

Analisis dan Modifikasi Desain *Grate Cooler* Pabrik Semen

Odi Akhyarsi

Universitas Nusa Putra, Jl. Raya Cibolang No.21, Kabupaten Sukabumi, 43152

E-mail: odi.akhyarsi@nusaputra.ac.id

ABSTRACT

This study analyzes the case of wall layer damage in the bullnose area of a cement plant's grate cooler, proposes alternative design modifications, and evaluates the design alternatives. The case analysis and design evaluations were conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) approach. The results for the actual grate cooler indicate that the air flow temperature around the bullnose surface is very high, approximately 1500K, and the bullnose surface is exposed to air flow with a velocity of 4-5 m/s. The combination of high flow temperature and velocity is suspected to be the cause of erosion on the grate cooler wall surface. Two design alternatives were proposed and considered: Design A, where the right-angle forming the bullnose is eliminated, and Design B, where the bullnose position is shifted back by 13 meters and tertiary air channel are integrated with the kiln hood. Design A was found to reduce the air flow temperature around the bullnose surface by 100K. The best results were obtained with Design B, where the air flow temperature around the bullnose surface could be significantly reduced by approximately 400K, to 1000K. In both designs, the air velocity near the bullnose could be lowered to 2-4 m/s. This study recommends Design B as a solution to prevent recurring damage to the wall layer in the bullnose area of the grate cooler.



KEYWORDS

Keywords: CFD; analysis; grate cooler; modification; design..

ABSTRAK

Studi ini menganalisis kasus kerusakan lapisan dinding di area *bullnose* sebuah *grate cooler* pabrik semen, mengusulkan alternatif modifikasi desain, dan mengevaluasi alternatif modifikasi desain tersebut. Analisis kasus dan evaluasi desain tersebut dilakukan dengan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil studi untuk *grate cooler* aktual mengindikasikan bahwa temperatur aliran udara di sekitar permukaan *bullnose* sangat tinggi, yaitu sekitar 1500K, dan permukaan *bullnose* dilewati oleh udara dengan kecepatan 4-5 m/s. Kombinasi temperatur dan kecepatan aliran udara tinggi ini diduga menjadi penyebab terjadinya erosi terhadap permukaan dinding *grate cooler*. Terdapat dua alternatif desain yang diusulkan dan dipertimbangkan, yaitu desain A dimana sudut siku yang membentuk *bullnose* dihilangkan dan desain B dimana posisi *bullnose* dimundurkan sejauh 13 meter dan saluran udara tersier digabungkan dengan *kiln hood*. Desain A ditemukan dapat mengurangi temperatur udara di sekitar permukaan *bullnose* sebesar 100K. Hasil terbaik diperoleh dengan desain B, dimana temperatur udara di sekitar permukaan *bullnose* dapat dikurangi secara signifikan, sekitar 400K, menjadi 1000K. Pada kedua desain, kecepatan udara yang melewati *bullnose* dapat diturunkan menjadi 2-4 m/s. Studi ini merekomendasikan Desain B sebagai solusi untuk mencegah kerusakan berulang lapisan di area *bullnose* pada *grate cooler*.



KEYWORDS

Kata kunci: CFD; analisis; grate cooler; modifikasi; desain.



This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

1. Pendahuluan

Grate cooler adalah salah satu perangkat penting dalam produksi semen, yang berfungsi untuk mendinginkan klinker panas yang keluar dari kiln, dengan temperatur sekitar 1400°C, menjadi sekitar 200°C. *Grate cooler* biasanya beroperasi secara terus menerus selama proses produksi. Kinerja yang optimal pada *grate cooler* penting untuk menjaga kontinuitas produksi dan kualitas produk semen yang dihasilkan. Informasi dari sejumlah pabrik semen mengindikasikan bahwa terdapat beberapa kerusakan yang sering terjadi pada *grate cooler*, yang diantaranya adalah kerusakan pada lapisan dinding di area *bullnose* yang merupakan material pelindung panas dengan nilai ekonomi tinggi. Kerusakan tersebut mengganggu dan bahkan mengakibatkan berhentinya proses produksi.

