

PERANCANGAN *DUCTING COOLING FAN 472-FA9* DAN PENAMBAHAN *GUIDE VANE* PADA *INLET* *GRATE COOLER* KOMPARTEMEN 4

Hanugrah Sukma P.¹, Gun Gun Ramdhan Gunadi^{2*}, Rahmat Pujiyanto³

¹Program Studi D3 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

³PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Pabrik Cilacap, Jl. Ir. H. Juanda, Padaramai, Karangtalun, Cilacap Utara, Cilacap 53224

*Corresponding author E-mail address: gungun.rg@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Grate cooler merupakan peralatan penting pada industri semen yang berfungsi mendinginkan klinker untuk mempertahankan kualitas fasa mineral serta mendukung efisiensi pemulihan panas. Permasalahan distribusi udara pendingin yang tidak merata pada Kompartemen 4 PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Cilacap Plant menyebabkan beberapa grate plate mengalami beban termal berlebih (overheat) sehingga berpotensi menimbulkan repetitive failure. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan distribusi udara pendingin melalui modifikasi percabangan ducting dan penambahan guide vane menggunakan metode Computational Fluid Dynamics. Simulasi dilakukan dengan SolidWorks Flow Simulation terhadap tiga variasi desain ducting yang dievaluasi berdasarkan distribusi volume flow rate dan pressure drop. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain terpilih menghasilkan distribusi aliran udara yang lebih merata dengan pressure drop lebih rendah dibandingkan desain lainnya. Penambahan guide vane juga meningkatkan suplai udara ke sisi utara Kompartemen 4 sehingga ketimpangan distribusi aliran dapat dikurangi. Modifikasi yang diusulkan berpotensi meningkatkan keandalan sistem pendinginan grate cooler tanpa meningkatkan kapasitas fan, sehingga dapat menjadi alternatif perbaikan yang lebih efisien untuk mengurangi risiko kerusakan grate plate.

Kata-kata kunci: Grate Cooler, Ducting, CFD, Flow Rate

Abstract

Grate cooler is a critical equipment in the cement industry that functions to cool clinker in order to preserve the quality of mineral phases and support heat recovery efficiency. The uneven distribution of cooling air in Compartment 4 at PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Cilacap Plant causes several grate plates to experience excessive thermal loads (overheating), potentially leading to repetitive failure. This study aims to optimize the cooling air distribution through ducting branch modification and the addition of guide vanes using the Computational Fluid Dynamics method. Simulations were conducted using SolidWorks Flow Simulation on three ducting design variations, evaluated based on volume flow rate distribution and pressure drop. Simulation results indicate that the selected design produces a more uniform airflow distribution with a lower pressure drop compared to the other designs. The addition of guide vanes also enhances air supply to the northern side of Compartment 4, thereby reducing flow distribution imbalance. The proposed modifications have the potential to improve the reliability of the grate cooler cooling system without increasing fan capacity, making it a more efficient corrective alternative to reduce the risk of grate plate damage.

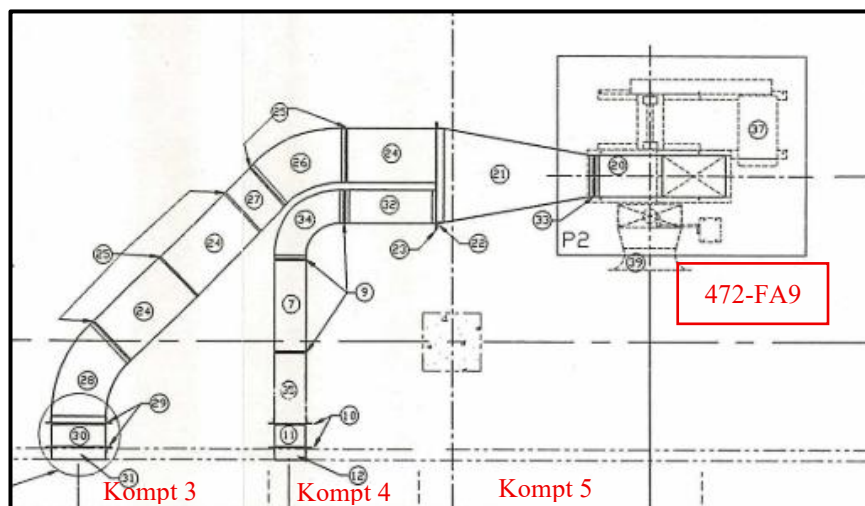
Keywords: Grate Cooler, Ducting, CFD, Flow Rate

