

ANALISA KEANDALAN UNTUK MENETAPKAN STRATEGI PEMELIHARAAN MENGGUNAKAN SYSTEM EQUIPMENT RELIABILITY PRIORITIZATION: STUDI KASUS DI INDUSTRI SEMEN

Dwi Agus Arvianto

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: arvianto.da@gmail.com

Abstrak

Industri semen Indonesia mengalami pertumbuhan yang signifikan pasca-COVID-19, membuka peluang permintaan yang harus dimanfaatkan. Untuk mempertahankan posisi pasar, perusahaan perlu menerapkan strategi peningkatan operational excellence pada produksi, terutama dalam menjaga kelancaran Kiln pada sistem pyroprocessing. Kiln berperan penting dalam proses produksi semen, dan gangguan pada sistem ini dapat menyebabkan kerugian. Meskipun perusahaan telah menerapkan pemeliharaan preventif yang terjadwal, breakdown tetap terjadi sebelum jadwal pemeliharaan dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan strategi pemeliharaan yang lebih efektif pada pyroprocessing system PT. DEF. Metode yang digunakan dimulai dengan menentukan maintenance priority index (MPI) untuk peralatan utama di pyroprocessing menggunakan metode System Equipment Reliability Prioritization (SERP). Setelah itu, dilakukan pengujian distribusi data dan analisis keandalan sisa peralatan. Optimasi biaya perawatan dilakukan untuk mencapai target kinerja perusahaan, yang berfokus pada pengurangan biaya dan peningkatan keandalan sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peralatan dengan MPI tertinggi, yang berada dalam sepuluh besar, dapat mencapai target keandalan sistem sebesar 0,9. Penelitian ini juga menghasilkan strategi pemeliharaan yang tepat dengan interval waktu pemeliharaan yang teroptimasi untuk masing-masing peralatan, yang diharapkan dapat mengurangi breakdown dan gangguan produksi. Dengan penerapan strategi pemeliharaan yang lebih tepat, diharapkan keandalan sistem pyroprocessing PT. DEF dapat meningkat, dan proses produksi semen dapat berjalan lebih lancar dengan biaya yang lebih efisien.

Kata kunci: maintenance strategy, pyroprocessing, maintenance priority index, system equipment reliability prioritization.

Abstract

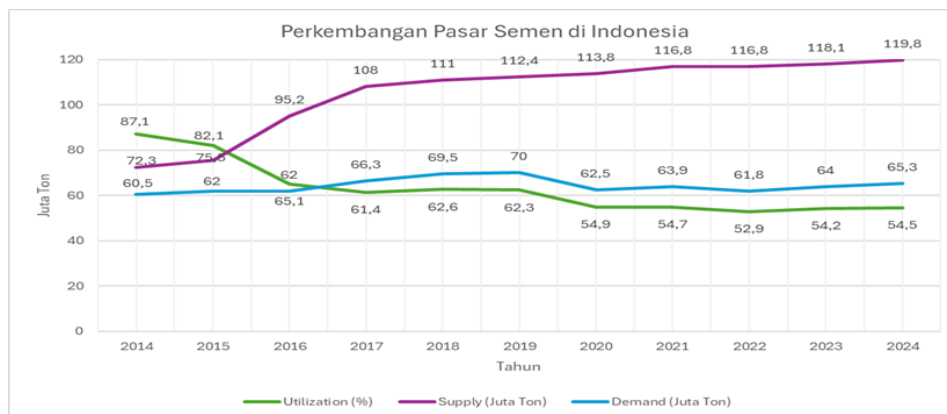
Indonesia's cement industry experienced significant growth post-COVID-19, opening up demand opportunities that must be capitalized on. To maintain its market position, the company needs to implement a strategy to improve operational excellence in production, especially in maintaining the smooth running of the Kiln in the pyroprocessing system. Kilns play an important role in the cement production process, and disruptions in this system can cause losses. Although the company has implemented scheduled preventive maintenance, breakdowns still occur before scheduled maintenance is performed. This research aims to develop a more effective maintenance strategy for PT DEF's pyroprocessing system. The method used starts with determining the maintenance priority index (MPI) for the main equipment in pyroprocessing using the System Equipment Reliability Prioritization (SERP) method. After that, data distribution testing and analysis of the remaining equipment reliability are carried out. Maintenance cost optimization was performed to achieve the company's performance targets, which focused on reducing costs and improving system

reliability. The results show that the equipment with the highest MPI, which is in the top ten, can achieve the system reliability target of 0.9. This research also resulted in an appropriate maintenance strategy with optimized maintenance time intervals for each equipment, which is expected to reduce breakdowns and production disruptions. With the implementation of a more appropriate maintenance strategy, it is expected that the reliability of PT DEF's pyroprocessing system can increase, and the cement production process can run more smoothly at a more efficient cost.

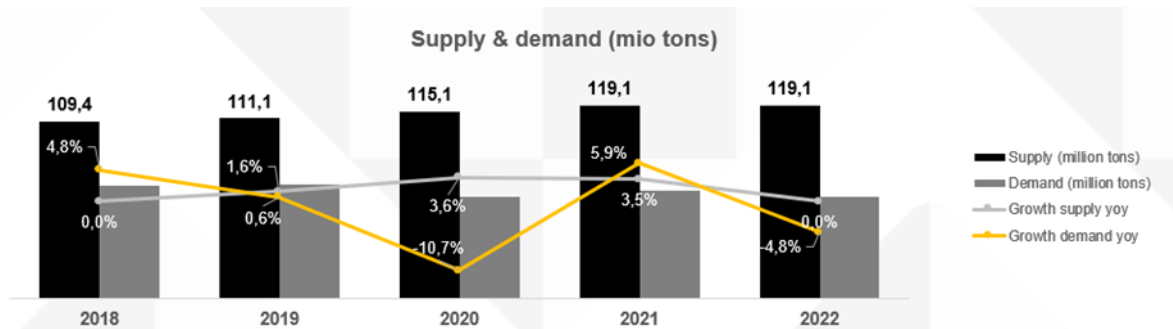
Keywords: maintenance strategy, pyroprocessing, maintenance priority index, system equipment reliability prioritization.