Penelitian mengenai *grate cooler* sudah banyak dilakukan, terutama mengenai proses pendinginan [1] dan analisis energi dan emisinya secara umum [2,3]. Namun, studi yang mendalam mengenai kasus-kasus aktual kerusakan *grate cooler*, apalagi kasus aktual di Indonesia, sangat sulit ditemukan dan oleh karenanya perlu untuk dilakukan. Hasil-hasil studi tersebut diharapkan dapat menemukan penyebab terjadinya kerusakan dan dapat menjadi dasar untuk modifikasi desain. Masalah berikutnya adalah studi yang melibatkan pengukuran parameter-parameter fisik secara *in-situ* di dalam *grate cooler* pada kondisi operasinya sangat sulit dilakukan. Kesulitan tersebut diantaranya adalah karena kondisi yang ekstrim di dalam *grate cooler* dan proses pengukuran dapat mengganggu proses dan jadwal produksi. Pendekatan yang lebih *feasible* untuk mempelajari kasus kerusakan *grate cooler* adalah melalui simulasi numerik, yaitu dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

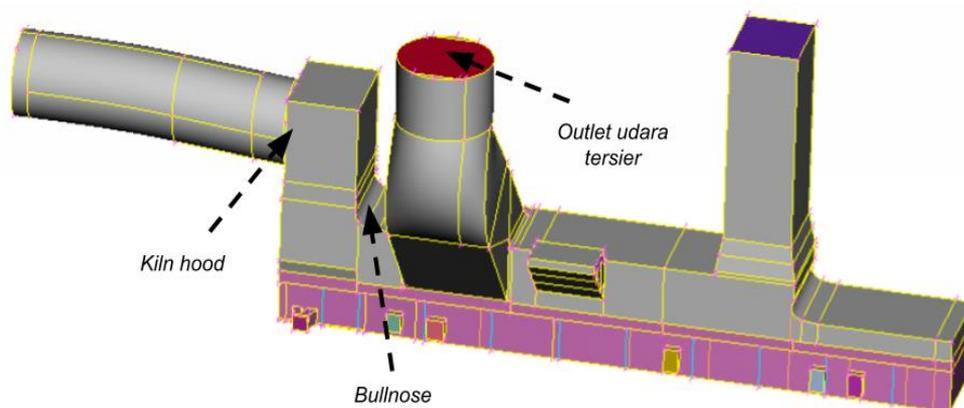
CFD adalah proses pemodelan fenomena fisik sistem-sistem yang melibatkan aliran fluida [4] dan perpindahan panas, dengan berdasarkan persamaan Navier-Stokes, yang kemudian diselesaikan secara numerik menggunakan bantuan komputer berspesifikasi tinggi. CFD telah menjadi alat bantu untuk penelitian dan pengembangan di dunia akademik maupun industri [5,6], tidak terkecuali pada pabrik semen. CFD dipercaya dapat menjadi alat bantu dalam memahami perilaku aliran fluida dan distribusi panas di dalam *grate cooler* secara lebih baik serta mensimulasikan perubahan perilaku aliran fluida dan distribusi temperatur untuk desain *grate cooler* yang dimodifikasi.

Penelitian ini menganalisis kasus kerusakan lapisan dinding di area *bullnose* sebuah *grate cooler* pabrik semen, mengusulkan alternatif modifikasi desain, serta mengevaluasi alternatif modifikasi desain tersebut. Analisis kasus dan evaluasi desain tersebut dilakukan dengan memanfaatkan CFD.

2. Metodologi

Objek penelitian ini adalah sebuah *grate cooler* aktual yang terpasang di salah satu pabrik semen di Indonesia. Data geometri dan kondisi operasi dikumpulkan selengkap mungkin dari lembar spesifikasi, laporan, dan pengukuran lapangan, yang kemudian direpresentasikan menjadi model 3 dimensi (seperti terlihat pada Gambar 1) dan tabel kondisi operasi (lihat Tabel 1). *Grate cooler* tersebut terdiri dari inlet tempat masuknya klinker bertemperatur tinggi (bagian kiri di Gambar 1), *grate* yang bergerak membawa klinker dan dialiri aliran udara dingin dari rangkaian kipas berkapasitas besar di bawahnya, saluran dan outlet udara sekunder, saluran dan outlet udara tersier, saluran dan outlet udara panas, saluran dan outlet udara berlebih, serta outlet klinker.

