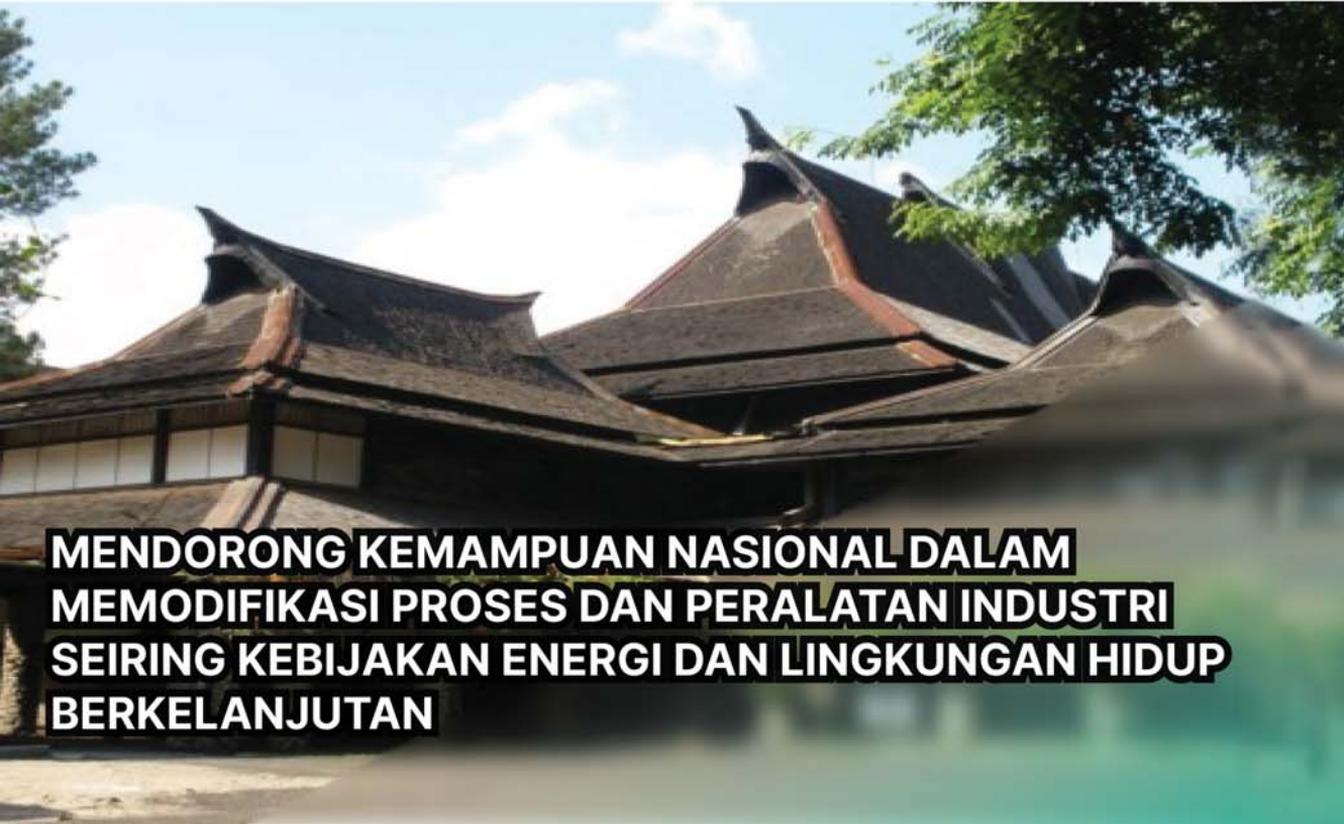




FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



**MENDORONG KEMAMPUAN NASIONAL DALAM
MEMODIFIKASI PROSES DAN PERALATAN INDUSTRI
SEIRING KEBIJAKAN ENERGI DAN LINGKUNGAN HIDUP
BERKELANJUTAN**

Profesor Prihadi Setyo Darmanto
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung

**Aula Barat ITB
29 Oktober 2022**

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
29 Oktober 2022

Profesor Prihadi Setyo Darmanto

**MENDORONG KEMAMPUAN NASIONAL
DALAM MEMODIFIKASI PROSES DAN
PERALATAN INDUSTRI SEIRING KEBIJAKAN
ENERGI DAN LINGKUNGAN HIDUP
BERKELANJUTAN**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: MENDORONG KEMAMPUAN NASIONAL DALAM MEMODIFIKASI
PROSES DAN PERALATAN INDUSTRI SEIRING KEBIJAKAN ENERGI
DAN LINGKUNGAN HIDUP BERKELANJUTAN

Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 29 Oktober 2022.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Prof. Prihadi Setyo Darmanto

MENDORONG KEMAMPUAN NASIONAL DALAM MEMODIFIKASI PROSES
DAN PERALATAN INDUSTRI SEIRING KEBIJAKAN ENERGI DAN
LINGKUNGAN HIDUP BERKELANJUTAN

Disunting oleh Prof. Prihadi Setyo Darmanto

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2022

xii+92 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-65-9

1. Rekayasa Peralatan Konversi Energi 1. Prihadi Setyo Darmanto

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, bahwasanya atas berkat dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas perkenannya untuk menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar.

Dalam laporan di Geneva pada bulan Agustus 2021, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mengutip kembali kesimpulan hasil penelitian para ilmuwan bahwa *“belum pernah terjadi sebelumnya dalam ribuan, jika tidak ratusan ribu tahun, beberapa perubahan yang telah terjadi -seperti kenaikan permukaan laut yang berkelanjutan dan kondisi ini tidak dapat diubah selama ratusan hingga ribuan tahun”*. Salah satu penyebabnya adalah kenaikan kandungan gas rumah kaca di atmosfer bumi. Kandungan CO₂ di atmosfer yang sudah melewati batas 400 ppm yaitu meningkat sebanyak 50 persen sejak dimulainya revolusi industri di abad ke-18, telah menyebabkan pemanasan global yang menimbulkan masalah perubahan iklim seperti kesimpulan dari hasil penelitian IPCC tersebut. Pengurangan gas CO₂ dan gas rumah kaca lainnya seperti Sulfur Dioksida (SO₂), Nitrogen Oksida (NO_x) menjadi prioritas utama pencegahan perubahan iklim. Indonesia termasuk salah satu negara yang

ikut menandatangani *Paris Agreement* harus mengusahakan penurunan emisi gas rumah kaca ini dalam beberapa dekade ke depan hingga menjadi zero emisi CO₂ pada 2060 di berbagai sektor. Salah satu cara yang paling efektif untuk hal tersebut adalah mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan menggantinya dengan bahan bakar alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan.

Dalam masa transisi hingga 2060 tersebut, karena masih harus memenuhi kebutuhan pasar, Industri kita tetap harus beroperasi pada kapasitas desainnya secara efisien. Oleh karena itu diperlukan kemampuan bangsa ini untuk memodifikasi proses dan peralatan agar target industri-industri tersebut tetap dapat dicapai. Untuk itulah orasi ilmiah ini disusun dalam rangka menyosialisasikan pengalaman penulis dan tim dalam melakukan belasan macam modifikasi proses dan peralatan di industri padat energi seperti industri daya, industri semen dan industri baja. Harapan penulis dan tim, tulisan ini dapat memotivasi kemampuan bangsa Indonesia dalam bidang modifikasi proses dan peralatan di industri proses khususnya, karena untuk mempertahankan efisiensi konsumsi energi pada kapasitas produksi desain dibutuhkan kemampuan seperti ini. Akan menjadi satu hal yang mahal bila semuanya kita gantungkan pada pihak asing di dalam masa transisi energi ini. Selain itu dampak lain yang segera dirasakan adalah tidak diberikannya kesempatan pada peningkatan kompetensi nasional di bidang teknologi, dan bahkan secara tidak sadar akan dapat mendegradasi tujuan

pendidikan teknik kita yang seharusnya mampu meningkatkan kompetensi bangsa di bidang teknologi.

Bandung, 29 Oktober 2022

Prihadi Setyo Darmanto

(Guru Besar dalam bidang ilmu Rekayasa Peralatan Konversi Energi)

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vii
SINOPSIS	ix
1. Pendahuluan	1
2. Metodologi dan Lingkup Peralatan Industri Proses	5
3. Modifikasi peralatan di industri baja	7
3.1. Perancangan, pembuatan dan penerapan <i>octangular mould</i> untuk mengatasi cacat sudut slab baja di PT Krakatau Steel ...	7
3.2. Pemanfaatan <i>coke oven gas</i> (COG) pada pabrik Hot Strip Mill PT Krakatau Steel	16
4. Modifikasi Peralatan dan Proses di Industri Pembangkit Listrik ...	23
4.1. Instalasi <i>anti abrasion beam</i> di dalam Boiler jenis CFB di PLTU Tarahan	23
4.2. Instalasi dual fuel pada boiler pabrik etanol berbahan baku ketela pohon	32
5. Modifikasi Peralatan dan Proses di Industri Semen	40
5.1. Pengembangan piranti lunak perhitungan detail aliran gas dan material di pabrik semen	41
5.2. Peningkatan efisiensi pemisahan material di <i>Top Cyclone</i> <i>preheater</i>	46
5.3. Perancangan, pembuatan dan implementasi <i>Cyclone Deduster</i> pada <i>Coal Mill System</i>	49

5.4. Modifikasi geometri Calciner dan implementasinya	50
5.5. <i>Rerouting</i> aliran material pada ILC dan SLC <i>double string</i> <i>pre-heater</i>	54
5.6. Peningkatan efisiensi Fan besar dan implementasinya pada Raw dan <i>Finish Mills</i>	64
5.7. Aplikasi metode penyeimbangan aliran gas dan partikel masuk <i>ID Fan</i> untuk menurunkan level vibrasi	70
6. Penutup	74
UCAPAN TERIMA KASIH	75
DAFTAR PUSTAKA	78
CURRICULUM VITAE	83

SINOPSIS

Masa transisi energi menuju zero emisi karbon pada tahun 2060 membuka peluang kepada kita untuk memutar otak agar dapat melewatinya dengan baik. Kriteria baik di sini yang dimaksud bahwa industri proses dapat berproduksi sesuai kapasitas desain namun secara bertahap dapat melakukan substitusi kebutuhan energinya dari yang semula dipasok oleh bahan bakar fosil menjadi bahan bakar baru dan terbarukan. Tidak mudah memang, karena pada umumnya peralatan industri proses dirancang sesuai pasokan bahan bakar saat itu. Perubahan bahan bakar pasti menuntut penyesuaian yang bijak baik dari sisi proses, peralatan utama dan kadang peralatan bantu juga. Penyesuaian ini pada umumnya memerlukan modifikasi proses, modifikasi peralatan dan bahkan peralatan pendukung baik minor maupun mayor. Dalam kondisi penyesuaian ekstrem bahkan kadang perlu penggantian sebagian peralatan utama. Kriteria tambahan dalam modifikasi proses dan peralatan ini juga datang dari pemilik pabrik antara lain biaya yang kompetitif, waktu *tie-in* yang sesingkat mungkin serta tidak banyak kehilangan produksi.

Tuntutan dan kendala di atas membutuhkan penelitian, percobaan, simulasi dan aplikasi di lapangan yang semuanya membutuhkan pembinaan sumber daya manusia yang mumpuni. Kemampuan akademik yang tinggi sering diperlukan untuk dapat melaksanakan kegiatan modifikasi proses dan peralatan di industri ini. Bagi akademisi

yang terlibat, yang saat ini dihimbau oleh kementerian untuk bermitra dengan industri, tentu kesempatan ini merupakan tantangan. Selain untuk menerapkan kemampuan akademik, mencari metode yang pas pada suatu kasus merupakan satu hal yang menarik dalam keterbatasan waktu yang diberikan oleh industri. Selain itu yang tidak kalah penting, peluang seperti ini akan menjadikan industri riil sebagai laboratorium nyata. Banyak pertimbangan yang harus diperhitungkan untuk menjadikan peralatan proses sebagai alat uji di laboratorium riil ini. Dalam dua dekade terakhir ini penulis memperoleh kesempatan emas ini untuk menjadikan beberapa pabrik besar dalam bidang industri baja, industri daya dan industri semen menjadi laboratorium riil dengan skala riil pula, sehingga belasan modifikasi proses, modifikasi peralatan utama dan peralatan bantu yang terkait dengan perubahan bahan bakar, peningkatan produksi dan efisiensi konversi energi telah dilakukan. Berikut ini beberapa contoh yang diringkas dalam orasi ilmiah kali ini, antara lain:

Di Industri Baja:

1. Perancangan, pembuatan dan penerapan *mould octangular* untuk mengatasi cacat sudut slab baja di PT Krakatau Steel.
2. Pemanfaatan coke oven gas (COG) pada pabrik Hot Strip Mill PT Krakatau Steel.

Di Industri Pembangkit Listrik:

1. Instalasi anti abrasion beam di dalam Boiler jenis CFB di PLTU Tarahan.

2. Instalasi dual fuel pada boiler pabrik etanol berbahan baku ketela pohon.

Di Industri Semen:

1. Pengembangan piranti lunak perhitungan detail aliran gas dan material di pabrik semen.
2. Peningkatan efisiensi pemisahan material di *Top Cyclone preheater*.
3. Perancangan, pembuatan dan implementasi *Cyclone Deduster* pada *Coal Mill System*.
4. Modifikasi geometri Calciner dan implementasinya.
5. *Rerouting* aliran material pada ILC dan SLC *double string pre-heater*.
6. Peningkatan efisiensi Fan besar dan implementasinya pada *Raw* dan *Finish Mills*.
7. Aplikasi metode penyeimbangan aliran gas dan partikel masuk *ID Fan* untuk menurunkan level vibrasi.

Secara umum modifikasi proses dan peralatan dilakukan untuk mengantisipasi perubahan bahan bakar, peningkatan kapasitas produksi atau perbaikan efisiensi. Dengan metodologi yang benar dan terukur, pada umumnya dapat menghasilkan capaian yang sangat menguntungkan baik dari sisi biaya studi, perancangan dan implementasi maupun dari sisi peningkatan kompetensi, keterlibatan dan kepercayaan diri karyawan, karena memanfaatkan sumber daya nasional serta waktu *tie-in* yang singkat dan dapat disesuaikan dengan waktu perawatan terjadwal.

Beberapa contoh kemampuan meningkatkan efisiensi dan

beradaptasi terhadap perubahan sumber energi maupun tuntutan produksi dengan cara memodifikasi proses dan peralatan sehingga diperoleh biaya investasi dan waktu *tie-in* yang *reasonable* di beberapa industri di Indonesia telah diberikan. Hasil yang diperoleh menunjukkan keuntungan tidak hanya finansial namun juga dalam hal peningkatan kemampuan SDM nasional, penghematan devisa dan motivasi bagi karyawan. Tentu hal yang demikian harus senantiasa didorong agar selalu meningkat, karena masalah di masa depan akan lebih kompleks sebagai akibat keterbatasan sumber daya energi, kelestarian lingkungan yang harus dijaga dan *sustainability* dari perusahaan sendiri dalam berusaha agar tetap bisa mencetak keuntungan.

MENDORONG KEMAMPUAN NASIONAL DALAM MEMODIFIKASI PROSES DAN PERALATAN INDUSTRI SEIRING KEBIJAKAN ENERGI DAN LINGKUNGAN HIDUP BERKELANJUTAN

1. PENDAHULUAN

Dalam laporan di Geneva pada bulan Agustus 2021, *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* mengutip kembali kesimpulan hasil penelitian para ilmuwan bahwa “belum pernah terjadi sebelumnya dalam ribuan, jika tidak ratusan ribu tahun, beberapa perubahan yang telah terjadi -seperti kenaikan permukaan laut yang berkelanjutan- dan kondisi ini tidak dapat diubah selama ratusan hingga ribuan tahun”[1]. Hal ini mengisyaratkan bahwa pemanasan global terus berlanjut dan semakin tinggi percepatan kenaikan temperatur global yang terjadi. Jika pada rentang tahun 1850-1900 terjadi kenaikan temperatur global sekitar 1,1°C, pada 20 tahun ke depan, jika tidak ada usaha yang signifikan untuk mengurangi emisi gas CO₂, kenaikan tersebut diramalkan akan mencapai mencapai sekitar 1,5°C atau lebih. Ini berarti terjadi percepatan kenaikan yang terasa dengan tanda-tanda antara lain pemanasan di daratan lebih besar dari rata-rata global, dan lebih dari dua kali dibanding dengan kenaikan di Kutub Utara. Oleh karena itu diperlukan tindakan nyata untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Salah satu usaha telah ditetapkan dalam *Paris Agreement* yang membatasi kenaikan temperatur

global 2,7°C hingga 2100 dan mulai diberlakukan tahun 2020 [2]. Konsesi ini dipakai sebagai acuan, namun masih ada ambisi-ambisi yang lebih ketat seperti:

- a. *International Energy Agency's (IEA) 2C scenario (2DS)*, yang konsisten ingin membatasi kenaikan temperatur global rerata sebesar 2°C sampai 2100. Asumsi dan harapan ini mengakibatkan perlunya penurunan emisi CO₂ di sektor semen saja misalnya sekitar 24% hingga 2050 atau harus diikuti tambahan penurunan 7,7 Gt CO₂ secara global dibanding usulan *Paris Agreement*.
- b. Bila asumsi tersebut diubah dengan menurunkan batasan kenaikan Temperatur global yang diharapkan menjadi 1,75°C, maka skenarionya berubah menjadi *IEA's Beyond 2C Scenario, (B2DS)*. Konsekuensinya penurunan emisi CO₂ harus ditambah lagi sebesar 3,4 Gt.
- c. Asumsi dan keinginan/harapan yang paling ketat adalah membatasi kenaikan temperatur global sebesar 1,5°C hingga tahun 2100. Hal ini akan memiliki konsekuensi reduksi emisi CO₂ yang lebih banyak lagi per tahunnya.

Indonesia termasuk salah satu negara yang ikut menandatangani *Paris Agreement* tersebut. Konsekuensinya Indonesia harus mengusahakan penurunan emisi gas rumah kaca ini dalam beberapa dekade ke depan di berbagai sektor, salah satunya sektor industri proses (pertambangan, petro kimia, minyak dan gas, semen dan lain-lain) dan

pembangkit listrik. Industri-industri tersebut tentunya memiliki peralatan proses yang banyak jenisnya dengan jumlah aset yang besar. Yang tidak kalah penting, industri tersebut menjadi salah satu sasaran dalam usaha memenuhi *Paris Agreement*. Himbauan dari pemerintah Indonesia telah dilontarkan sejak beberapa tahun lalu, dan yang terbaru antara lain siaran pers dari kementerian perindustrian yang menghimbau pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT) sehingga terjadi peningkatan bauran energi EBT dari yang saat ini sekitar 11% menjadi 23% di tahun 2025. Sebenarnya sejak beberapa tahun lalu, industri proses telah memulai penerapan himbauan ini. Sebagai contoh di industri semen, beberapa kegiatan telah dimulai antara lain peningkatan efisiensi proses, penggunaan bahan baku dan bahan bakar alternatif, penurunan faktor klinker dan diversifikasi produk semen. Sedangkan di industri daya pemanfaatan energi alternatif berbasis non fosil juga telah dimulai meski persentasenya masih sangat kecil. Untuk meningkatkan secara kuantitatif penggunaan energi non fosil pada sektor industri, khususnya industri padat energi, selain perlu studi dan pengembangan, bisa jadi perlu modifikasi beberapa peralatan proses terkait. Modifikasi proses dan peralatan di industri pada umumnya juga dilakukan untuk penyesuaian terhadap perubahan bahan baku, perubahan bahan bakar, peningkatan kapasitas produksi, peningkatan efisiensi konversi energi, peningkatan kualitas produk, substitusi parsial bahan bakar yang lebih murah dan lain-lain. Pada industri daya yang dibangun beberapa dekade yang lalu, pada umumnya dirancang untuk bahan bakar batu bara jenis nilai kalor

medium. Dengan semakin langkanya jenis batu bara tersebut serta meningkatnya harga, kebijakan penggunaan batu bara dengan nilai kalor rendah ditetapkan sehingga diperlukan penyesuaian peralatan termasuk *boiler* karena tentu akan terjadi perubahan karakteristik pembakaran dan transfer panas di ruang bakar dan *wall tubes*. Meningkatnya permintaan pada suatu komoditi tertentu seperti nikel, emas, semen dan lain-lain akan menuntut peningkatan kapasitas produksi peralatan pabriknya. Peningkatan kapasitas pabrik hingga 20% dengan hanya memodifikasi sebagian peralatan tanpa investasi tinggi dan waktu *tie-in* yang singkat barangkali menjadi satu hal yang sangat menarik, mengingat pembangunan pabrik baru tentu selain memerlukan investasi tinggi juga waktu pembangunan yang panjang. Modifikasi proses dan peralatan pabrik untuk tujuan tertentu membutuhkan penelitian, percobaan, simulasi dan aplikasi di lapangan yang semuanya membutuhkan pembinaan sumber daya manusia yang mumpuni. Kemampuan akademik yang tinggi sering diperlukan untuk dapat melaksanakan kegiatan modifikasi proses dan peralatan di industri ini. Bagi akademisi yang terlibat, yang saat ini dihimbau oleh kementerian untuk bermitra dengan industri, tentu kesempatan ini merupakan tantangan. Selain untuk menerapkan kemampuan akademik, mencari metode yang pas pada suatu kasus merupakan satu hal yang menarik dalam keterbatasan waktu yang diberikan oleh industri. Selain itu yang tidak kalah penting, peluang seperti ini akan menjadikan industri riil sebagai laboratorium nyata. Banyak pertimbangan yang harus diperhitungkan untuk

menjadikan peralatan proses sebagai alat uji di laboratorium riil ini. Hal-hal inilah yang menjadi inti dari orasi ini dan diharapkan menjadi motivator bagi para peneliti dan praktisi di industri proses dalam rangka mengisi masa transisi usaha penurunan emisi gas rumah kaca beberapa dekade ke depan untuk mengantisipasi perubahan kebijakan energi dan lingkungan hidup.

2. METODOLOGI DAN LINGKUP PERALATAN INDUSTRI PROSES

Tidak seperti merancang dan membuat peralatan baru dalam industri proses, dalam memodifikasi proses dan peralatan industri untuk tujuan tertentu kadang membutuhkan tambahan pertimbangan dalam mewujudkannya. Beberapa pertimbangan yang sering diperhitungkan antara lain:

1. Dari efisiensi proses dan konsumsi energi pada umumnya diminta sekurang-kurangnya tidak berubah atau bahkan diminta lebih tinggi, khususnya bila tujuannya adalah peningkatan efisiensi proses dan konsumsi energi.
2. Dalam aplikasi dibutuhkan waktu *tie-in* yang tidak terlalu lama dan kalau memungkinkan disisipkan pada saat waktu *shutdown* untuk perawatan terencana akan lebih baik karena harapannya tidak akan mengganggu target produksi. Pelaksanaan juga harus diperhitungkan dengan cermat agar keamanan selama *tie-in* dan *commisioning*

terjaga.

3. Sedikit mungkin dampaknya terhadap perubahan kinerja peralatan lainnya yang terkait dalam sistem yang akan dimodifikasi.
4. Biaya investasi yang serendah mungkin namun masih masuk akal (kompetitif) sehingga diharapkan akan segera kembali dalam waktu yang *reasonable*.

Untuk dapat memenuhi beberapa persyaratan tersebut, langkah-langkah dalam modifikasi proses dan peralatan dalam suatu industri secara garis besar dapat dibagi menjadi beberapa tahap antara lain[3]:

1. Tahap persiapan dan analisis proses yang ada. Pada umumnya tahap ini beberapa hal seperti mempelajari *flow sheet* proses dan mempersiapkan neraca massa dan energi proses perlu dilakukan secara saksama. Mempelajari peralatan dan mekanisme operasionalnya juga harus dilakukan sehingga kaitan antara proses yang terjadi serta pengaturan yang diperlukan dapat dikuasai dengan baik. Pada tahap penyiapan neraca massa dan energi kadang tidak mudah karena prosesnya yang cukup rumit dan perlu menurunkan persamaan-persamaan yang terkait. Beberapa asumsi kadang perlu dilakukan, namun hal ini berarti bahwa akan mengurangi tingkat keakuratan perhitungan yang dilakukan. Penyebabnya dapat berasal dari pengukuran yang tak mungkin dapat dilakukan karena keterbatasan kondisi operasi (temperatur tinggi, tidak mungkin memasang alat ukur, tidak tersedianya alat ukur yang memadai dan

lain-lain) atau tidak diijinkannya mengubah peralatan untuk dapat memasang alat ukur karena dapat mengganggu operasi dan produksi.

2. Tahap assesmen teknik modifikasi dan dampak-dampak yang mungkin akan terjadi meliputi *technical feasibility assesment*, *economic viability analysis*, evaluasi dampak lingkungan dan analisis beberapa alternatif solusi yang dapat dilakukan serta perhitungan-perhitungan teknik terkait serta metode simulasi yang dapat dilakukan untuk lebih meyakinkan hasil perhitungan yang diperoleh.
3. Tahap berikutnya adalah tahap perhitungan dan persiapan implementasi termasuk di dalamnya perancangan peralatan yang dimodifikasi dan metode serta waktu *tie-in* yang paling tepat, implementasi modifikasi dan evaluasi hasil modifikasi serta *commisioning*.