Pendahuluan

Industri semen merupakan salah satu industri strategis yang sangat penting dalam pembangunan infrastruktur di dalam suatu negara. PT DEF merupakan salah satu produsen semen di Indonesia dengan kapasitas produksi terpasang 56,5 juta ton per tahun, memiliki 9 lokasi pabrik terintegrasi sebagai operating company di Indonesia. Pemerintah Indonesia saat ini fokus dengan Pembangunan infrastruktur sehingga industri semen berkontribusi besar dalam tujuan tersebut. Kapasitas Pabrik Semen terpasang di Indonesia sebesar 118 juta ton sementara permintaan semen domestik sebesar 64 juta ton maka kondisi telah terjadi over supply semen. Dengan kondisi tersebut Pabrik Semen yang memiliki kondisi yang handal, biaya produksi yang efisien serta kualitas produk yang baik menjadi tuntutan yang harus dicapai oleh pabrik semen untuk memenangkan kompetisi. Hal ini sangat penting terutama pada saat ini dimana permintaan semen mulai ada sedikit peningkatan permintaan pasar domestik pasca pandemi COVID 19, meskipun masih terjadi over supply. Gambar 1. Demand, supply dan utilisasi pabrik semen di Indonesia, menunjukkan tren permintaan semen yang tidak sebanding dengan supply, sehingga utilisasi pabrik juga mengikuti trending permintaan semen yang artinya perbandingan antara produksi aktual dengan produksi potensial desain pabrik tidak maksimal (Kurian et al., 2020; Nugroho, 2021; Patil & Bewoor, 2022).



Gambar 1. Demand, supply dan utilisasi pabrik semen di Indonesia

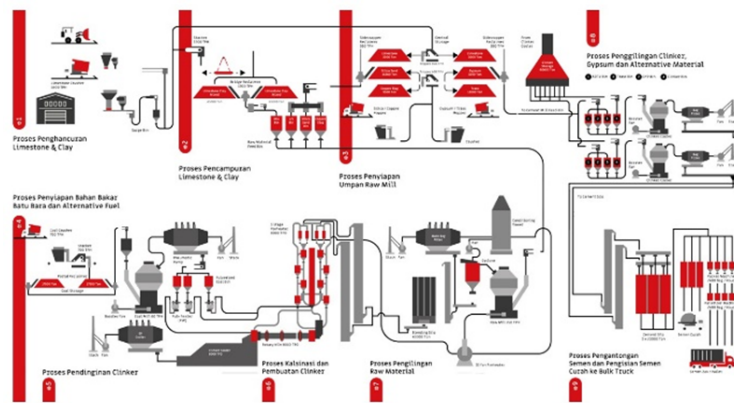


Gambar 2. Supply & Demand Growth (2018-2022)

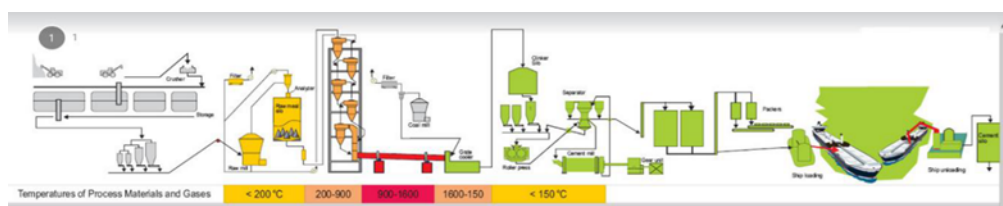
Sedangkan Gambar 2. Supply & demand growth (2018-2022) semen nasional dimana growth demand langsung turun drastis di tahun 2020, dengan demikian maka hal ini memperkuat akan kebutuhan biaya produksi yang efisien, agar bisa memenangkan persaingan. Dengan kondisi tersebut untuk bisa bersaing diperlukan pabrik yang beroperasi dengan biaya produksi yang efisien. Biaya produksi yang efisien bisa diartikan sebagai produksi sebanyak-banyaknya dengan biaya seminimal mungkin yang berkelanjutan (low cost sustainable). Produksi sebanyak-banyaknya bisa dilakukan jika pabrik bisa beroperasi secara kontinu tanpa mengalami stop yang tidak terencana, terlebih pabrik semen merupakan proses kontinu yang beroperasi selama 24 jam (Darestani et al., 2020; Hartini et al., 2018).

Gambar 3. menunjukkan proses produksi semen terdapat yang mempunyai beberapa tahapan sebelum menjadi semen. Tahap pertama yaitu persiapan bahan baku, dimana bahan baku utama untuk produksi semen adalah batu kapur dan tanah liat serta pasir silika, bijih besi, dan material ketiga atau material alternatif lainnya. Batu kapur dan tanah liat diperoleh dari aktivitas penambangan. Tahap kedua yaitu proses penggilingan bahan baku, dimana bahan baku yang telah ditambang dihancurkan dan dihaluskan menjadi serbuk halus menggunakan crusher dan mill. Proses ini dapat melibatkan beberapa tahap pengolahan untuk memastikan ukuran partikel yang tepat sesuai dengan kualitas produk yang diinginkan. Tahap ketiga yaitu proses pencampuran dan penggilingan. Bahan baku yang telah diolah, selanjutnya akan dicampur dengan komposisi yang tepat untuk membentuk raw material. Campuran ini kemudian digiling menjadi bubuk halus dalam roller mill. Dalam roller mill terbagi menjadi vertical roller mill sebagai penggiling bahan baku menjadi bubuk halus dan blending silo sebagai tempat bahan baku dicampur dalam komposisi yang tepat sebelum disalurkan dalam proses selanjutnya. Tahap keempat yaitu Pyroprocessing, dimana material dari blending silo akan dibakar dalam Preheater dan kiln dengan menggunakan bahan bakar seperti batu bara dan bahan bakar alternatif lainnya. Proses pembakaran ini mengubah raw material menjadi klinker yang melalui proses pemanasan awal di Preheater dan selanjutnya material dibakar di rotary kiln dengan temperature 14000C secara kontinu selama 24 jam sepanjang tahun sesuai rencana produksi. Output dari rotary kiln berupa lava yang mengalir kemudian didinginkan secara mendadak sehingga berbentuk granular yang biasa dikenal dengan klinker. Tahap kelima yaitu penggilingan klinker dengan beberapa tambahan material lain sesuai dengan jenis semen yang diinginkan, hasil dari tahap kelima adalah serbuk semen yang akan disimpan dalam silo semen. Tahap keenam yaitu proses pengemasan. Semen didalam Silo akan dikemas dalam kantong menggunakan packing machine atau disimpan bentuk curah dalam silo sebelum dikirimkan kepada distributor.

