

Kajian Numerik Infiltrasi *Flue Gas* pada Komponen *Lance Tube Soot Blower* Tipe PS-SL

M Haidar Ali Yafie^{1*}, Muhammad Shah², Burniadi Moballa³

Program Studi D4 Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia^{1,2}

Program Studi D3 Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia³

Email: yafimha@gmail.com¹; m.shah@gmail.com²; burniadi@gmail.com³

Abstract - One failure that often occurs in the sootblower is that it breaks in the lance tube caused by corrosion. Based on the results of the root analysis the failure of the cause of corrosion in the component lance tube is caused by the occurrence of flue gas infiltration which results in blockage of the vent valve. This causes the remaining blowing medium cannot be pushed into the furnace and if left for too long will cause condensation in the lance tube. Condensation mixed with corrosive substances from flue gas can accelerate the corrosion rate on the lance tube. The simulation was carried out using the CFD (Computational Fluid Dynamics) method assisted by Fluent ANSYS 17.2 software. Corrosive substances in flue gas are modeled as inert particles of fly ash using DPM (Discrete Phase Model). To overcome the infiltration problem, angular variations were made in the converging section of the under-expanded nozzle on the lance tube. The concentration of DPM particles is compared to the cross section to find out how many corrosive particles enter the soot blower. Particle concentrations at angles of 10° 15° and 20° are 2,043 kg/m³, 0.515 kg/m³, 0.475 kg/m³, respectively. While the mass fraction is 0.0069, 0.0017, 0.0016, respectively. The simulation results show a reduction in infiltration with the addition of an angle to the nozzle, with an angle of 20° showing the best results.

Keywords: CFD, DPM, flue gas, soot blower, under-expanded nozzle

NOMENCLATURE

x,y,z = koordinat

u,v,w = komponen kecepatan

t = waktu (s)

ρ = massa jenis (kg/m³)

p = tekanan (Pa)

τ = tegangan (N/m²)

q = heat flux

Re = Reynolds number

Pr = Prandtl number

1. PENDAHULUAN

Di dalam sistem PLTU terdapat boiler yang berfungsi sebagai penghasil uap (*steam generator*). Permintaan energi listrik yang tinggi membuat boiler harus mampu beroperasi dalam waktu yang lama. Interupsi tidak terjadwal (*unscheduled shutdown*) harus dihindari karena dapat menimbulkan kerugian yang besar. Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar utama untuk menghasilkan panas menyisakan *fly ash* yang jika dipanaskan pada temperatur tertentu dapat melekat pada *tube* boiler dalam bentuk tumpukan jelaga (*slag*). Akumulasi jelaga pada *tube* di dalam boiler dapat menyebabkan efisiensi perpindahan panas menurun dan juga menyumbat aliran *flue gas*. Hal tersebut jika dibiarkan dapat menyebabkan kerusakan pada *tube arrangement*.

Sootblower berfungsi untuk membersihkan *tube boiler* pada *Heat Recovery Area* (HRA) yang terdiri dari area *superheater*, *economizer*, *reheat*, serta pada *air heater* dari jelaga (*slag*) yang menempel. *Sootblower* menggunakan uap panas *auxiliary* sebagai *blowing medium*. Kegagalan pada *sootblower* seringkali terjadi pada komponen *lance tube*. *Lance tube* sering mengalami korosi dan juga defleksi [8].

Penelitian yang dilakukan oleh Jameel, Tran, Lovo, dan Oliveira [3] menyimpulkan bahwa korosi pada *lance tube* disebabkan oleh infiltrasi *flue gas* ke dalam *lance tube sootblower*. Pernyataan tersebut didukung dengan ditemukannya zat korosif di dalam *lance tube* yang berasal dari batu bara. Pada kondisi normal hal tersebut seharusnya tidak terjadi karena perbedaan tekanan antara tekanan di dalam *furnace* dan tekanan atmosfer sekitar memungkinkan adanya aliran udara melalui *vent valve* yang mendorong sisa *blowing medium* ke dalam *furnace*. Sementara dalam penelitian tersebut *vent valve* tersumbat akibat korosi sehingga *blowing medium* yang tersisa terkondensasi dan mempercepat laju korosi akibat perubahan zat dan juga percampuran dengan *flue gas*. PLTU Pacitan mengalami masalah yang terjadi pada sejumlah *sootblower* di lokasi *high temperature superheater*.