1. PENDAHULUAN

PT Solusi Bangun Indonesia Tbk merupakan perusahaan yang bergerak di bidang industri manufaktur yaitu memproduksi semen dan clinker. Salah satu tahapan paling krusial dalam lini produksi ini adalah pembakaran raw meal di dalam rotary kiln pada suhu mencapai 1450°C untuk membentuk material setengah jadi berupa klinker [1]. Setelah keluar dari klinker kalsinasi tersebut, temperatur klinker yang sangat tinggi harus segera diturunkan secara mendadak menggunakan grate cooler. Proses pendinginan cepat (quenching) ini tidak hanya berfungsi menjaga kualitas fasa mineral klinker, tetapi juga bertindak sebagai media transportasi material sekaligus melindungi peralatan pada proses penggilingan akhir lanjutan [2].

Sebagai alat penurun suhu utama, efektivitas grate cooler sangat bergantung pada keseragaman tumpukan material dan distribusi laju aliran udara pendingin yang diembuskan oleh fan cooler dari area bawah pelat (undergrate). Ketidakmerataan distribusi udara dapat memicu fenomena peningkatan temperatur lokal (overheating atau red spot). Dampak termal berlebih ini mengakibatkan deformasi struktural, keausan dini, hingga potensi terlepasnya grate plate yang memicu terjadinya fall through (klinker jatuh ke bawah pelat). Kerusakan material berulang (repetitive failure) ini pada akhirnya mengganggu kontinuitas operasional pabrik dan meningkatkan biaya pemeliharaan (maintenance cost).

Pada unit grate cooler kompartemen 4 di PT Solusi Bangun Indonesia Tbk. Cilacap Plant, ditemukan ketimpangan termal yang signifikan antara sisi utara dan selatan. Grate plate sisi utara, khususnya pada row 39 dan 41, mengalami kerusakan dan keausan yang jauh lebih cepat dibandingkan row 37. Evaluasi awal mengindikasikan bahwa konstruksi saluran tunggal (single ducting) eksisting dari Cooling Fan 472-FA9 menyebabkan aliran udara cenderung terkonsentrasi di dekat titik masuk (row 37), sehingga row 39 dan 41 mengalami defisit pasokan udara pendingin secara ekstrem dalam jangka waktu yang lama.



Gambar 1 Konfigurasi Desain Duct Existing [3]

Untuk mengatasi akar permasalahan tersebut, penelitian ini menawarkan solusi rekayasa berupa modifikasi geometri melalui percabangan ducting menjadi dua jalur aliran (double outlet). Melalui konfigurasi ini, laju aliran udara diharapkan dapat terbagi secara proporsional dan merata ke seluruh kompartemen 4. Guna memastikan efektivitas perancangan tanpa mengganggu karakteristik operasional kompartemen lain, kajian teknis dilakukan secara komprehensif menggunakan simulasi numerik berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD) yang menggunakan beberapa tahapan, yaitu pre-processor (modeling, mesh generation, dan boundary condition), solver, dan post-processor [4]. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi geometri ducting yang optimal untuk memperpanjang umur operasional grate plate, dan menjaga efisiensi energi proses produksi semen.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang modifikasi geometri ducting agar distribusi aliran udara pendingin dapat terbagi secara lebih merata pada row 37, 39, dan 41. Melalui rekayasa saluran ini, arah aliran udara dikondisikan agar sedikit membelok menuju sisi utara sesaat setelah memasuki ruang Kompartemen 4 guna mengeliminasi defisit pasokan udara pendingin pada area kritis tersebut.

2. METODE

Penelitian ini menerapkan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk mengevaluasi karakteristik aliran udara dan kerugian tekanan pada sistem ducting cooling fan 472-FA9. Tahapan kerja diawali dengan identifikasi masalah lapangan terkait kegagalan material akibat beban termal berlebih (overheat) pada grate plate Row 37, 39, dan 41 di Kompartemen 4 sisi utara PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Pabrik Cilacap. Investigasi awal menunjukkan ketimpangan distribusi ini disebabkan oleh konstruksi saluran tunggal (single ducting) eksisting. Dirancang usulan modifikasi saluran menjadi dua cabang (double outlet). Data operasional penunjang berupa laju aliran udara aktual sebesar 54.221 m³/h diekstrak secara historis dari platform TiS pabrik untuk menentukan parameter input simulasi[5].