Berikut ini beberapa contoh modifikasi proses dan atau peralatan pabrik yang pernah kami lakukan diantaranya di industri baja, industri pembangkit daya, dan industri semen.

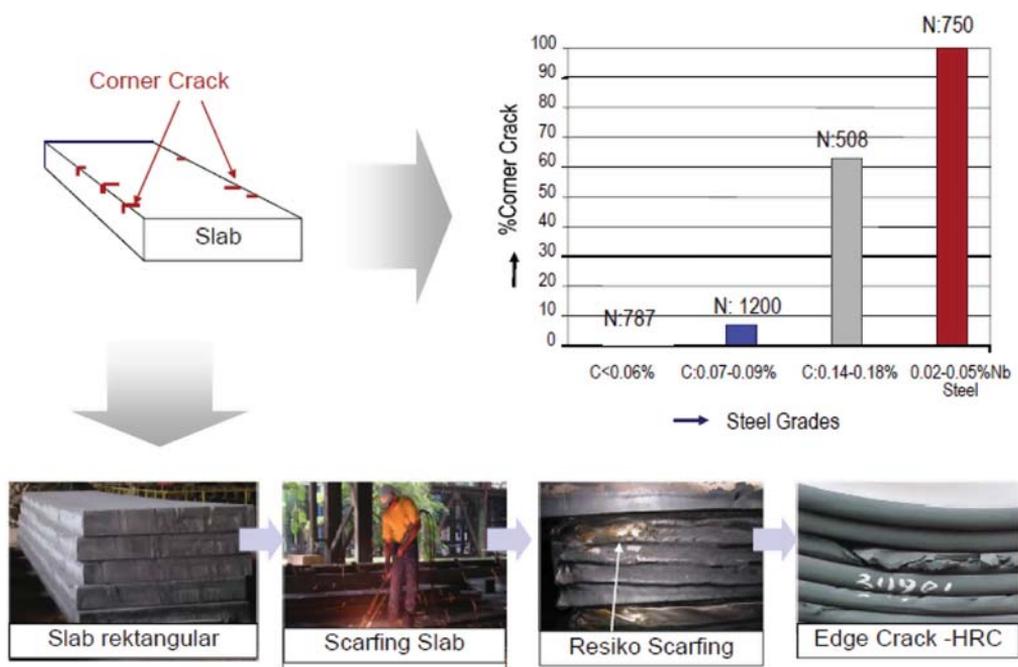
3. MODIFIKASI PERALATAN DI INDUSTRI BAJA.

- a. **Perancangan, pembuatan dan penerapan *octangular mould* untuk mengatasi cacat sudut slab baja di PT Krakatau Steel.**

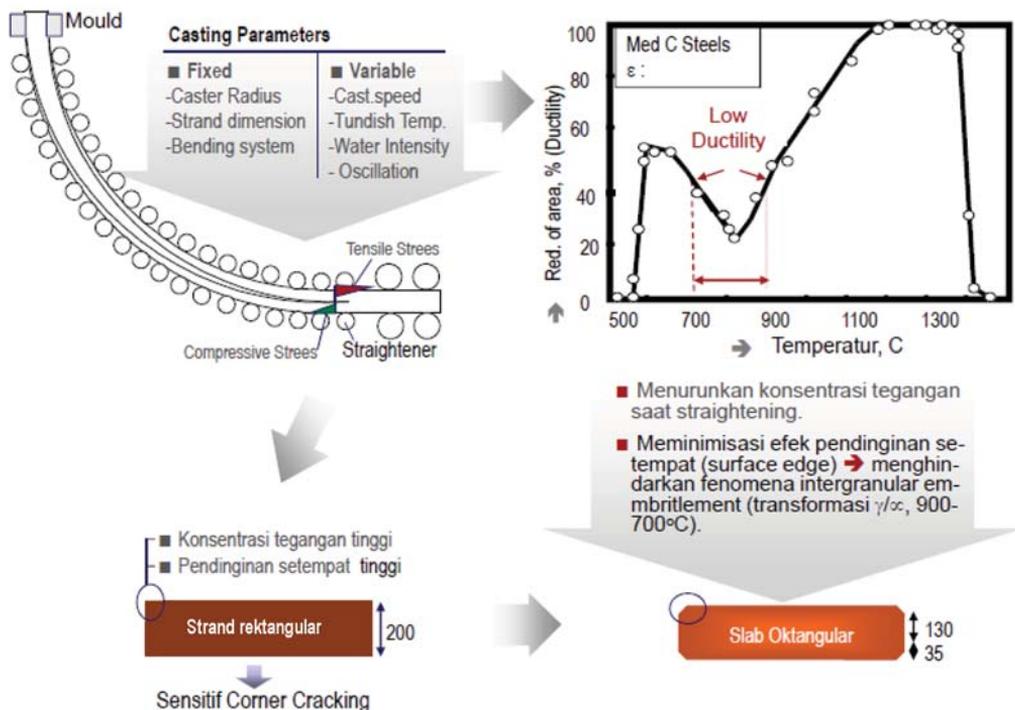
Latar Belakang.

Berdasarkan data produksi PT Krakatau Steel (PTKS), sekitar 0.85 %

dari *slab* baja karbon medium yang diproduksi pertahun dengan geometri cetakan (*mould*) rektangular sebanyak lebih dari 870.000 ton telah mengalami cacat *corner crack*. Cacat tersebut ditanggulangi dengan proses *scarfing*. Kelemahan penanganan proses ini antara lain: menurunkan *yield*, memperpanjang waktu *conditioning*, dan beresiko akan timbulnya cacat-cacat baru yang secara keseluruhan akan mengakibatkan kenaikan biaya produksi. Berkaitan dengan hal itu, alternatif penanganan atau metode pencegahan cacat *corner crack* yang lebih baik merupakan suatu kebutuhan [4,5]. Prosentase produk dan konsekuensi dari cacat sudut ini dapat digambarkan seperti nampak pada Gambar 1 [5].



Gambar 1: Konsekuensi kegiatan produksi akibat adanya cacat sudut pada slab baja[5]



Gambar 2: Perbaikan kualitas dan keunggulan yang diharapkan pada slab oktangular[5]

Dari beberapa kajian, teridentifikasi penyebab cacat *corner crack* adalah karena adanya fenomena penggetasan antar butir yang diinisiasi oleh adanya tegangan yang bekerja bersamaan dengan terjadinya proses transformasi gamma-alpha (temperatur A_3) pada proses pendinginan *hot strand*. Fenomena ini dipengaruhi oleh intensitas tegangan yang ditimbulkan oleh proses *straightening* dan distribusi temperatur *hot strand*. Kedua faktor tersebut berkaitan dengan disain *caster*, terutama bentuk *mould*, radius dan sistem *rebending caster*.

Perubahan disain bentuk *mould* dari rektangular menjadi oktangular

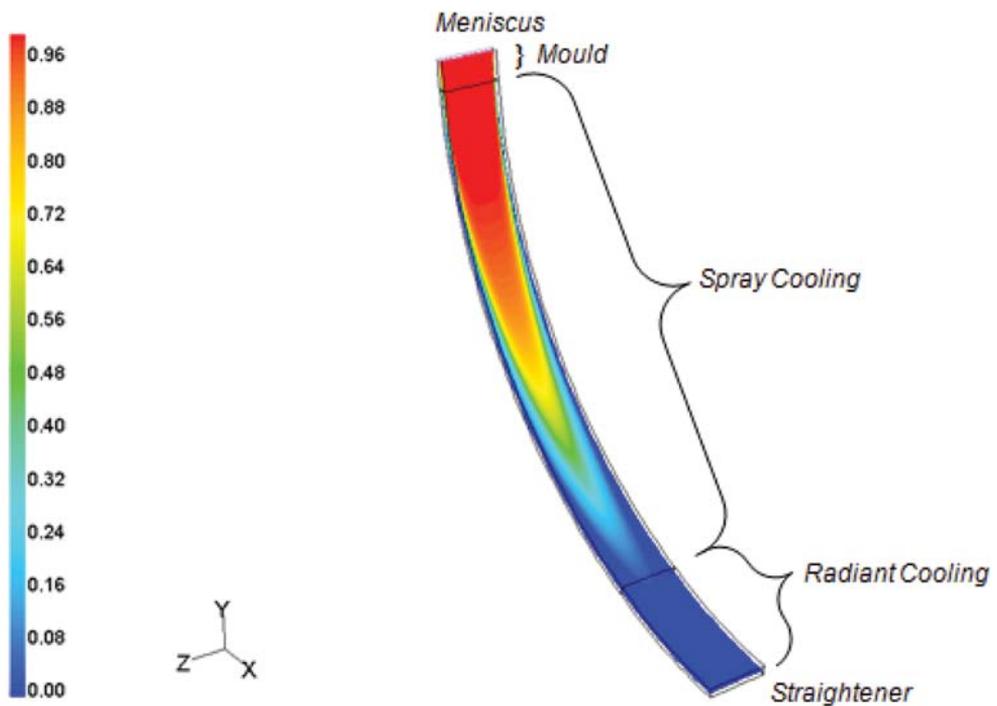
diharapkan mampu mengurangi terjadinya cacat *corner crack*. Perbaikan kinerja diharapkan diperoleh dari adanya perbaikan distribusi temperatur slab selama proses solidifikasi seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Berkaitan dengan hal tersebut maka diperlukan pengkajian distribusi temperatur *slab* untuk *mould* berbentuk rektangular dan oktangular.

Simulasi pengecoran kontinyu slab.

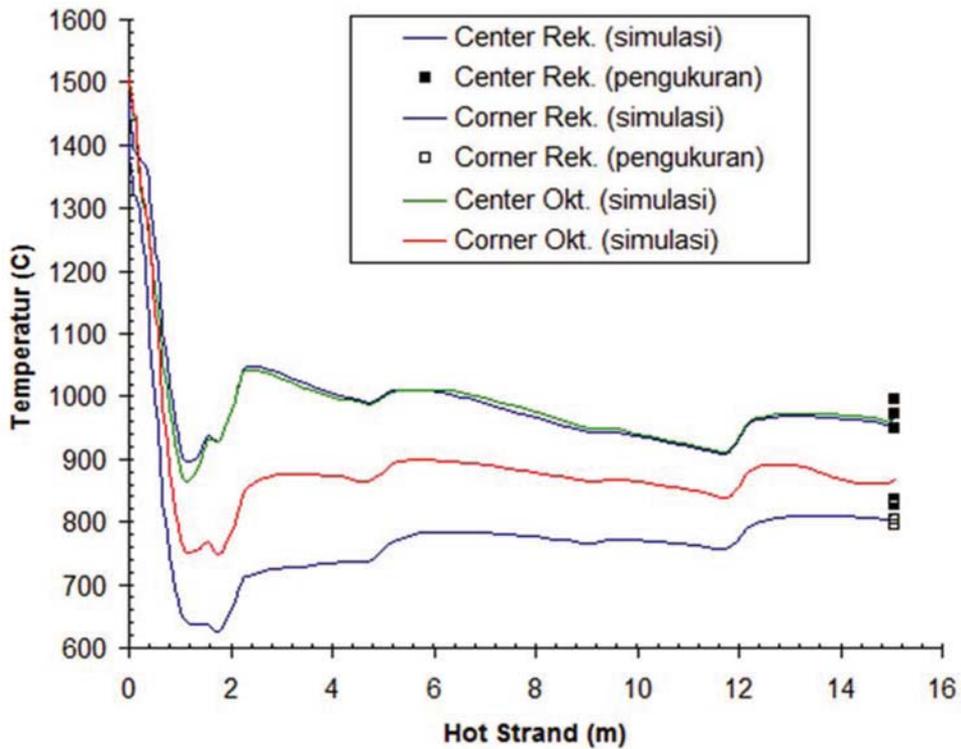
Simulasi dilakukan dengan metode numerik, *computational fluid dynamics* (CFD), dengan beberapa asumsi parameter kinerja yang mendekati proses yang terjadi di pabrik. Persamaan matematik untuk pemodelan proses terdiri dari persamaan kekekalan massa, momentum dan energi dalam bentuk persamaan diferensial. Beberapa persamaan empirik tambahan diberikan untuk melengkapi pemodelan. Proses pengecoran kontinyu pada beberapa ukuran penampang *slab* disimulasikan. Salah satunya adalah 1580 mm x 200 mm untuk baja medium dengan kecepatan pengecoran sekitar 0,9 m/s hingga 1 m/s. Semua data simulasi, sifat bahan dan laju air pendingin baik pada cetakan maupun *hot strand* diberikan secara lengkap pada laporan penelitian [4]. Salah satu hasil simulasi fraksi cair pada *slab* geometri rektangular sebagai validasi proses simulasi ditunjukkan pada Gambar 3. Sedangkan perbandingan temperatur pada ujung *slab* antara hasil simulasi dan pengukuran pada *mould* rektangular diberikan pada Gambar 4.

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, perbedaan temperatur antara

hasil geometri rektangular dengan oktangular tidak terlalu jauh sehingga menambah kepercayaan diri untuk berani memodifikasi cetakan rektangular menjadi oktangular dengan perubahan laju air pendingin di dalam cetakan. Berikut ini akan dijelaskan garis besar modifikasi cetakan tersebut.



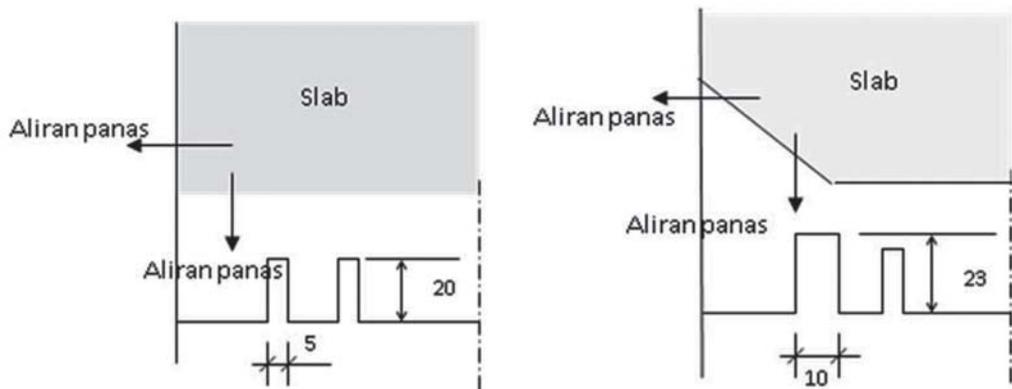
Gambar 3: Kontur fraksi cair slab rektangular pada pengecoran kontinyu [4]



Gambar 4: Perbandingan Profil Temperatur Rektangulr-Oktangulr, Loose Side[4]

Perancangan cetakan oktangular.

Inti dari perancangan cetakan (*mould*) adalah kemampuan pendinginan cetakan tersebut oleh air sedemikian rupa sehingga saat *strand* keluar dari cetakan sudah dalam keadaan padat pada permukaan yang melewati cetakan agar tidak pecah. Oleh sebab itu penarikan panas, khususnya pada daerah sudut cukup besar sehingga berada di bawah temperatur bekunya namun tidak terlalu tinggi agar tidak terjadi (*crack*). Arah aliran panas pada kedua jenis cetakan ini secara ilustrasi diberikan pada Gambar 5.



Gambar 5: Arah perpindahan panas di sekitar sudut cetakan rektangular dan oktangular[4]

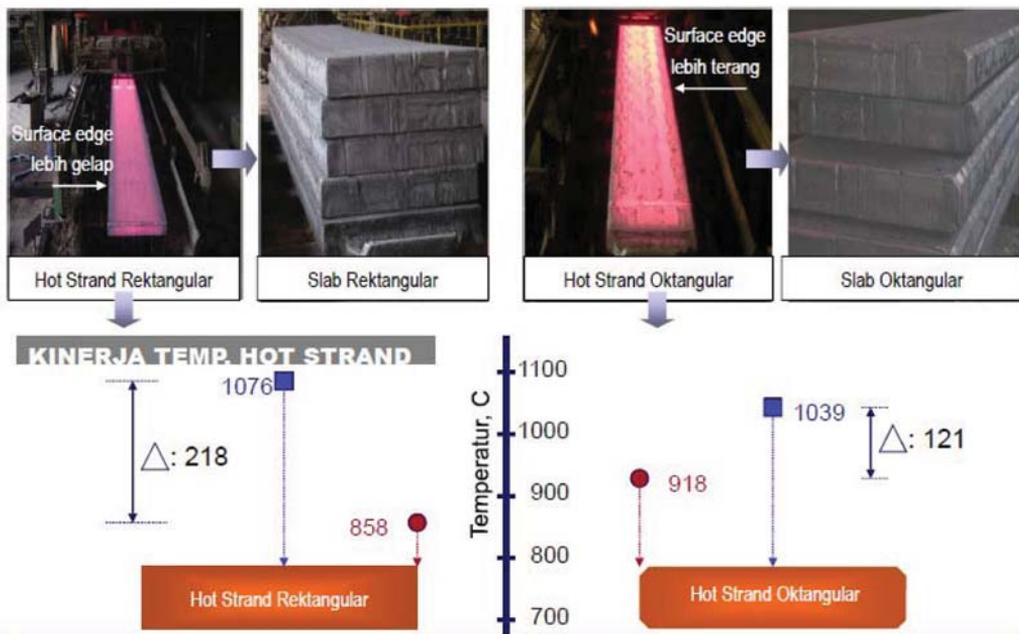
Dari kedua macam cetakan tersebut terdapat tiga hal penting pada mekanisme transfer panas dari *slab* menuju ke air pendingin yaitu:

1. Arah aliran panas sebenarnya menjadi tidak tegak lurus lagi terhadap sebagian besar sisi *mould*. Artinya ada sebagian panas justru mengalir dalam arah tegak lurus sisi *mould* yang miring.
2. Jarak dari *slab* menuju sisi alur air pendingin bertambah, dengan jarak maksimal adalah dari titik tengah sisi *mould* yang miring ke arah sisi alur air pendingin. Apabila diasumsikan secara garis lurus jarak ini didekati dengan separoh dari sisi siku *mould* yang miring, maka jarak maksimal ke alur bertambah.
3. Luas sisi permukaan perpindahan panas menjadi lebih sempit pada daerah *mould* yang dimiringkan. Pada *mould* eksisting dianggap luas sisi permukaan perpindahan panas sebesar dua satuan luas (*loose/fixed side* dan *narrow side*), sedangkan pada *mould* modifikasi menjadi $\sqrt{2}$ satuan (miring ke arah *loose side* dan *narrow side*).

Berdasarkan hasil perhitungan laju perpindahan panas yang keluar dari *strand* ke air pendingin diperoleh nilai yang lebih tinggi pada sudut oktagular dibanding rektangular karena luas permukaan yang lebih kecil[4]. Oleh karena itu dirancang dengan luas penampang pendinginan untuk saluran air yang lebih luas.

Aplikasi di lapangan dan diskusi hasil.

Setelah cetakan oktagular dibuat, *tie-in* di pabrik pengecoran kontinyu slab ini dilakukan dan proses pengecoran dengan cetakan oktagular dilaksanakan. Hasil visualisasi produk slab oktagular juga dibandingkan dengan slab rektangular seperti pada Gambar 6.



Gambar 6: Perbandingan parameter pengecoran antara cetakan rektangular dan oktagular[5]

Dari hasil percobaan tersebut beberapa kesimpulan dapat ditarik antara lain:

1. Perbaikan kualitas *slab* oktangular dibanding rektangular benar-benar terjadi yang antara lain ditandai dengan berkurangnya *corner crack* secara signifikan, temperatur *straightening edge* yang lebih tinggi sehingga lebih ulet, dan pengurangan konsentrasi tegangan pada sisi tersebut.
2. Warna *surface edge* yang lebih gelap pada slab rektangular dibanding oktangular yang menandakan lebih tingginya temperatur *slab* pada daerah tersebut pada *slab* oktangular.
3. Berpeluang secara signifikan untuk mengatasi masalah *corner crack* pada *slab* baja karbon medium dan *micro alloy*.
4. Memperbesar peluang pada *hot charging* proses lanjutannya sehingga akan sangat menghemat energi.

Perlu dicatat di sini bahwa berdasarkan informasi dari Bapak Ir Koesnohadi, inisiator dan penanggung jawab proyek *slab* oktangular ini pada saat itu, akhirnya *slab* oktangular ini tidak diproduksi secara kontinyu di PT Krakatau Steel. Beberapa tahun kemudian setelah selesainya penelitian dan eksperimen ini, *slab* oktagular justru diimplementasikan di pabrik baja Zab Zib di Rusia dan PT Krakatau Steel mengimpor dari sana dalam orde ratusan ribu ton.

3.2. Pemanfaatan *coke oven gas* (COG) pada pabrik *Hot Strip Mill* PT Krakatau Steel

Latar Belakang

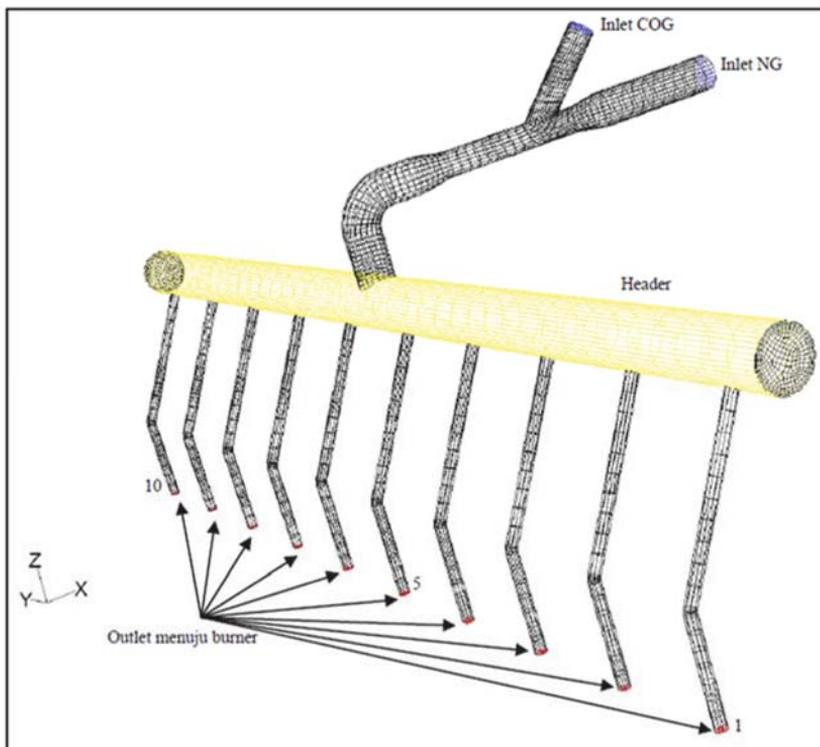
PT Krakatau Steel memiliki *coke oven gas* (COG) yang cukup besar dari hasil samping proses di *blast furnace*. COG akan dimanfaatkan semaksimal mungkin pada pembakaran di dalam tungku *hot strip mill* (HSM) agar dapat meminimalkan penggunaan *natural gas* (NG) sebagai bahan bakar tunggal selama ini. Namun mengingat perbedaan karakteristik seperti nilai kalor (NG=9400 kkal/Nm³ sedangkan COG=4100 kkal/Nm³), densitas dan tekanan awal antara NG dan COG, maka perlu dicampur secara baik dahulu sebelum diumpankan ke *burner* dari tungku pemanasan bahan baku baja profil tersebut. Pencampuran COG dan NG dirancang di dalam saluran hingga percabangan menuju *burner*. Dalam tungku ini terdapat banyak *burner* yang dikelompokkan dalam 9 grup *burner*. Pencampuran NG dan COG diinginkan di empat kelompok *burner* yang konsumsi bahan bakarnya terbesar. Pencampuran harus terjadi secara sempurna untuk menjamin pembakaran campuran gas di masing-masing *burner* terjadi dengan komposisi yang sama. Dengan rencana tersebut diperlukan modifikasi instalasi dari empat kelompok saluran bahan bakar tersebut.

Modifikasi saluran dan simulasi pencampuran dan pembakaran dalam tungku.

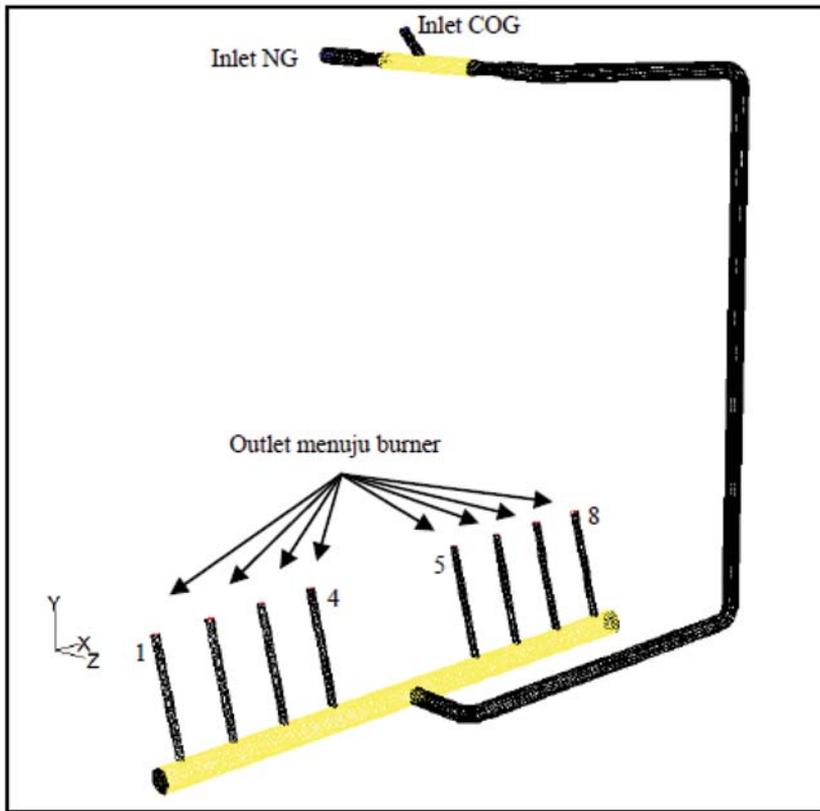
Keempat kelompok yang dimodifikasi salurannya menjadi saluran pencampur NG dan COG dapat ditunjukkan berturut turut pada Gambar 7 hingga 10. Komposisi gas yang akan dicampur diberikan dalam Tabel 1 [6].