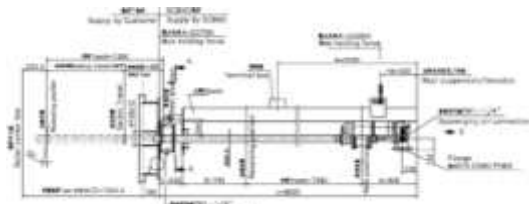
2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Soot blower

Soot blower merupakan peralatan penunjang pada sistem boiler yang berfungsi

untuk membersihkan akumulasi jelaga (*soot*) pada permukaan tube di area *superheater*, *reheater*, *economizer*, dan *air heater*. Terdapat beberapa jenis *sootblower* yang digunakan pada boiler, namun yang paling banyak digunakan adalah *sootblower* bertipe *long retractable*.

Pada saat tidak beroperasi, pengangkut *soot blower* berada pada posisi ujung dekat dinding *furnace*, *lance tube* pada posisi siaga dengan dua *nozzle*-nya berada di dalam *wall box*. Saat motor penggerak dihidupkan, pengangkut *soot blower* bergerak maju ke depan mendorong *lance tube* secara heliks ke dalam *flue gas pass*. *Soot blower valve* kemudian terbuka saat *nozzle* melewati *boiler wall*. Proses *blowing* dimulai. Pengangkut *soot blower* secara kontinyu mendorong *lance tube* ke dalam *flue gas pass* hingga *nozzle* mencapai bagian akhir. Pengangkut *soot blower* kemudian mengganti arah pergerakannya dan kembali ke posisi semula. *Soot blower valve* segera tertutup sebelum *nozzle* mencapai *boiler wall*. Motor dimatikan setelah *soot blower* kembali pada posisi semula tanpa melakukan *blowing* [5].



Gambar 1 *Soot Blower*

2.2 Lance Tube

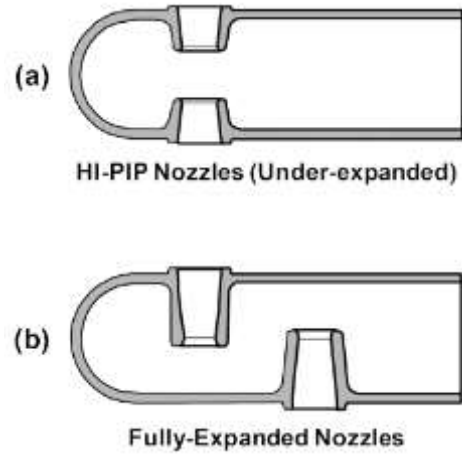
Pada *soot blower* terdapat *lance tube* yang berfungsi sebagai *blower* dengan dua buah venturi *nozzle* di bagian ujungnya yang terpisah 180°. Saat beroperasi *lance tube* bergerak secara heliks memasuki area *flue gas pass*, berganti arah pergerakan pada posisi ujung dan kembali pada posisi semula. *Lance tube* digerakkan oleh *soot blower carriage* yang terpasang pada *track beam*. *Medium blowing* diumpun oleh *lance tube* melalui *soot blower valve* dan *fixed feed tube* [5].

2.4 Desain Nozzle

Desain dari *nozzle soot blower* pada boiler industri hingga pertengahan 1990 antara lain dari dua lubang simpel yang dibor ke dalam *lance tube* sampai ke model lebih canggih yaitu tipe venturi, atau secara konvensional dikenal sebagai *High Performance Peak Impact Pressure (Hi-PIP) nozzle*.