Setelah data dihimpun, pemodelan numerik dilakukan melalui beberapa tahapan simulasi CFD [4]. Tahap yang pertama adalah *geometry modeling*, yaitu pembuatan model tiga dimensi detail dari ducting eksisting dan tiga variasi konfigurasi geometri modifikasi berdasarkan dimensi aktual instalasi pabrik dan referensi standar ASHRAE [6]. Desain ducting yang optimal adalah distribusi udara yang tepat, ukuran dimensinya tepat sehingga penurunan tekanan di seluruh ruangan udara berada dalam spesifikasi pabrikan dan desain, serta ducting tertutup rapat ducting tertutup rapat untuk memastikan aliran udara dapat mengalir tanpa terganggu dengan adanya false air [7]. Langkah selanjutnya masuk ke dalam tahapan *mesh generation* yaitu untuk membagi volume fluida menjadi elemen-elemen kecil. Analisis sensitivitas jaring dilakukan untuk memastikan bahwa hasil perhitungan tidak bergantung pada jumlah sel. Jaring yang dipilih terdiri dari sekitar 2,3 juta elemen, yang menyeimbangkan antara akurasi dan biaya komputasi, sesuai dengan pedoman dari studi optimisasi CFD sebelumnya [8]. Tahapan dilanjutkan dengan *boundary condition* untuk memasukkan parameter operasional aktual lapangan pada model simulasi. Sisi saluran masuk (inlet) ditetapkan menggunakan parameter *volume flow rate* sebesar 4 m³/s dari olah data TiS pabrik, sedangkan penampang keluar (outlet) kompartemen diatur menggunakan *environment pressure* pada tekanan atmosfer standar 101.325 Pa. Tahapan selanjutnya masuk ke penentuan *physical models* dimana aliran udara diasumsikan stabil, tidak dapat dimampatkan, dan turbulen. Model turbulensi k-ε realizable digunakan karena kemampuannya yang handal dalam menangkap sirkulasi ulang dan stratifikasi di dalam ruangan[9].

Simulasi kemudian memasuki tahapan *solver configuration*, di mana dilakukan pengaturan parameter iterasi matematika sebelum kalkulasi dijalankan dengan menetapkan parameter pencapaian target (Goals) pada *volume flow rate* outlet serta *total pressure* sistem. Proses iterasi komputasi ini dijalankan oleh software secara kontinu hingga mencapai kondisi konvergen yang stabil. Tahap akhir dari rangkaian simulasi ini adalah *post-processing and analysis*, di mana data hasil iterasi numerik diekstrak ke dalam bentuk visualisasi. Hasil kuantitatif ketiga variasi desain tersebut akhirnya dievaluasi secara komparatif untuk memilih geometri saluran terbaik yang mampu menurunkan kerugian tekanan (pressure drop) [4] serta mengarahkan aliran udara secara proporsional menuju sisi utara Kompartemen 4 menggunakan komponen guide vane.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Spesifikasi Tipe Fan Cooler 472-FA9

PT Solusi Bangun Indonesia Cilacap Plant menggunakan fan cooler dengan tipe centrifugal forced draft (FD) fan dengan satu vendor dengan unit grate cooler yaitu FLSmidt, berikut merupakan spesifikasi fan cooler 472-FA9 pada Gambar 3.

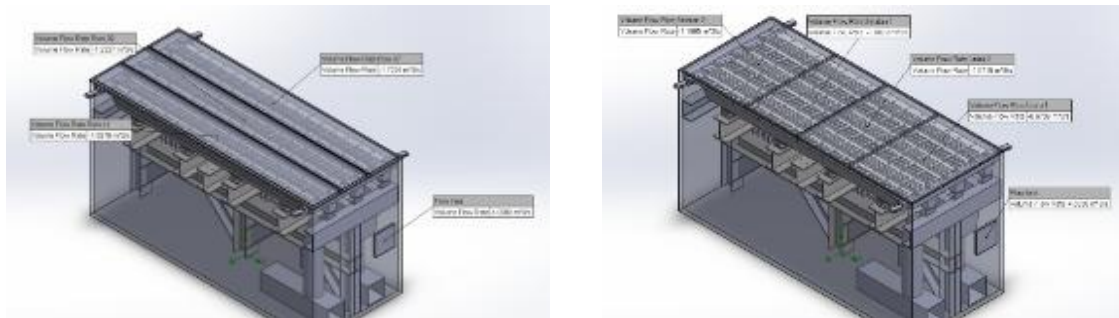
Project Name: P.T. Semen Nusantara		Project No. 94-20098-135		
SPECIFICATION DATA SHEET		Vendor:		
Equipment: FAN		Date: 09 November 95		
Equip. No(s): 445.FNF				
Item	Details/Description	Unit	Data	Notes
General	Type	-	Centrifugal	
	Model	-	HELM SLIA 120	
	Arrangement	-	S1	
	Location	-	P2	
Performance	Volume (normal/design)	m ³ /h	47230/66120	
	Pressure (normal/design)	mmwg	500/700	
	Temperature (normal/design)	°C	30/30	
	Gas Density (normal/design)	kg/m ³	1.2	
	Dust	g/m ³	N/A	
	Speed (normal/design)	rpm	1764	
Rotor	Wheel diameter	mm	1200	
	Shaft diameter	mm	100	
	Inertia (WR ²)	kg-m ²	38	
Bearings	Type	-	Anti-Friction	
	Size	mm	100	
Damper	Type	-	V1V	
	Operator	-	Beck	
Motor	Power - required (design)	kW	177	
	- installed	kW	200	
	Type of speed control	-	N/A	