Analisa Keandalan Untuk Menetapkan Strategi Pemeliharaan Menggunakan System Equipment Reliability Prioritization: Studi kasus di Industri Semen

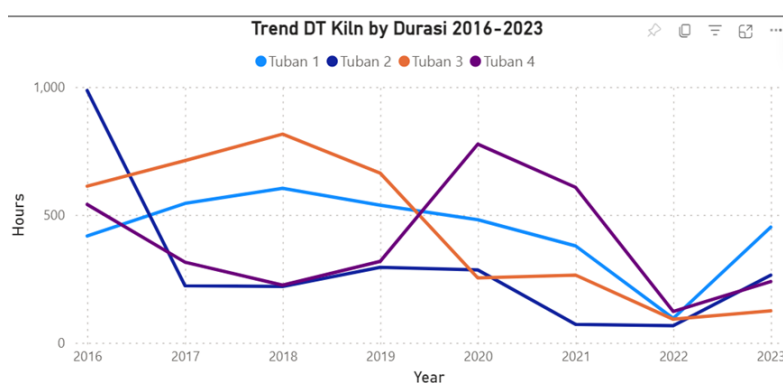


Gambar 3. Proses Produksi Semen di PT DEF

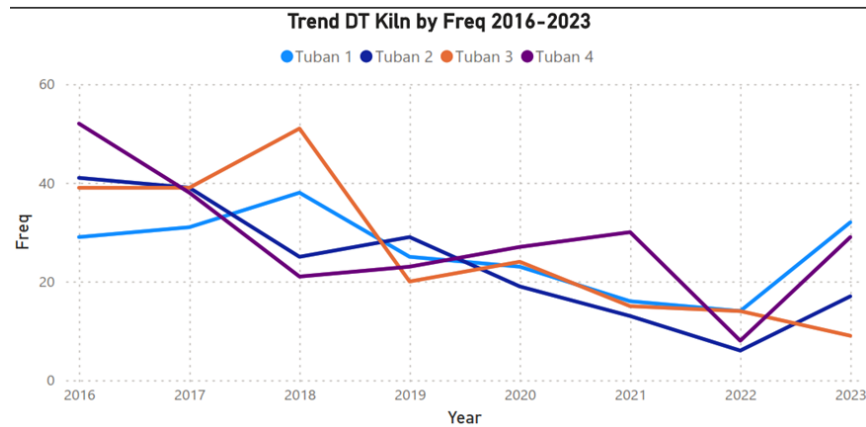


Gambar 4. Temperatur Pada Proses Pembuatan Semen

Pada proses pembuatan semen memerlukan temperatur operasi yang ditunjukkan pada Gambar 4, mulai dari penggilingan Raw Material di Roller mill yang mempunyai temperature < 200°C, sampai dengan tahapan proses kalsinasi dan pembuatan klinker di Preheater dan Rotary kiln yang memerlukan temperature sampai dengan 1400°C sehingga membutuhkan bahan bakar untuk mencapai temperature operasional tersebut. Ketika terjadi kerusakan peralatan pada proses ini, akan membutuhkan waktu start up kembali atau proses heating up dengan menggunakan bahan bakar Ido. Untuk mengurangi gangguan kerusakan peralatan utama diperlukan suatu langkah pencegahan agar tidak terjadi kegiatan pemeliharaan yang bersifat breakdown yang mana menyebabkan pabrik berhenti berproduksi dan membutuhkan start up dari awal.



Gambar 5. Durasi (hours) downtime Kiln di PT. DEF (2016-2023)



Gambar 6. Frekuensi downtime Kiln di PT. DEF (2016-2023)

Sumber: Data Laporan Operasi Pabrik Semen, 2024

Pada Gambar 5. dan 6. terdapat data durasi dan frekuensi downtime Kiln di PT. DEF pada tahun 2016 sampai dengan 2023. Dari data tersebut menunjukkan terjadinya unplan shutdown pada Pabrik PT DEF yang tertinggi mencapai 985 jam per tahun dan yang terendah 66,5 jam per tahun serta frekuensi tertinggi mencapai 52 kali/tahun dan terendah 8 kali/tahun. Data tersebut akan digunakan untuk menganalisis performa perawatan di Pabrik untuk mengidentifikasi subsystem mana yang perlu diperbaiki serta merencanakan pemeliharaan secara tepat untuk meminimalkan downtime di masa depan sehingga dapat meningkatkan produktifitas Plant. Kerusakan yang menyebabkan downtime dapat dicegah dengan maintenance strategy yang baik, mulai dari pemeliharaan autonomous, pemeliharaan preventive, pemeliharaan predictive dan overhaul. Manajemen pemeliharaan bertujuan untuk meningkatkan efektivitas peralatan secara keseluruhan dan produktivitas sistem apa pun (Choudhary et al., 2019). Perusahaan ini telah memiliki jadwal pemeliharaan preventive, namun masih sering terjadi kegagalan sebelum dilakukan pemeliharaan pencegahan (Jatmiko, 2019). Oleh karena itu diperlukan penelitian untuk menentukan strategi pemeliharaan yang tepat agar keandalan peralatan terutama dapat terjaga, sehingga tidak mengganggu operasional pabrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan strategi pemeliharaan yang lebih efektif pada pyroprocessing system PT. DEF.

Metode Penelitian

Setelah melakukan studi lapangan, identifikasi masalah dan studi pustaka, maka tahap selanjutnya adalah merumuskan pokok permasalahan yang dihadapi dan tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini. Dari data downtime Kiln pada lampiran A akan diolah sesuai diagram alir penelitian (Gambar 3.1) akan didapatkan nilai top ten dari Maintenance Priority Index (MPI) pada peralatan kritikal di pyroprocessing system dengan metode SERP, nilai keandalan pada komponen subsystem peralatan kritikal, nilai keandalan pada masing- masing komponen subsystem, dan strategi pemeliharaan sistem dengan dasar nilai keandalan komponen subsystem

Untuk mendapatkan tujuan tersebut, perencanaan pemeliharaan yang tepat pada peralatan utama diperlukan sehingga keandalan dapat tercapai maksimal . Pada penelitian ini akan menggunakan metode System Equipment Reliability Prioritization (SERP) untuk menentukan peralatan kritis pada Pyroprocessing system dan mendapatkan Top Ten nilai Maintenance Priority Index (MPI) untuk peralatan kemudian menganalisa keandalan

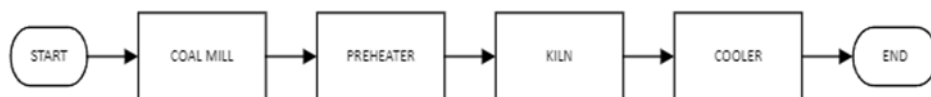
yang berfungsi dalam menetapkan strategi pemeliharaan guna menjaga keandalan dari peralatan utama.

Dalam perhitungan MPI secara formula diperlukan beberapa aspek atau kategori System criticality ranking (SCR) antarlain; Operational cost, Process Throughput / Availability (PT), Product Quality (PQ, Safety (SF), Regulatory / Environmental Compliance (RC), Plant Efficiency (PE), Recovery Time (RT) sehingga bisa mewakili kondisi peralatan dari berbagai aspek.