Kemampuan *soot blower* untuk membersihkan jelaga yang melekat secara langsung sebanding dengan energi jet yang mana erat terkait dengan *peak impact pressure (PIP)* atau tekanan tekanan benturan puncak dari jet dengan *tube*. PIP besar tergantung dari tekanan uap di dalam *lance tube* dan desain *nozzle* yang dilalui *steam jet*. Jameel [3] menunjukkan tekanan

uap pada leher *nozzle* adalah *supersonic*, uap mengalami ekspansi dan berakselerasi hingga mencapai kelajuan di atas kecepatan suara. Sedangkan tekanan mengalami penurunan akibat pengaruh bentuk dari bagian *nozzle* yang berbeda. [7].



Gambar 2 (a) *Hi-PIP Nozzle (Under-Expanded)* dan (b) *Fully-Expanded Nozzle* [7]

2.3 Persamaan Dasar

1. Persamaan Kontinuitas [2]

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

2. Persamaan Momentum (Navier-Stokes) [4]

x-momentum,

$$\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

y-momentum,

$$\left(\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

z-momentum

$$\left(\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (4)$$

3. Persamaan Kekekalan Energi [3]

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re.Pr} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \right.$$

$$\left[\frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx}u\tau_{xy}u\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy}u\tau_{yy}u\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz}u\tau_{yz}u\tau_{zz}) \right] \quad (5)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan yaitu identifikasi masalah, pengumpulan data, pengolahan data, analisa dan terakhir tahap kesimpulan. Identifikasi masalah merupakan tahap awal dalam menentukan tujuan dan rumusan masalah berdasarkan hasil penelitian terdahulu tentang *soot blower*. Pengumpulan data merupakan tahap dimana pencarian dan pengumpulan data sesuai permasalahan yang didapat. Pengolahan data merupakan tahap lanjutan dari pengumpulan data yang dibagi mulai dari tahap perhitungan, pemodelan geometri, dan tahap simulasi CFD dengan menggunakan software [9]. Tahap analisa yaitu analisa data berbekal data-data yang diperoleh dari hasil simulasi. kesimpulan merupakan bagian terakhir menarik kesimpulan dari hasil simulasi yang dilakukan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

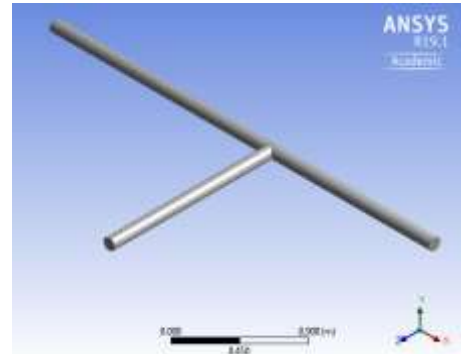
4.1 Validasi

Validasi [1] menggunakan penelitian dengan judul “*Prediction of Black Powder Distribution in Junctions using the Discrete Phase Model*”. Kajian ini mencakup simulasi turbulen dari aliran gas-partikel (*gas-solid*) melewati pipa bercabang dengan geometri dan kondisi aliran yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari efek dari ukuran partikel dan orientasi pipa dengan sudut asimetri berbeda pada cabang dari pipa tersebut. Partikel solid dapat muncul pada jaringan transmisi gas sebagai kontaminan dalam bentuk *black powder* yang perlu untuk dihilangkan.

Simulasi menggunakan model standar k-ε turbulen dan *Discrete Phase Model* (DPM). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemisahan fase padat dapat didefinisikan mengikuti aliran udara yang mendekati nilai angka Stokes yang cukup kecil daripada *unity* ($St = 0,2$). Sedangkan untuk nilai angka Stokes menengah ($St = 1$) sedikit lebih tinggi dari *unity* ($St = 5$). Partikel mendapatkan beberapa independensi dari fase gas dan untuk partikel tersebut orientasi pipa memainkan peran yang signifikan. Sistem pertama menggunakan pipa horizontal sementara untuk sistem kedua ditambahkan penambahan gravitasi pada untuk memberikan pengaruh cabang pipa orientasi 90° ke atas (*upward*).

