone*. Banyaknya *dust-loading* sangat mempengaruhi efisiensi pemisahan dari *cyclone*. Semakin banyak debu yang ikut terbawa bersama gas akan membuat efisiensi pemisahan menjadi meningkat. Hal ini memungkinkan terjadinya tumbukan antar partikel semakin besar. *Dust-loading* yang besar harus sebanding pula dengan kecepatan gas inlet yang besar juga. Apabila kecepatan gas inlet kecil akan menyebabkan sumbatan pada *cyclone* (Kumar and Kumar, 2018).

4. Densitas partikel
Semakin besar densitas partikel maka semakin mudah partikel-partikel tersebut terpisah dengan gas. Efisiensi partikel apabila densitas besar maka akan meningkat (Miller, 2016)
5. Diameter badan cyclone
Umumnya diameter dari cyclone bertipe *high efficiency* memiliki diameter sekitar 30 cm – 60 cm. semakin kecil diameter badan cyclone maka akan meningkatkan tekanan gas yang mengalir. Dengan begitu efisiensi cyclone akan meningkat (Cheremisinoff and Rosenfeld, 2010).

3.4.2. Wet Scrubber

1. Jenis batubara
Batubara berasal dari alam dan terkadang di dalam batu bara terkandung tanah liat, maka batubara yang tidak atau sedikit mengandung tanah liat gas yang dihasilkan dari proses pembakaran lalu di lewatkan *wet scrubber* tidak ada penyumbatan dan sebaliknya jika mengandung tanah liat maka akan terjadi penyumbatan karena tanah liat yang akan menempel di dinding-dinding *wet scrubber* (Khairumizan,2008).
2. Kalori batubara
Semakin tinggi kalori yang terkandung di dalam batubara maka semakin bagus, karena kalori mempengaruhi jumlah batubara yang akan terbakar dan jika batubara yang terbakar lebih banyak maka *ash* yang dihasilkan akan lebih sedikit (Khairumizan,2008).
3. Air yang Digunakan
Fungsi air dalam *wet scrubber* untuk menyemprotkan butiran-butiran air di dalam *wet scrubber*. Air yang di gunakan yaitu air bersih yang tidak berasal dari *Waste Water Treatment* (IPAL) namun berasal dari air sumur/air tanah untuk pengisian awal untuk pengisian selanjutnya ditambahkan air dari proses kondensasi pada pemasakan *boiler* sehingga di dapatkan uap air yang kemudian di tampung dan digunakan (Turner, James. M; Mckenna, 1998).

3.5. Permasalahan-permasalahan pada cyclone dan wet scrubber

3.5.1. Cyclone

Permasalahan, penyebab dan solusi yang terjadi pada *cyclone* dijelaskan pada tabel 5.

Tabel 5. Permasalahan pada *cyclone*

Masalah	Penyebab	Solusi
Adanya sumbatan pada motor	Debu yang dihasilkan dari pembakaran di <i>boiler</i> dan bebannya sangat besar	Bisa dihindari dengan kecepatan pada inlet yang tinggi dan pembersihan <i>cyclone</i> secara berkala.
Kecepatan udara dibawah standar	debu tidak terhisap sempurna dan dapat menyebabkan terjadinya sumbatan.	Pemeriksaan secara berkala untuk memantau kecepatan udara agar tetap terjaga.

3.5.2. Wet scrubber

Permasalahan, penyebab dan solusi yang terjadi pada *wet scrubber* dijelaskan pada tabel 6.

Tabel 6. Permasalahan pada *wet scrubber*

Masalah	Penyebab	Solusi
<i>Wet scrubber</i> penuh dengan abu basah di dinding Pengeroposan dinding pada tangki <i>wet scrubber</i>	Air shower yang tidak kuat membawa lumpur ke sedimen yang disebabkan oleh batubara yang mengandung tanah liat Dinding pada tangki <i>wet scrubber</i> sering terkena air dengan gas yang mengandung SO _x dan NO _x yang bersifat asam dan dapat membuat dinding keropos	Membersihkan tangki <i>wet scrubber</i> secara berkala dan setiap mesin berhenti. Bahan dari <i>wet scrubber</i> seharusnya terbuat dari bahan yang <i>stainless</i> sehingga menghindari terjadinya keropos

3.6. Operasional dan pemeliharaan cyclone dan wet scrubber

3.6.1. Cyclone

Operasional dan pemeliharaan yang dapat dilakukan pada *cyclone* diantaranya adalah membersihkan bagian kerucut *cyclone* agar tidak terjadi penyumbatan (Davis, 2007), memeriksa komponen-komponen *cyclone* yang dilakukan setiap harinya dan membuat laporan masalah mesin dan *checklisnya*, dan pengencangan dilakukan dengan menggunakan kunci pas/ring pada bagian-bagian baut yang berada di *cyclone* (Cheremisinoff, 2018).