Gambar 2 Spesifikasi Fan Cooler 472-FA9

Fan cooler ini memiliki kapasitas volume flow rate maksimal 66120 m³/h dan pada operasionalnya menggunakan kapasitas volume flow rate sebesar 54221 m³/h [5]. Pada konfigurasi fan cooler 472-FA9 menyuplai udara pendingin untuk kompartemen 3 dan kompartemen 4 [3]. Menggunakan asumsi bahwa luas penampang duct berbanding lurus dengan volume flow rate total, maka didapat volume flow rate yang masuk ke kompartemen 4 sebesar 14544 m³/h, jika dikonversikan menjadi satuan detik sebesar 4,04 m³/s. Nilai ini dibulatkan menjadi 4 m³/s yang nantinya dijadikan sebagai nilai inlet *volume flow rate* pada simulasi flow Solidworks.

3.2 Kondisi Existing Distribusi Aliran Udara pada Kompartemen 4

Untuk melihat kondisi existing dari kompartemen 4 grate cooler dilakukan simulasi untuk membuktikan bahwa kondisi existing sesuai dengan pemahaman awal.



(a) Simulasi Kompartemen 4 Existing Antar Row

(b) Simulasi Kompartemen 4 Existing Antar Sisi Utara dan Selatan

Gambar 3 Perbandingan Simulasi Kompartemen 4 Existing

Pada kondisi existing, sistem ducting menggunakan konfigurasi single inlet sehingga udara yang masuk ke Kompartemen 4 belum terdistribusi secara merata untuk row 39 dan 41. Selain itu, hasil simulasi kondisi existing juga menunjukkan bahwa aliran udara cenderung terkonsentrasi pada sisi selatan, sedangkan sisi utara menerima debit udara yang lebih rendah. Kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4 melalui distribusi volume flow rate pada masing-masing row dan sisi utara, selatan yang disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 Hasil Simulasi Kompartemen 4 antar Row (a)

Goal Name	Unit	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
Flow Inlet 1	[m ³ /s]	4	4	4
Volume Flow Rate Row 37	[m ³ /s]	1.72	1.71	1.72
Volume Flow Rate Row 39	[m ³ /s]	1.22	1.22	1.22
Volume Flow Rate Row 41	[m ³ /s]	1.06	1.05	1.07

Pada tabel 1 menunjukan bahwa row 37 yang dekat dengan duct inlet mendapatkan aliran udara yang lebih banyak sebesar 1,72 m³/s dibandingkan dengan row 39, dan 41 yang sebesar 1,22 m³/s dan 1,06 m³/s