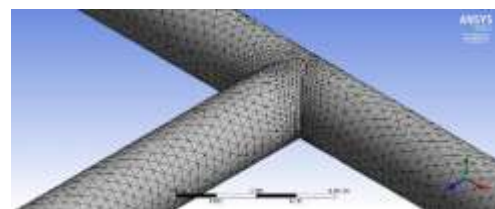
Geometri berupa pipa dengan cabang (*t-junction*). Pembuatan geometri menggunakan Design Modeler pada ANSYS 17.2. Pipa ini

memiliki diameter dengan ukuran Ø100 mm dan panjang 3.5 m pada pipa utama. Sementara untuk cabang pipa diberikan pada jarak 2 m dari inlet pipa utama. Pipa pada cabang memiliki panjang sebesar 2.5 m. Geometri sistem dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 3 Geometri Sistem Validasi

Pada *setup* simulasi *software* yang digunakan yaitu Fluent dari ANSYS 17.2. *Discrete phase model* digunakan untuk memodelkan injeksi partikel pada simulasi. Injeksi yang digunakan bertipe *surface* dari sisi inlet sistem. Partikel bertipe *inert* dengan material *default* dari Fluent *database* yaitu *anthracite*. dengan assa jenis partikel sebesar 4800 kg/m³. Diameter partikel menggunakan distribusi *rosin-rammler* dengan ukuran diameter maksimum sebesar 50 mikron, minimum sebesar 5 mikron, sedangkan untuk diameter rata rata sebesar 28.6 mikron. Model *viscous* yang diterapkan yaitu *standard k-ε model*. Kecepatan sebesar 15 m/s dengan laju aliran massa 0.00000848 kg/m³. *Spread parameter* bernilai 2 dengan 7 jumlah diameter.



Gambar 4 Meshing validasi

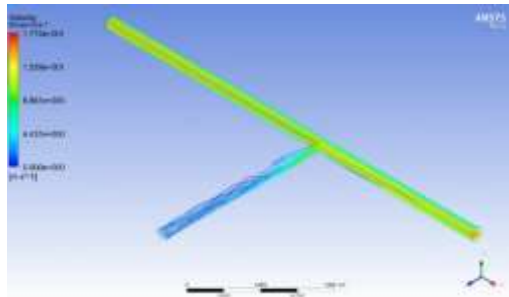
Solver yang digunakan *transient*, sehingga diperlukan adanya *time step*. Ukuran *time step* menentukan lama waktu aliran bergerak ketika disimulasikan pada sebuah model per *time step*-nya. *Time step* di-set pada ukuran yang tetap/*fixed* sebesar 0.005 s per *time step*. Untuk sistem kedua ditambahkan gravitasi pada sumbu Y sebesar -9.81 m/s² (negatif menunjukkan arah gravitasi yang berlawanan dengan sumbu Y).

Tabel 1 *Boundary Conditions* dan *Particle Properties*

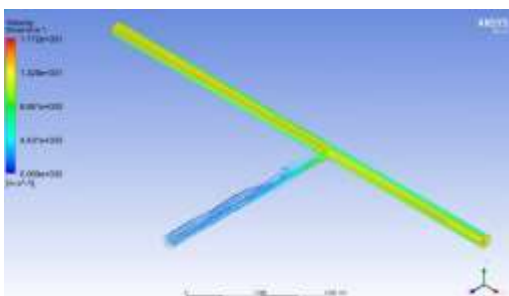
Inlet	Outlet		Particle Properties	
	Velocity (m/s)	Main (Pa)	Branch (Pa)	Density (kg/m ³)
15 m/s	0	0	4800	28.6