Tabel 1: Komposisi rerata NG dan COG yang akan dicampur

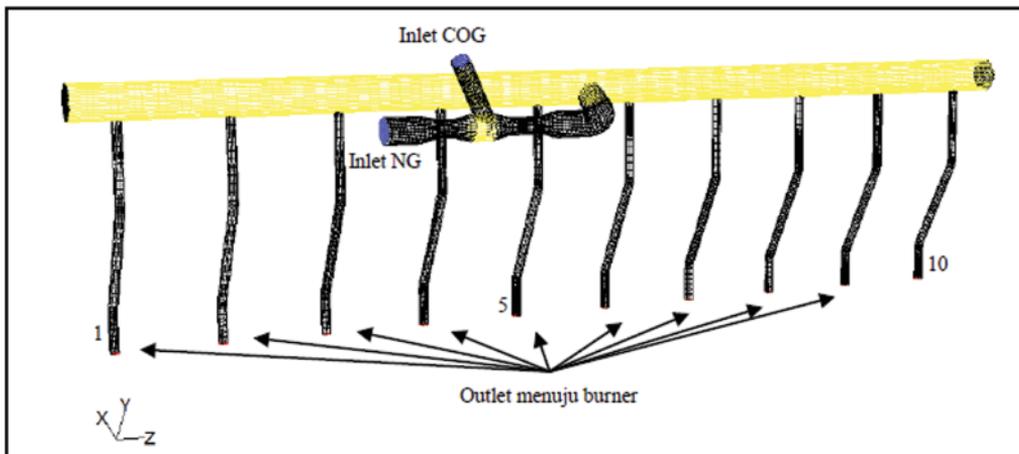
Komposisi molar (%)		
Unsur	NG	COG
CH ₄	48,96	25,25
C ₂ H ₆	2,97	1,8
C ₃ H ₈	1,28	
C ₄ H ₁₀ +	0,32	
H ₂	36,1	66,05
CO	5,8	2,3
CO ₂	4,03	1,72
N ₂	5,06	3,66
O ₂	0	0
Pengotor	0	0,13



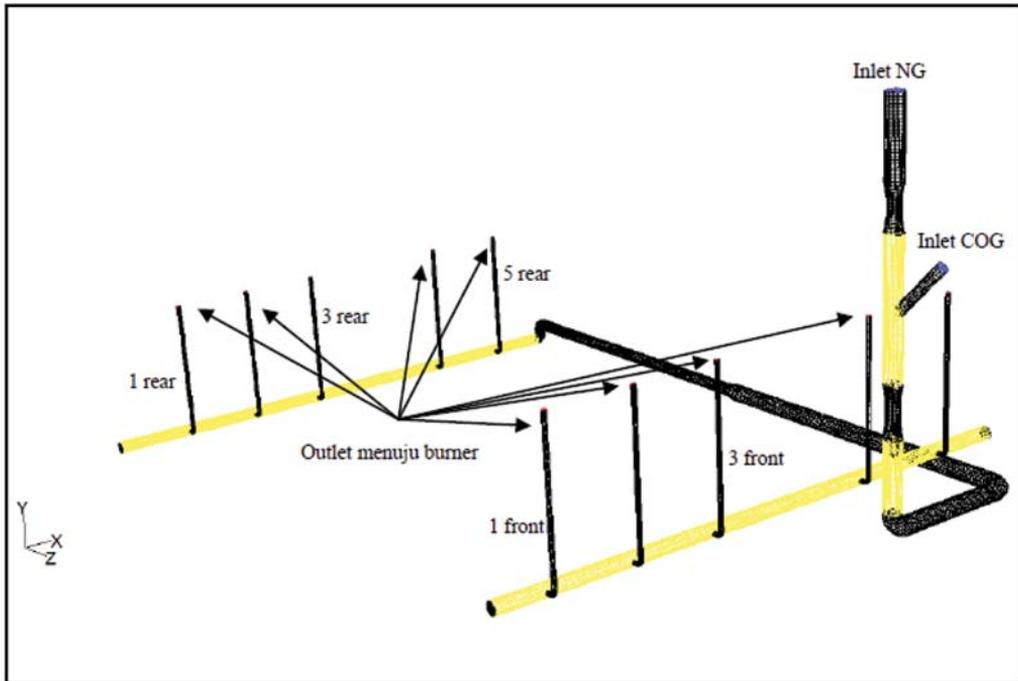
Gambar 7: Skematik saluran pencampuran NG dan COG kelompok *burner 1*



Gambar 8: Skematik saluran pencampuran NG dan COG kelompok *burner 2*



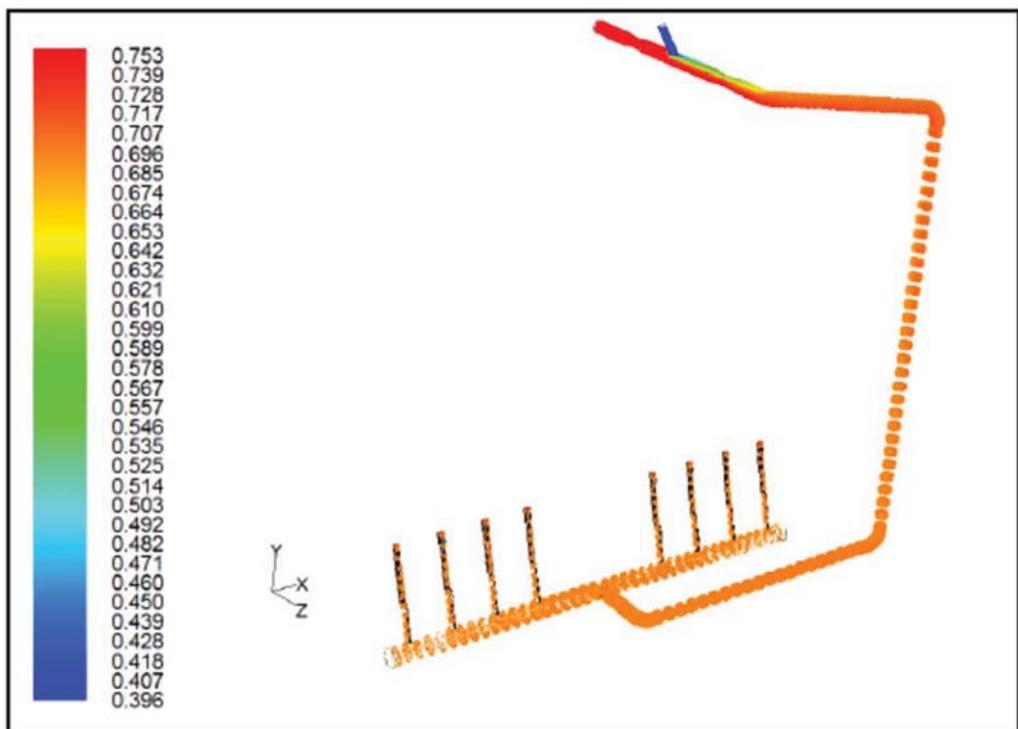
Gambar 9: Skematik saluran pencampuran NG dan COG kelompok *burner 3*



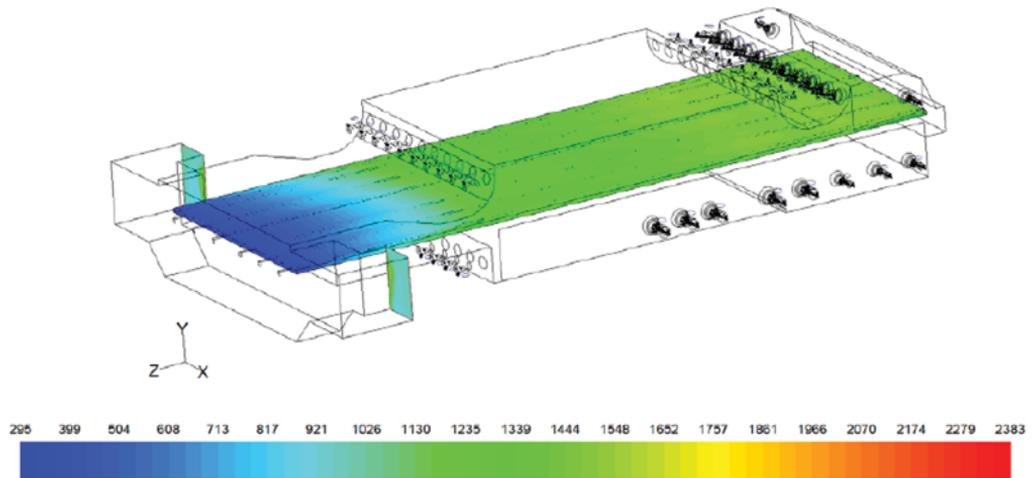
Gambar 10: Skematik saluran pencampuran NG dan COG kelompok *burner* 4

Karena keterbatasan ketersediaan COG maka laju alirannya pada umumnya akan lebih rendah dibanding NG sehingga diperlukan ukuran saluran yang lebih kecil. Pada saluran yang dimodifikasi akhirnya ditetapkan diameter saluran COG adalah 500 mm sedangkan untuk NG dipertahankan pada 700 mm. Posisi masukan saluran COG dirancang menyudut sebesar 45° untuk kemudahan aliran dan pemasangannya, dengan perkiraan jarak cukup jauh dari saluran utama menuju *burner*. Pada posisi yang ditetapkan ini diharapkan pencampuran akan terjadi secara baik sehingga saat masuk ke dalam *burner* NG dan COG sudah tercampur secara baik. Simulasi numerik dengan bantuan *software* CFD kemudian dilakukan pada perbandingan laju aliran NG dan COG yang

divariasikan sesuai dengan rancangan operasional tungku pada kondisi normal, beban tinggi dan beban rendah. Data perbandingan laju aliran yang disimulasikan diberikan secara lengkap dalam laporan penelitian[6]. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa sebelum masuk ke setiap *burner*, proses pencampuran NG dan COG sudah terjadi secara merata yang ditandai dengan konsentrasi Metana (CH_4) yang rata pada saluran sebelum menuju *burner*. Salah satu hasil simulasi pencampuran NG dan COG diberikan pada Gambar 11 sedangkan simulasi hasil pembakaran campuran bahan bakar ini di dalam tungku *hot strip mill* (HSM) diberikan pada Gambar 12.



Gambar 11: Distribusi konsentrasi CH_4 hasil simulasi pada saluran kelompok *burner* 4.



Gambar 12: Distribusi temperatur($^{\circ}\text{C}$) pada suatu penampang di dalam tungku (6)

Pada simulasi pembakaran campuran bahan bakar, perbandingan antara laju aliran NG dan COG diberikan pada Tabel 2, dimana diasumsikan tungku terisi *slab* penuh dan kondisi pemanasan pada laju pemanasan tinggi.

Tabel 2: Perbandingan laju massa NG dan COG dalam simulasi CFD

Laju aliran bahan bakar (Nm^3/jam)		
Kelompok <i>burner</i>	NG	COG
1	1600	1500
2	2036	1500
3	1171	1500
4	1798	1500
5	370	0
6	370	0
7	436	0
8	436	0
9	291	0

Aplikasi di lapangan dan diskusi hasil yang diperoleh.

Setelah persiapan peralatan yang akan disambungkan ke saluran pipa NG sudah siap, maka *tie-in* dilakukan dan dipersiapkan pula *standard operation procedure* (SOP) penyesuaian[7]. Kemudian setelah semua peralatan siap, dilakukan *commisioning* dan berhasil dengan baik. Pencampuran NG dan COG berlangsung dengan baik, khususnya pada kelompok *burner* 1 sampai dengan 4 dan *commisioning* dinyatakan selesai dengan baik. Bergantung pada ketersediaan pasokan COG operasi dengan bahan bakar campuran dapat dilakukan dengan baik dan penghematan energi pada pabrik HSM#1 mulai terjadi dan dirasakan manfaatnya. Kebutuhan bahan bakar NG menjadi berkurang karena sebagian dipasok oleh COG. Dari data pengamatan diperoleh bahwa pemakaian COG pada tahun 2021 tercatat selama tiga bulan pertama (Januari - Maret 2021) sebesar berturut-turut 2851665 m³, 1249565 m³ dan 1340669m³. Ini berarti pada saat pemakaian tersebut, konsumsi rerata COG sekitar 7665 m³/jam, atau ekuivalen dengan pengurangan NG sekitar 17,4% substitusi energi untuk pemanasan tungku. Sayangnya pasokan COG ini tidak konstan sepanjang tahun sehingga substitusi bahan bakar pemanasan tungku HSM dengan hasil samping dari *blast furnace* tidak terjadi secara kontinyu pula. Namun demikian modifikasi ini sekurang-kurangnya telah membuktikan pengurangan biaya energi dan kemampuan rekayasa bangsa. Akhirnya modifikasi yang mirip juga diterapkan di pabrik HSM#2 untuk memanfaatkan COG dari sumber lain, khususnya untuk keperluan *start-up* tungku juga telah berhasil dilakukan dengan baik[7].

4. MODIFIKASI PERALATAN DAN PROSES DI INDUSTRI PEMBANGKIT LISTRIK.

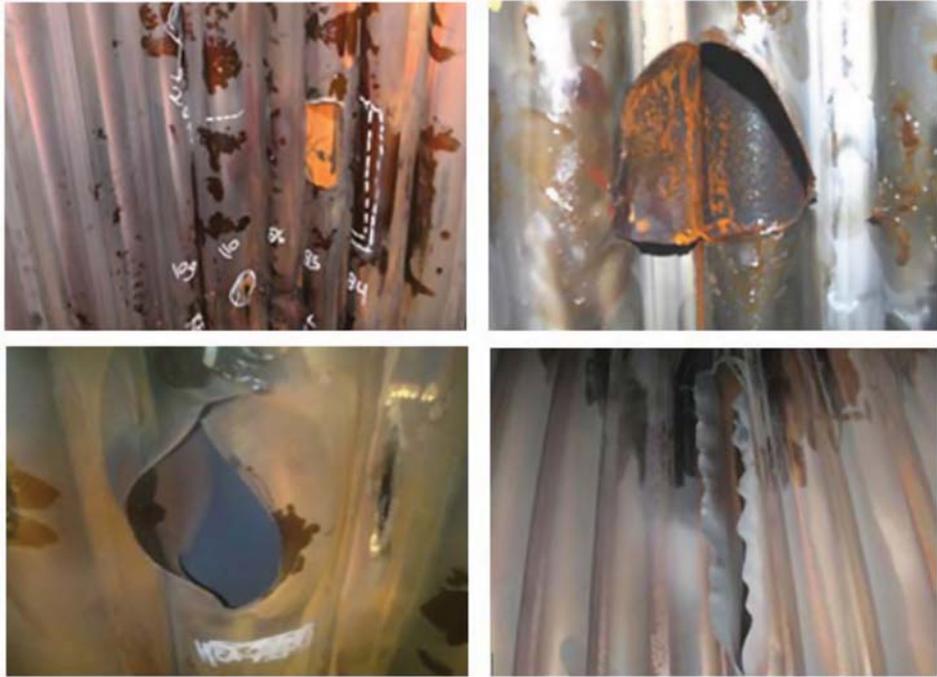
4.1. Instalasi *anti abrasion beam* di dalam Boiler jenis CFB di PLTU

Tarahan.

Latar belakang dan Pendahuluan.

Salah satu jenis *boiler* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTP) adalah sistem *fluidized bed*. Jenis *boiler* ini memanfaatkan pasir sebagai media pemanas pipa-pipa air. Apabila pasir ini disirkulasikan, maka *boiler* jenis ini disebut *circulated fluidized bed* (CFB). Jenis PLTU CFB ini banyak juga dimiliki oleh PT PLN Persero. Salah satunya di Tarahan, Lampung. Prinsip kerjanya hampir sama dengan *boiler stoker* mekanik, namun tidak menggunakan rantai, tetapi menggunakan tumpukan (*bed*) partikel pasir yang diletakkan di bagian bawah ruang bakar sebagai media untuk memanaskan udara dan ruang bakar secara keseluruhan. Udara dengan tekanan dan kecepatan tinggi dihembuskan dari dasar ruang bakar melalui nozel-nozel dan menembus tumpukan pasir akhirnya bertemu dengan batu bara yang ditebarkan di atas tumpukan pasir tersebut. Batubara terbakar dalam ruang bakar dan dapat melayang bersama pasir di dalam ruang bakar. Batubara yang telah terbakar namun belum habis dan sebagian pasir ikut bersama-sama dengan aliran gas hasil pembakaran untuk memanaskan air di dalam pipa-pipa yang memenuhi dinding ruang bakar dan harus dipisahkan agar dapat dibakar kembali. Proses pemisahannya menggunakan siklon untuk dikembalikan ke ruang

bakar agar terbakar secara sempurna. Untuk jenis yang seperti ini sering disebut sebagai unggun terfluidisasi tersirkulasi (*circulated fluidized bed* atau CFB). Kecepatan gas di dalam ruang bakar *boiler* tipe CFB lebih tinggi dibanding pada *boiler* jenis *bubbling fluidized bed*. Agar sebagian tumpukan pasir dan bahan bakar dapat terangkat serta mengalir bersama gas hasil pembakaran bahan bakar, maka diperlukan nilai kecepatan gas minimum. Sisa bahan bakar padat yang belum terbakar sempurna akan disirkulasikan melalui *cyclone separator*. Aliran pasir di dalam ruang bakar ini bervariasi baik kecepatan maupun arahnya sehingga berpeluang besar menabrak dan bergesekan dengan *wall tubes* yang berada di sekeliling ruang bakar, khususnya pada aliran balik. Sebagai akibatnya pipa-pipa tersebut tererosi dan akhirnya bocor sehingga operasi *boiler* harus dihentikan agar dapat dilakukan penggantian. Contoh beberapa pipa yang bocor akibat erosi pasir di PLTU CFB Tarahan unit 3 dan 4 diberikan pada Gambar 13[8]. Kejadian seperti ini bisa memiliki frekuensi yang cukup sering sehingga menurunkan efisiensi, kehandalan, dan jam operasi tahunan dari *boiler* yang berujung pada tidak tercapainya target daya pembangkitan tahunan. Dari sisi parameter operasi pembangkit, konsekuensi ini umumnya berakibat pada meningkatnya EFOR (*Equivalent Force Outage Rate*) dan SdOF (*Sudden Outage Frequency*) yang diikuti dengan menurunnya EAF (*Equivalent Availabillity Factor*) dan CF (*Capabillity Factor*).

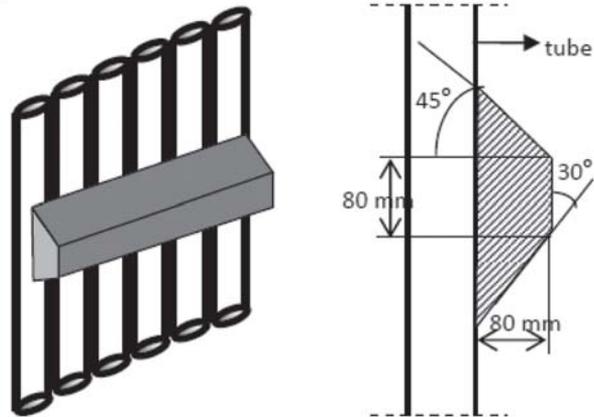


Gambar 13: Beberapa contoh pecahnya pipa-pipa *boiler* akibat erosi material *bed*[8].

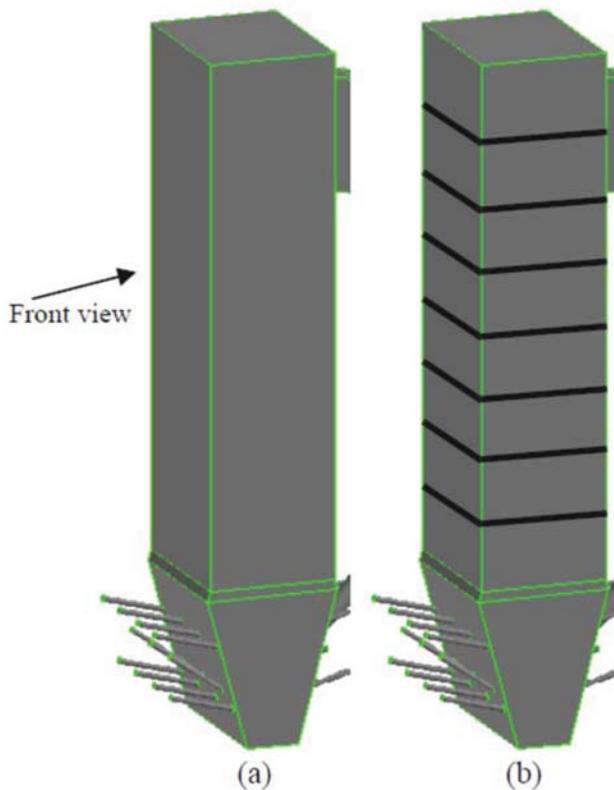
Untuk mengembalikan fungsi *boiler* dan meningkatkan keandalannya, akhirnya terpikir memasang *anti abrasion beam*, diterjemahkan sebagai “polisi tidur” pada dinding ruang bakar sehingga diharapkan dapat mengurangi efek abrasi pasir pada pipa-pipa. Sebelum diimplementasikan di lapangan, simulasi aliran pasir, perhitungan perpindahan panas dan pengaruh berkurangnya luas permukaan perpindahan panas terhadap prestasi *boiler* dilakukan.

Simulasi implementasi ‘polisi tidur’ dan dampaknya pada prestasi ruang bakar.

Gambaran *anti abrasive beam* atau ‘polisi tidur’ pada dinding ruang bakar *boiler* tipe CFB ini diberikan pada Gambar 14.



Gambar 14: Ilustrasi geometri *anti abrasion beam* pada dinding ruang bakar boiler[9,10].



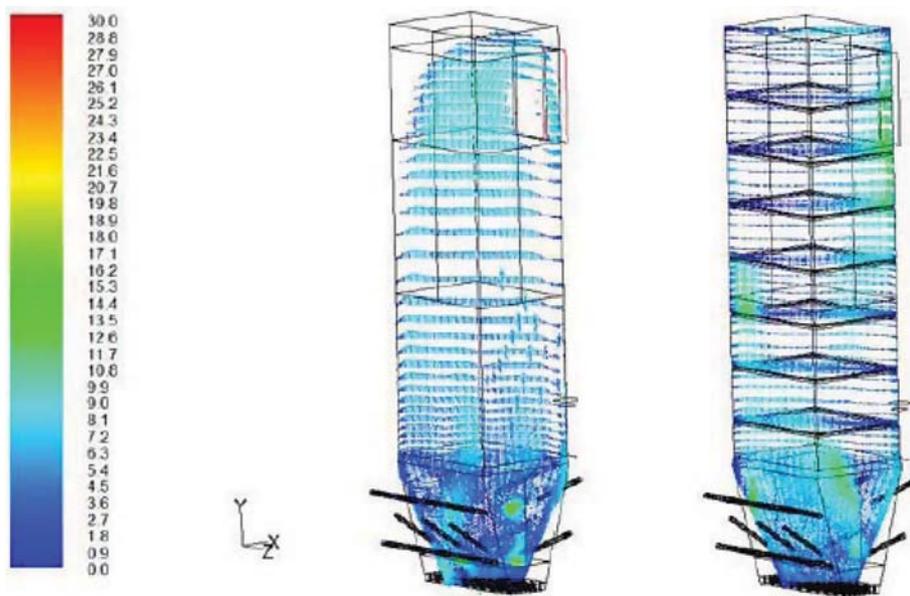
Gambar 15: Lokasi rencana pemasangan *anti abrasion beam* di dalam ruang bakar boiler Tarahan unit 3&4.