Klinker panas hasil pembakaran di kiln memasuki *grate-cooler* dengan temperatur 1450°C dan debit 353 ton per jam. Klinker dengan massa jenis 1190 kg/m³ tersebut kemudian membentuk lapisan dengan ketebalan kurang lebih 70 cm dan lebar 4,95 m. Untuk pendinginan, udara dengan temperatur 35°C dihembuskan dengan debit 214 m³/s. Rasio debit udara pada outlet udara sekunder : outlet udara tersier : outlet udara berlebih adalah 15% : 25% : 60%.



Gambar 1. Model geometri *grate cooler* pabrik semen

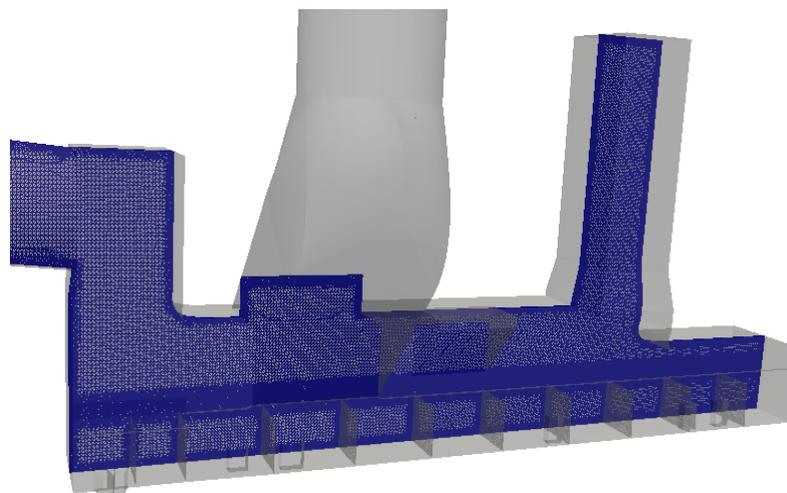
Tabel 1. Kondisi operasi *grate cooler* pabrik semen aktual

No	Parameter	Nilai
1	Temperatur klinker di inlet	1450°C
2	Debit klinker	353 ton/jam
3	Massa jenis klinker	1190 kg/m ³
4	Ketebalan klinker	70 cm
5	Lebar <i>grate</i>	4,95 m
6	Rasio debit udara sekunder : udara tersier : udara berlebih	15% : 25% : 60%
7	Debit udara dari bawah <i>grate</i>	214 m ³ /s
8	Temperatur udara masuk dari bawah <i>grate</i>	35°C

Model geometri dan kondisi operasi di atas digunakan lebih lanjut untuk pemodelan CFD, yang dilakukan menggunakan Openfoam. Openfoam [7,8] merupakan perangkat lunak CFD berbasis *open source* yang banyak digunakan di dunia industri dan akademik untuk pemodelan fenomena-fenomena mekanika fluida dan perpindahan panas. Perangkat keras yang digunakan dalam studi ini adalah sebuah server komputasi dengan 2 buah prosesor 6 inti 2,2 GHz dan total memori sebesar 48 GB.

Model geometri diproses untuk pembuatan domain komputasi beserta *mesh*-nya. Gambar 2 menunjukkan domain komputasi tiga dimensi beserta *mesh* komputasi pada penampang melintang *grate cooler*. Untuk menjaga konvergensi dan keakuratan hasil komputasi, *mesh* di bagian *grate* dibuat memiliki resolusi tinggi. Data-data kondisi operasi digunakan sebagai referensi dalam penentuan dan pengaturan sejumlah kondisi batas dan kondisi awal simulasi. Persamaan Navier-Stokes diselesaikan menggunakan *solver* yang dimiliki oleh Openfoam berdasarkan domain, *mesh*, kondisi batas, kondisi awal, model turbulen, dan metode numerik yang ditentukan.