4.2 Hasil Simulasi Validasi

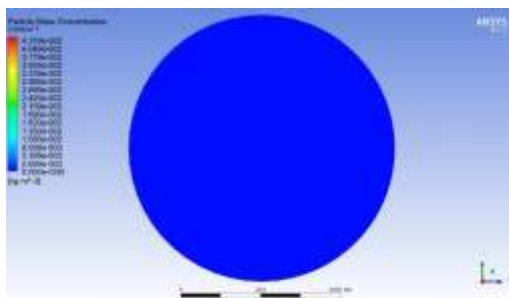
Streamline dari kedua simulasi (horizontal dan upward) dibandingkan pada gambar berikut. Dapat terlihat aliran udara lebih banyak menuju ke arah outlet utama daripada outlet cabang dengan kecepatan yang lebih tinggi.



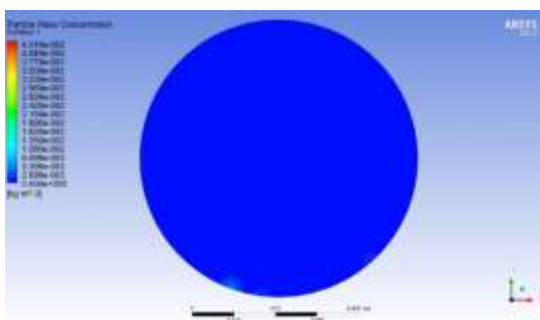
Gambar 5 *Streamline* Pipa Horizontal



Gambar 6 *Streamline* Pipa Upward



Gambar 7 Konsentrasi Partikel pada Penampang Outlet dari Pipa Horizontal



Gambar 8 Konsentrasi Partikel pada Penampang Outlet dari Pipa Upward

Pada gambar terlihat konsentrasi dengan nilai kurang dari 0.00269 yang terfokus pada dasar pipa. Nilai yang kecil menunjukkan hanya sedikit partikel yang berbelok ke arah cabang daripada ke arah outlet utama. Hasil tersebut

mendukung hasil dari *streamline* yang jika dilihat aliran fluida lebih banyak berbelok ke cabang daripada ke outlet utama.

Fraksi massa dalam penelitian ini menunjukkan rasio massa partikel pada outlet cabang pipa terhadap massa partikel total. Nilai fraksi massa diketahui dari grafik fraksi massa partikel pada outlet pipa terhadap tiap sudut yang berbeda. Grafik tersebut diperoleh dari jurnal validasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12. Nilai yang dibandingkan adalah simulasi *horizontal solid spherical* dan *up solid spherical*. Sudut yang digunakan sama, yaitu sebesar 90°.

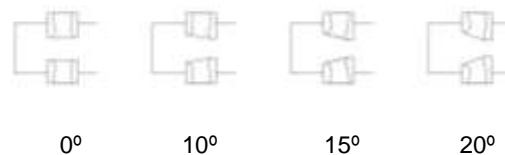
Jika dilihat dari tabel 2 nilai fraksi massa dari simulasi untuk sistem vertikal dan horizontal sudah mendekati hasil dari jurnal validasi. Pada kedua hasil simulasi margin error kurang dari 10% sehingga pengaturan pada setup telah cocok dan dapat digunakan pada simulasi sistem *existing* dan variasinya.

Tabel 2 Perbandingan Hasil antara Jurnal dan Simulasi

Fraksi Massa	Jurnal	Simulasi	Margin Error (%)
Horizontal	0.041	0.045	9.1
Upward	0.029	0.028	9.6

4.3 Simulasi Sistem

Pada penelitian ini mula-mula dilakukan simulasi pada sistem *existing* (sistem desain awal). Setelah itu simulasi berikutnya menggunakan variasi desain pada *nozzle* seperti terlihat pada Gambar 4.13 Pada gambar tersebut *nozzle* pada sistem *existing* memiliki sudut *converging* sebesar 0°. Untuk sistem variasi, *nozzle* dibelokkan ke arah depan dari *lance tube* dengan sudut 10°, 15° dan 20°. Pengambilan sudut mempertimbangkan jarak antara kedua *nozzle* dengan celah *water-wall* yang apabila terlalu besar dapat mempengaruhi aliran *steam* ketika *soot blower* beroperasi.