(a) Sebelum ada *anti abrasion beam*, (b) sesudah ada *anti abrasion beam*[9,10]

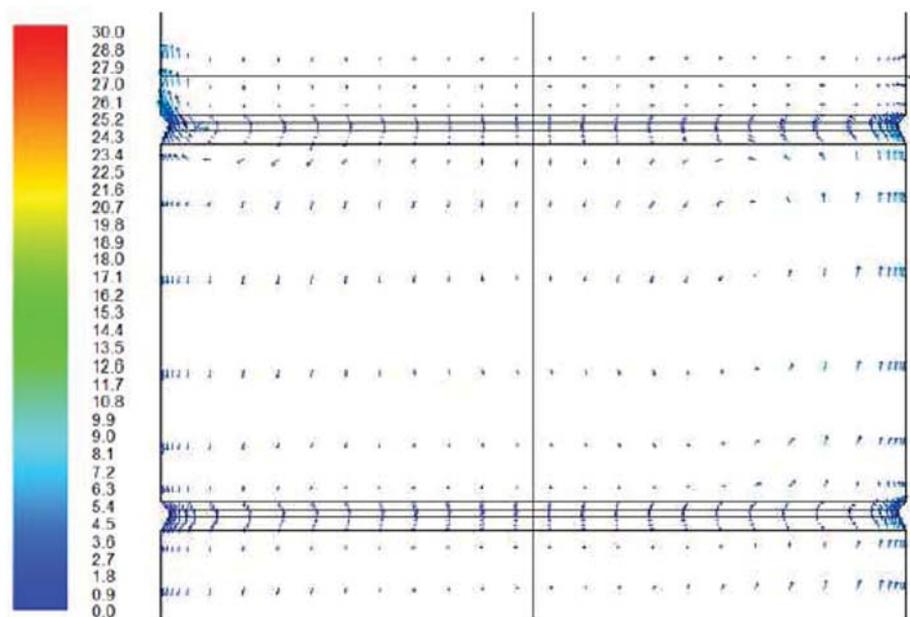
Jarak antar vertikal dari polisi tidur tersebut disimulasikan juga beberapa kali agar diperoleh jarak optimum dengan kriteria pengurangan frekuensi tumbukan pasir pada dinding tungku berkurang secara signifikan tanpa berkurangnya laju panas yang dapat diterima oleh permukaan pipa untuk memanaskan air. Setelah beberapa kali disimulasikan, ternyata yang paling optimum direncanakan dipasang tujuh baris pada ketinggian ruang bakar antara meter ke 16 hingga meter ke 40 dengan jarak antar 4 m seperti diperlihatkan pada Gambar 15[9,10]. Data simulasi dipilih pada kondisi beban penuh seperti diberikan dalam Tabel 3. Hasil simulasi misalnya distribusi vektor kecepatan aliran partikel di dalam ruang bakar diberikan pada Gambar 16. Sedangkan distribusi vektor kecepatan di sekitar dua polisi tidur paling atas dan bagian tengah ruang bakar diberikan berurutan pada Gambar 17 dan 18.

Tabel 3: Data simulasi pembakaran di *boiler* Tarahan Unit 3&4

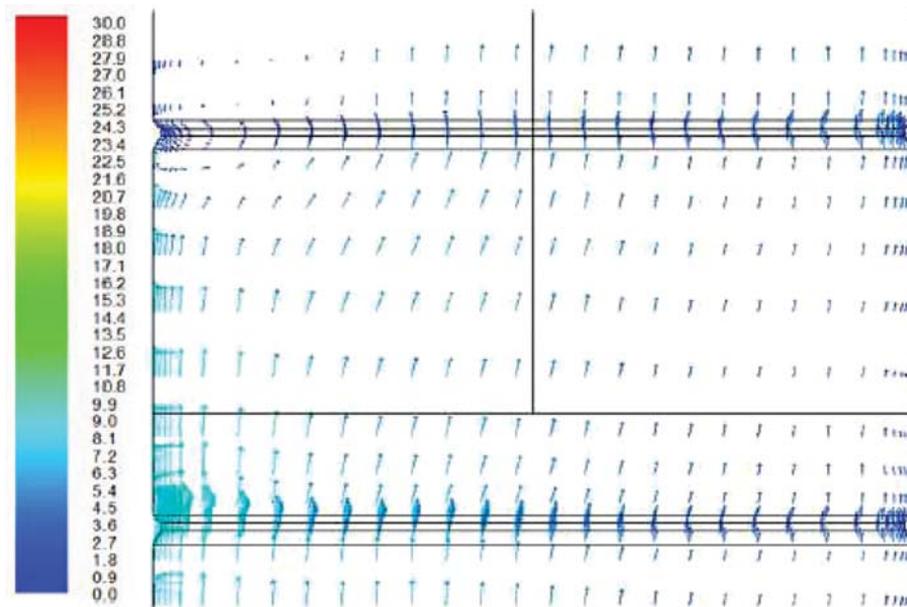
Parameter	Nilai	Satuan
Laju volume udara primer melalui nozel	209000	m ³ /jam
Laju volume udara primer melalui <i>coal feeder</i>	15000	m ³ /jam
Laju udara sekunder	148900	m ³ /jam
Laju udara melalui perapat	10000	m ³ /jam
Temperatur udara primer	225	°C
Temperatur udara sekunder	253	°C
Laju massa batu bara	49	ton/jam
Nilai kalor batu bara	5000	kcal/kg
Panas yang diserap di dalam <i>boiler</i>	116000	kW
Panas yang diserap <i>economizer</i>	42705	kW
Panas yang diserap oleh <i>super heater</i> (SH)	43500	kW



Gambar 16: Distribusi kecepatan aliran partikel di dalam ruang bakar (m/s), tanpa (kiri) dan dengan (kanan) *anti abrasion beam*



Gambar 17: Distribusi kecepatan aliran partikel di sekitar dua polisi tidur teratas ruang bakar(m/s),



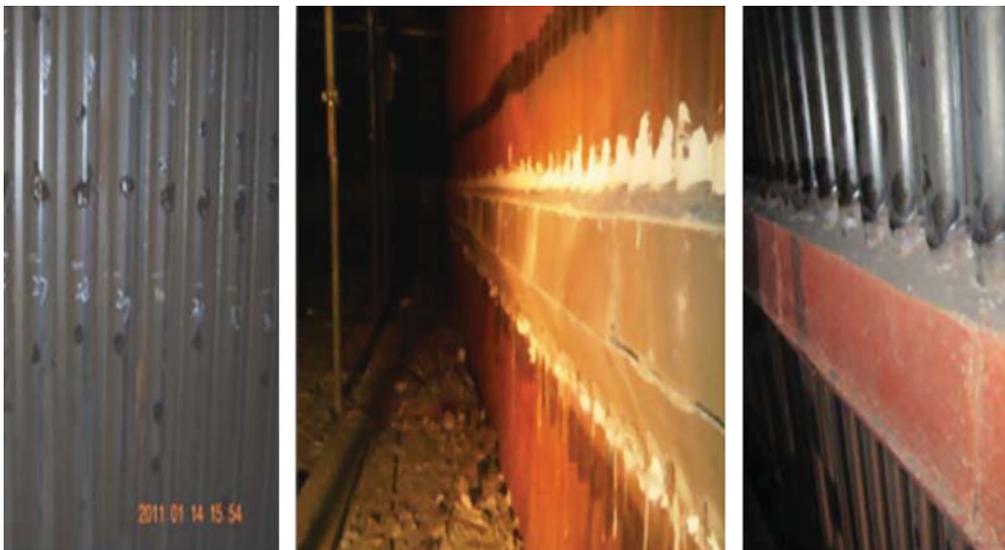
Gambar 18: Distribusi kecepatan aliran partikel di sekitar dua polisi tidur tengah ruang bakar(m/s),

Dari gambar-gambar hasil simulasi distribusi kecepatan aliran tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan adanya polisi tidur, besar dan arah kecepatan partikel di dekat pipa pada dinding ruang bakar berubah dibanding pada kondisi tanpa polisi tidur. Pada bagian atas ruang bakar kecepatan partikel di dekat dinding mengecil dan arahnya cenderung menjauhi polisi tidur yang diimbangi dengan meningkatnya kecepatan pada bagian tengah penampang ruang bakar. Sedangkan pada bagian tengah dan bawah ruang bakar, kecepatan partikel diantara dua polisi tidur cenderung lebih kecil dengan sebagian besar kecepatan sekitar 3 m/s dengan maksimum 10 m/s. Akibat tarikan dari aliran menuju siklon, kecepatan di bagian tengah penampang ruang bakar menjadi lebih tinggi.

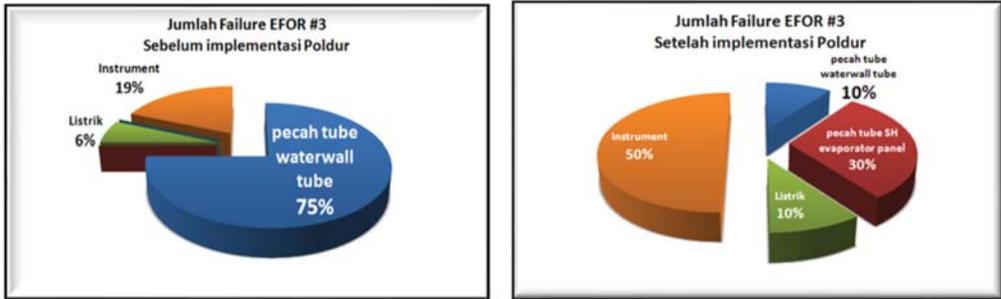
Demikian juga pada bagian atas. Namun karena di sebagian besar di dekat dinding ruang bakar kecepatan partikel turun dan bahkan ada yang berada pada kisaran 1-3 m/s, maka tentunya penurunan kecepatan partikel ini akan berakibat penurunan kecepatan aus dari pipa-pipa yang berada di dinding ruang bakar, sehingga implementasi polisi tidur ini dapat dipertimbangkan.

Implementasi anti abrasi beam (polisi tidur) di dalam ruang bakar dan hasil yang diperoleh.

Setelah mempelajari hasil simulasi yang dinilai positif dan disertai dengan perhitungan ekonomis yang memadai, implementasi polisi tidur ini akhirnya dilaksanakan pada unit 3 dan 4. Gambar hasil implementasi polisi tidur di dalam ruang bakar diberikan pada Gambar 19[8].



Gambar 19: Foto implementasi polisi tidur di ruang bakar Unit 3 PLTU CFB Tarahan, sebelum(kiri) dan sesudah (tengah & kanan) implementasi[8].



Gambar 20: Hasil evaluasi EFOR Unit 3 sebelum dan sesudah implementasi polisi tidur[8].

Setelah tujuh baris polisi tidur terpasang di ruang bakar, kemudian dilakukan pengamatan mengenai EFOR (*equivalent force outage rate*) selama 8760 jam operasi dan dibandingkan dengan kondisi operasi sebelum implementasi. Hasil pengamatan penyebab EFOR diberikan pada Gambar 20. Pecah pipa berkurang dari 75% menjadi 30%. Sedangkan hasil evaluasi ekonomi diberikan pada Tabel 4.

Dari hasil evaluasi tahunan dan perbandingan beberapa parameter kinerja sebelum dan sesudah implementasi polisi tidur pada Unit 3 dan 4 PLTU CFB Tarahan ini dapat disimpulkan beberapa hal antara lain:

- a. Penerapan polisi tidur pada ruang bakar PLTU CFB dapat dilakukan meski akan mengurangi luas perpindahan panas dalam ruang bakar namun memberikan keuntungan penurunan secara drastis frekuensi *shutdown* akibat pecah pipa.

Tabel 4: Hasil evaluasi tahunan setelah implementasi polisi tidur Unit 3&4[8]

Parameter pengamatan	Sebelum implementasi	Sesudah implementasi
Frekuensi pecah <i>Waterwall Tube</i> per tahun	8 kali	1 kali
Faktor <i>EAF</i> rerata per tahun	± 87%	± 95%
Faktor <i>CF</i> rerata per tahun	Beban min. 75 MW, ± 69%	Base Load 100 MW, ± 89%
Biaya modifikasi	Rp.1.745.975.000,-	-
Biaya Penambahan Batubara naik sekitar 3,06%/tahun untuk Unit 3&4	-	Rp. 11.371.490.559,- /tahun
Penghematan biaya operasional	-	Rp. 28.471.770.833,- /tahun

- b. Sebagai konsekuensi lanjutannya adalah kenaikan EAF dan CF dari pembangkit yang berakibat pada kenaikan pendapatan meski diikuti pula dengan kenaikan biaya bahan bakar tahunan.
- c. Keunggulan yang diperoleh akan meningkatkan kepercayaan untuk mengoperasikan pembangkit menuju KPI (*key performance indicators*) yang telah ditetapkan sebagai pembangkit *base loader*.

4.2. Instalasi *dual fuel* pada boiler pabrik etanol berbahan baku ketela pohon.

Latar belakang.

Dalam proses pembuatan etanol berbahan baku dari ketela pohon diperlukan uap dan listrik. Oleh karena itu pada umumnya di dalam pabrik etanol disediakan *boiler* untuk memproduksi uap, yang sebagian untuk memenuhi kebutuhan proses dan sisanya untuk pembangkit listrik. Pada pabrik etanol berbahan baku ketela yang menjadi obyek studi

tersebut, desain awal *boiler* hanya menggunakan bahan bakar batu bara. Setelah beberapa waktu beroperasi, ternyata proses pengolahan limbah yang terjadi menghasilkan gas yang terdiri dari metana (sekitar 60%), CO₂ (sekitar 35%) dan sisanya uap air. Gas hasil pengolahan limbah tersebut dibakar sebagai *flare* untuk mengamankan proses dan pabrik. Namun dengan berjalannya waktu timbul pemikiran bahwa bagaimana kalau gas tersebut dibakar saja di dalam *boiler* untuk mengurangi kebutuhan batubara sehingga secara tidak langsung akan mengurangi biaya bahan bakar. Untuk merealisasikan ide tersebut maka dilakukan penelitian pembakaran kombinasi batu bara dan gas di dalam ruang bakar *boiler* dengan sasaran utama memanfaatkan gas buangan hasil pengolahan limbah untuk mengurangi konsumsi batu bara namun operasi *boiler* tetap terjaga normal dan aman.

Metodologi penelitian dan perancangan pemasangan *gas burner*.

Dengan menggunakan metode simulasi numerik CFD (*computational fluid dynamics*) rancangan posisi pemasangan *gas burner* dan proses pembakaran *co-firing* antara batu bara dan gas dilakukan. Foto *boiler* dan *burner* yang akan dipasang pada salah satu sisi dinding *boiler* tersebut diberikan pada Gambar 21 dan 22.



Gambar 21: Foto boiler pabrik etanol obyek studi



Gambar 22: Gas burner yang akan dipasang untuk proses *co-firing* batubara dan gas

Data spesifikasi teknik dari boiler diberikan sebagai berikut:

<i>Steam generator type</i>	: <i>Grate VibroGrate VG-40</i>
<i>Design steam production</i>	: 40000 kg/h
<i>Working pressure</i>	: 40 bar (gage)
<i>Steam outlet temperature</i>	: 400°C
<i>Design pressure</i>	: 43 bar (gage)
<i>Feed water temperature</i>	: 105°C
<i>Stack temperature</i>	: 155°C
<i>Design coal consumption</i>	: 6560 kg/h

Sedangkan data *gas burner* adalah:

<i>Produser/Manufacturer</i>	: RAY OL - & GASBRENNER Type EG2000
<i>Maximum Heat Input</i>	: 15 MW <i>thermal equivalent</i>
<i>Maximum Gas Flow</i>	: 2500 m ³ /h.

Maksud dari simulasi numerik berbasis CFD yang dilakukan di sini adalah untuk lebih meyakinkan posisi terbaik dari *gas burner* serta optimasi laju bahan bakar gas dan udara pembakaran yang diijinkan maksimum agar tidak terjadi badan api yang panjang dan dapat memanaskan dinding *boiler* depan *burner* sehingga tidak akan terjadi *over heating* pada dinding tersebut. Dengan demikian proses perpindahan panas yang terjadi di dalam ruang bakar *boiler* menjadi optimum.

Simulasi CFD proses co-firing batubara dan gas.

Proses simulasi CFD dimulai dengan pembuatan *mesh* pada ruang

bakar tempat terjadinya *co-firing* seperti ditunjukkan pada Gambar 23. Kemudian data komposisi kimia batubara yang digunakan serta nilai kalornya pada proses pembakaran yang disimulasikan diberikan sebagai berikut[11]:

Total Moisture (ARB) : 24,51%

Proximate Analysis (ADB)

- *Inherent Moisture* : 11,77 %

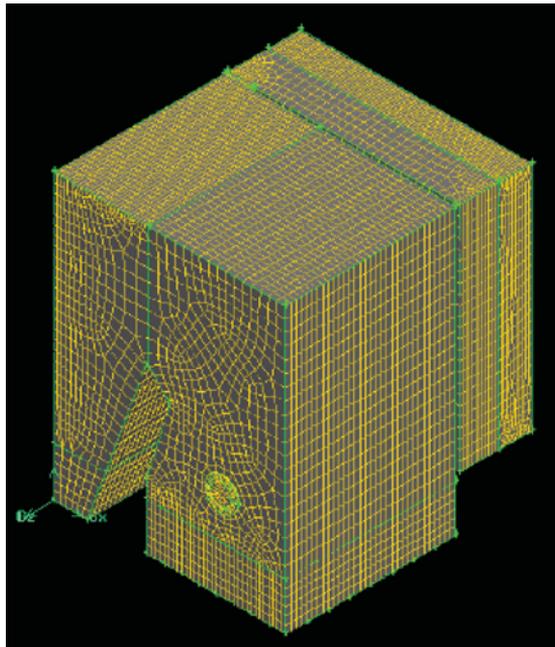
- *Ash Content* : 4,94 %

- *Volatile Matter* : 42,23 %

- *Fixed Carbon* : 41,06 %

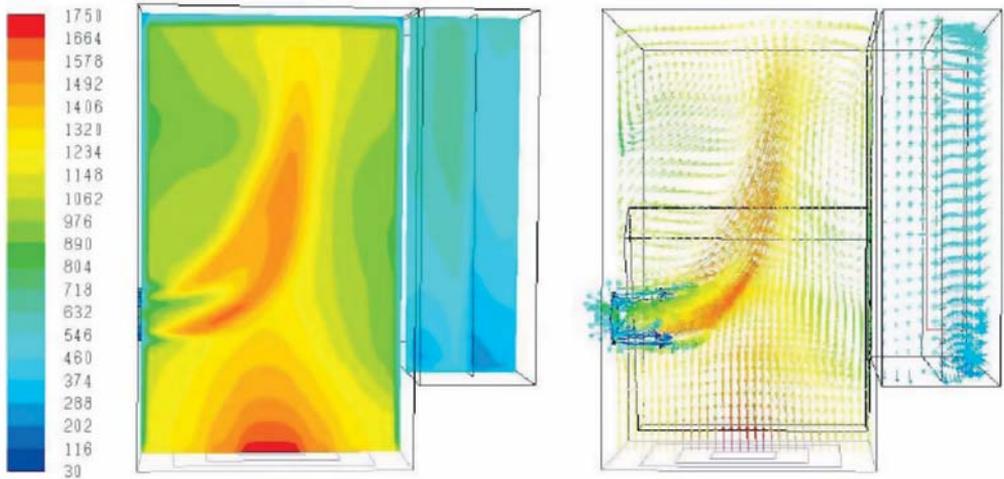
- *Total Sulphur (ADB)* : 0,32 %

Gross Calorific Value (ADB) : 6194 kkal/kg

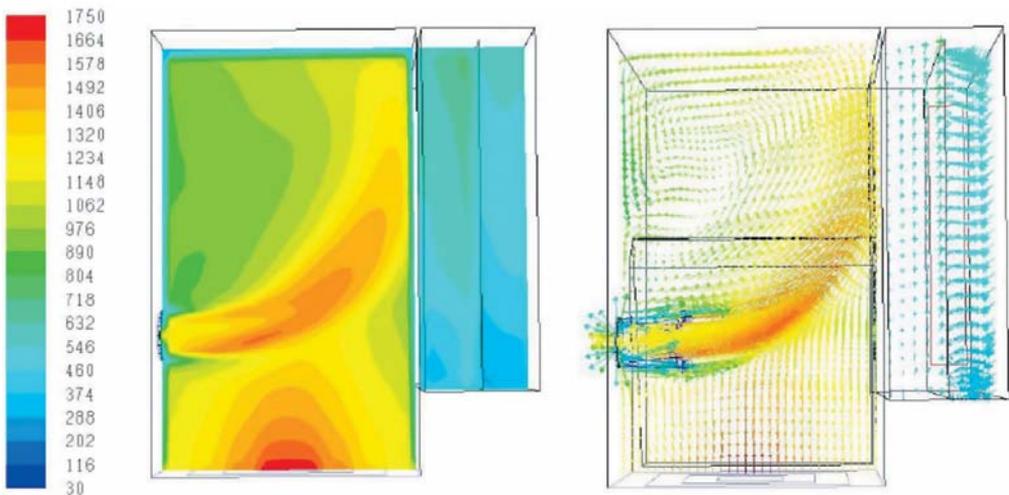


Gambar 23: Hasil *meshing* pada ruang bakar boiler.

Berdasarkan hasil pengamatan dari produksi selama 6 bulan berturut-turut, dapat disimpulkan bahwa produksi uap berada dalam kisaran 25 hingga 31 ton/jam pada tekanan 37 barg dan temperatur 400°C, sedangkan produksi gas dari pengolahan limbah yang selama ini dibakar sebagai *flare* adalah sekitar 16000 hingga 35000 m³/hari. Dengan data tersebut simulasi pembakaran dilakukan untuk produksi uap 25 ton/jam dan 30 ton/jam. Pada produksi uap sebesar 25 ton/jam, penyerapan panas di *boiler* diperkirakan sebesar 16500 kW dan di ekonomiser sebesar 4500 kW, sedangkan pada produksi uap 30 ton/jam sebesar 17000 kW di *boiler* dan 8000 kW di *ekonomiser*. Pada kondisi tersebut *co-firing* diharapkan dapat menghemat batubara sekitar 30% hingga 36,5%. Hasil simulasi berupa distribusi temperatur di dalam ruang bakar pada produksi uap 25 ton/jam dan 30 ton/jam diberikan berurutan pada Gambar 24 dan Gambar 25[11]. Perlu dicatat bahwa dari beberapa kali iterasi diperoleh bahwa laju aliran massa udara pembakaran yang diijinkan agar tidak terjadi *over heating* pada dinding di depan *gas burner* adalah sebesar 2 kg/s pada produksi uap 25 ton/jam dan sebesar 3 kg/s pada produksi uap 30 ton/jam.



Gambar 24: Distribusi temperatur gas di ruang bakar ($^{\circ}\text{C}$) pada produksi uap 25 ton/jam dan laju massa udara melalui *gas burner* 2 kg/s



Gambar 25: Distribusi temperatur gas di ruang bakar ($^{\circ}\text{C}$) pada produksi uap 30 ton/jam dan laju massa udara melalui *gas burner* 3 kg/s

Dengan dibatasinya laju massa udara yang diijinkan melalui *gas burner*, maka pasokan udara pembakaran sisanya diperoleh dari bagian bawah *boiler* yaitu dari sistem *stoker* sebagai peralatan utama proses

pembakaran batu bara pada *boiler* ini. Perlu dicatat bahwa untuk kesempurnaan pembakaran dengan sistem stoker ini, kecukupan udara pembakaran diatur berdasarkan kadar Oksigen sisa di gas hasil pembakaran sekitar 8%. Dari Gambar 24 terlihat bahwa pada laju massa udara sebesar 3 kg/s, lidah api cukup panjang hingga menyentuh dinding ruang bakar di sisi depan dari *gas burner*. Sedangkan pada laju udara 2 kg/s, terlihat lidah api yang masih berada di ruang bakar. Oleh sebab itu maka akhirnya diputuskan nilai laju massa udara pembakaran yang diijinkan melalui *gas burner* maksimum adalah 2 kg/s saja untuk keamanan proses dan optimalisasi distribusi temperatur ruang bakar sehingga proses perpindahan panas akan menjadi lebih optimum pula, meski udara tersebut hanya sekitar 67% dari kebutuhan proses pembakaran gas. Kebutuhan udara sisanya diambil di ruang bakar yang berasal dari bagian bawah ruang bakar yaitu dari sistem stoker.

Hasil implementasi *gas burner* dan *co-firing* yang terjadi.

Dengan hasil simulasi CFD untuk optimasi pembakaran gabungan gas dan batu bara yang diperoleh, akhirnya *gas burner* dan instalasi sistem pasokan gas hasil pengolahan limbah termasuk peralatan kontrol pembakaran untuk keamanan proses diimplementasikan dan diuji coba dengan pasokan gas bertahap. Pada kondisi optimum saat produksi uap sebesar 25 ton/jam diperoleh bahwa pemakaian gas hasil pengolahan limbah ini dapat menghemat konsumsi batu bara hingga 27% sehingga dapat mengurangi biaya penggunaan bahan bakar batu bara secara signifikan.