Hasil dan Pembahasan

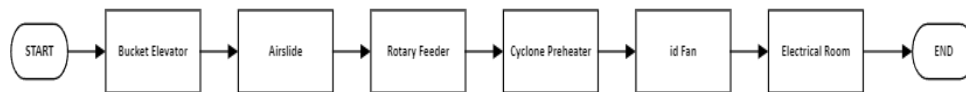
Identifikasi Struktur Sistem dan Pembuatan diagram blok keandalan (RBD)

Proses produksi semen modern sangat bergantung pada sistem interlocking yang kompleks, di mana setiap tahap produksi saling terkait dan bergantung satu sama lain (Mappanganro, 2020; Putri & Rimantho, 2022; Riskiah & Safaruddin, 2022; Saputro & Purwanggono, 2016; Yuandi & Safaruddin, 2022). Sistem ini dirancang untuk memastikan kontinuitas proses, namun juga berfungsi sebagai mekanisme pengaman untuk mencegah terjadinya kerusakan yang lebih parah akibat kegagalan pada salah satu komponen. Interlocking ini bekerja dengan cara menghentikan secara otomatis proses produksi jika terdeteksi adanya anomali atau kondisi yang tidak normal, sehingga mencegah terjadinya kerusakan yang lebih luas pada peralatan dan menghindari potensi bahaya bagi pekerja. Berikut adalah diagram blok keandalan untuk area Pyroprocessing.



Gambar 7. Diagram Block keandalan Pyroprocessing

Pada subsystem Pyroprocessing yaitu Coal mill, Preheater, Kiln dan Cooler mempunyai blok keandalan yang juga mempengaruhi blok keandalan system pyroprocessing secara keseluruhan. Berikut adalah diagram blok masing-masing subsystem.



Gambar 8. Diagram Block keandalan Subsystem Preheater



Gambar 9. Diagram Block keandalan Subsystem Kiln



Gambar 10. Diagram Block keandalan Subsystem Cooler



Gambar 11. Diagram Block keandalan Subsystem Coal mil

Suatu sistem yang dimodelkan dengan susunan seri mempunyai arti komponen peralatan yang ada didalam sistem itu harus bekerja dan berfungsi seluruhnya agar sistem tersebut sukses dalam menjalankan fungsinya. Atau dengan kata lain bila ada satu peralatan saja yang tidak bekerja, maka akan mengakibatkan sistem itu gagal menjalankan fungsinya. Apabila suatu sistem terdiri dari beberapa peralatan yang disusun seri, maka keandalan dari sistem tersebut merupakan hasil perkalian masing-masing komponen penyusunnya.

Diagram blok keandalan merupakan representasi visual dari struktur sistem produksi semen yang menunjukkan hubungan antar komponen dan subsistem. Dengan menggunakan diagram ini, kita dapat mengidentifikasi dengan jelas titik-titik kritis dalam proses produksi yang memiliki potensi kegagalan tinggi. Selain itu, diagram ini juga dapat digunakan untuk menganalisis dampak dari kegagalan suatu komponen terhadap keseluruhan sistem. Dengan demikian, diagram blok keandalan menjadi alat yang sangat berguna dalam perencanaan pemeliharaan, penggantian komponen, dan peningkatan keandalan sistem secara keseluruhan.

System & Equipment Reliability Prioritization (SERP)

Perencanaan Pertahanan terhadap Kegagalan (Failure Defense Planning / FDP) adalah sebuah metode yang digunakan untuk memastikan kinerja peralatan tetap optimal dengan perencanaan perawatan yang matang. FDP menentukan pentingnya setiap sistem dan peralatan berdasarkan berbagai faktor seperti biaya, ketersediaan, keamanan produksi, lingkungan, kualitas produk, dan aspek bisnis lainnya. Tahap awal FDP adalah Prioritas Keandalan Sistem & Peralatan (SERP). Melalui SERP, kita bisa menentukan urutan prioritas perawatan atau nilai Indeks Prioritas Perawatan (MPI).

Sebelum menentukan MPI dilakukan pengumpulan data kerusakan seperti ditunjukkan pada Lampiran B data downtime kiln kemudian dilakukan perhitungan data MTBF. Untuk menentukan MPI dari data downtime kiln tersebut, dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan 1. Sedangkan untuk menentukan kriteria penilaian atau pembobotan parameter PT, OC, PQ, SF, RC dan AFPF menggunakan Tabel kriteria 2.1 sampai dengan 2.9. Gambar 12 menunjukkan hasil perhitungan MPI pada peralatan Pyroprocessing Plant 1-4.

No	Equipment	Code	OC	PT	PQ	SF	RC	PE	RT	SCR	OCR	ACR	APPF	MPI
1	Kiln Sup Roll	441KL1 SUP ROLL	8	10	10	6	6	10	4	8,04	10	80,36	6	482,14
2	Kiln refractory	441KL1 REFRATORY	8	10	10	6	4	10	4	7,86	10	78,56	6	471,35
3	Kiln Drive	441KL1 M1	6	10	10	6	6	10	4	7,78	10	77,83	6	466,97
4	Fan Clinker Cooler	441FN8-9	2	10	10	6	2	10	2	7,05	10	70,51	6	423,05
5	Electrical Room	ER4-6	2	10	10	4	4	10	2	6,97	10	69,69	6	418,16
6	Id Fan	441FN1	2	8	10	4	6	10	2	6,80	10	68,03	6	408,20
7	Clinker Cooler	441CC1	2	8	10	6	2	10	2	6,68	10	66,76	6	400,57
8	Hammer Clinker	441CR1-2	2	8	10	6	2	10	2	6,68	10	66,76	6	400,57
9	Preheater	441PH1	4	10	10	6	4	5	2	6,51	10	65,14	6	390,82
10	Pulfurized Coal Weight feeder	481PW1-3	2	8	8	6	2	10	2	6,28	10	62,79	6	376,75

Gambar 12. Top ten MPI Plant 1

Analisa Keandalan Untuk Menetapkan Strategi Pemeliharaan Menggunakan System Equipment Reliability Prioritization: Studi kasus di Industri Semen