Validitas dan akurasi domain, *mesh*, kondisi batas, kondisi awal, model turbulen, dan metode numerik tersebut diuji dengan membandingkan hasil simulasi dengan data lapangan, dimana diantaranya terkonfirmasi bahwa perbedaan tekanan antara area *kiln hood* dengan outlet udara berlebih hasil simulasi sesuai dengan hasil pengukuran di lapangan, yaitu 150 Pa. Profil tekanan, kecepatan udara, dan temperatur di dalam *grate cooler* juga mengindikasikan kondisi yang realistis. Simulasi dijalankan sampai mencapai kondisi konvergen dan hasilnya kemudian diekstrak untuk mendapatkan distribusi kecepatan aliran dan distribusi temperatur di dalam *grate cooler*. Distribusi-distribusi tersebut kemudian dijadikan sebagai rujukan menemukan fenomena yang mengakibatkan kerusakan lapisan dinding di area *bullnose* dan sekaligus rujukan dalam mengusulkan modifikasi desain untuk mengurangi resiko kerusakan serupa di kemudian hari.



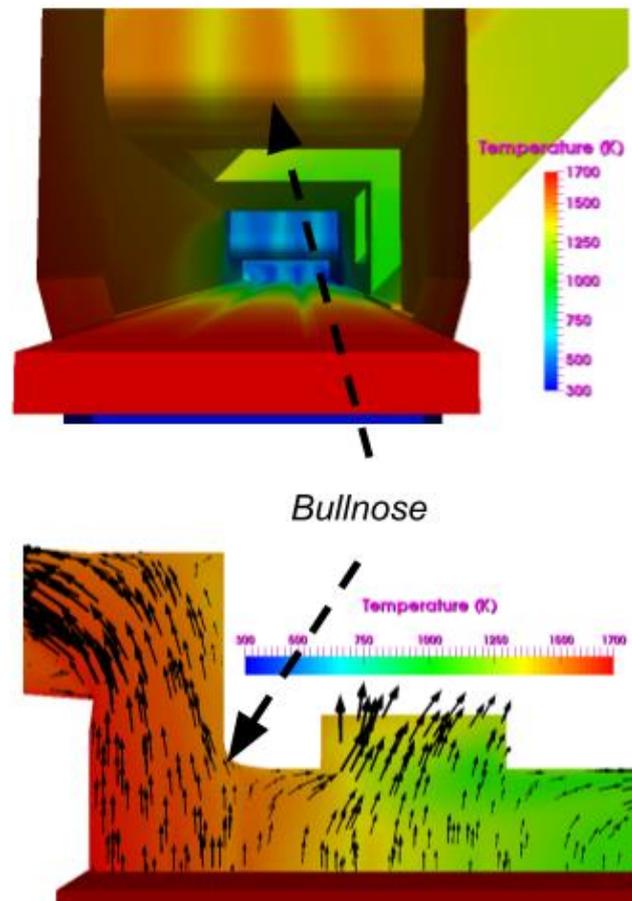
Gambar 2. Domain komputasi 3 dimensi (abu-abu) dan *mesh* pada penampang melintang *grate cooler* (biru tua)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Simulasi *Grate Cooler* Aktual

Gambar 3 menunjukkan hasil analisis CFD berupa distribusi temperatur udara di sekitar permukaan dalam *grate cooler* dilihat dari arah inlet klinker dan distribusi temperatur udara pada penampang melintang *grate cooler* beserta profil kecepatan udaranya. Hasil ini mengindikasikan bahwa temperatur udara di sekitar permukaan *bullnose* sangat tinggi (1500K), direpresentasikan dengan warna jingga. Profil kecepatan udara mengindikasikan bahwa permukaan *bullnose* dilewati oleh udara dari arah bawah, dengan kecepatan 4-5 m/s. Kombinasi tingginya temperatur dan kecepatan udara di sekitar *bullnose* diduga menjadi penyebab terjadinya erosi terhadap lapisan dinding di area tersebut.

Hal tambahan yang dapat ditunjukkan oleh distribusi temperatur di Gambar 3 adalah bahwa semakin ke hilir temperatur akan semakin rendah, sesuai dengan kondisi aktual yang wajar. Profil kecepatan udara di Gambar 3 menunjukkan bahwa separasi antara udara yang mengalir menuju ke kiln dan udara yang menuju ke outlet udara tersier terjadi di area di bawah *bullnose*, sedangkan separasi antara udara yang mengalir menuju outlet udara tersier dan outlet udara berlebih terjadi di area bawah bagian ujung belakang outlet udara tersier.