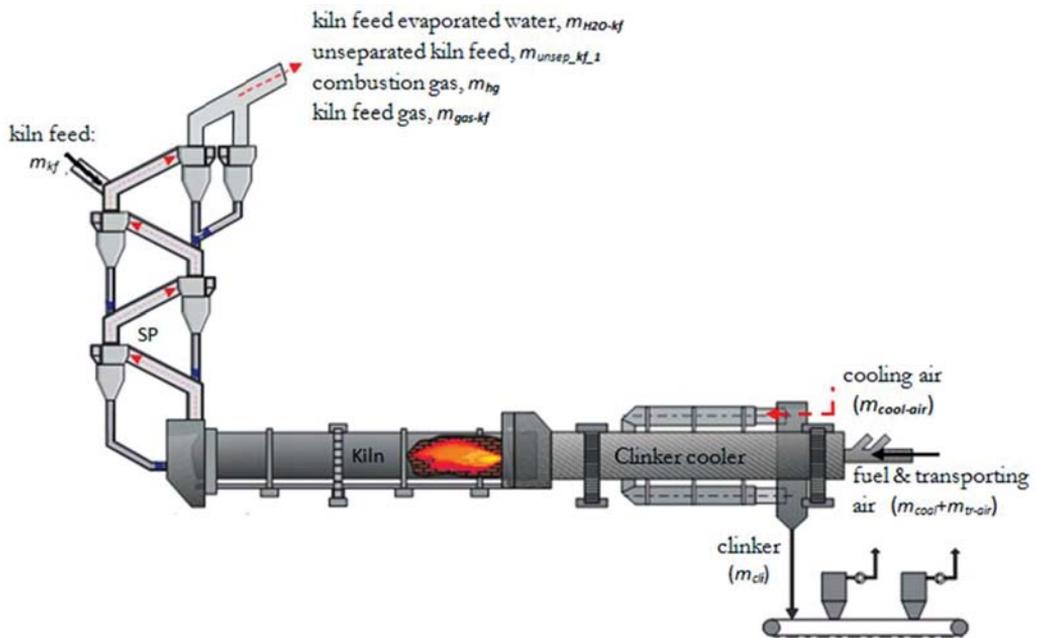
5. MODIFIKASI PERALATAN DAN PROSES DI INDUSTRI SEMEN.

Industri semen merupakan salah satu industri padat energi (sekitar 3200 - 3600 kJ/kg klinker dan 90 kWh/ton semen) dan penghasil gas rumah kaca yang termasuk besar kontribusinya di dunia (sekitar 5-7%)[12]. Hal inilah yang menjadi alasan kenapa pabrik semen selalu berusaha untuk meningkatkan penggunaan material ketiga dan bahan bakar alternatif (non fosil), meningkatkan konservasi energi panas yang dihasilkan dan menurunkan konsumsi listrik yang digunakan. Usaha-usaha tersebut semakin meningkat dengan semakin terbatasnya ketersediaan energi di dunia yang tak terbarukan dan pembatasan polusi lingkungan untuk meningkatkan *sustainability* wahana kehidupan. Banyak usaha menuju kondisi yang lebih baik tersebut telah dimulai, namun rasanya akan semakin membutuhkan kecepatan implementasi di masa mendatang mengingat semakin besarnya tuntutan dunia akan kebutuhan ketersediaan dan penggunaan energi terbarukan yang semakin tinggi, pengurangan dampak pemanasan global serta ketersediaan pangan yang memadai. Oleh karena itu kecepatan kemampuan untuk substitusi bahan dan bahan bakar tak terbarukan di pabrik semen harus selalu didorong baik melalui modifikasi proses maupun peralatan pada pabrik-pabrik yang sudah ada pada masa transisi saat ini dan beberapa dekade ke depan. Berikut ini beberapa usaha yang telah dilakukan penulis dan tim di pabrik semen di Indonesia untuk mewujudkan dukungan terhadap peningkatan produksi dan efisiensi penggunaan bahan baku serta energi.

5.1. Pengembangan piranti lunak perhitungan detail aliran gas dan material di pabrik semen.

Pendahuluan

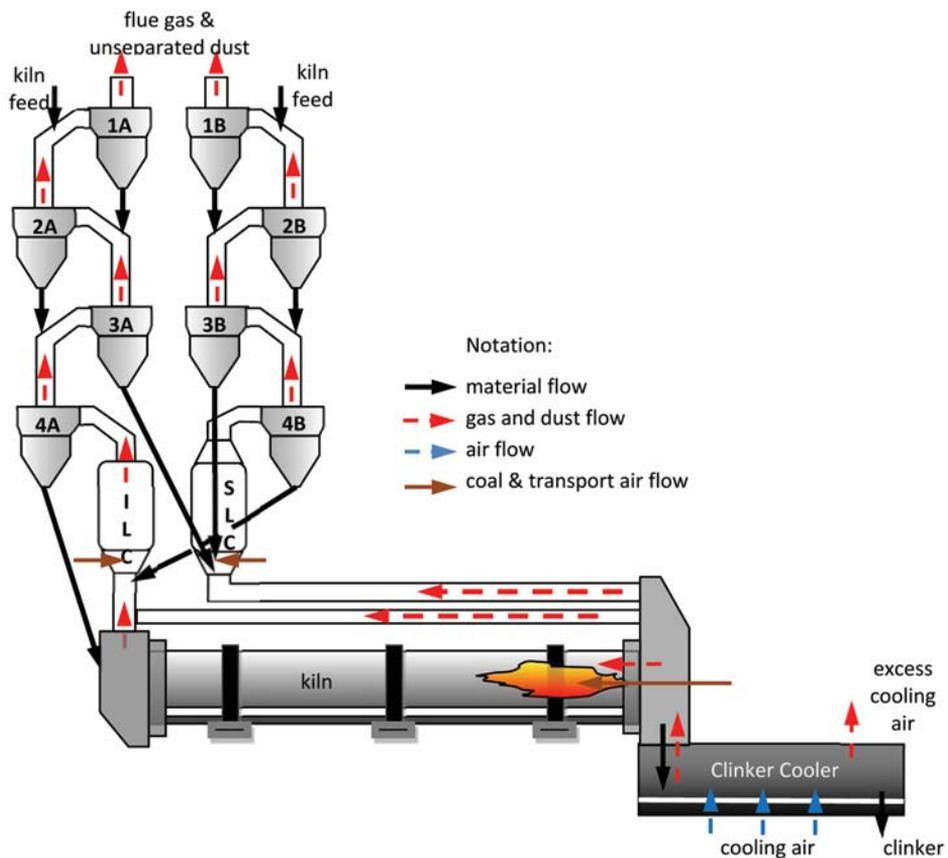
Langkah awal dalam usaha meningkatkan efisiensi suatu pabrik dalam lingkup industri proses, termasuk industri semen, adalah memiliki data laju aliran massa dan energi yang terjadi di setiap peralatan proses yang ingin ditingkatkan efisiensinya atau dimodifikasi. Sayangnya untuk pabrik semen yang sekarang banyak digunakan, yaitu dengan sistem kering, hingga beberapa tahun lalu belum ada referensi yang mengevaluasi secara detail pada peralatan *suspension pre-heater* yang terdiri dari beberapa siklon terpasang secara seri dan kalsiner. Hampir semua evaluasi neraca massa dan panas pabrik semen difokuskan pada keseluruhan peralatan yang merupakan satu sistem pabrik terak/klinker. Hal ini disebabkan oleh kesulitan pengukuran aliran massa partikel bahan baku dalam kondisi temperatur proses yang bisa mencapai 1500°C. Sebagai akibatnya aliran massa bahan baku dan produk hanya dapat diukur di sisi masuk maupun sisi keluar sistem saja. Tambahan lagi beberapa pabrik memiliki konfigurasi peralatan yang bervariasi tergantung pada pembuat pabrik. Di Indonesia saja ada sekitar 6 variasi konfigurasi peralatan pabrik semen. Dua diantara konfigurasi tersebut diberikan pada Gambar 26 dan Gambar 27[12,13].



Gambar 26: Konfigurasi pabrik semen dengan satu *string preheater* dan *planetary clinker cooler*.

Konfigurasi pada Gambar 26 pada umumnya digunakan untuk pabrik semen dengan kapasitas produksi klinker sekitar 1500 - 2000 ton/hari. Sedangkan konfigurasi pada Gambar 27 pada umumnya untuk pabrik besar dengan kapasitas produksi klinker antara 7000 - 9000 ton/hari. Dalam usaha meningkatkan efisiensi proses dan peralatan kadang hanya dilakukan pada sebagian kecil dari sistem peralatan secara menyeluruh tersebut. Oleh karena itu diperlukan pengembangan perangkat lunak perhitungan neraca massa dan panas secara detil hingga pada setiap siklon dan kalsiner dalam sistem *pre-heater* tersebut untuk beberapa konfigurasi pabrik ini terlebih dahulu. Tujuan pengembangan perangkat lunak ini adalah untuk mempercepat proses evaluasi aliran

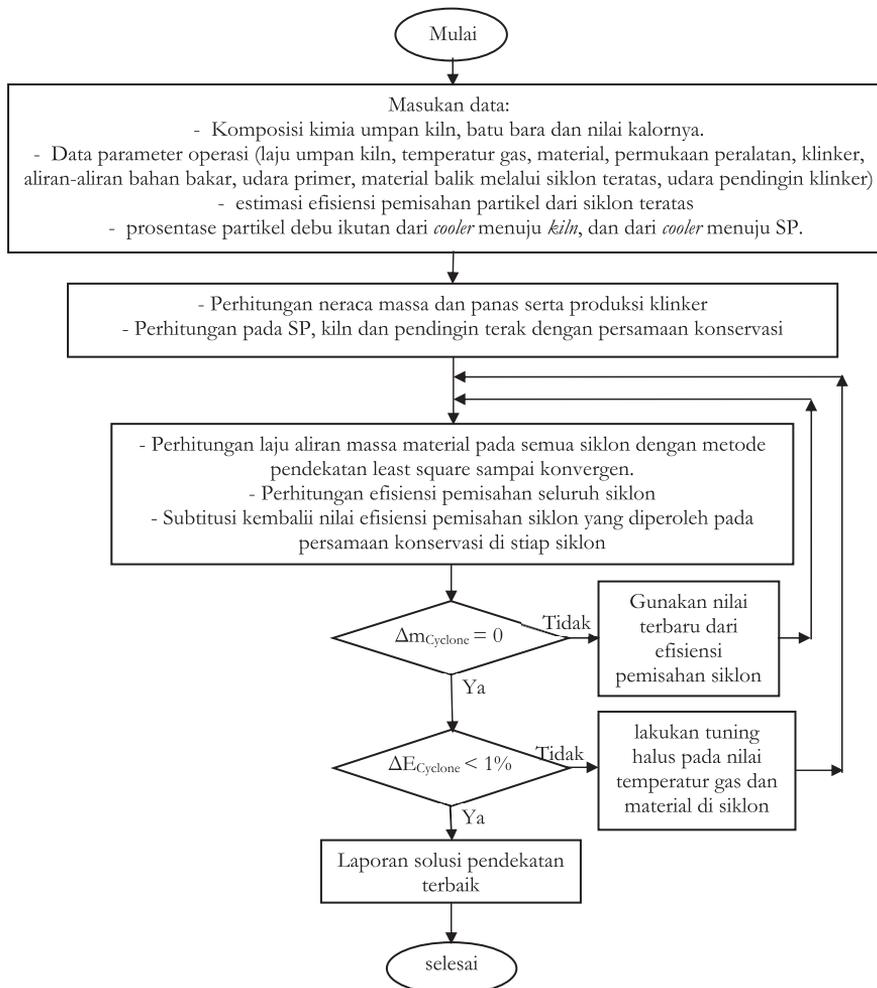
massa dan panas pada peralatan utama pabrik-pabrik semen yang sedang beroperasi saat ini di Indonesia. Versi terakhir yang dikembangkan didasarkan hanya pada hasil pengukuran temperatur gas pada sisi masuk dan keluar siklon maupun *calciner* (kalsiner), yang umumnya selalu tersedia di setiap pabrik semen, dengan persamaan matematik aliran massa dan energi yang diusulkan dapat digunakan untuk mengevaluasi efisiensi pemisahan masing-masing siklon yang tidak mungkin dilakukan di lapangan saat pabrik sedang beroperasi[14-16].



Gambar 27: Konfigurasi pabrik semen dengan dua string preheater dan grate clinker cooler.

Konsep perhitungan detail neraca massa dan panas suatu pabrik semen.

Aliran massa material padatan dan gas pada peralatan utama pabrik semen (*preheater, calciner, kiln* dan *clinker cooler*, lihat Gambar 26 dan 27) berasal dari material baku umpan kiln, bahan bakar dan udara yang dimasukkan ke dalam sistem melalui peralatan utama tersebut.



Gambar 28: Diagram alir perhitungan neraca massa padatan dan gas suatu pabrik semen.

Sedangkan material padatan keluar berupa klinker/terak dan debu tak tersaring serta gas hasil pembakaran bahan bakar dan udara pendingin klinker sisa yang tidak digunakan sebagai udara untuk pembakaran bahan bakar. Secara prinsip diperlukan data laju aliran umpan kiln, bahan bakar dan udara yang dimasukkan ke dalam sistem serta menimbang klinker yang diproduksi dan debu tak tersaring yang keluar melalui *top cyclone preheater* serta kadar Oksigen di dalam gas keluar dari *kiln* dan *preheater*. Dengan data tersebut garis besar neraca massa material dan gas secara global dari sistem peralatan pabrik klinker ini dapat ditentukan melalui persamaan konservasi energi yang diturunkan dalam referensi [14-16]. Kemudian berdasarkan neraca massa material padatan dan gas secara keseluruhan peralatan utama pabrik ini dan digabung dengan persamaan konservasi energi secara detail di setiap siklon dan kalsiner, akan diperoleh satu set persamaan linier dalam bentuk matriks sistem persamaan *over-determined* yang dapat diselesaikan dengan metode pendekatan *least square* sehingga diperoleh solusi pendekatan dengan kesalahan pada keseimbangan aliran energi tidak melebihi 1%. Diagram alir solusi tersebut diberikan pada Gambar 28. Apabila perhitungan neraca aliran massa dan panas secara detail di setiap peralatan pabrik telah diperoleh, yang tidak mungkin diukur secara langsung saat pabrik sedang beroperasi, maka hasil perhitungan ini dapat digunakan sebagai data perhitungan dalam modifikasi proses maupun peralatan yang ingin dilakukan. Contoh-contoh penggunaan data dari hasil perhitungan ini untuk berbagai tujuan optimasi proses, peningkatan

efisiensi peralatan dan modifikasi peralatan yang dilakukan diberikan pada pasal-pasal berikut.

5.2. Peningkatan efisiensi pemisahan material di *Top Cyclone preheater*

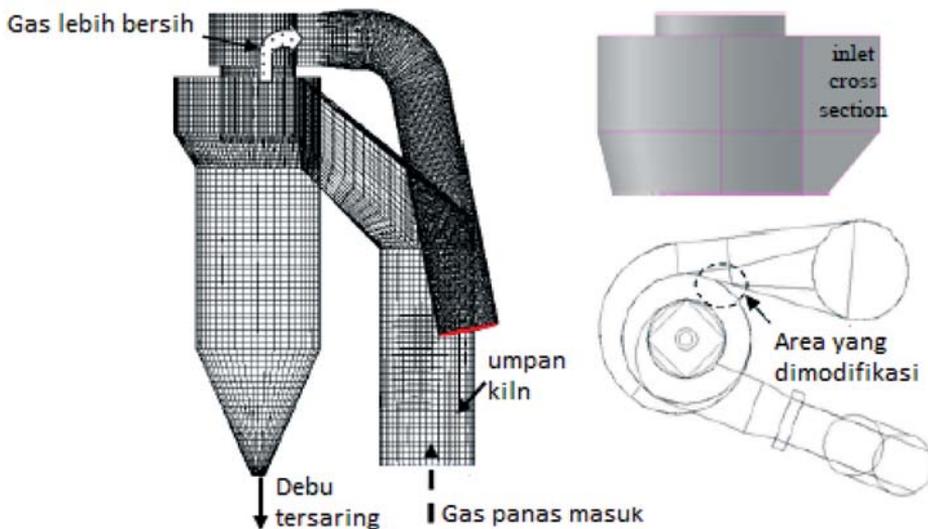
Pendahuluan

Gas keluar dari *top cyclone preheater* suatu pabrik semen digunakan sebagai pengering bahan baku dan batubara sebelum dibuang ke lingkungan. Gas ini banyak mengandung debu bila efisiensi *top cyclone* rendah yang menyebabkan rasio bahan baku dengan produk klinker menjadi tinggi. Hal ini akan membebani *induced draft* (ID) Fan sehingga konsumsi listrik bisa meningkat. Selain itu kandungan debu dalam gas juga dapat mengontaminasi produk penggilingan batubara sehingga mengurangi nilai kalornya. Untuk mengatasi hal ini diperlukan peningkatan efisiensi pemisahan debu yang tinggi pada *top cyclone preheater*. Secara umum efisiensi pemisahan debu pada *top cyclone* dari pabrik semen di Indonesia masih berpeluang untuk ditingkatkan. Berikut salah satu contoh hasil penelitian kami untuk meningkatkan efisiensi pemisahan *top cyclone preheater* yang sudah diaplikasikan di beberapa pabrik di Indonesia seperti semen Padang, Indocement Tunggal Prakarsa, Solusi Bangun Indonesia, semen Tonasa dan Semen Baturaja.

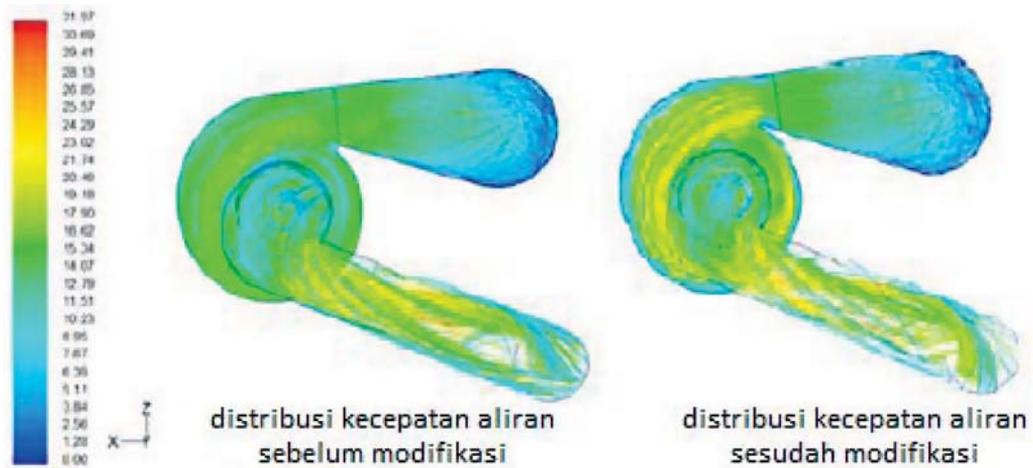
Perancangan dan implementasi modifikasi *top cyclone* pada pabrik semen.

Metodologi penelitian kami lakukan berbasis *computational fluids*

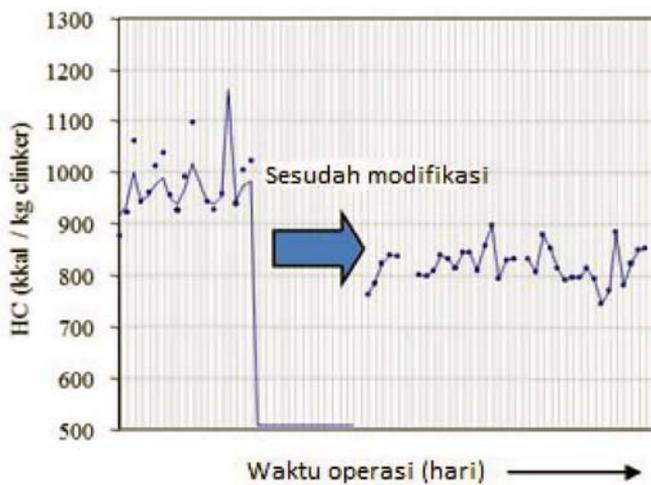
dynamic (CFD). Pada umumnya optimasi luas penampang sisi masuk *top cyclone* menjadi obyek penelitian dengan modifikasi yang sederhana sehingga tidak membutuhkan biaya tinggi dengan waktu *tie-in* yang singkat. Metode modifikasi, hasil simulasi CFD dan foto implementasi terlihat pada Gambar 29[17]. Hasil modifikasi ini pada umumnya dapat meningkatkan efisiensi pemisahan sekitar 5% dan menurunkan konsumsi panas spesifik pabrik (HC) sekitar 100 kkal/kg klinker seperti ditunjukkan pada Gambar 30[18]. Selain itu konsentrasi debu pada gas turun sekitar 2,83% sehingga menurunkan kontaminasi debu pada produk *coal mill* dan meningkatkan nilai kalornya. Pada umumnya berdasarkan hasil penelitian kami, penurunan kadar debu 1% berdampak pada kenaikan nilai kalor batu bara tergiling sekitar 100 kkal/kg.



(a)



Gambar 29: Metode modifikasi (a) dan simulasi kecepatan aliran sebelum dan sesudah modifikasi (m/s).



Gambar 30: Perubahan konsumsi panas spesifik pabrik sebelum dan sesudah modifikasi *top cyclone*[17].

5.3. Perancangan, pembuatan dan implementasi *Cyclone Deduster* pada *Coal Mill System*

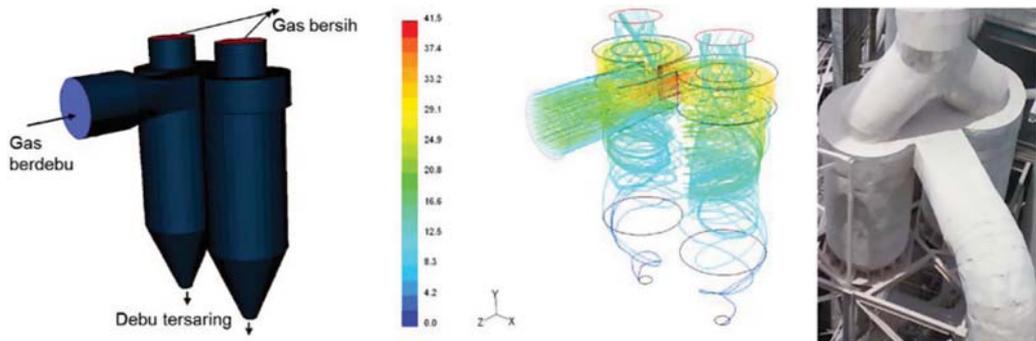
Pendahuluan

Penggunaan batubara berkalori rendah yang kebanyakan mengandung air cukup tinggi sudah umum di pabrik semen, pembangkit dan industri lainnya. Oleh karena itu pada saat digiling dalam *coal mill system*, batu bara tersebut perlu dikeringkan dengan menggunakan gas panas miskin oksigen. Di pabrik semen umumnya gas ini diambil dari gas keluaran dari *top cyclone preheater*. Sayangnya gas ini banyak mengandung debu yang bisa mengontaminasi produk penggilingan batubara sehingga mengurangi nilai kalornya. Untuk mengatasi hal ini diperlukan peralatan tambahan pengurang kadar debu gas yang umumnya disebut *deduster*.

Perancangan dan implementasi *cyclone deduster* pada sistem *coal mill* pabrik semen.

Berikut ini salah satu contoh hasil studi dan implementasi *cyclone deduster* pada pabrik semen yang pernah kami lakukan. *Deduster* berupa *double cyclone* dengan desain optimum berdasarkan hasil penelitian berbasis CFD, distribusi kecepatan aliran hasil simulasi dan foto implementasi terlihat pada Gambar 31[19,20]. Dengan diameter bodi deduster sebesar 3,2 m dan tinggi 9,45 m serta gas masuk sekitar 2650 m³/menit dan kadar debu sekitar 40 g/m³, hasil simulasi menunjukkan kemampuan pengurangan kadar debu sekitar separuhnya. Hasil pengukuran di lapangan setelah implementasi peralatan adalah terjadi

penurunan kadar debu yang mengontaminasi produk *fine coal* dari 8,5% menjadi 3,8% yang ekivalen dengan kenaikan nilai kalor produk penggilingan sekitar 300 kkal/kg[20].



Gambar 31: Rancangan, simulasi aliran dan foto implementasi *deduster* pada sistem *coal mill* pabrik semen.

5.4. Modifikasi geometri Calciner dan implementasinya.

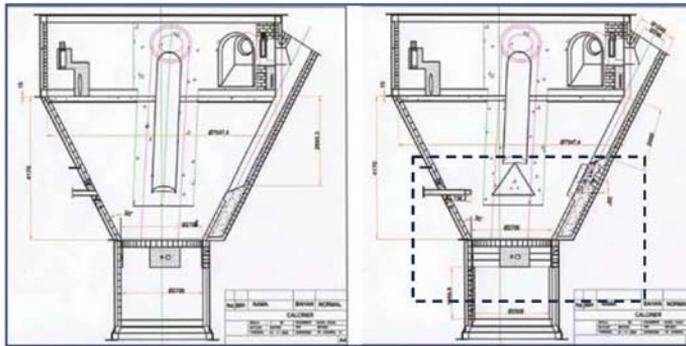
Latar Belakang dan Metodologi

Di pabrik semen, kalsiner merupakan suatu peralatan sangat penting sehingga kapasitas pabrik menjadi besar seperti saat ini dengan tetap mempertahankan mutu klinker. Dengan kalsiner sebagian besar proses kalsinasi, reaksi dari batu kapur CaCO_3 menjadi kalsium oksida CaO dan gas CO_2 , terjadi. Dengan adanya kalsiner hampir 60% bahan bakar yang dibutuhkan pabrik semen dibakar di peralatan ini. Dengan perubahan bahan bakar yang dikonsumsi serta batasan baku mutu polutan yang diijinkan, sudah selayaknya pembakaran bahan bakar dan proses kalsinasi di kalsiner disesuaikan agar sasaran kualitas produksi dan lingkungan hidup tetap terpenuhi. Banyak pabrik semen di Indonesia

dibangun pada dekade 1990an dimana kualitas batu bara yang digunakan saat itu masih kelas medium. Dengan perubahan kualitas batu bara yang digunakan saat ini serta peluang menggunakan bahan bakar alternatif, geometri dan proses yang terjadi di kalsiner perlu disesuaikan[21]. Berikut ini contoh hasil modifikasi geometri kalsiner dan proses pembakaran yang pernah kami lakukan di dua pabrik semen di Indonesia. Metodologi perhitungan proses pembakaran dan kalsinasi yang kami gunakan adalah berbasis CFD, sedangkan data proses dan aliran massa berdasarkan hasil perhitungan dengan memanfaatkan piranti lunak yang telah kami kembangkan.