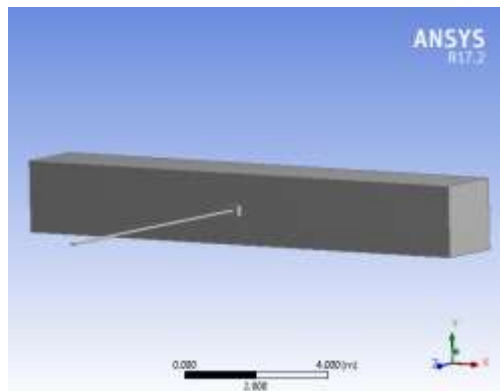


Gambar 9 Variasi sudut pada *nozzle soot blower*

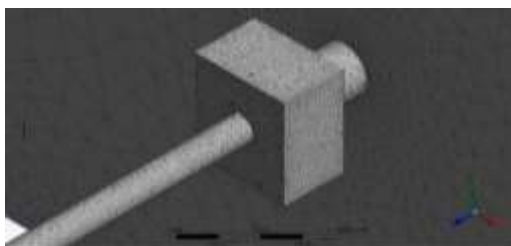
Geometri digambar menggunakan software Design Modeler ANSYS 17.2. Bentuk geometri berdasarkan data drawing dengan memperhatikan bagian yang dilewati oleh aliran fluida. Geometri sistem terdiri dari boiler, celah *water wall*, *wall box*, *nozzle*, dan *lance tube*. Meshing pada geometri sistem menggunakan tipe tetrahedral dengan minimum size sebesar 0.1 mm. Pada beberapa bagian diberikan *manual sizing surface* dan juga *edge*. Tujuannya untuk

mengurangi skewness dan juga untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih akurat.

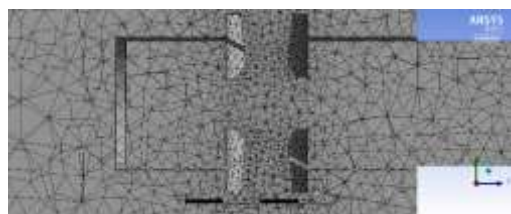
Pada software Fluent model yang digunakan yaitu DPM (*Discrete Phase Model*). *Discrete phase model* digunakan dengan injeksi bertipe surface pada sisi inlet. Injeksi partikel bertipe inert dengan jenis *ash-solid* yang memiliki massa jenis 700 kg/m³. Distribusi diameter uniform dengan ukuran 4.651 mikron. Hukum drag yang digunakan yaitu *spherical*. Model turbulensi menggunakan *standard k-ε model*



Gambar 9 Model 3D Sistem Existing dan Letak Named Selection



(a)



(b)

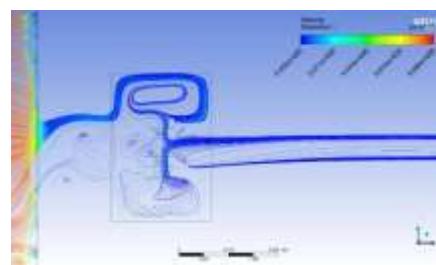
Gambar 10 Detail Meshing pada Sistem Existing. (a) Wall-box, Celah Water-Wall, dan Lance Tube; (b) Nozzle.

Simulasi menggunakan tipe *pressure-based* dengan waktu *transient*. Injeksi yang digunakan bertipe surface dari sisi inlet sistem. Partikel bertipe inert dengan material *ash-solid*. Massa jenis partikel sesuai dengan data sekunder sebesar 4800 kg/m³. Diameter partikel karena hanya terdapat data rata-rata menggunakan distribusi uniform dengan ukuran 46.51 mikron. Model *viscous* yang diterapkan yaitu *standard k-ε model*. Kecepatan dari hasil perhitungan sebesar 9 m/s dengan laju aliran massa 2.62 kg/m³ (dari *ash content* batu bara).