Gambar 3. Distribusi temperatur udara di sekitar permukaan dalam *grate cooler* dilihat dari arah inlet klinker (atas) dan distribusi temperatur udara pada penampang melintang *grate cooler* beserta profil kecepatan udaranya (bawah).

3.2 Desain Modifikasi Geometri *Grate Cooler*

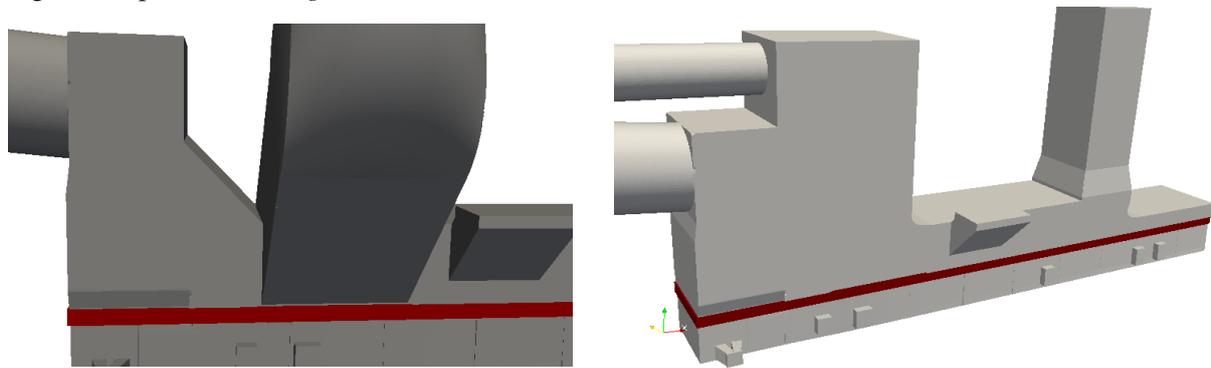
Dengan indikasi bahwa penyebab terjadinya erosi terhadap lapisan dinding di area *bullnose* pada *grate cooler* aktual adalah temperatur dan kecepatan udara tinggi, maka perlu diusulkan alternatif

solusinya. Solusi yang diusulkan melalui studi ini adalah dengan memodifikasi geometri *grate cooler* aktual sedemikian rupa agar penyebab-penyebab yang disebut di atas bisa diminimalisasi. Terdapat 2 usulan modifikasi geometri, yang dinamakan Desain Modifikasi A (atau disingkat Desain A) dan Desain Modifikasi B (Desain B), untuk dievaluasi lebih lanjut dan kemudian ditentukan desain mana yang paling baik untuk direkomendasikan.

Pada Desain A, bentuk *bullnose* diubah sedemikian rupa sehingga sudut siku *bullnose* dihilangkan dengan cara membuat geometri berbentuk diagonal, seperti terlihat di Gambar 4 sebelah kiri. Hipotesis dari desain ini adalah penghilangan siku tersebut diharapkan dapat mengurangi luas bidang yang berjarak dekat dengan klinker panas di bagian hulu *grate cooler* dan aliran udara yang menuju kiln menjadi lebih *streamline* dan tidak lagi menumbuk *bullnose*.

Hal yang diusulkan melalui Desain B adalah lokasi *bullnose* dimundurkan sampai ke posisi dimana klinker pada *grate cooler* aktual memiliki temperatur sekitar 1050K, yaitu posisi dengan jarak 13 meter dari ujung kiln, dan outlet udara tersier dipindahkan menjadi bergabung dengan *kiln hood* (lihat Gambar 4 sebelah kanan). Hipotesis dari desain ini adalah ketinggian atap di atas klinker panas pada bagian hulu *grate cooler* menjadi maksimum dan *bullnose* berada di area bertemperatur dan berkecepatan udara relatif rendah.