Modifikasi geometri kalsiner dan hasil simulasi CFD.

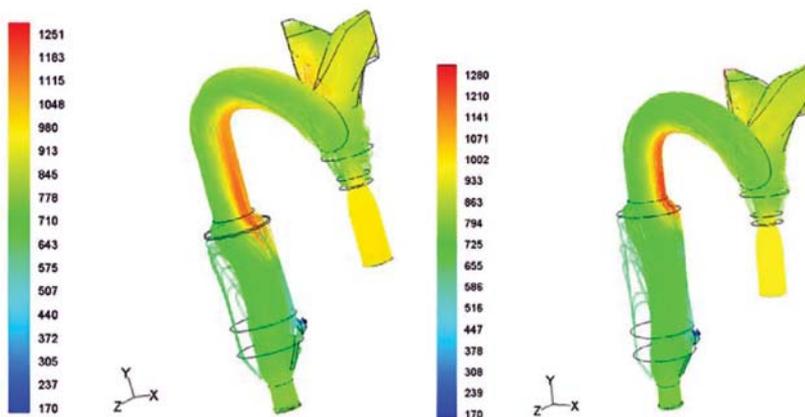
Dengan penggunaan batubara berkualitas lebih rendah serta penggunaan bahan bakar alternatif meski prosentasenya terbatas, pada umumnya proses pembakaran dan kalsinasi menjadi lebih lambat sebagai konsekuensi meningkatnya kadar air batu bara, turunnya nilai kalor dan temperatur gas hasil pembakaran. Mengantisipasi kondisi ini beberapa modifikasi yang dapat dilakukan pada umumnya adalah meningkatkan volume kalsiner, mengubah posisi dan jumlah *burner*, mengubah posisi masukan bahan baku, mengurangi luas penampang *ducting* udara masuk kalsiner dan lain-lain. Gambar 32 dan Gambar 33 berturut-turut menunjukkan modifikasi yang pernah dilakukan di pabrik Tonasa 4[22]. Pada Gambar 34 diperlihatkan perubahan lintasan gas dan partikel serta distribusi temperatur hasil simulasi setelah dilakukan modifikasi geometri.



Gambar 32: Modifikasi posisi masukan bahan baku, burner dan penampung saluran udara[22].

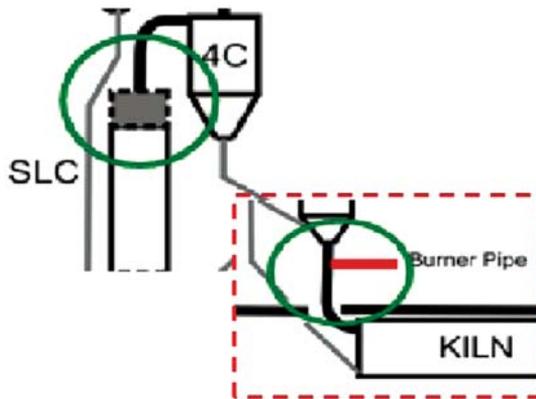


Gambar 33: Modifikasi volume kalsiner di pabrik Tonasa 4[22].

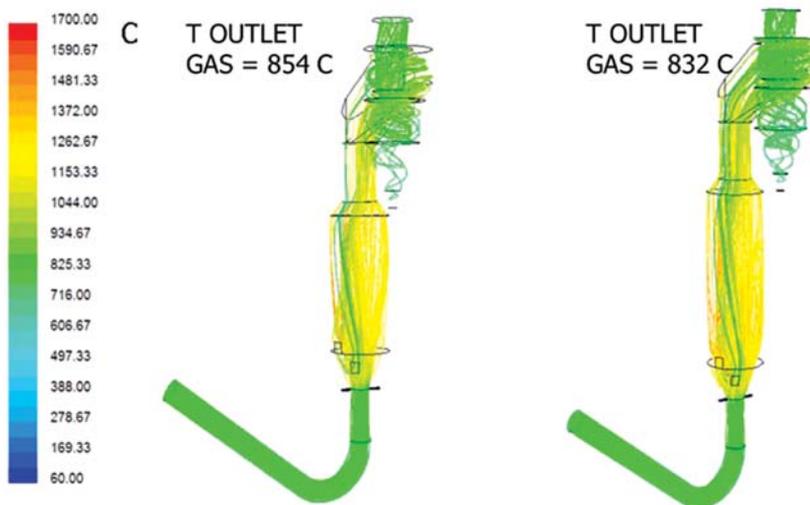


Gambar 34: Perubahan distribusi temperatur gas ($^{\circ}\text{C}$) di dalam kalsiner.

Pada pabrik semen Holcim (saat itu) di Cilacap, perubahan yang kami lakukan adalah modifikasi posisi *burner* dan penambahan volume kalsiner seperti ditunjukkan pada Gambar 35. Sedangkan hasil simulasi perbandingan distribusi temperatur di dalam kalsiner sebelum dan setelah modifikasi diperlihatkan pada Gambar 36.



Gambar 35: Perubahan posisi *burner* dan peningkatan volume kalsiner di pabrik Cilacap[23].



Gambar 36: Hasil simulasi distribusi temperatur gas di dalam kalsiner sebelum dan sesudah modifikasi geometri pada kalsiner pabrik semen Holcim di Cilacap.

Hasil modifikasi geometri dan proses pembakaran pada kalsiner.

Dari dua contoh kasus modifikasi geometri, posisi *burner*, dan posisi masukan bahan baku ke dalam kalsiner secara umum diperoleh beberapa keuntungan berikut[21,23]:

- Turunnya temperatur gas keluar dari kalsiner sekitar 20°C yang berarti terjadi peningkatan efektivitas proses perpindahan panas antara gas dan partikel bahan baku semen.
- Naiknya derajat kalsinasi sekitar 3-5% yang memberikan keuntungan mengurangi beban panas kiln sehingga secara nyata produksi klinker dapat ditingkatkan.
- Turunnya konsumsi spesifik panas spesifik yang berarti turunnya konsumsi bahan bakar secara keseluruhan.
- Turunnya *pressure drop* pada aliran gas pada kalsiner yang berdampak pada turunnya konsumsi listrik *ID fan* sehingga secara keseluruhan konsumsi spesifik *ID fan* turun secara proporsional sekitar 0,1 hingga 0,5 kWh/ton semen yang diproduksi.

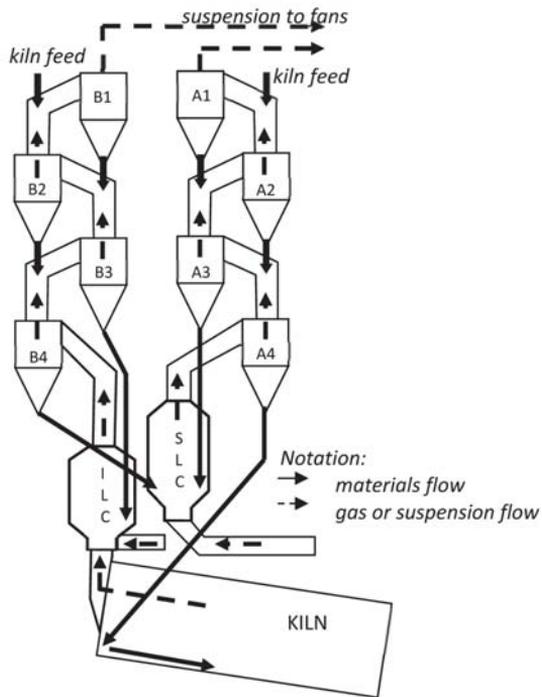
Keuntungan-keuntungan di atas secara langsung akan menurunkan biaya produksi dan polusi ke lingkungan. Ini berarti bahwa sasaran utama modifikasi dapat diperoleh.

5.5. Rerouting aliran material pada ILC dan SLC *double string pre-heater*.

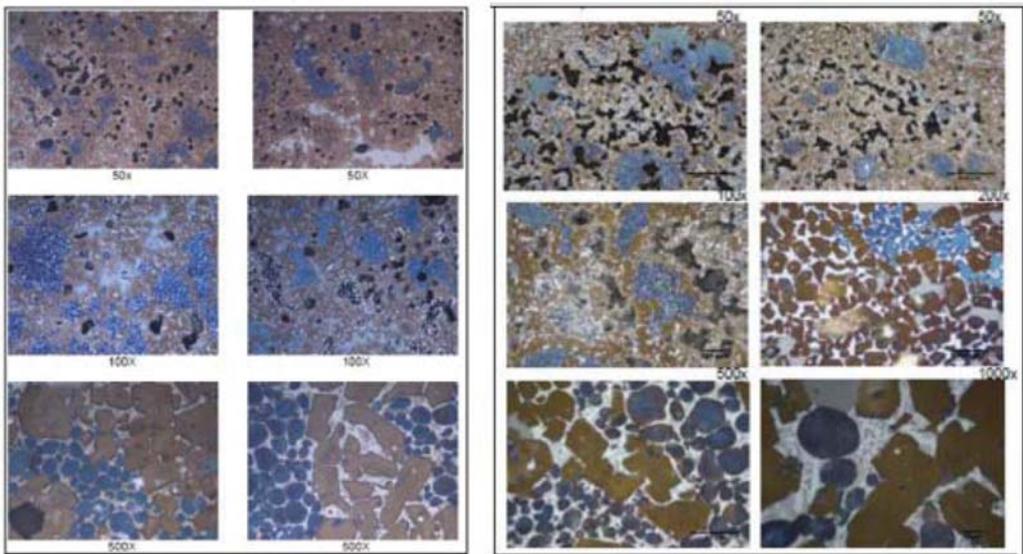
Latar belakang dan metodologi.

Pada era 2000an, beberapa pabrik semen yang dibangun di Indonesia

pada umumnya memiliki konfigurasi *preheater* dua string dengan *double calciner* ILC-SLC (*In Line and Separated Calciners*) dengan kapasitas produksi klinker antara 7500 hingga 7800 ton per hari (TPD) seperti diperlihatkan secara skematik pada Gambar 37[24]. Aliran material dari siklon B4 yang merupakan hasil kalsinasi di ILC menuju SLC bercampur dengan material dari siklon A3 yang praktis belum mengalami proses kalsinasi. Sebagai konsekuensinya bahan baku saat memasuki kiln memiliki derajat kalsinasi yang berbeda (tidak seragam) yang berakibat kualitas klinker yang kurang seragam pula (derajat kalsinasi bervariasi, kematangan pembakaran material dan struktur mikroskopik yang tidak seragam pula). Akibat langsung yang dirasakan adalah mutu klinker kurang seragam, kemampuan menampung material ketiga untuk memproduksi semen jenis PCC (*Portland Composite Cement*) menjadi terbatas, konsumsi bahan bakar yang kurang optimum dan biaya produksi menjadi relatif tinggi. Dari stuktur mikroskopik klinker terlihat bahwa kadar C3S (*alite*, warna coklat, adalah unsur semen yang paling reaktif) yang lebih sedikit dibanding produksi klinker dari pabrik dua string SLC saja yang secara umum pemanasan dan pembakaran bahan baku selalu bersama-sama dalam peralatan yang sama, seperti nampak pada Gambar 38[24].



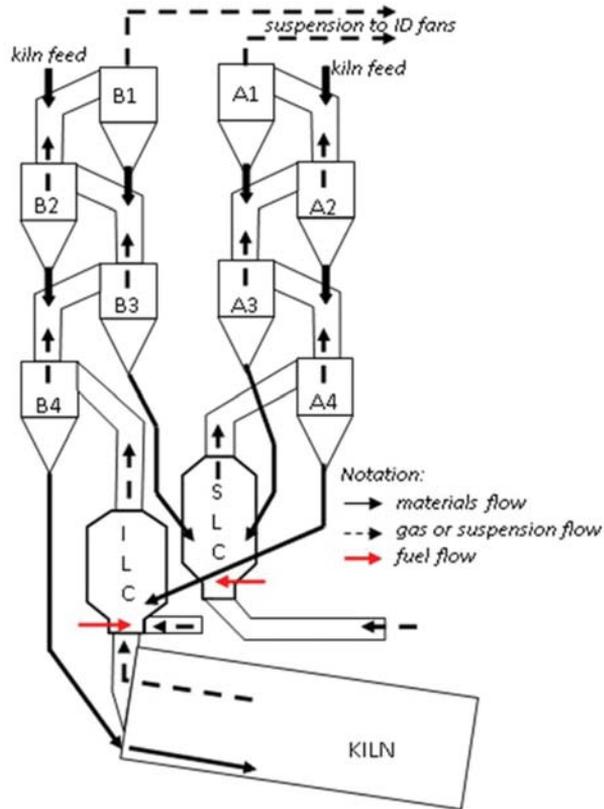
Gambar 37: Skematik peralatan pabrik klinker tipe ILC-SLC.



Gambar 38: Struktur mikroskopik produk klinker pabrik tipe dua *string preheater* tipe SLC saja (kiri) dan tipe dua *string* ILC-SLC (kanan)[25].

Oleh karena itu, ada ide untuk menyeragamkan proses yang dialami oleh material dari sejak masuk *preheater* hingga keluar dari *clinker cooler*. Ide ini dapat dilakukan bila rute aliran diperbaiki (*materials flow re-routing*) menjadi dari *preheater* semua material dialirkan ke SLC dahulu baru dimasukkan ke ILC untuk kemudian dialirkan ke *kiln* dan *cooler* secara bersamaan. Untuk mendukung ide ini metodologi perhitungan proses dilakukan dengan cara perhitungan detail aliran massa material dan gas dibantu dengan simulasi aliran dan perpindahan panas dengan CFD [15-17]. Dengan perubahan pola rute aliran material ini, secara skematik aliran bahan baku diperlihatkan pada Gambar 39[24].

Dari Gambar 39 nampak bahwa semua material baku mengalir menuju SLC terlebih dahulu sebelum akhirnya dilanjutkan pembakarannya di ILC dan kemudian di kiln secara bersamaan. Dengan demikian keseragaman proses yang dialami material baku seluruhnya diharapkan dapat terpenuhi. Keseragaman proses ini akan mengakibatkan pemanasan dan klinkerisasi serta pendinginan awal klinker di dalam kiln menjadi lebih seragam sehingga mutu klinker dari produk kiln menjadi lebih seragam dan lebih mudah dikendalikan.



Gambar 39: Skematik aliran bahan baku hasil *re-routing* pada pabrik dua *string* preheater ILC-SLC[24]

Namun demikian ada hal kritis yang perlu disikapi yaitu kemampuan kedua kalsiner dalam memproses material baku. Untuk itu proses pembakaran dan kalsinasi di kedua kalsiner tersebut perlu disimulasikan dengan bantuan *CFD software*. Berikut ini secara singkat akan diuraikan tentang manfaat modifikasi, bagian peralatan utama yang dimodifikasi, dan perubahan data operasi serta simulasi proses akibat modifikasi.

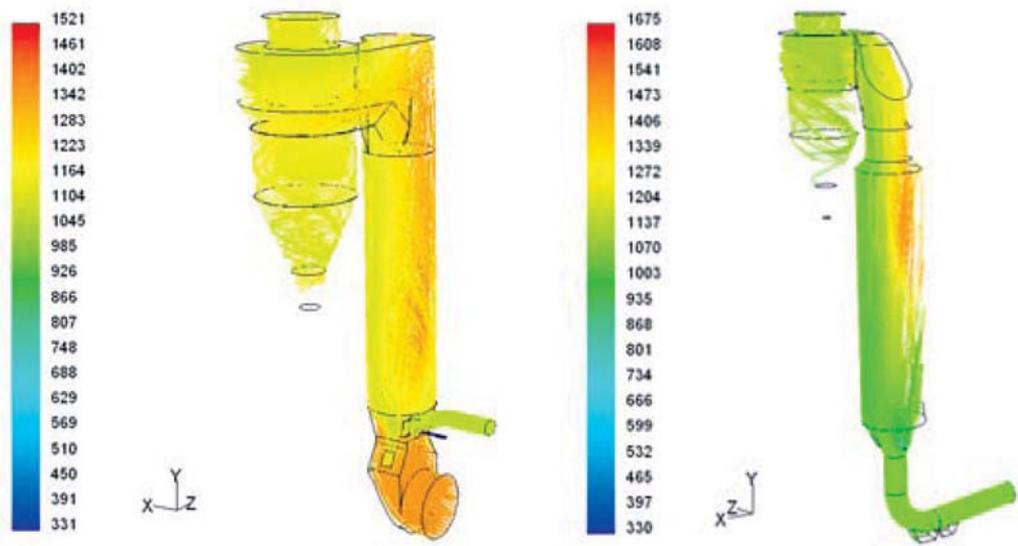
Manfaat modifikasi peralatan, bagian peralatan yang dimodifikasi dan simulasi proses.

Manfaat dari modifikasi *preheater* dan *calciner* ini adalah untuk meningkatkan kapasitas produksi klinker pabrik ke kapasitas lebih besar dari kapasitas desain 7800 ton per hari (TPD) menjadi sekurang-kurangnya 8500 TPD dengan tetap mempertahankan kualitas klinker serta operasi peralatan yang stabil dalam jangka waktu yang lama. Sedangkan bagian peralatan yang dimodifikasi antara lain:

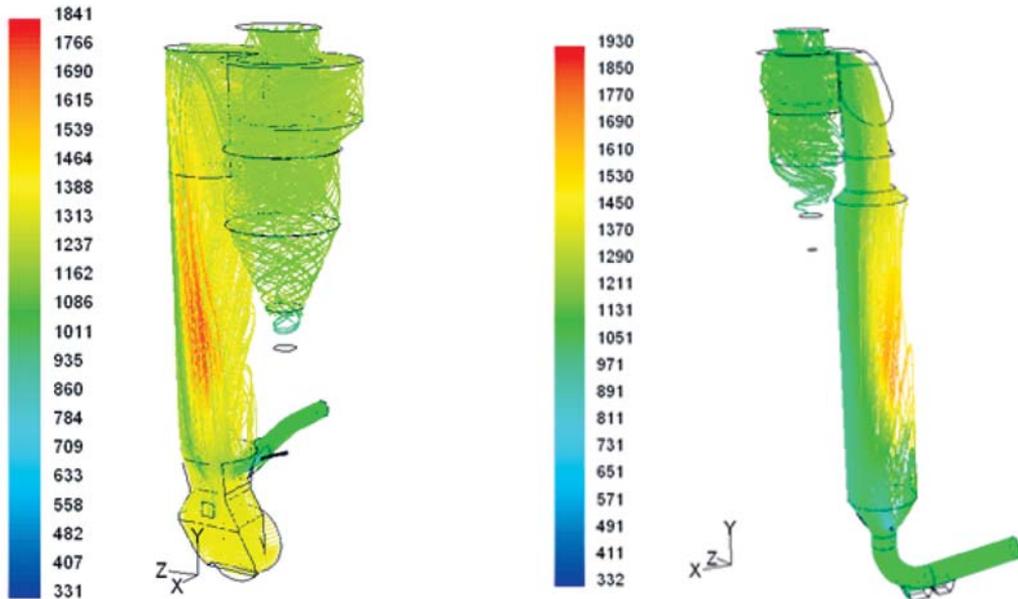
1. Modifikasi geometri sisi masukan gas pada *top cyclone*. Modifikasi pada bagian ini dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan *top cyclone* sehingga diperoleh pengurangan kadar abu di *fine coal*, penurunan rasio klinker dengan bahan baku dan pengurangan konsumsi panas spesifik akibat peningkatan efektivitas perpindahan panas yang terjadi.
2. Pengalihan aliran material dari siklon ketiga dari atas kedua *string preheater* (A3 dan B3) menuju ke SLC seluruhnya untuk kemudian dari siklon A4 dimasukkan ke ILC dan dari siklon B4 material mengalir menuju kiln seperti nampak pada Gambar 39.
3. Perubahan posisi *burner* ILC dari cone menjadi di sisi masuk *tertiary air duct* (TAD) agar terjadi pengeringan lebih awal dan pembakaran batu bara mengikuti aliran tangensial sehingga akan lebih sempurna dengan waktu pembakaran yang lebih lama.
4. Penambahan volume SLC yaitu memperpanjang *cylinder body*-nya ke

arah bawah dengan mengurangi panjang TAD sepanjang 3 m, untuk penyempurnaan proses pembakaran bahan bakar, perpindahan panas, proses kalsinasi bahan baku serta mengurangi *pressure drop*.

Dengan data proses hasil perhitungan neraca massa dan panas untuk kapasitas produksi yang direncanakan menjadi sekitar 8500 TPD, proses pembakaran bahan bakar, perpindahan panas, aliran fluida dan kalsinasi di ILC dan SLC disimulasikan. Namun sebelumnya perlu dilakukan simulasi untuk verifikasi pada kondisi operasi sebelum modifikasi dilakukan. Salah satu hasil verifikasi pada kondisi operasi sebelum modifikasi dan hasil simulasi pada kondisi kapasitas produksi klinker 8500 TPD diberikan secara berurutan pada Gambar-gambar 40 dan 41.



Gambar 40: Distribusi temperatur gas (K) pada kondisi sebelum modifikasi.



Gambar 41: Hasil simulasi distribusi temperatur (K) pada kapasitas produksi klinker 8500 TPD

Berdasarkan Gambar 40, diperoleh hasil perhitungan derajat kalsinasi batu kapur saat keluar dari ILC adalah sekitar 48% dengan batu bara terbakar lebih dari 99,7%. Sedangkan di SLC, kalsinasi batu kapur merata, karena bahan baku dari A53 dan B53 saat masuk ke kalsiner berbeda kondisi kalsinasinya, menjadi sekitar 80%. Simulasi ini tidak berbeda jauh dengan hasil perhitungan berdasarkan neraca massa dan panas serta pengukuran di laboratorium terhadap sampel bahan baku panas yang diambil dari kondisi sebelum memasuki kiln. Dengan demikian validasi simulasi dapat diterima. Dari Gambar 41, diperoleh hasil simulasi bahwa bahan bakar terbakar sudah di atas 99%, sedangkan derajat kalsinasi dari batu kapur sekitar 62% keluar dari SLC dan 90%

keluar dari ILC sebelum memasuki kiln. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan secara empirik berdasarkan neraca massa dan panas. Perlu dicatat bahwa bahan baku terkalsinasi secara seragam pada kondisi operasi peralatan yang sudah dimodifikasi.

Hasil *commissioning* pabrik setelah modifikasi.

Setelah dilakukan modifikasi yang direncanakan, *commissioning* dilakukan dengan mengamati parameter-parameter operasi selama tiga hari berturut-turut. Hasil *commissioning* diberikan pada Tabel 5. Dari hasil *commissioning* tersebut beberapa hal yang dapat ditarik sebagai kesimpulan antara lain:

1. Produksi klinker naik lebih tinggi dari target yang dicanangkan yaitu 500 TPD. Hal ini merupakan capaian yang baik sekali mengingat modifikasi ini hanya mengandalkan kemampuan sumber daya di dalam negeri. Bahkan setelah bisa menjadi contoh bagi pembuat pabrik maupun pabrik-pabrik sejenis yang berada di Indonesia. Kunjungan ke pabrik ini telah diterima baik dari staf pembuat pabrik maupun dari pabrik semen lain di Indonesia. Setelah kesuksesan ini, pabrik-pabrik baru sudah tidak menggunakan teknologi ILC SLC lagi, hampir semuanya sekarang hanya menggunakan ILC tapi dengan volume ruang bakar yang besar.
2. Konsumsi panas spesifik turun sehingga pasti terjadi penghematan bahan bakar akan terjadi pada operasi selanjutnya.
3. Konsumsi listrik spesifik naik yang menandakan adanya peningkatan

penggunaan listrik, meski tidak besar per satuan produk. Hal ini disebabkan adanya peningkatan kapasitas produksi klinker, kenaikan putaran *kiln*, dan memerlukan studi lanjut untuk mengurangnya karena terkait dengan *raw mill*, *coal mill*, serta *fan-fan* besar yang digunakan.

4. Laporan selanjutnya menunjukkan bahwa hingga saat ini, pabrik lebih banyak beroperasi dengan kapasitas produksi di sekitar 8500 TPD, yang menandakan bukti bahwa dengan modifikasi yang pas pabrik dapat ditingkatkan kapasitasnya hingga 9% dibanding desain awalnya dengan biaya modal kembali sekitar 3 (tiga) tahun.