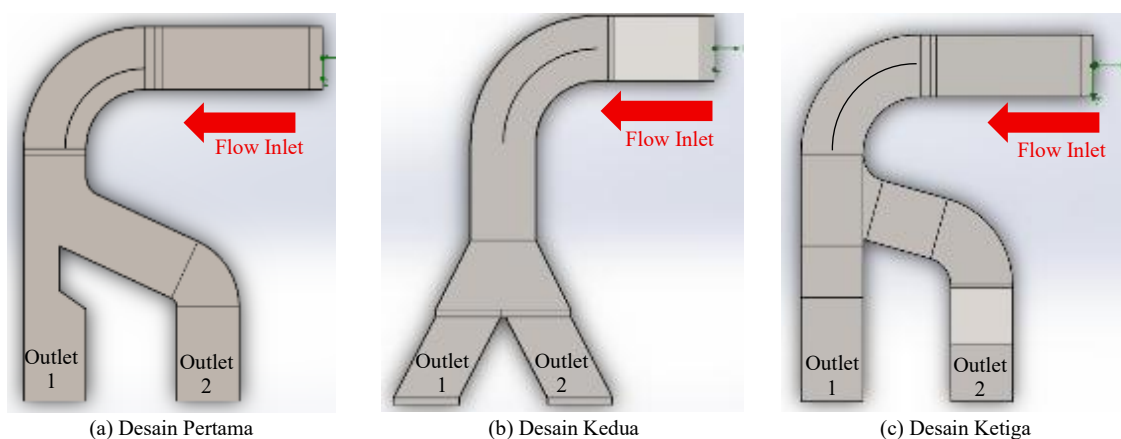
Tabel 2 Simulasi Kompartemen 4 antar Sisi Utara dan Selatan (b)

Goal Name	Unit	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
Flow Inlet 1	[m ³ /s]	4	4	4
Outlet Utara 1	[m ³ /s]	0.67	0.67	0.67
Outlet Utara 2	[m ³ /s]	1.07	1.07	1.07
Outlet Selatan 1	[m ³ /s]	1.06	1.06	1.07
Outlet Selatan 2	[m ³ /s]	1.20	1.19	1.20

Pada tabel 2 menunjukan bahwa sisi selatan mendapatkan lebih banyak aliran udara sebesar 2,26 m³/s dibanding sisi utara sebesar 1,67 m³/s. Ketidakmerataan distribusi udara ini disebabkan oleh inlet duct yang condong mengarah menuju row 37 dan arah momentum aliran yang langsung menuju sisi selatan setelah udara keluar dari inlet. Selain itu, tidak adanya komponen pengarah aliran menyebabkan sebagian besar udara mengikuti jalur dengan hambatan paling kecil (path of least resistance), sehingga suplai udara pada sisi utara menjadi lebih rendah.

3.3 Pengaruh Modifikasi Percabangan Ducting

Untuk mengatasi ketidakmerataan distribusi udara pada kondisi existing, dilakukan modifikasi geometri percabangan ducting sebagai upaya mengarahkan aliran udara agar lebih seimbang menuju ketiga row pada kompartemen 4. Pada penelitian ini, tiga variasi desain ducting dievaluasi menggunakan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) berdasarkan distribusi volume flow rate dan pressure drop yang dihasilkan.



Gambar 4 Desain Modifikasi Ducting 472-FA9

Untuk memperoleh perbandingan yang lebih objektif, hasil simulasi dari ketiga variasi desain selanjutnya dirangkum dalam bentuk tabel berdasarkan parameter volume flow rate, pressure drop, dan persentase distribusi aliran pada masing-masing outlet. Penyajian data secara kuantitatif bertujuan untuk mempermudah evaluasi

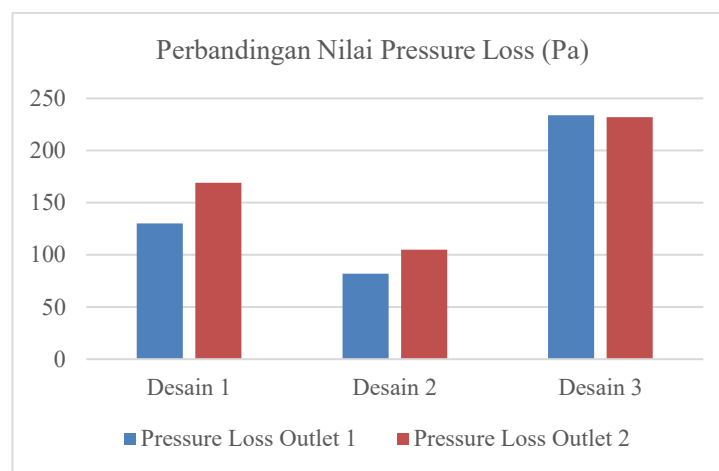
terhadap pengaruh perubahan geometri ducting terhadap karakteristik aliran udara. Ditunjukkan pada Tabel 3, seperti berikut