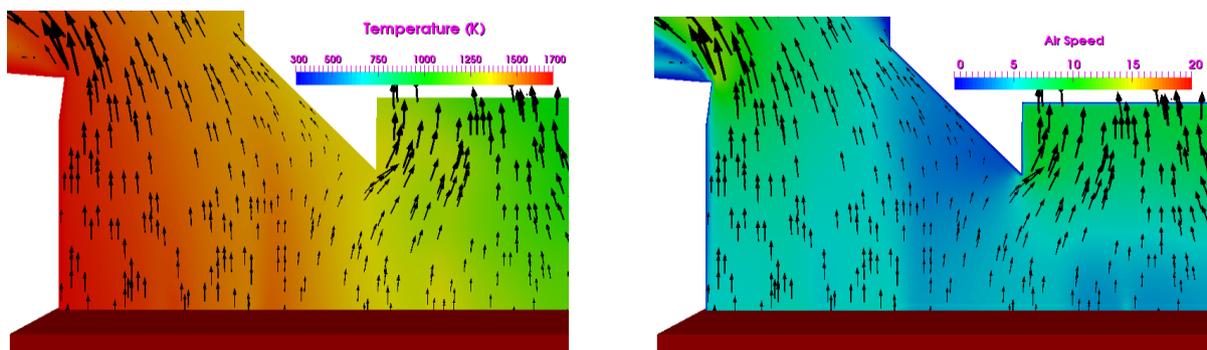
Simulasi CFD dilakukan terhadap kedua desain di atas dengan menggunakan data kondisi operasi, kondisi batas, kondisi awal, model turbulen, dan metode numerik yang konsisten dengan yang digunakan pada simulasi *grate cooler* aktual.



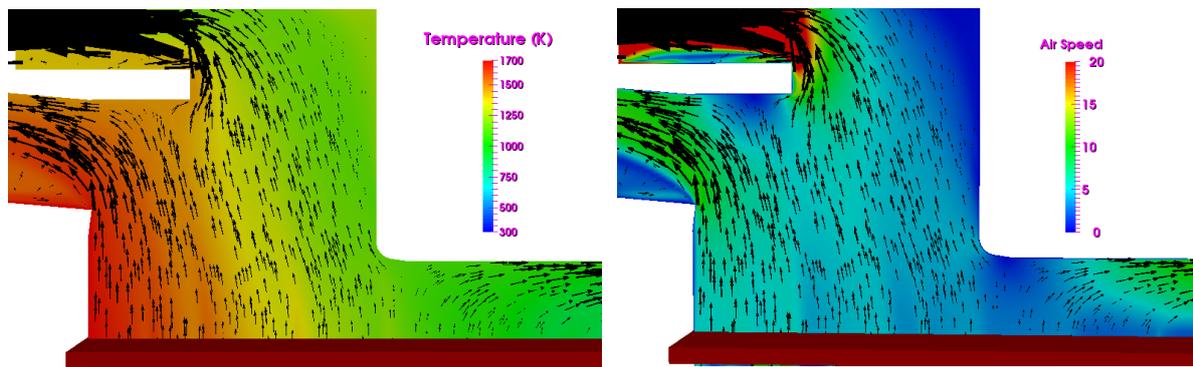
Gambar 4. Desain modifikasi A dimana bentuk *bullnose* diubah (kiri) dan desain modifikasi B dimana lokasi *bullnose* dimundurkan dan outlet udara tersier dipindah dan digabung dengan *kiln hood*

3.3 Hasil Simulasi *Grate Cooler* Desain Modifikasi A

Gambar 5 menunjukkan hasil analisis CFD berupa distribusi temperatur dan kecepatan udara pada penampang melintang *grate cooler* Desain Modifikasi A. Distribusi temperatur menunjukkan bahwa temperatur udara di sekitar daerah *bullnose* adalah 1400 K, atau 100K lebih rendah disbanding kondisi di *grate cooler* aktual. Kecepatan udara di daerah *bullnose* menjadi relatif lebih rendah, yaitu sekitar 2-4 m/s. Hasil-hasil ini mengindikasikan bahwa potensi erosi bisa sedikit dikurangi dengan Desain A.



Gambar 5. Distribusi temperatur udara (kiri) dan kecepatan udara (kanan) untuk Desain Modifikasi A



Gambar 6. Distribusi temperatur udara (kiri) dan kecepatan udara (kanan) untuk Desain Modifikasi B beserta profil vektor kecepatan udara

3.4 Hasil Simulasi *Grate Cooler* Desain Modifikasi B

Hasil simulasi CFD Desain B yang diperlihatkan melalui Gambar 6 mengindikasikan bahwa temperatur udara di daerah *bullnose* menjadi cukup rendah (1000K), dengan kecepatan udara di daerah *bullnose* juga relatif rendah, yaitu sekitar 2-4 m/s. Kondisi ini dinilai sangat baik dan lebih optimal dibandingkan hasil Desain A dalam menurunkan potensi erosi pada lapisan dinding di area *bullnose*. Dengan demikian, modifikasi B (lokasi *bullnose* berada 13 meter dari ujung kiln dan outlet udara tersier dipindahkan ke *kiln hood*) direkomendasikan sebagai solusi untuk mencegah kerusakan berulang lapisan dinding di area *bullnose* pada *grate cooler*.