Tabel 5: Perbandingan parameter kinerja pabrik klinker sebelum dan sesudah modifikasi

Nomor	Parameter	Satuan	Sebelum modifikasi	Sesudah modifikasi
1	Produksi klinker	Ton/hari	7800 ^{*)}	8572
2	Konsumsi spesifik bahan baku	Ton/Ton klinker	1,51	1,48
3	Nilai kalor netto batubara halus	kcal/kg	5790	5790
4	Konsumsi panas spesifik	kcal/kg klinker	754	739
5	Prosentase kapur bebas	%	< 1	< 1
6	Konsumsi listrik spesifik dept. Kiln	kWh/Ton klinker	35,4	37,1
7	Temperatur gas keluar <i>top cyclone</i>	°C	370-380	375-380
8	Daya listrik IDE Fan <i>kiln string</i>	Kw	1820	1835
9	Daya listrik IDE Fan <i>Calciner string</i>	Kw	1860	1895
10	Temperatur udara tersier	°C	850	930
11	Putaran kiln	rpm	2,5	3

^{*)} kondisi desain pabrik

5.6. Peningkatan efisiensi Fan besar dan implementasinya pada *Raw* dan *Finish Mills*.

Pendahuluan

Penggunaan *fan* besar dengan diameter *impeller* lebih besar dari 2 m dan motor penggerak lebih dari 500 kW banyak digunakan di industri semen. Bahkan ada satu *fan* dengan motor penggerak berdaya lebih dari 3 MW. Konsumsi daya *fan* besar tersebut merupakan kedua terbesar setelah daya yang diperlukan untuk proses penggilingan material, sehingga peningkatan efisiensi konversi energi *fan*, meskipun hanya sekitar 1%, akan sangat berguna bagi usaha menurunkan biaya energi. Selain itu apabila usaha peningkatan efisiensi *impeller fan* besar tersebut berhasil dan modifikasi *impeller* tersebut dilakukan di dalam negeri, maka keuntungan tambahan dapat diperoleh karena harga di dalam negeri bisa mencapai sepertiga dari harga pembuatan *impeller* yang sama di negara asalnya. Berikut ini akan dipresentasikan hasil usaha modifikasi *fan* besar yang telah kami lakukan dengan hasil yang cukup signifikan baik dari sisi penurunan biaya operasi maupun investasi yang diperoleh.

Konsep dasar modifikasi impeller dan metodologi penelitian yang dilakukan

Dasar desain *impeller* umumnya menggunakan persamaan empirik yang diturunkan dari persamaan Stodola[26]. Namun karena persamaan tersebut menggunakan beberapa konstanta berdasarkan hasil eksperimen, maka peluang untuk meningkatkan efisiensi konversi energi

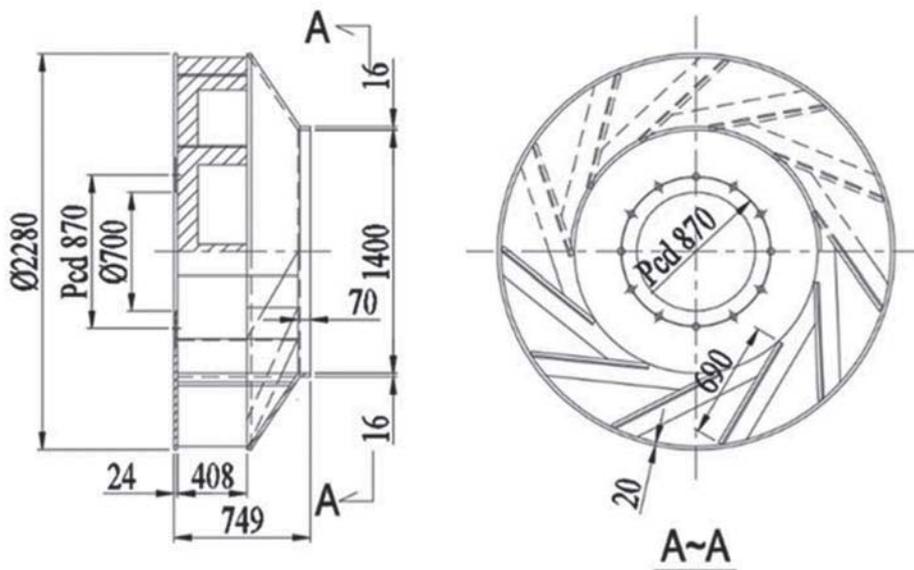
selalu masih ada. Selain itu dengan berkembangnya metode numerik berbasis CFD (*computational fluid dynamics*), perbaikan proses desain untuk memperoleh efisiensi tertinggi semakin berpeluang besar. Dasar perancangan dan metode numerik berbasis CFD ini juga kami terapkan dalam penelitian ini. Dengan basis pengembangan lebih lanjut persamaan Stodola dan ditambah aplikasi analisis CFD untuk menambah keyakinan perhitungan empiris, dua *fan* besar, *fan* A (*finish mill fan*) dan *fan* B (*raw mill fan*), dijadikan sebagai obyek studi. Data geometri dan spesifikasi teknik serta Gambar original kedua *fan* tersebut berturut-turut diberikan pada Tabel 6 dan 7 serta Gambar 42[27]. Inti dari usaha peningkatan efisiensi *impeller* adalah menurunkan kerugian energi yang terjadi, yang dipengaruhi banyak faktor seperti putaran kerja, rasio diameter *impeller* antara sisi keluar dan sisi masuk, jumlah sudu, lebar *impeller*, sudut sudu pada sisi masuk dan keluar *impeller*, bentuk sudu dan profil desain difusor.

Tabel 6: Data spesifikasi teknik Fan A dan Fan B obyek studi.

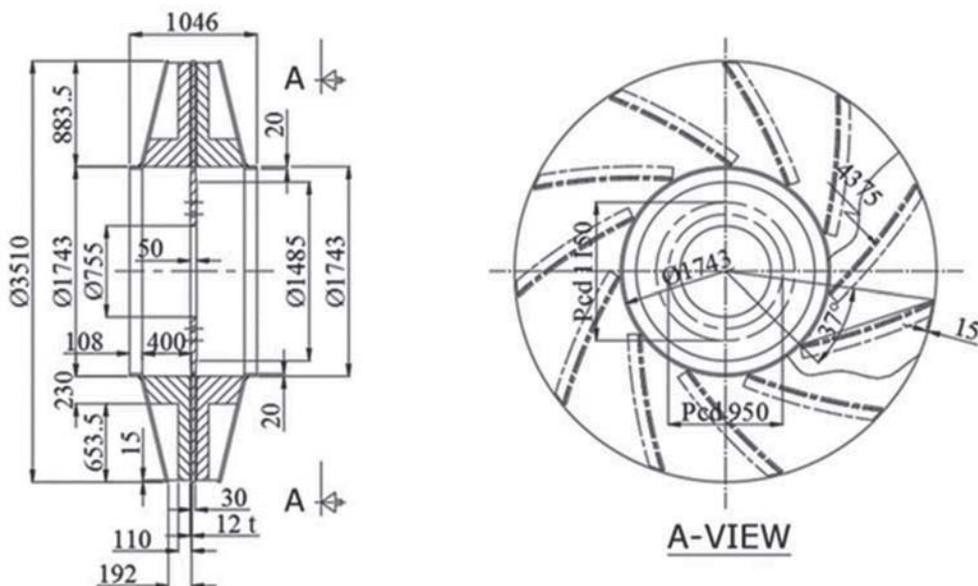
Parameter	Satuan	Fan A	Fan B
Diameter <i>impeller</i> sisi keluar (d_2)	mm	2280	3480
Diameter <i>impeller</i> sisi masuk (d_1)	mm	1400	1740
Lebar <i>impeller</i> sisi keluar (b_2)	mm	749	800
Lebar <i>impeller</i> sisi masuk (b_1)	mm	408	380
Jumlah sudu (z)	buah	11	11
Kecepatan putar (n)	rpm	980	924
Laju volume aliran desain (V)	m ³ /jam	334000	550000
Kadar debu maksimum pada gas	g/m ³	94	50
Temperatur gas desain (T_g)	°C	96	70

Tabel 7: Hasil pengujian kinerja fan sebelum dimodifikasi

Parameter	Satuan	Fan A	Fan B
Kecepatan putaran (n)	rpm	991	924
Laju volume aliran terukur (V)	m ³ /jam	323810	549000
Beda tekanan statik sisi keluar-masuk (Δp)	mBar	40,6	124
Densitas gas di sisi masuk (ρ)	kg/m ³	0,916	1,05
Temperatur gas terukur (T_g)	°C	94	70
Daya fluida terukur (N_{fluid})	kW	365,2	1891
Daya motor terukur (N_{motor})	kW	528,2	2660
Efisiensi fan (η_{tot})	%	72,77	74,83



(a) Fan A



(b) Fan B

Gambar 42: Gambar geometri sebelum modifikasi dari fan A dan Fan B

Geometri impeller modifikasi, estimasi kinerja dan hasil implementasi di lapangan.

Berdasarkan pedoman modifikasi *impeller* yang direkomendasikan seperti yang disebutkan pada persamaan semi empiris Stodola dan dibantu simulasi CFD, maka dilakukan modifikasi geometri Fan A dan B dengan batasan total berat *impeller* yang dimodifikasi tidak banyak berubah. Hasil modifikasi geometri optimum untuk kedua fan obyek studi ini disajikan pada Tabel 8, sedangkan estimasi kinerja berdasarkan formulasi empiris disajikan pada Tabel 9. Sedangkan geometri hasil modifikasi *impeller* dari kipas A dan B ini disajikan pada Gambar 43.

Tabel 8: Geometri *impeller* Fan A dan Fan B hasil modifikasi

Parameter	Satuan	Fan A	Fan B
Sudut sudu sisi masuk (β_1)	derajat ($^\circ$)	30	38
Sudut sudu sisi keluar (β_2)	derajat ($^\circ$)	43	56,2
Diameter sudu (D_b)	mm	3600	4000

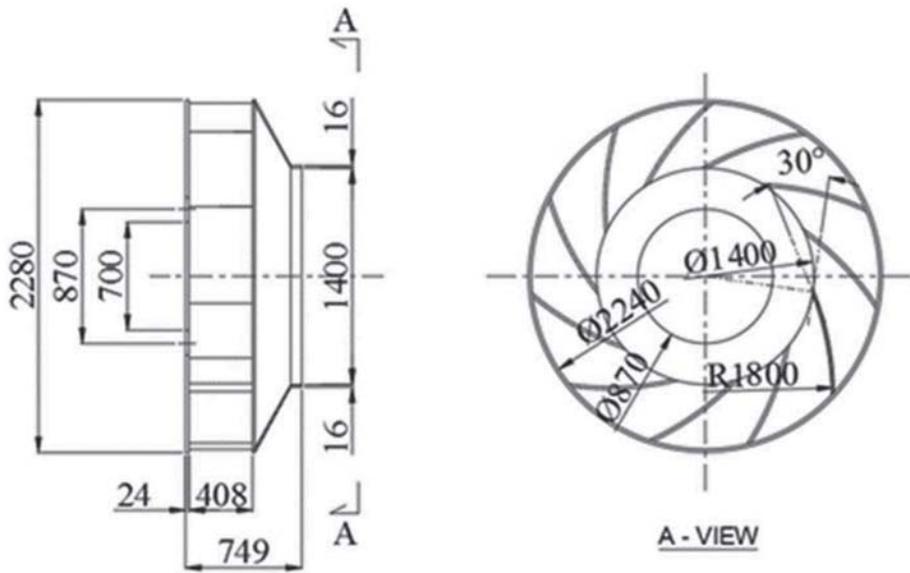
Tabel 9: Estimasi kinerja *impeller* hasil modifikasi

Parameter	Satuan	Fan A	Fan B
Laju volume aliran (V)	m ³ /jam	334700	550000
Beda tekanan statik hasil perhitungan (Δp)	mBar	41,5	121
Kecepatan putaran (n)	rpm	991	924
Daya terserap (N_{motor})	kW	514,2	2425
Efisiensi fan (η_{tot})	%	> 75	> 80

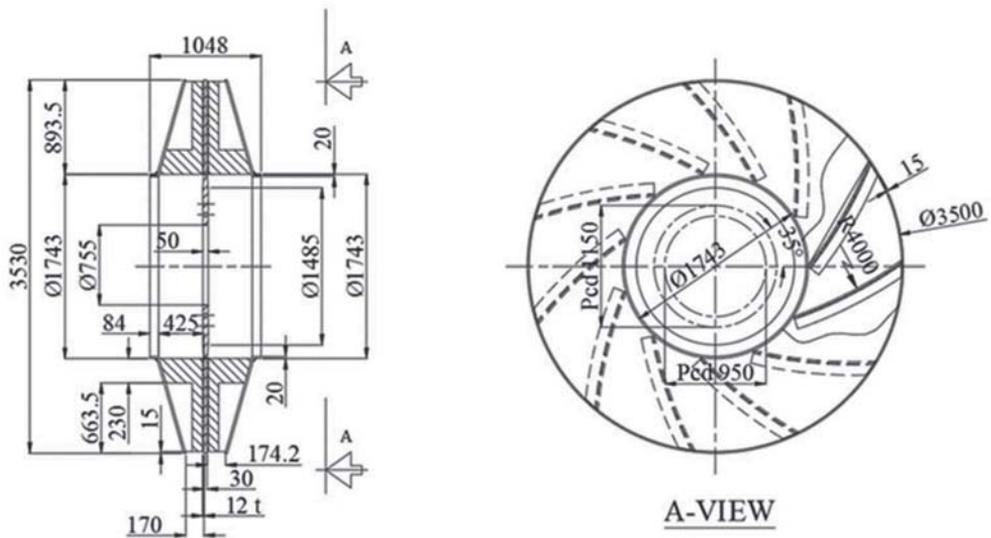
Hasil perhitungan dan perancangan geometri modifikasi kedua *impeller* akhirnya dibuat dan diimplementasikan sebagai pengganti dari *impeller* yang terpasang di lapangan. Kemudian tes *commissioning* kinerja dilakukan dengan mengukur parameter terkait kinerja antara lain daya fluida dan daya motor. Hasil pengujian lapangan diberikan dalam Tabel 10.

Tabel 10: Hasil pengukuran parameter kinerja fan A and B modifikasi

Parameter	Unit	Fan A	Fan B
Laju volume aliran (V)	m ³ /h	334700	567514
Beda tekanan statik (Δp)	mBar	41,6	121
Kecepatan putaran (n)	rpm	991	924
Daya fluida (N_{fluid})	kW	386,76	1907,50
Daya motor terserap (N_{motor})	kW	537	2527
Efisiensi fan (η_{tot})	%	75,81	79,71



(a) Fan A



(b) Fan B

Gambar 43: Gambar geometri hasil modifikasi *impeller* dari fan A dan Fan B

Hasil perbandingan terkait parameter kinerja fan antara sebelum dan sesudah modifikasi *impeller* menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi lebih dari 3% diperoleh. Untuk kasus fan A yang menggunakan penggerak motor listrik 700 kW, peningkatan efisiensi ini berkaitan dengan penurunan daya motor listrik mendekati 50 kW. Sedangkan untuk fan B dengan penggerak motor listrik 2,7 MW, peningkatan efisiensi lebih dari 4,5% berkaitan dengan penurunan daya motor lebih dari 130 kW. Hasil ini sangat signifikan terhadap upaya penurunan biaya operasional khususnya pada industri semen, salah satu industri intensif energi. Keuntungan lain yang diperoleh dari modifikasi desain ini *impeller* fan menjadi lebih panjang umurnya (2 tahun baru ganti, biasanya setiap 6 bulan untuk Fan A khususnya), biaya investasi berkurang banyak baik dari sisi harga investasi karena dibuat di dalam negeri dengan harga hampir sepertiga dibanding bila dibuat di pabrik pembuatnya dan frekuensi pergantiannya yang menjadi lebih jarang serta dari biaya operasi karena ada kenaikan efisiensi.

5.7. Aplikasi metode penyeimbangan aliran gas dan partikel masuk

***ID Fan* untuk menurunkan level vibrasi.**

Latar belakang masalah.

Vibrasi ID fan di pabrik semen yang berlebihan dapat menyebabkan penghentian produksi klinker. Vibrasi ini kebanyakan disebabkan oleh *coating* material padat pada sudu *impeller* yang tidak seimbang sebagai akibat aliran gas berdebu yang tidak seragam saat masuk ke dalam fan.

Frekuensinya bisa dua minggu sekali. Solusi umumnya adalah pembersihan *coating* dengan berbagai cara seperti penyemprotan dengan udara panas, uap dan air, atau menggunakan pasir. Akibatnya *impeller* aus dan bila tak merata keausannya sehingga vibrasi yang berlebihan terjadi, maka pabrik harus diberhentikan minimal setengah hari untuk pembersihan. Konsekuensinya adalah produksi terhenti, perlu pengembalian ke kondisi optimum yang bisa jadi lebih boros energi untuk mencapainya dan target produksi bisa tak tercapai.

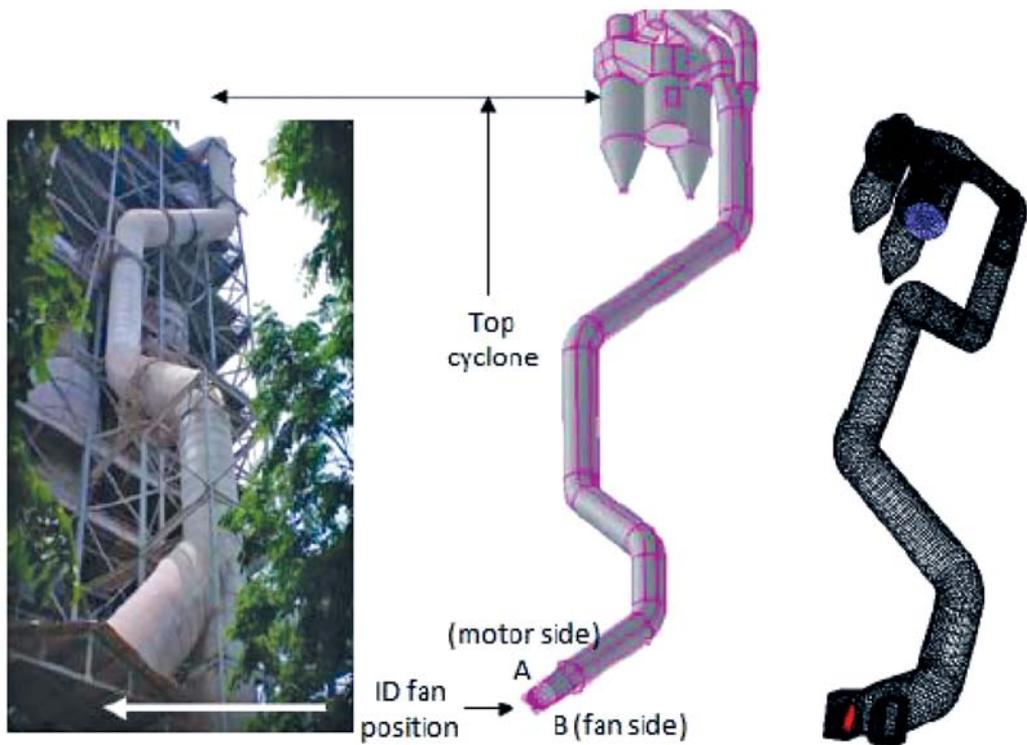
Metodologi, usulan solusi dan aplikasi.

Usulan solusi yang kami tawarkan adalah menyeragamkan aliran gas berdebu pada ke dua sisi masuk *impeller*, dengan memasang pelat penyearah aliran. Sedangkan metode analisisnya adalah simulasi CFD aliran fluida di sepanjang saluran dari *top cyclone* hingga sisi masukan *fan*. Simulasi CFD dilakukan untuk mengoptimasi geometri dan posisi pelat pengarah aliran yang akan dipasang. Untuk menyeimbangkan aliran diusulkan pemasangan pelat pengarah. Contoh aplikasi di pabrik semen Holcim di Cilacap dengan data operasi *fan* berikut:

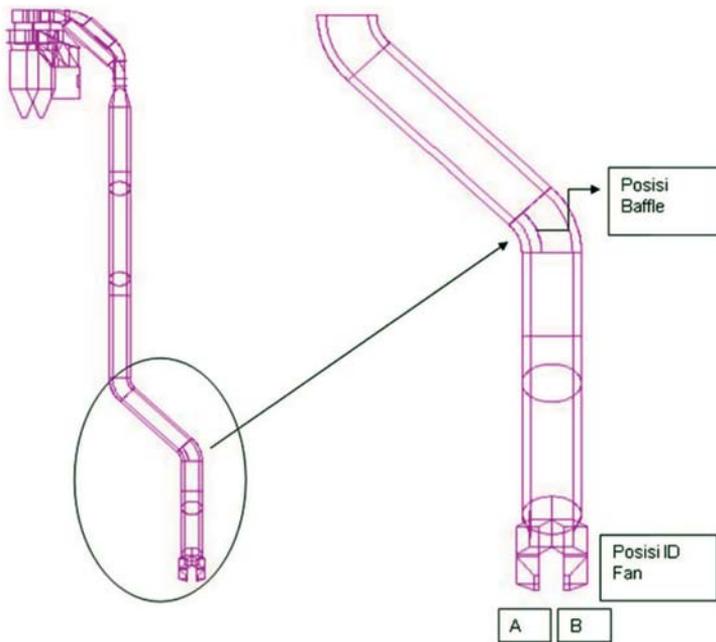
Kapasitas kiln	:	8097,9 TPD
Laju aliran gas	:	88,48 kg/s.
Debu dari siklon di bawahnya	:	12,28 kg/s.
Laju umpan kiln	:	79,1 kg/s.
Temperatur gas masuk siklon	:	550 °C.

Gambar instalasi *ID fan* terlihat pada Gambar 44. Gambar pelat pengarah dan penempatannya di saluran gas diberikan pada Gambar 45.

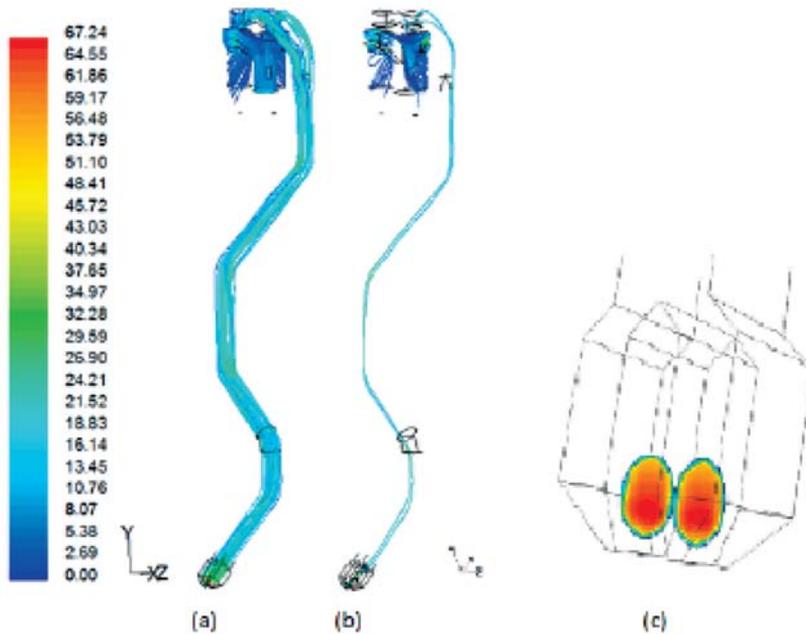
Hasil simulasi aliran aerosol diberikan pada Gambar 46. Dari hasil simulasi nampak bahwa pemasangan pelat pengarah aliran dapat menyeragamkan aliran masuk dan menyeimbangkannya saat memasuki *fan* dari kedua sisinya.



Gambar 44: Instalasi *ducting* pada sisi masuk *fan*

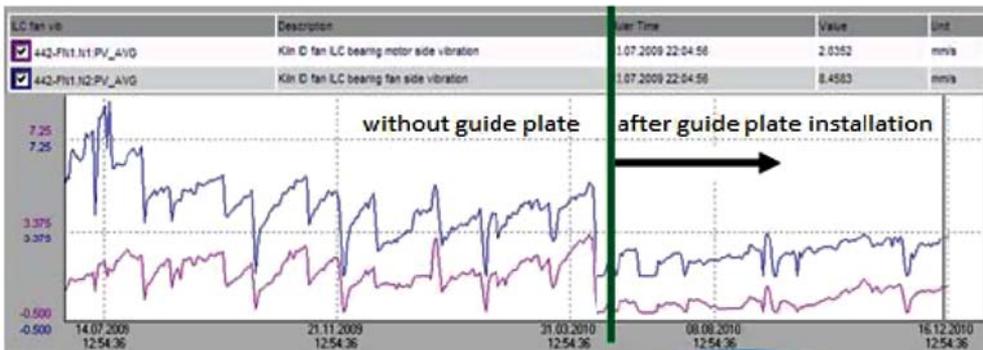


Gambar 45: Pemasangan pelat pengarah pada saluran gas menuju fan.



Gambar 46: Simulasi kecepatan aliran gas (a), partikel (b) dan pada sisi masuk fan(c) dalam m/s[28].

Kemudian usulan ini diaplikasikan dan pengukuran vibrasi dilakukan setelah *fan* dioperasikan kembali. Hasil pengukuran vibrasi ditunjukkan pada Gambar 47. Dari hasil pengukuran vibrasi *fan* tersebut nampak perbaikan yang diperoleh (terjadi penurunan intensitas vibrasi yang signifikan) sehingga akhirnya *fan* dapat beroperasi tanpa gangguan vibrasi hingga lebih dari 7 bulan[28].



Gambar 47: Hasil pengukuran vibrasi fan sebelum dan sesudah implementasi pelat pengarah.