Kecepatan pada inlet bersifat konstan sebesar 9 m/s dengan intensitas turbulensi sebesar 5%. Tipe *boundary condition* yang digunakan pada inlet yaitu *escape*. Pada kedua outlet tekanan sebesar 0 atm (*gauge*). Pada permukaan boiler yang menempel dengan *water wall* ditentukan sebagai *wall* dengan sifat *no slip*. Sedangkan untuk permukaan boiler lainnya di-set sebagai *symmetry* untuk menyesuaikan geometri boiler yang disederhanakan. Permukaan lain selain yang tidak disebutkan secara otomatis di-set sebagai *wall*. Kondisi operasi diatur sesuai dengan massa jenis fluida yang dilewati oleh partikel yaitu udara dengan nilai 1.025 kg/m³

4.1 Hasil Simulasi Sistem

Dua buah bidang (*plane*) 2 dimensi digunakan untuk menampilkan data hasil simulasi. Bidang tersebut terletak pada potongan melintang sumbu YZ dimana bidang pertama mencakup boiler hingga lance tube sedangkan untuk bidang kedua merupakan area perpotongan lance tube dari bagian depan hingga sisi *outlet lance tube* dengan luas area sebesar 0.6836011 m². Bidang pertama digunakan untuk menampilkan *streamline* dari partikel yang masuk ke dalam lance tube melewati *nozzle*. Sedangkan bidang kedua digunakan untuk menampilkan kontur konsentrasi partikel.



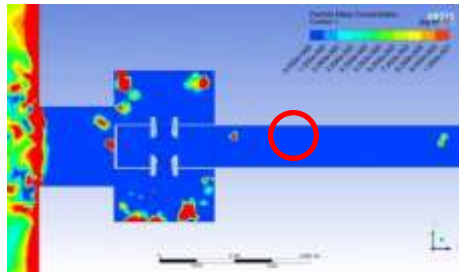
Gambar 11 Streamline pada sistem existing

Pada Gambar 11 terlihat pola aliran dari boiler saat memasuki lance tube yang diambil dari bidang pertama. Sebanyak 2000 garis diambil untuk merepresentasikan *streamline* agar terlihat lebih jelas. Terdapat perputaran aliran yang disebabkan oleh kecepatan aliran dan dimensi dari sistem itu sendiri. *Streamline* yang ditampilkan merupakan gabungan antara aliran yang maju (*forward flow*) dan juga aliran mundur (*backward flow*). Kecepatan maksimum berada pada boiler dengan 9.086 m/s kemudian mulai memasuki celah *water-wall* menurun hingga di bawah 2.271 m/s.

Pada gambar di atas dapat terlihat kontur konsentrasi DPM dengan pada potongan melintang dari geometri. Terjadi infiltrasi partikel ke dalam *lance tube* yang ditandai dengan lingkaran merah. Nilai yang didapat sangat kecil dengan maksimum konsentrasi sebesar 0.1 kg/m³.

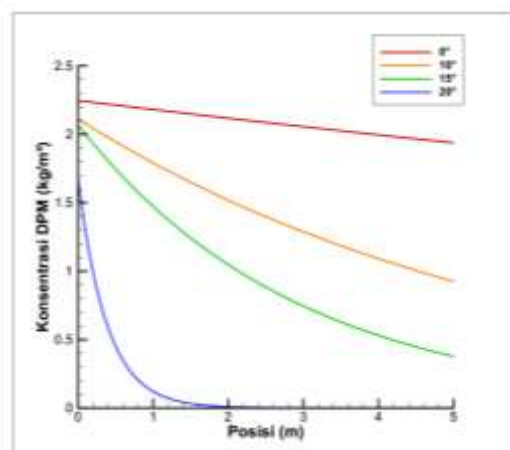
Pada Gambar 13 dapat terlihat grafik perbandingan konsentrasi terhadap posisi dari

partikel. Partikel dianggap mulai memasuki *nozzle* pada jarak 13 m dari sisi boiler. Jika diperhatikan nilai konsentrasi partikel dan juga jarak penetrasi infiltrasi *flue gas* berkurang yang dipengaruhi penambahan variasi kemiringan sudut di bagian *converging nozzle*.