Tabel 3 Hasil Simulasi dari Ketiga Desain Duct

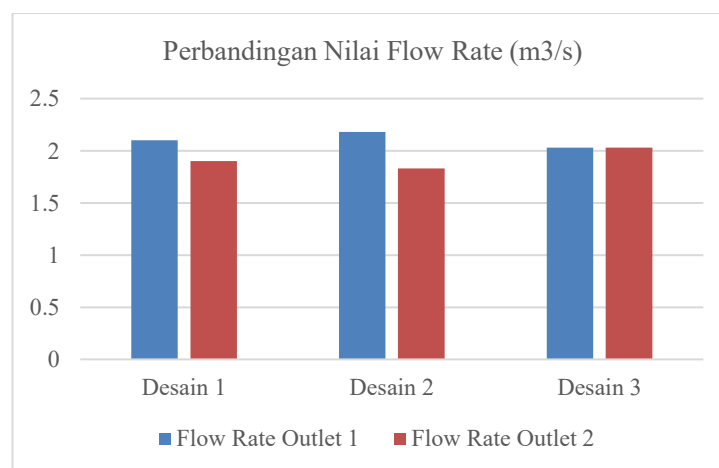
Parameter	Desain 1	Desain 2	Desain 3
Flow Rate Inlet (m ³ /s)	4	4	4
Pressure Loss Outlet 1 (Pa)	130	82	234
Pressure Loss Outlet 2 (Pa)	169	105	232
Flow Rate Outlet 1 (m ³ /s)	2,1	2,18	1,98
Flow Rate Outlet 2 (m ³ /s)	1,9	1,83	2,03

Pada tabel 3 menunjukkan perbandingan dua parameter (Pressure Loss Outlet dan Flow Rate Outlet) terhadap ketiga desain yang direncanakan.

Grafik 1 Perbandingan Nilai Pressure Loss dari Ketiga Desain

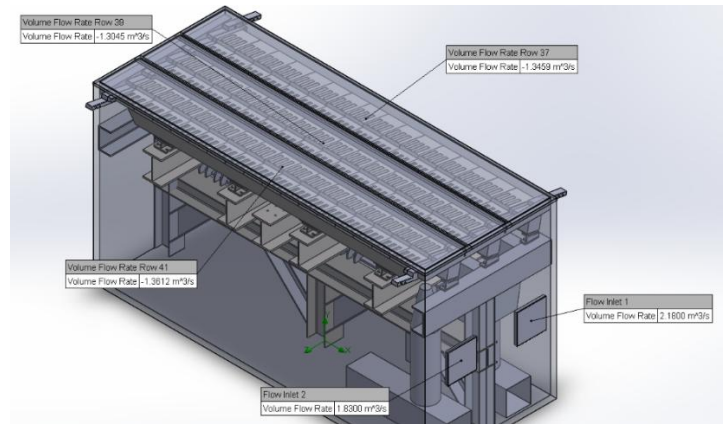


Grafik 2 Perbandingan Nilai Flow Rate dari Ketiga Desain



Berdasarkan hasil simulasi Tabel 3, desain 2 menunjukkan performa terbaik dibandingkan variasi lainnya. Salah satunya ialah ditambahkannya sebuah *guide vane* pada elbow yang berfungsi untuk mengurangi terjadinya turbulensi setelah belokan elbow [10]. Meskipun distribusi aliran antara kedua outlet belum sepenuhnya sama, perbedaannya relatif kecil dan masih dapat dikompensasi melalui pengaturan damper pada masing-masing cabang duct. Selain itu, desain ini menghasilkan nilai pressure drop yang lebih rendah dibandingkan desain lainnya, sehingga kehilangan energi akibat perubahan arah aliran dapat diminimalkan. Oleh karena itu **Desain 2** dipilih sebagai konfigurasi terbaik untuk tahap optimasi berikutnya.

Untuk memverifikasi performa desain ducting yang telah dipilih, konfigurasi tersebut selanjutnya diterapkan pada model kompartemen 4 dengan sistem double inlet. Evaluasi dilakukan berdasarkan distribusi volume flow rate pada setiap row grate plate sehingga efektivitas modifikasi ducting terhadap pemerataan suplai udara pendingin dapat dianalisis secara menyeluruh. Berikut merupakan simulasi kompartemen 4 dengan konfigurasi double outlet setelah dilakukan modifikasi duct.



Gambar 5 Simulasi Kompartemen 4 Setelah Modifikasi Duct

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan sistem double inlet mampu mengubah pola distribusi aliran udara di dalam Kompartemen 4 dibandingkan kondisi existing. Untuk memberikan perbandingan yang lebih jelas, distribusi volume flow rate pada setiap row grate plate disajikan pada Tabel 4.