3.6.2. Wet Scrubber

Operasional dan pemeliharaan yang dapat dilakukan pada *wet scrubber* yaitu pengecekan nozzle-nozzle pada *shower*, karena nozzle dimakan waktu karena korosi untuk itu diperlukan penggantian jika ditemukan nozzle yang mengalami korosi, pengecekan terhadap pompa air untuk *shower*, monitor alat-alat yang terdapat pada *wet scrubber*, dan pengecekan laboratorium secara berkala untuk kadar TDS yang dihasilkan oleh lumpur atau *sludge* dari *wet scrubber* jika melebihi 2500 mg/l maka blow down perlu diperbanyak untuk menghindari kesadahan (Krockta and Lucas, 1972).

4. Kesimpulan

Pengukuran emisi cerobong pada *boiler* Hitachi dan Hamada diukur setiap 6 bulan sekali yang diukur oleh Laboratorium BKK Jateng mengacu pada baku mutu yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007 telah memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan. Efisiensi yang dihasilkan oleh *boiler* Hitachi 94,195% dan *boiler* Hamada II 96,844%. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja *cyclone* sehingga efisiensinya menurun yaitu kecepatan gas inlet, ukuran partikel, dan *dust-loading*. Sedangkan untuk *wet scrubber* adalah jenis batubara, kalori batubara, dan air yang digunakan. Permasalahan yang sering terjadi pada *cyclone* diantaranya adanya sumbatan pada motor dan kecepatan udara dibawah standar. Pada *wet scrubber* yaitu *wet scrubber* penuh dengan abu basah di dinding dan Pengeroposan dinding pada tangki *wet scrubber*. Untuk pemeliharaan *cyclone* dengan memebersihkan bagian kerucut, memeriksa komponen, dan pengencangan baut. Sedangkan *wet scrubber* yaitu dengan pengecekan nozzle, ketinggian air untuk *shower*, monitor alat, dan pengecekan labolatorium *sludge* yang dihasilkan. Saran yang dapat disampaikan bagi Perusahaan adalah melakukan perhitungan efisiensi alat *cyclone* dan *wet scrubber* minimal satu tahun sekali agar kualitas alat terpantau dan mempertahankan kinerja *cyclone* dan *wet scrubber*. Pengambilan sampling untuk diukur konsentrasi sebaiknya dilakukan dalam jangka waktu yang sering.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada PT. Pura Nusapersada Unit *Paper Mill 7/8* yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melaksanakan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Cheremisinoff, P. 2018. *Air Pollution Control and Design for Industry*.
Cheremisinoff, N. P. & Rosenfeld, P. E. 2010. *Pollution prevention manual and cleaner production in Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production*, 179–259.
Cooper, C. D. and Alley, F. C.. 1994. *Air Pollution Control: A Design Approach*, Second Edition, Waveland Press, Inc. IL.
Cooper, C. D. & Alley, F.C. 2011. *Air Pollution Control A Design Approach Fourth Edition*. Illinois : Maveland Press Inc
Coker, A. K. 2007. *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*.
Davis, W. T., Ed., 2000. *Air Pollution Engineering Manual*, second ed. John Wiley & Sons, Inc., New York
Goodfellow, H. 2001. *Gas-Cleaning Technology in Industrial Ventilation Design Guidebook*, 1197–1316.

- Junaedi, A. 2014. Estimasi Jumlah Karbon Vegetasi Yang Hilang Akibat Kegiatan Pemanenan Kayu Di Hutan Alam Tropis. *Jurnal Hutan Tropis*, 2 (2), 146-151.
- Khairumizan, P. 2008. Studi Eksperimental Implementasi Venturi Scrubber Pada Sistem Gasifikasi Batubara. Depok : Universitas Indonesia
- Krockta, H. & Lucas, R. L. 1972. Information required for the selection and performance evaluation of wet scrubbers, *Journal of the Air Pollution Control Association*.
- Kumar, D., & Kumar, D. 2018. Sustainable Management of Coal Preparation. doi: 10.1016/C2016-0-01854-5.
- Miller, B. G. 2016. *Clean Coal Engineering Technology: Second Edition*.
- Munir, M. 2008. Pemanfaatan Abu Batubara (Fly Ash) Untuk Hollow Block Yang Bermutu Dan Aman Bagi Lingkungan. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Nevers, N. D. 2000. *Air Pollution Control Engineering*. University of Utah, Chemical engineering. McGraw-Hill International
- Panjaitan, S. 2019. Evaluasi Sistem Produksi Menggunakan Metode Six Sigma (DMAIC) Dalam Penurunan Tingkat Cacat Produk Kertas Jumbo Roll Pada Paper Machine (PM)₃ Di PT. Indah Kiat Pulp & Paper Tbk. Jakarta: Universitas Mercu Buana.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap.
- Pudjiastuti, W. 2002. Debu Sebagai Bahan Pencemar Yang Membahayakan Kesehatan Kerja Jakarta, Pusat Kesehatan Kerja, Departemen Kesehatan Republik Indonesia
- Sulistyanto, A. 2006. Karakteristik Pembakaran Biobriket Campuran Batubara dan Sabut Kelapa. *Jurnal Media Mesin* 7 (2), 77-84.
- Turner, J. M, & Mckenna, J. 1998. *Particulate Matter Controls*, EPA/452/B-02-001.
- Wardani, S. P. R. 2008. Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) Untuk Stabilisasi Tanah Maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan. 9.