Gambar 12 Kontur Konsentrasi DPM

Pada tahap terakhir untuk mengetahui jumlah (total) massa partikel yang berhasil masuk ke dalam *lance tube* dilakukan *surface integral* pada bidang kedua di tiap sistem. Setelah itu hasilnya dibandingkan pada Tabel 2. Dari tabel diketahui konsentrasi partikel semakin menurun dengan semakin miringnya sudut dari bagian *converging* pada *nozzle*.



Gambar 13 Grafik Posisi Konsentrasi Partikel pada *Soot Blower*

Tabel 3 Perbandingan Konsentrasi DPM dan Fraksi Massa tiap Variasi Sudut pada Bidang YZ

Sudut	DPM Concentration (kg/m ³)		Fraksi Massa
	Inlet	Bidang YZ	
0°	298.85	6.341	0.021
10°	295.59	2.043	0.0069
15°	295.40	0.515	0.0017
20°	293.37	0.475	0.0016

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari analisis data yang diperoleh, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari simulasi sistem existing diperoleh hasil konsentrasi partikel sebesar **6.341 kg/m³** dengan fraksi massa sebesar **0.021**

2. Hasil percobaan variasi sudut *nozzle* menunjukkan jumlah konsentrasi partikel di dalam *soot blower* sebesar **2.043 kg/m³**, sedangkan untuk fraksi massa-nya sebesar **0.0069**
3. Hasil percobaan variasi sudut *nozzle* menunjukkan jumlah konsentrasi partikel di dalam *soot blower* sebesar **0.515 kg/m³**, sedangkan untuk fraksi massa-nya sebesar **0.0017**
4. Hasil percobaan variasi sudut *nozzle* menunjukkan jumlah konsentrasi partikel di dalam *soot blower* sebesar **0.475 kg/m³**, sedangkan untuk fraksi massa-nya sebesar **0.0016**
5. Konsentrasi partikel di dalam *soot blower* mengalami pengurangan dengan adanya variasi pada model *nozzle*.
6. Jarak infiltrasi *flue gas* ke dalam *lance tube* juga semakin menurun seiring dengan semakin besar penambahan sudut pada *nozzle*

6. PUSTAKA

- [1] AIAA, G. (1998) Guide for The Verification and Validation of Computation Fluid Dynamics Simulations. NPARC
- [2] Djatmiko, E. (2016). CFD. Retrified from Aero Engineering: <https://aeroengineering.co.id/2016/06/pendahuluan-cfd-mekanika-fluida/>
- [3] Jameel, M.I., Tran, H., Lovo, A. C., & Oliveira, N. (2006). Sootblower Lance Tube Corrosion in Recovery Boilers. TAPPI Journal, 18-22.
- [4] NASA. (n.d.). Glenn Research Center. Retrieved from NASA: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.htm>
- [5] Shanghai Clyde Bergemann Machinery Co. Ltd. (2009). *Instruction for Installation Operation Maintenance Long Retractable Sootblower PS-SL*. Pacitan: Clyde Bergemann.
- [6] SO Boiler PT. PJB UBJOM Pacitan. (2016). *Root Cause Failure Analysis Lance Tube IK Sootblower*. Pacitan: PT. PJB UBJOM.
- [7] Tran, H., & Tandra, D. S. (2015). Recovery Boiler Sootblowers: History and Technological Advances. TAPPI Journal, 51-60.
- [8] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Essex: Pearson Education Limited.