No	Equipment	Code	OC	PT	PQ	SF	RC	PE	RT	SCR	OCR	ACR	AFPF	MPI
1	Kiln refractory	442KL1 REF	8	10	10	6	4	10	4	7,86	10	78,56	6	471,35
2	Kiln Drive	442KL1 M1	6	10	10	6	6	10	4	7,78	10	77,83	6	466,97
3	Sistem Komunikasi	442KL1 CCR	6	10	10	6	6	10	2	7,67	10	76,72	6	460,31
4	Electrical Room	ER11-13	2	10	10	4	4	10	2	6,97	10	69,69	6	418,16
5	Id Fan	442FN1-2	2	8	10	4	6	10	2	6,80	10	68,03	6	408,20
6	Clinker Cooler	442CC1	2	8	10	6	2	10	2	6,68	10	66,76	6	400,57
7	Hammer Clinker	442CR1-2	2	8	10	6	2	10	2	6,68	10	66,76	6	400,57
8	Preheater	442PH1	4	10	10	6	4	5	2	6,51	10	65,14	6	390,82
9	Belt Bucket Elevator	422BE1-2	4	10	10	6	4	5	2	6,51	10	65,14	6	390,82
10	Pulfurized Coal Weight feeder	482PW1-3	2	8	8	6	2	10	2	6,28	10	62,79	6	376,75

Gambar 13. Top ten MPI Plant 2

No	Equipment	Code	OC	PT	PQ	SF	RC	PE	RT	SCR	OCR	ACR	AFPF	MPI
1	Kiln refractory	443KL1 REFF	8	10	10	6	4	10	4	7,86	10	78,56	6	471,35
2	Kiln Drive	443KL1 M1	6	10	10	6	6	10	2	7,67	10	76,72	6	460,31
3	Electrical Room	ER18	2	10	10	4	4	10	2	6,97	10	69,69	6	418,16
4	Superbolt kiln	443KL1 SUPB	2	10	10	4	2	10	2	6,85	10	68,45	6	410,71
5	Id Fan	443FN1-2	2	8	10	4	6	10	2	6,80	10	68,03	6	408,20
6	Clinker Cooler	443CC1	2	8	10	6	2	10	2	6,68	10	66,76	6	400,57
7	Hammer Clinker	443CR1	2	8	10	6	2	10	2	6,68	10	66,76	6	400,57
8	Preheater	443PH1	4	10	10	6	4	5	2	6,51	10	65,14	6	390,82
9	Pulfurized Coal Weight feeder	483PW1	2	8	8	6	2	10	2	6,28	10	62,79	6	376,75
10	Belt Bucket Elevator	423BE1-2	2	8	8	6	2	10	2	6,28	10	62,79	6	376,75

Gambar 14. Top ten MPI Plant 3

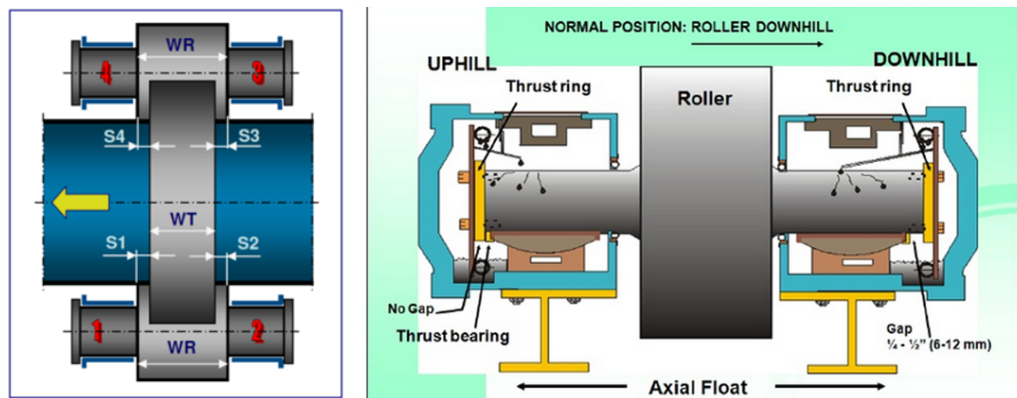
No	Equipment	Code	OC	PT	PQ	SF	RC	PE	RT	SCR	OCR	ACR	AFPF	MPI
1	Kiln refractory	444KL1 REFF	8	10	10	6	4	10	4	7,86	10	78,56	6	471,35
2	Sistem Komunikasi	444KL1 CCR	6	10	10	6	6	10	2	7,67	10	76,72	6	460,31
3	Kiln Drive	444KL1 M1	6	10	10	6	6	10	2	7,67	10	76,72	6	460,31
4	Pulfurized Coal Weight feeder	484PW1-3	2	10	10	6	2	10	2	7,05	10	70,51	6	423,05
5	Electrical Room	ER25-26	2	10	10	4	4	10	2	6,97	10	69,69	6	418,16
6	Id Fan	444FN1-2	2	8	10	4	6	10	2	6,80	10	68,03	6	408,20
7	Clinker Cooler	444CC1	2	8	10	6	2	10	2	6,68	10	66,76	6	400,57
8	Preheater	444PH1	4	10	10	6	4	5	4	6,64	10	66,44	6	398,64
9	Belt Bucket Elevator	424BE1	2	8	8	6	2	10	2	6,28	10	62,79	6	376,75
10	Rotary Feeder	424RF1-4	4	10	10	6	6	10	2	7,48	10	74,83	4	299,33

Gambar 15. Top ten MPI Plant 4

Dari hasil pembahasan SERP pada periode Juni-Agustus 2024 di Plant 1-4 yang melibatkan expert bidang Operasi dan Pemeliharaan diperoleh Top Ten MPI pada masing-masing Plant. Berikut pembahasan kriteria MPI pada masing-masing peralatan Pyroprocessing:

Supporting roll Kiln

Supporting roll pada kiln berfungsi untuk menahan beban kiln yang diteruskan melalui Tyre, yang ditunjukkan pada Gambar 16. Pada Plant Tuban 1-4 kiln mempunyai design 3 tyre. Masing-masing tyre ditahan 2 supporting roll pada tiap fondasinya.



Gambar 16. Supporting roll Kiln

Supporting roll terdiri dari beberapa komponen antara lain ; shaft, Roller, Thrust bearing, Thrust Ring, Lubrikasi assy, seal dan Housing bearing. Permasalahan yang sering terjadi pada supporting roll adalah kenaikan temperatur pada sensor bearing supporting roll. Hal ini diakibatkan dari berbagai kemungkinan antara lain dari beban, permukaan shaft dan bearing yang tidak rata dan kegagalan lubrikasi. Kerusakan pada supporting roll menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya lebih dari 500 juta untuk penggantian bearing supporting roll assy dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Supporting roll mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada supporting roll juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama supporting roll, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-4 minggu dikarenakan untuk pemesanan part utama yang harus diganti. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada supporting roll sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Kiln Refractory

Kiln refractory berfungsi sebagai proteksi atau pengaman operasi kiln shell terhadap temperatur tinggi, sehingga shell kiln tidak mengalami kontak langsung dengan api burner dan material hasil pembakaran pada rotary kiln. Jika refractory pada kiln mengalami kegagalan maka shell akan mengalami kenaikan temperature atau disebut Red Spot (Li et al., 2023; Szczerba et al., 2017).