Pabrik semen pemilik dan operator *grate cooler* objek penelitian ini diharapkan dapat menindaklanjuti dan mengimplementasikan Desain B serta melakukan rangkaian studi lanjutan untuk mengevaluasi keefektifan dan keandalannya. Modifikasi Desain B juga dinilai dapat lebih optimal jika disertai dengan peningkatan debit udara pendingin di bagian hulu *grate cooler*. Evaluasi peningkatan debit udara pendingin *grate cooler* ini juga menarik untuk dijadikan sebagai studi berikutnya.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menganalisis fenomena fisik yang terjadi di dalam sebuah *grate cooler* pabrik semen menggunakan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD), dalam kaitannya dengan kasus kerusakan lapisan dinding di area *bullnose* pada *grate cooler*. Hasil simulasi mengindikasikan bahwa temperatur udara di sekitar permukaan *bullnose* sangat tinggi, yaitu 1500K, dan permukaan *bullnose* dilewati oleh udara dari arah bawah dengan kecepatan 4-5 m/s. Kombinasi tingginya temperatur dan kecepatan udara tersebut diduga menjadi penyebab terjadinya erosi terhadap lapisan dinding di area *bullnose*. Dalam upaya meminimalisasi terjadinya kondisi temperatur dan kecepatan udara yang tinggi tersebut, dan mencegah terjadinya kerusakan lapisan dinding di area *bullnose*, studi ini mengusulkan dua modifikasi desain. Pada Desain A, bentuk *bullnose* dihilangkan, sedangkan pada Desain B posisi *bullnose* dimundurkan ke arah hilir *grate cooler* serta outlet udara tersier diintegrasikan dengan *kiln hood*. Hasil evaluasi menyimpulkan bahwa walau Desain A dapat mengurangi temperatur udara di sekitar permukaan *bullnose* sebesar 100K, hasil terbaik diperoleh dengan desain B, dimana temperatur udara di sekitar permukaan *bullnose* dapat dikurangi secara signifikan menjadi 1000K. Kecepatan udara yang melewati *bullnose* juga dapat diturunkan menjadi 2-4 m/s. Studi ini merekomendasikan Desain B sebagai solusi untuk mencegah kerusakan berulang lapisan di area *bullnose* pada *grate cooler*.

Referensi

- [1] Wei Shao, Zheng Cui, Xiao-teng Ma, “Experimental research on cement grate cooler system and numerical simulation of its clinker cooling process”, *Applied Thermal Engineering*, Volume 181, 2020.
- [2] T. J. B. Taweel et al., “Energy and Exergy Analysis of Clinker Cooler in the Cement Industry, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering”, Volume 463, Issue 3, 2018.
- [3] Adem Atmaca and Recep Yumrutas, “The effects of grate clinker cooler on specific energy consumption and emissions of a rotary kiln in cement industry”, *International Journal of Exergy*, Vol. 18, No. 3, 2015.
- [4] Howard H. Hu, “Chapter 10 - Computational Fluid Dynamics, Fluid Mechanics (Fifth Edition), Academic Press, 2012.
- [5] Odi Akhyarsi et al., “Characteristics of Gaseous and Liquid Fuel Combustion in Laboratory-scale Furnaces”, *Journal of Environment and Engineering* 5 (1), 157-167, 2010.
- [6] W. F. Lima and R. Huebner, “Optimization of Air Distribution in a Baghouse Filter Using Computational Fluid Dynamics”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 4452–4456, 2019.
- [7] Beaudoin, M. and Jasak, H., “Development of a generalized grid interface for turbomachinery simulations with OpenFOAM”, *Open Source CFD International Conference*, 2008.
- [8] Hrvoje Jasak, “OpenFOAM: Open source CFD in research and industry”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 1, Issue 2, 2009.