6. PENUTUP

Aset produktif industri proses dan industri daya di Indonesia sangat besar. Saat ini industri-industri tersebut masih merupakan andalan untuk menghasilkan keuntungan dan memenuhi hajat hidup bangsa. Namun dengan kebijakan energi dan lingkungan sekarang dan beberapa tahun mendatang yang cenderung pro keberlanjutan, kemampuan beradaptasi pada masa transisi saat ini sangat diperlukan. Dukungan nasional kemampuan sumber daya insani beradaptasi agar efisiensi dan *availability* tetap terjaga dengan risiko yang terkendali sangat diperlukan. Kesiapan

dalam beradaptasi inilah yang tetap harus didorong dan didukung agar masa transisi berjalan dengan baik sehingga kebutuhan energi tetap terpenuhi dan risiko negatif terhadap lingkungan hidup minimum. Selain itu akan mendorong peningkatan manfaat institusi kita sebagai penghasil SDM dalam bidang teknologi.

Beberapa contoh kemampuan meningkatkan efisiensi dan beradaptasi terhadap perubahan sumber energi maupun tuntutan produksi dengan cara memodifikasi proses dan peralatan sehingga diperoleh biaya investasi dan waktu *tie-in* yang *reasonable* di beberapa industri di Indonesia telah diberikan. Hasil yang diperoleh menunjukkan keuntungan tidak hanya finansial namun juga dalam hal peningkatan kemampuan SDM nasional, penghematan devisa dan motivasi bagi karyawan. Tentu hal yang demikian harus senantiasa didorong agar selalu meningkat, karena masalah di masa depan akan lebih kompleks sebagai akibat keterbatasan sumber daya energi, kelestarian lingkungan yang harus dijaga dan *sustainability* dari perusahaan sendiri dalam berusaha agar tetap bisa mencetak keuntungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan rahmat Allah yang maha kasih dan sayang, alhamdulillah, tulisan ini selesai penulis tulis meski tentunya banyak kekurangan di sana sini. Rasanya bagi penulis, sulit menulis yang seperti ini tanpa dukungan banyak pihak. Oleh karena itu ucapan terima kasih yang tak ternilai wajib

penulis sampaikan kepada beberapa pihak berikut:

1. Yayasan Pengembangan Persemenan Indonesia (YPPI) yang dipimpin oleh Bapak Ir E.H.Nizar Datok Kayo (M58); Bapak alm. Ir Masri Saridam; Bapak Ir Darusman Mawardi (M68); Bapak Ir. Thariq Abudan, MM; dan Bapak Ir Sudaryanto, yang telah memberikan kesempatan seluas-luasnya kepada penulis dan tim untuk melakukan berbagai penelitian, mengembangkan metode dan perancangan perbaikan proses dan peralatan pabrik semen dan industri lain yang padat energi di Institut Semen dan Beton Indonesia.
2. Seluruh anggota tim penelitian dan pengembangan di Institut Semen dan Beton Indonesia antara lain Bapak Ir Arief Syahlan, MT. IPM; Ibu Alfi Amalia, ST., MT, IPM; Bapak Gusti Hidayat, SE; dan kawan-kawan yang telah bekerja sama dengan penulis dalam mengembangkan metode dan perbaikan proses serta peralatan pabrik semen utamanya dan industri lainnya yang padat energi. Dan yang tak kalah nilainya adalah selalu saling memotivasi bahwa kita, bangsa Indonesia ini, ada yang bisa berbuat sesuatu untuk peningkatan kinerja industri proses yang padat energi.
3. Manajemen pabrik-pabrik semen di Indonesia antara lain PT Semen Padang, PT Semen Gresik, PT Semen Tonasa, PT Semen Baturaja, PT Indocement Tungal Prakarsa, PT Semen Holcim Indonesia di Cilacap dan Banda Aceh yang sekarang berubah menjadi PT Solusi Bangun Indonesia, yang awalnya dimotori oleh

PT Semen Padang sebelum bergabung di Semen Indonesia Grup yang dimulai dengan kepercayaan dan keberanian Bapak Ir Johan Samudra, MM (M75); Bapak Ir Durain Parmanoan, MT (Teknik Kimia ITB), IPM; Ir Admartin, MM (TK 89); Ir. Teguh Sutrisno; alm. Ir Suharto dan kawan-kawan untuk memanfaatkan jasa kami dalam perbaikan kinerja pabrik semen Indarung yang akhirnya disusul oleh beberapa pabrik semen lainnya di atas karena melihat keberhasilan kami di Pabrik Indarung tersebut. Yang sangat membanggakan kami adalah keberanian beliau-beliau untuk merelakan pabriknya dijadikan **laboratorium riil** bagi kami. Hal ini tentunya wajib kami apresiasi yang sangat tinggi dan tak mungkin akan kami lupakan.

4. PT Krakatau Steel (pabrik Pengecoran Kontinyu Slab dan Hot Strip Mill), yang dimotori oleh Bapak Ir. Koesnohadi dan Bapak Ir. Thomas Tumangger (M 87), waktu itu, yang dengan keramahan dan keterbukaannya untuk mengaplikasikan desain *octangular mould* untuk pengecoran kontinyu slab serta *co-firing* pemanfaatan COG. Implementasi di lapangan riil dengan skala satu-satu dan berhasil merupakan kebanggaan kami, meskipun akhirnya yang pengecoran slab oktangularnya tidak dilanjutkan dalam skala industri yang besar.
5. PT PLN Pusat Penelitian dan Pengembangan serta Sektor Pembangkitan Tarahan, yang saat itu dimotori oleh alm. Bapak Ir. Sugiarto, MT dan Bapak Ir A. Bargowo Wahyu Jatmiko, mengajak

bersama-sama melakukan penelitian aplikasi *anti abrasion beam* di Boiler tipe *Circulated Fluidized Bed* (CFB). Kepercayaan dan kerjasama dalam memperbaiki kinerja pembangkit listrik tipe CFB ini sangat memotivasi kami untuk semakin percaya diri bahwa kita bisa, dan pantas kami apresiasi setinggi-tingginya.

6. Pihak-pihak lain yang menyusul mempercayai kami untuk menjadikan pabrik sebagai laboratorium riil di Indonesia antara lain Pabrik Nikel Antam di Pomalaa (PT Antam Persero) dan Pabrik Nikel di Soroako (PT Vale Indonesia), PT Pama Persada Nusantara dan lain-lain.

Terima kasih yang tak terhingga kami sampaikan dengan iringan doa semoga Industri proses di Indonesia menjadi semakin maju dan semakin banyak yang mau menerima kebiasaan kami untuk ikut andil memajukannya dalam menghadapi situasi transisi energi dan pelestarian lingkungan hidup yang ramah dan berkelanjutan. Sebagai penutup, kami berharap kritikan yang membangun dari para pembaca agar tulisan selanjutnya menjadi lebih baik dan semakin berguna bagi kemajuan dan kemandirian bangsa Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

1. The IPCC finalized the first part of the Sixth Assessment Report, *“Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021”*, 14th

Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC.

2. Paris Agreement, *“United Nations Framework Convention on Climate Change”*, 2015.
3. Bureau of Energy Efficiency (BEE), National Productivity Council (NPC) of India, Energy Audit, Certified Energy Manager, Certified Energy Auditor, 2020.
4. Prihadi Setyo Darmanto, Arief Syahlan, dan Koesnohadi, *“Model Matematis Dan Simulasi Perpindahan Panas Proses Pengecoran Kontinyu Baja Slab”*, Teknik Mesin, 2002.
5. Laporan penelitian *“Penggunaan Oktangular Mould untuk Mengatasi Corner Crack pada Slab Baja di PT Krakatau Steel”*, 2007.
6. Prihadi Setyo Darmanto, Arief Syahlan dan Alfi Amalia, *“Pemanfaatan Coke Oven Gas (COG) di Pabrik Baja lembaran Panas (HSM) PT Karakatau Steel (Persero) Tbk “*, LAPIITB, 2016.
7. Laporan persiapan commissioning, *“Draft Persiapan Commissioning Pemanfaatan Coke Oven Gas di Hot Strip Mill”*, PT Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon, 2019.
8. Laporan Karya Inovasi dan Presentasi *“Polisi tidur CFB Tarahan”*, Tim Inovasi Sektor Pembangkitan Tarahan, 2012.
9. Laporan Penelitian, *“Kajian Engineering Refractory PLTU Tarahan”*, LAPIITB, 2011.
10. Ariana Dwiputra, Iqbal Felani, Prihadi Setyo Darmanto dan Arief

Syahlan, *“CFD Modelling of Multiple Layer Anti Abrasion Beam Implementation at 100 MW Tarahan CFB Boiler”*, Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.

11. Prihadi Setyo Darmanto and Michael Arifyanto, *“Study and CFD Simulation of the Utilization of Waste Treatment Plant Gas Product as Co-Fuel of Steam Boiler in Ethanol Plant”*, International Conference on Cooling and Heating Technologies, Bandung, Indonesia, December 2010.
12. Duda, W.H., *“Cement Data Book I”*, 3rd edition, International Process in the Cement Industry, Bouverlag GmbH Weisbaden Und Berlin, 2000.
13. F. L. Smidth. *“Dry Process Kiln”*, FL Smidth Inc, USA, 2004.
14. P. S. Darmanto, I Made Astina, Alfian Kusuma Wardhana, Alfi Amalia and Arief Syahlan. *“New Method on the Evaluation of Detail Materials and Heat Flows for Single String Clinker Cement Plant”*, Acta Polytechnica, Czech Technical University in Prague, Vol. 61(1), pp. 199-218, 2020.
15. P. S. Darmanto, I. H. Muzakki, I M. Astina, F. B. Juangsa, A. Amalia and A. Syahlan, *“New Method on The Materials Flow Calculation for Double Strings SLCI Type Cement Plant (Part 1: The Whole Clinker Plant)”*, Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 53, No. 5, pp. 903-925, 2021.
16. P. S. Darmanto, I. H. Muzakki, I M. Astina, F. B. Juangsa, A. Amalia and A. Syahlan, *“New Method on The Materials Flow Calculation for Double*

Strings SLCI Type Cement Plant (Part 2: Suspension Preheater and Calciners)”, Journal of Engineering and Technological Sciences Vol. 53, No. 6, pp. 1038-1060, 2021.

17. Prihadi Setyo Darmanto dan Arief Syahlan, *“Modifikasi Top Cyclone Untuk Meningkatkan Kinerja Suatu Pabrik Semen”*, Jurnal Teknik Mesin, Vol. 21, No 1, April 2006
18. Prihadi Setyo Darmanto, I Made Astina, Arief Syahlan and Alfi Amalia, *“CFD Application on the Implementation of Enhancing Top Cyclone Separation Efficiency of a Cement Plant”*, The 11th Regional Conference on Environmental Engineering 2018 (RCEnvE-2018) Jointly held with The 3rd International Symposium on Conservation and Management of Tropical Lakes, Phnom Penh, Cambodia September 27th - 28th, 2018.
19. Prihadi Setyo Darmanto dan Joko Sarsetyanto, *“Kaji Eksperimental Dan Numerik Kinerja Cyclo Dust Filter”* Teknik Mesin, 2003
20. Prihadi Setyo Darmanto, I Made Astina and Arief Syahlan, *“Design and Implementation of De-Duster for Improving Fine Coal Quality in A Cement Plant”*, FTEC Proceedings, South Korea, 2009
21. Prihadi Setyo Darmanto and Tri Abdi Satryo, *“Burning Efficiency Improvement at Tonasa IV Calciner”*, International Cement Review, January 2005.
22. Prihadi Setyo Darmanto, *“Perbandingan Parameter Desain Dan Parameter Operasi Beberapa Kalsiner Pabrik Semen di Indonesia”*, Jurnal

Teknik Mesin, Vol. 21, No 2, Oktober 2006.

23. Laporan penelitian, "*Modifikasi geometri kalsiner SLC Pabrik Cilacap 2*", ISBI dan PT Semen Holcim Indonesia, 2012.
24. Laporan penelitian, "*Modifikasi Preheater Kiln Indarung V*", ISBI dan PT Semen Padang, 2007.
25. Prihadi Setyo Darmanto and Alfi Amalia, *Analysis of high clinker ratio of Portland Composite Cement (PCC)*, South African Journal of Chemical Engineering 34 (2020), pp. 116-126.
26. Eck B., 1975, "*Fans - Design & Operation of Centrifugal, Axial Flow and Cross Flow Fans*," Pergamon Press, New York.
27. Prihadi Setyo Darmanto, Arief Syahlan dan Michael Arifyanto, "*Redesign and Implementation of Big Fan Impellers for Enhancing Its Efficiency*", International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 246-255, 2022.
28. Prihadi Setyo Darmanto, Arief Syahlan and Alfi Amalia, "*Vibration Level Improvement of Id Fan in a Cement Plant Based on CFD Study of Incoming Dust Particles Streamline*", Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence, Volume 4 No 3 June (2016); pp: 23-29.

CURRICULUM VITAE



Nama : **PRIHADI SETYO DARMANTO**

Tanggal lahir : 19 Juni 1957

Alamat Kantor : Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik Mesin dan

Dirgantara, Institut Teknologi

Bandung

Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132

KEHIDUPAN KELUARGA

- Eny Marwanti (Istri)
- Ariana Darmanto (Anak 1) dan Dedy Dwi P. Eriyanto (menantu)
- Nisrina Setyo Darmanto (Anak 2) dan M Bintang H. Prayoga (menantu)
- Bagaskoro Darma Eriyanto (Cucu 1)
- Radityo Ardana Eriyanto (Cucu 2)

PENDIDIKAN

- *Sarjana teknik Mesin*, 1981
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung.
- *Diploma d'Etude Approfondies (DEA) on Energy Conversion*, 1987
Universite de Valenciennes et du Hainaut Cambresis, Perancis
- *Doctor on Energy Conversion System*, Juli 1990,
Universite de Valenciennes et du Hainaut Cambresis, Perancis

TRAINING DAN RISET LANJUTAN

- Heat Transfer on Cavity and Enclosure, TIT - Japan, 1991
- Joint research on Heat Transfer Applied on Air Conditioning System, NKK - Japan, 1993
- Energy Auditing for Industries AIT-Bangkok, 1995
- Energy Auditing on Cement Industry, Osaka - Japan, 2001
- Insinyur Profesional Utama (IPU), Persatuan Insinyur Indonesia, sejak 2017

JABATAN SEBAGAI DOSEN

- Assisten Ahli : 1981 -1990
- Lektor : 1990 - 1996
- Lektor Kepala 1996 - 2021
- Guru Besar, September 2021

PENGALAMAN DALAM PEMBIMBINGAN MAHASISWA

- Lebih dari 100 mahasiswa program Sarjana Teknik Mesin ITB
- Lebih dari 30 mahasiswa Program Magister Teknik Mesin dan Teknik Geotermal ITB
- 4 Program Doktor Teknik Mesin bidang Konversi Energi ITB

PENGALAMAN PENELITIAN PADA BIDANG

- *Frosting formation on tubular and flat heat exchanger.*
- *Experimental study of the application of swirling jet diffuser for distributing air in the air conditioning fields.*
- *Development of a software as a tool for energy auditing in cement industry.*

- *New method for the evaluation of heat and mass flow in the cement plants.*
- *Computational study of the flow and heat transfer mechanism in cement industry main equipment.*
- *Study on the possibility of energy saving in industries (Air conditioning, Cement and Power generation).*
- *Development of generic simulator as a tool for operator training for boiler, turbine, and coal mill.*
- *Performance enhancement of intensive energy process equipment.*
- *Development of collaboration research on improving equipment performance and opportunities for new and renewable energy utilization.*
- *Application of Calcium Looping on Cement Industries*

PENGALAMAN KOLABORASI RISET INTERNASIONAL

- *Sebagai koordinator Research collaboration with Kanda Laboratory, Department of International Development Engineering, Tokyo Institute of Technology, Japan berdasarkan MOU of Research collaboration between TIT and ITB No. 4039 / I1.B04 / LL / 2015 dan berjalan hingga 2019.*
- *Anggota Tim Riset kerjasama antara Institut Teknologi Bandung and Universite of Valenciennes and du Hainaut Cambresis France.*
- *Sebagai Advisor pada program double degree master program of Mechanical Engineering Department, Institut Teknologi Bandung dan Mechanical Engineering of Czech Technical University in Prague, Czech Republic.*

PENGALAMAN KOLABORASI DENGAN INDUSTRI:

1. Anggota dan Ketua Tim Ahli Bangunan Gedung bidang Mekanikal dan Elektrikal di DKI Jakarta
2. Senior Adviser di Institut Semen dan Beton Indonesia
3. Reviewer di *International Journal of Energy* dan *International Journal of Sustainable Cities and Society (Elsevier)*.

TANDA PENGHARGAAN:

1. Satya Lencana Karya Satya 15 tahun Pengabdian, Presiden RI
2. Finalis Peneliti Muda Indonesia, LIPI, 1994
3. Peneliti Utama Teladan, RUT VI Bidang Rekayasa, Kementerian Ristek, 2003
4. Satya Lencana 20 tahun, ITB
5. Penghargaan Pengabdian 25 Tahun dari Rektor ITB
6. Satyalencana Karya Satya 30 Tahun dari Presiden Republik Indonesia
7. Penghargaan Pengabdian 35 Tahun dari Rektor ITB

PUBLIKASI ILMIAH DALAM 5 TAHUN TERAKHIR

1. R. Horas Manahan Sinaga, **Prihadi Setyo Darmanto**, Andy Trirakhmadi, *Energy Optimization and Gas Removal Selection of Geothermal Power Plant*, International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA), Jakarta, Indonesia, 2017.
2. I. Made Astina, Ren Sokha, **Prihadi S. Darmanto**, *Study on Adsorption Refrigeration System Using Activated Carbon-Ethanol as Working Pair*, International Journal of Thermal & Environmental

Engineering, Vol. 15, No. 2 (2017) pp. 143-150.

3. I. Made Astina, M. Irfan Zidni, Hary R. Hasugian, and **Prihadi S. Darmanto**, *Experiment of adsorption refrigeration system with working pairs of difluoromethane and activated carbon modified by sulfuric and nitric acids*, International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST) 2017, AIP Conference Proceedings 1984, 020015 (2018); doi: 10.1063/1.5046599
4. **P. S. Darmanto**, N. J. Sutanto, I. M. Astina, and A. Marjianto, *Study of the district cooling implementation opportunity in Jakarta*, International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST) 2017, AIP Conference Proceedings 1984, 020015 (2018); doi: 10.1063/1.5046599.
5. Huy Visal, **Prihadi Setyo Darmanto**, I Made Astina, *Comparative Study of Using Solar Water Heater and Heat Pump Water Heater in a Hospital Building - Jakarta*, The 11th Regional Conference on Environmental Engineering 2018 (RCEnvE-2018) Jointly held with The 3rd International Symposium on Conservation and Management of Tropical Lakes, Phnom Penh, Cambodia September 27th-28th, 2018.
6. I Made Astina and **Prihadi Setyo Darmanto**, *Challenge of green building for energy and water savings in Indonesia*, The 11th Regional Conference on Environmental Engineering 2018 (RCEnvE-2018) Jointly held with The 3rd International Symposium on Conservation and Management of Tropical Lakes, Phnom Penh, Cambodia September 27th-28th, 2018.
7. Seng Sunhor, I Made Astina, **Prihadi Setyo Darmanto**, *Sustainable Co-generation of Hot Water production for a Hotel Building*

Consumption in Jakarta, The 11th Regional Conference on Environmental Engineering 2018 (RCEnvE-2018) Jointly held with The 3rd International Symposium on Conservation and Management of Tropical Lakes, Phnom Penh, Cambodia September 27th-28th, 2018.

8. **Prihadi Setyo Darmanto**, I Made Astina, Arief Syahlan and Alfi Amalia, *CFD Application on the Implementation of Enhancing Top Cyclone Separation Efficiency of a Cement Plant*, The 11th Regional Conference on Environmental Engineering 2018 (RCEnvE-2018) Jointly held with The 3rd International Symposium on Conservation and Management of Tropical Lakes, Phnom Penh, Cambodia September 27th-28th, 2018.
9. Bhakti Nuryadin, **Prihadi Setyo Darmanto**, I Made Astina, *Experimental Study of Water Jet Ejector for Geothermal Power Plant*, 7th ITB International Geothermal Workshop, Indonesia, March 21-22, 2018.
10. Kazuki Yamaguchi, Yukihiro Kikegawa, Alvin Christopher G. Varquez, and **Prihadi Setyo Darmanto**, *Reduction Effect of DALY of Sleep Disturbance and Fatigue by Air Conditioner Evaluation in Jakarta, Indonesia*, Journal of Life Cycle Assessment Japan · January 2019, DOI: 10.3370/lca.15.2
11. Koemleng Kan, I Made Astina and **Prihadi Setyo Darmanto**, *Simultaneous optimization of saturation equations for two hydrocarbons and four hydro-fluoroolefins refrigerants*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 715 (2020) 012069 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/715/1/012069.
12. Naufal Nandaliaryad, Dimas Taha Maulana, **Prihadi Setyo**

- Darmanto**, *Study of Development Scenarios for Bottoming Unit Binary Cycle to Utilize Exhaust Steam from Back Pressure Turbine Geothermal Power Plant*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 417, (2020), IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/417/1/012017.
13. Reza Setiawan, František Hrdlička, Prihadi Setyo Darmanto, Vera Pangni Fahriani, Suciani Rahma Pertiwi, *Thermal Design Optimization of Shell-and-Tube Heat Exchanger Liquid to Liquid to Minimize Cost using Combination Bell-Delaware Method and Genetic Algorithm*, Journal of Mechanical Engineering Science and Technology (JMEST), Vol. 4 (1), 2020, pp. 14-27.
 14. Firman Bagja Juangsa, **Prihadi Setyo Darmanto**, Muhammad Aziz, *CO₂-free power generation employing integrated ammonia decomposition and hydrogen combustion-based combined cycle*, Thermal Science and Engineering Progress 19 (2020).
 15. **Prihadi Setyo Darmanto** and Alfi Amalia, *Analysis of high clinker ratio of Portland Composite Cement (PCC)*, South African Journal of Chemical Engineering 34 (2020), pp. 116–126.
 16. Bhakti Nuryadin, **Prihadi Setyo Darmanto**, I Made Astina, Suyanto, *Study of Implementation of Water Jet Ejector as a Gas Removal System for a Case Study of BPPT 3 MW Geothermal Power Plant*, World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, October, 2021.
 17. A. Marjianto, Haftirman, and **P. S. Darmanto**, *Energy and Cost Saving of Air Conditioning System Using Magnetic Bearing for a Hotel in Jakarta*, International Journal of Innovation in Mechanical Engineering & Advanced Materials (IJIMEAM), Vol.3, No.1, 2021. pp. 1-11.

18. Vera Pangni Fahriani, Reza Setiawan, František Hrdlicka, **Prihadi Setyo Darmanto**, *Thermal Design Optimization of No Phase Change Shell-and-Tube Heat Exchanger using Particle Swarm Algorithm*, Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering (JEMMME), Vol. 6 (2), 2021, pp. 83-96.
19. Prajamukti Ediatmaja, **Prihadi Setyo Darmanto** and Dimas Taha Maulana, *Performance Evaluation of Geothermal Power Production Using EES (Case Study Ulumbu Geothermal Power Production Unit 4 East Nusa Tenggara, Indonesia)*, ITB International Geothermal Workshop 2020, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 732 (2021).
20. **P. S. Darmanto**, I. H. Muzakki, I M. Astina, F. B. Juangsa, A. Amalia and A. Syahlan, *New Method on The Materials Flow Calculation for Double Strings SLCI Type Cement Plant (Part 1: The Whole Clinker Plant)*, Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 53, No. 5, 2021, pp. 903-925.
21. **P. S. Darmanto**, I. H. Muzakki, I M. Astina, F. B. Juangsa, A. Amalia and A. Syahlan, *New Method on The Materials Flow Calculation for Double Strings SLCI Type Cement Plant (Part 2: Suspension Preheater and Calciners)*, Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 53, No. 6, 2021, pp. 1037-1060.
22. **P. S. Darmanto**, I Made Astina, Alfian Kusuma Wardhana, Alfi Amalia and Arief Syahlan, *New Method on the Evaluation of Detail Materials and Heat Flows for Single String Clinker Cement Plant*, Acta Polytechnica, Czech Technical University in Prague, Vol. 61, No.1, 2021, pp. 199-218.
23. **Prihadi Setyo Darmanto**, Arief Syahlan dan Michael Arifyanto,

Redesign and Implementation of Big Fan Impellers for Enhancing Its Efficiency, International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 15, No. 2, 2022, pp. 246-255.

24. Firman Bagja Juangsa, Axl Sabilirasyad Cezeliano, **Prihadi Setyo Darmanto**, Muhammad Aziz, *Thermodynamic analysis of hydrogen utilization as alternative fuel in cement production*, South African Journal of Chemical Engineering 42, 2022, pp. 23-31.
25. Putri Sundari, **Prihadi Setyo Darmanto**, Bayu Rudiyanto, and Miftah Hijriawan, *Utilization of Excess Steam from a Vent Valve in a Geothermal Power Plant*, Energy Nexus, Vol 7, 2022.



Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132

Telp. (022) 2512532, E-mail: sekretariat-fgb@pusat.itb.ac.id



 fgb.itb.ac.id

 [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb)

 [FGB_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)

 [@fgbitb_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920)

 [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)