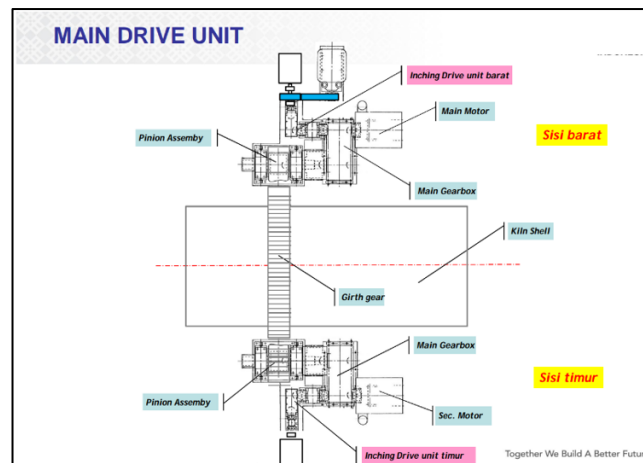


Gambar 17. Kiln Refractory installation

Permasalahan yang sering terjadi pada Refractory Kiln adalah Brick Refractory lepas atau mengalami keausan sehingga tidak dapat menjalankan fungsinya sebagai penahan panas pada kiln shell. Hal ini diakibatkan dari berbagai kemungkinan antara lain faktor thermal, mekanik, kimia, dan pemasangan. Kerusakan pada Refractory Kiln menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 100-500 juta untuk penggantian Part pada Refractory Kiln dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown, seperti ditunjukkan pada Gambar 17 pemasangan kiln refractory. Jika terjadi permasalahan pada Refractory Kiln mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Refractory Kiln juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Refractory Kiln, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-4 minggu dikarenakan instalasi brick membutuhkan waktu 1-4 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Refractory Kiln sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Kiln Drive

Kiln Drive pada kiln, seperti ditunjukkan dalam Gambar 18, merupakan Alat yang berfungsi menggerakkan rotary kiln pada Pyroprocessing. Kiln Drive pada Plant Tuban menggunakan double drive dimana Motor 1 untuk master dan motor 2 untuk sleeve.

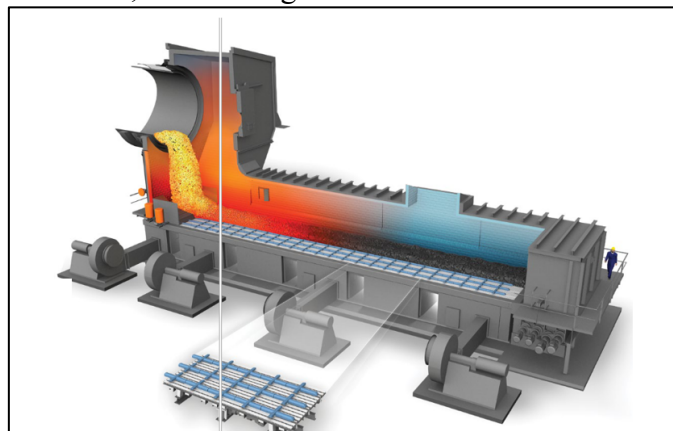


Gambar 18. Kiln Drive

Permasalahan yang sering terjadi pada Kiln Drive adalah Trip karena beban, deviasi ampere antara master dan sleeve, permasalahan encoder (Bogiatzidis et al., 2013; El Fakkoussi et al., 2020). Hal ini diakibatkan dari berbagai kemungkinan antara lain beban yang berlebih, pembacaan speed yang tidak sesuai, dan kerusakan drive. Kerusakan pada Kiln Drive menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 50-100 juta untuk penggantian Part pada Kiln Drive dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Kiln Drive mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Kiln Drive juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama Tyre Kiln, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-4 minggu dikarenakan pemesanan part utama yang harus diganti. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Sistem komunikasi dan komponennya sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Fan Clinker Cooler

Fan Clinker Cooler berfungsi sebagai pensupply udara ke Cooler, seperti ditunjukkan dalam Gambar19, untuk mendinginkan Clinker hasil dari rotary kiln. Jika Fan tidak berfungsi maka Cooler akan mengalami kenaikan temperature sehingga mematikan proses. Permasalahan yang sering terjadi pada Fan Cooler adalah kerusakan pada motor Fan, V belt Fan, dan bearing Fan.



Gambar 11. Fan Clinker Cooler

Kerusakan pada Fan Clinker Cooler menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10-50 juta untuk penggantian Part pada Fan Clinker Cooler dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Fan Clinker Cooler mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Fan Clinker Cooler juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Fan Clinker Cooler, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Fan Clinker Cooler sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Sistem Komunikasi Equipment ke CCR

Sistem pengoperasian equipment pada Plant dioperasikan melalui Central Room yang mempunyai pusat sistem kendali (DCS/ Distributed Control System). DCS menggabungkan dan mengintegrasikan Human Machine Interface (HMI), controler, historian, database dan manajemen alarm ke dalam sistem otomatis tunggal. DCS diciptakan untuk mengendalikan beberapa pengendali yang saling terpisah yang bekerja pada berbagai operasi yang bersifat kontinu. Semuanya terkoneksi menggunakan protokol komunikasi berkecepatan tinggi.



Gambar 2. Distributed Control System

Permasalahan yang sering terjadi pada Sistem Komunikasi adalah terputusnya sistem komunikasi, sistem magenta/ error, program interlock fault terputusnya atau hardware yang rusak. Hal ini diakibatkan dari berbagai kemungkinan antara lain system yang perlu upgrade dan hardware rusak. Kerusakan pada Sistem komunikasi menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repai spare part yang memerlukan biaya 50-100 juta untuk penggantian Part Sistem Komunikasi dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Sistem Komunikasi mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Tyre Kiln juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama Tyre Kiln, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-4 minggu dikarenakan untuk diagnosa permasalahan harus dilakukan secara menyeluruh dan pemesanan part utama yang harus diganti. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Sistem komunikasi dan komponennya sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Clinker Cooler

Clinker Cooler berfungsi sebagai alat transportasi Clinker dan mendinginkan Clinker hasil dari rotary kiln. Clinker Cooler digerakkan oleh crosbar, seperti ditunjukkan pada Gambar 21, yang kerjanya dilakukan oleh sistem hidrolis. Permasalahan yang sering terjadi pada Cooler adalah kerusakan pada sistem hidrolis dan pada cross bar yang diakibatkan karena beban material, temperatur material dan keausan.