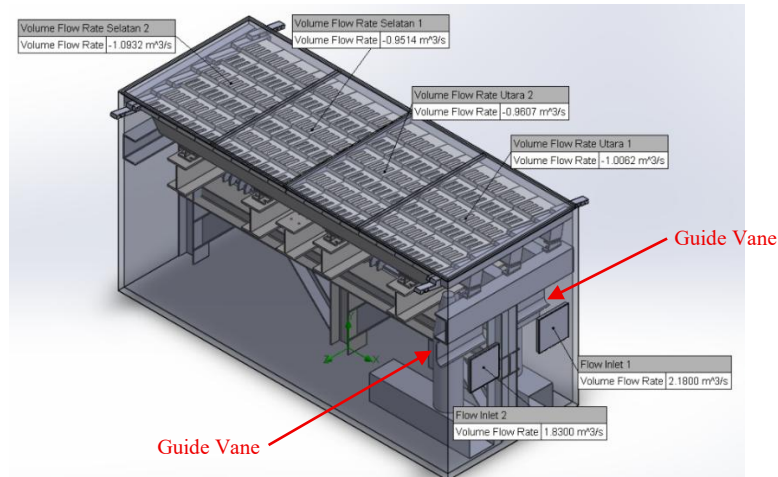
Tabel 4 Hasil Simulasi Kompartemen 4 Setelah Modifikasi Duct

Goal Name	Unit	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
Flow Inlet 1	[m ³ /s]	2.18	2.18	2.18
Flow Inlet 2	[m ³ /s]	1.83	1.83	1.83
Volume Flow Rate Row 37	[m ³ /s]	1.35	1.34	1.35
Volume Flow Rate Row 39	[m ³ /s]	1.30	1.30	1.31
Volume Flow Rate Row 41	[m ³ /s]	1.36	1.36	1.36

Berdasarkan Tabel 4, distribusi aliran udara pada Kompartemen 4 mengalami peningkatan dibandingkan kondisi existing. Dimana row 37, 39, dan 41 mendapatkan aliran udara sekitar 33% dari total flow rate yang dihasilkan oleh fan cooler 472-FA9.

3.4 Pengaruh Penambahan Guide Vane terhadap Distribusi Aliran Udara

Setelah merancang ducting untuk meratakan distribusi udara pada setiap row, dilakukan perancangan guide vane yang berfungsi untuk mengarahkan aliran udara menuju ke sisi utara. Penempatan *guide vane* dirancang berdasarkan pola aliran hasil simulasi sebelumnya. Posisi *guide vane* disesuaikan dengan arah aliran udara yang keluar dari kedua inlet sehingga sebagian momentum aliran dapat dibelokkan menuju area yang sebelumnya menerima suplai udara lebih rendah, yaitu sisi utara Kompartemen 4.



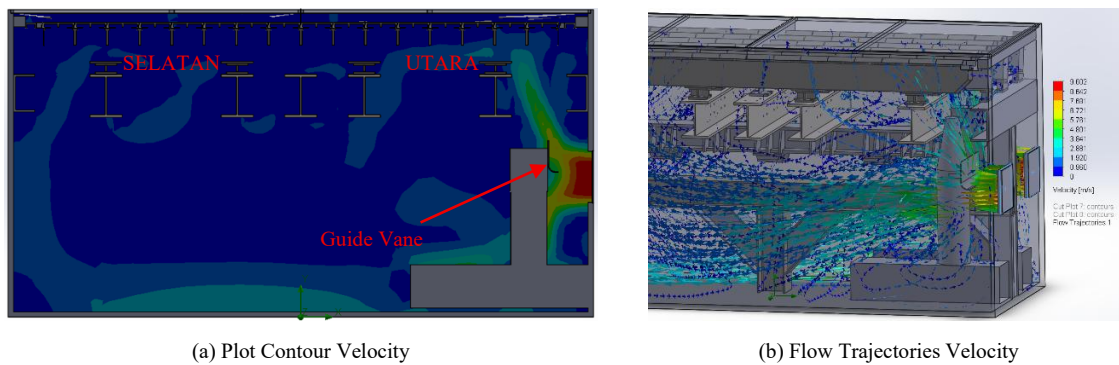
Gambar 6 Simulasi Kompartemen 4 dengan Penambahan Guide Vane

Berikut merupakan tabel hasil simulasi dari penambahan *guide vane*:

Tabel 5 Hasil Simulasi Penambahan Guide Vane

Goal Name	Unit	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
Flow Inlet 1	[m ³ /s]	2.18	2.18	2.18
Flow Inlet 2	[m ³ /s]	1.83	1.83	1.83
Outlet Utara 1	[m ³ /s]	1.01	1.01	1.01
Outlet Utara 2	[m ³ /s]	0.96	0.96	0.96
Outlet Selatan 1	[m ³ /s]	0.95	0.95	0.95
Outlet Selatan 2	[m ³ /s]	1.09	1.09	1.10

Pada tabel 5 menunjukan distribusi aliran udara sudah hampir merata pada sisi utara dan selatan dari ditambahkannya *guide vane*, yaitu utara sebesar 1,97 m³/s dan Selatan sebesar 2,04 m³/s. Selain itu ditampilkan result dari simulasi solidworks yang menampilkan cut plot contour dan flow trajectories dengan parameter *velocity* seperti pada Gambar 8.



(a) Plot Contour Velocity

(b) Flow Trajectories Velocity

Gambar 7 Result Simulasi Solidworks dengan Parameter Velocity

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan SolidWorks Flow Simulation, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Kondisi existing Kompartemen 4 menunjukkan distribusi udara pendingin yang belum merata. Aliran udara cenderung terkonsentrasi pada sisi selatan sehingga beberapa row grate plate pada sisi utara

menerima suplai udara yang lebih rendah. Kondisi ini berpotensi menyebabkan terjadinya overhear yang dapat memicu repetitive failure pada grate plate.

2. Hasil evaluasi terhadap tiga variasi desain percabangan ducting menunjukkan bahwa Desain 2 merupakan konfigurasi terbaik karena menghasilkan nilai pressure drop yang paling rendah, yaitu sebesar 82 Pa pada outlet 1 dan 105 Pa pada outlet 2, serta mampu menghasilkan distribusi volume flow rate yang lebih seimbang dibandingkan variasi desain lainnya. Setelah diterapkan pada model Kompartemen 4 dengan konfigurasi double inlet, distribusi udara pada setiap row menjadi lebih merata, dengan masing-masing row menerima sekitar 33% dari total debit udara yang disuplai fan.
3. Penambahan guide vane mampu mengarahkan sebagian aliran udara menuju sisi utara Kompartemen 4 sehingga distribusi udara pendingin menjadi lebih merata. Kombinasi modifikasi percabangan ducting dan penambahan guide vane menunjukkan potensi sebagai solusi untuk meningkatkan efektivitas distribusi udara pendingin tanpa meningkatkan kapasitas fan, sehingga berpotensi mengurangi risiko overhear dan memperpanjang umur pakai grate plate.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Solusi Bangun Indonesia Tbk atas dukungannya pada penelitian ini dan *Departement Mechanical Kiln* atas dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada rekan-rekan karyawan, kontraktor, dan rekan mahasiswa EVE atas dikusinya yang bermanfaat.

REFERENSI

- [1] Y. A. Mohamed and E. A. A. Alla, "Calculation of the formation process of clinker inside the rotary cement kiln," vol. 80, no. 1, pp. 233–239, 2018, doi: 10.20914/2310-1202-2018-1-233-239.
- [2] HOLDERBANK, "Cement Seminar Process Technology - Clinker Coolers."
- [3] FLSmidth, "General Arrangement, Field Erection & Assembly Drawings."
- [4] N. Tamimah and G. E. Kusuma, "Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of Ducting Design Simulation in a Urea Storage Warehouse," vol. 2025, doi: 10.2991/978-94-6463-926-1.
- [5] "TECHNICAL INFORMATION SYSTEM SBI," *PT Solusi Bangun Indonesia Tbk*.
- [6] ASHRAE, *ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS - 2021*.
- [7] H. A. Shah, P. T. Patel, and K. B. Gaywala, "DESIGN & PROPORTIONAL COMPUTATIONAL ASSESSMENT BETWEEN A CONVENTIONAL," vol. 5, no. 7, pp. 354–361, 2018.
- [8] E. Giana, "Review on Ventilation Systems for Building Applications in," pp. 1–14, 2022.
- [9] X. Lü *et al.*, "Improving the Energy Efficiency of Buildings Based on Fluid Dynamics Models : A Critical Review," pp. 1–23, 2021.
- [10] S. Walunj, S. Shirsath, A. Biradar, A. Salvi, and M. Deore, "STUDY AND ANALYSIS OF AIR FLOW THROUGH DUCT," vol. 8, no. 10, pp. 69–83, 2021.