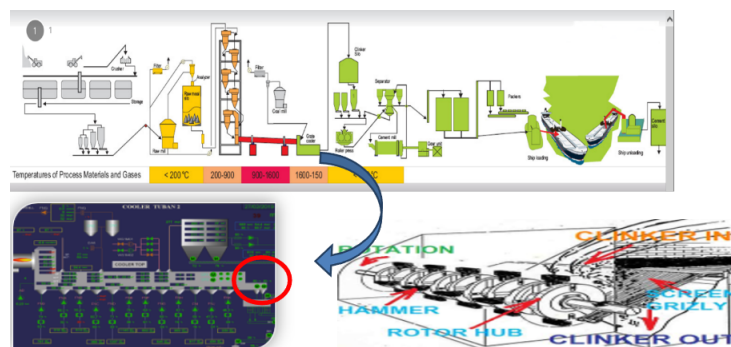


Gambar 3. Clinker Cooler

Kerusakan pada Clinker Cooler menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10-50 juta untuk penggantian Part Clinker Cooler dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Clinker Cooler mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Fan Clinker Cooler juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Clinker Cooler, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Fan Clinker Cooler sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Hammer Clinker Cooler

Hammer Clinker Cooler berfungsi sebagai alat penghancur Clinker yang berukuran besar (tidak granular) dari Cooler sebelum masuk ke Penyimpanan Clinker (Doom Clinker Storage). Hammer Clinker Cooler digerakkan oleh motor yang menggunakan transmisi V Belt. Permasalahan yang sering terjadi pada Hammer Clinker Cooler adalah Keausan pada Hammer, Material Clinker yang besar dan V belt.

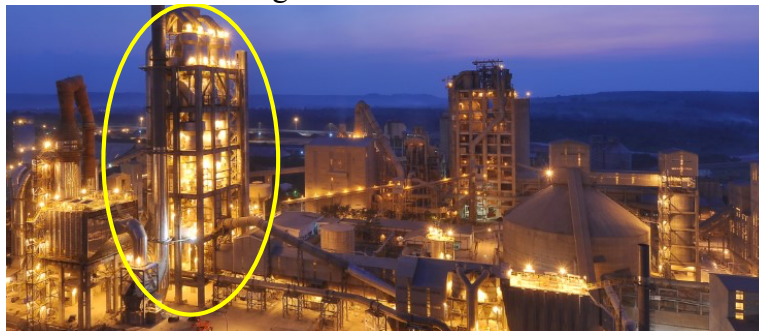


Gambar 22. Hammer Clinker Cooler

Kerusakan pada Hammer Clinker Cooler menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10-50 juta untuk penggantian Part Hammer Clinker Cooler dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Hammer Clinker Cooler mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Hammer Clinker Cooler juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Hammer Clinker Cooler, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Hammer Clinker Cooler sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Preheater

Preheater dalam sistem pyroproses mempunyai calciner dan cyclone untuk preheat material sebelum masuk ke tanur utama (rotary kiln). Material masuk melalui alat transportasi vertikal Bucket elevator yang kemudian ke Airslide dan rotary feeder. Didalam Preheater terdapat lining system untuk isolasi panas agar proses efisien dan melindungi plate cyclone Permasalahan yang sering terjadi pada Preheater adalah kebuntuan material atau benda asing.



Gambar 23. Preheater

Kerusakan pada Preheater menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10-50 juta untuk penggantian pada bagian Preheater dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Preheater mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Preheater juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Preheater, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Preheater sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Pulfurized Coal Weight Feeder

Pulfurized Coal Weight Feeder dalam sistem pyroproses mempunyai peranan untuk supply dan penimbang fine coal sebagai bahan bakar utama proses pembakaran dalam Rotary kiln dan Preheater. Fine coal dari Coal mill akan ditransfer ke Pulfurized Coal

Weight Feeder untuk ditimbang secara akurat dan kontinu dan diteruskan ke Burner untuk mendukung nyala api yang optimal untuk produksi Clinker.



Gambar 4. Pulfurized Coal Weight Feeder

Kerusakan pada Pulfurized Coal Weight Feeder menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10-50 juta untuk penggantian pada bagian Pulfurized Coal Weight Feeder dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Pulfurized Coal Weight feeder mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Pulfurized Coal Weight feeder juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Pulfurized Coal Weight feeder, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Preheater sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Belt Bucket Elevator Kiln Feed

Belt Bucket elevator dalam sistem Pyroprocessing mempunyai peranan untuk feeder material ke Preheater. Belt Bucket elevator merupakan peralatan pemindah yang berfungsi untuk menaikkan material dari Bottom Silo ke top Preheater.



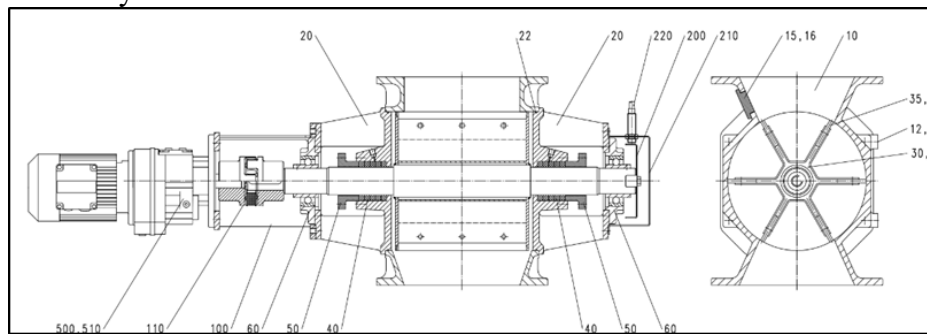
Gambar 5. Belt Bucket

Kerusakan pada Belt Bucket Elevator menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10 juta untuk penggantian pada bagian Pulfurized Coal Weight Feeder dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant

Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Pulverized Coal Weight feeder mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Pulverized Coal Weight feeder juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Pulverized Coal Weight feeder, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Preheater sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Rotary Feeder Kiln Feed

Rotary Feeder Kiln merupakan perangkat mekanis yang digunakan untuk secara kontinu memindahkan material kiln feed dari Airslide ke Preheater yang juga berfungsi sebagai airlock system.

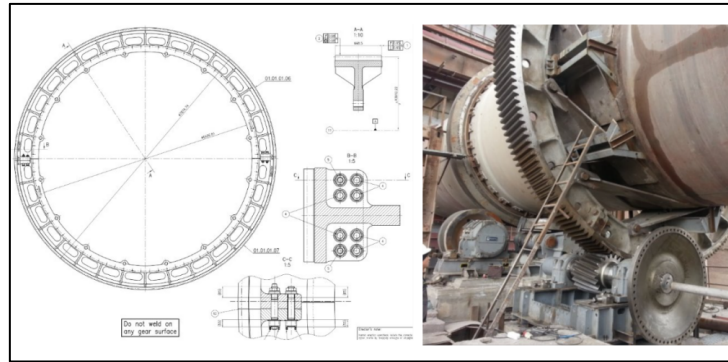


Gambar 26. Rotary Feeder

Kerusakan pada Rotary feeder berupa putusnya rotary feeder yang dapat mengganggu perputaran Rotary kiln. Kerusakan tersebut menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10-50 juta untuk penggantian Rotary feeder dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Rotary feeder Kiln mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Rotary feeder juga berdampak terhadap lingkungan dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Rotary feeder, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Rotary feeder sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Superbolt Main Gear

Superbolt Main Gear merupakan bagian penting dari Main Gear kiln untuk mengikat antar Segmental Main Gear sehingga dapat menjalankan fungsinya sebagai penggerak utama rotary kiln.



Gambar 27. Superbolt Main Gear

Kerusakan pada Superbolt berupa putusya Superbolt yang dapat mengganggu perputaran Rotary kiln. Kerusakan tersebut menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10 juta untuk penggantian Superbolt dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada Superbolt Kiln mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Superbolt tidak berdampak terhadap lingkungan dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Superbolt, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Superbolt sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Electrical Room

ER (Electrical Room) merupakan Sistem Kontrol Kelistrikan dan Instrument yang terdapat pada masing-masing area proses. Electrical Room menyalurkan power 6,3KV, 380 KV, dan 220 KV ke equipment proses.



Gambar 28. Elctrical Room

Kerusakan pada Electrical Room diidentifikasi sebagai kegagalan untuk menyalurkan atau menyediakan power untuk peralatan bisa karena power drop dari PLN atau karena terdapat kerusakan dalam sistem. Kerusakan tersebut menimbulkan operational cost untuk perbaikan atau repair spare part yang memerlukan biaya 10 juta untuk penggantian pada sistem di Electrical Room dan pada saat perbaikan mengharuskan Plant Shutdown. Jika terjadi permasalahan pada supply power di Electrical Room mengakibatkan kemampuan berproduksi turun sampai dengan 75 % dan menimbulkan kondisi dangerous situation dan low personnel injury. Kerusakan yang terjadi pada Electrical Room juga berdampak terhadap lingkungan karena dapat menyebabkan kegagalan system feeding material ke kiln dan berdampak besar pada penurunan Plant efficiency. Apabila terjadi kerusakan pada Electrical Room, untuk pemulihan membutuhkan waktu kurang dari 1 minggu. Peringkat operational criticality ranking (OCR) pada Electrical Room sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.

Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang dilakukan pada penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: 1) Didapatkan peringkat sepuluh besar Maintenance Prioritization Index (MPI) pada peralatan Pyroprocessing Plant 1 sampai dengan Plant 4. a. Peralatan Pyroprocessing pada Plant 1 yang masuk peringkat sepuluh besar Maintenance Prioritization Index (MPI) adalah Supporting Roll Kiln, Refractory Kiln, Kiln Drive, fan Clinker Cooler, Electrical room, Id Fan, Clinker Cooler, hammer Clinker, Preheater, Pulfurized Coal Weight feeder. b. Peralatan Pyroprocessing pada Plant 2 yang

masuk peringkat sepuluh besar Maintenance Prioritization Index (MPI) adalah Refractory kiln, Kiln Drive, Sistem Komunikasi Kiln, Electrical Room, Id fan, Clinker Cooler, Hammer Clinker, Preheater, Belt Bucket Elevator, Pulfurized Coal Weight feeder. c. Peralatan Pyroprocessing pada Plant 3 yang masuk peringkat sepuluh besar Maintenance Prioritization Index (MPI) adalah Refractory kiln, Kiln Drive, Electrical Room, Superbolt Kiln, id Fan, Clinker Cooler, Hammer Clinker, Preheater, Pulfurized Coal Weight feeder, Belt Bucket Elevator. d. Peralatan Pyroprocessing pada Plant 4 yang masuk peringkat sepuluh besar Maintenance Prioritization Index (MPI) adalah Refractory kiln, Sistem Komunikasi Kiln, Kiln Drive, Pulfurized Coal Weight feeder, Electrical Room, Id Fan, Clinker Cooler, Preheater, Belt Bucket Elevator, Rotary feeder.

2) Nilai Keandalan pada saat 1 Januari 2024 pada peralatan Pyroprocessing sebelum dilakukan perhitungan target keandalan tertinggi adalah ; a. Plant 1 nilai keandalan tertinggi pada Refractory Kiln sebesar 100 % dan nilai keandalan terendah pada Supporting Roll Kiln sebesar 37.53 %. b. Plant 2 nilai keandalan tertinggi pada peralatan Electrical Room sebesar 100 % dan nilai keandalan terendah pada Pulfurized Weight feeder sebesar 31.24 %. c. Plant 3 nilai keandalan tertinggi pada peralatan Electrical Room, Clinker Cooler, Pulfurized Coal Weight feeder, Bucket Elevator sebesar 100 % dan nilai keandalan terendah pada Refractory Kiln sebesar 50.74 %. d. Plant 4 nilai keandalan tertinggi pada peralatan CCR sebesar 100 % dan nilai keandalan terendah pada Preheater sebesar 37.30 %.

3) Interval waktu pemeliharaan pencegahan yang terpanjang setelah dilakukan optimasi, dengan target keandalan sebesar 0,9 pada Plant 1-4 adalah peralatan Electrical Room yaitu 7727 jam.

4) Interval waktu pemeliharaan pencegahan yang terpendek setelah dilakukan optimasi, dengan target keandalan sebesar 0,9 pada Plant 1-4 adalah peralatan Kiln Drive yaitu 26.42 jam.

5) Dengan target keandalan 0,7 ; 0,8 dan 0,9 berdasarkan hasil analisa perhitungan keandalan dan biaya pemeliharaan, semakin tinggi target keandalan maka biaya pemeliharaan semakin kecil.

6) Total penghematan biaya pemeliharaan pencegahan terbesar dengan target keandalan sebesar 0,9 adalah peralatan Kiln refractory Plant 2 dengan total penghematan biaya pemeliharaan sebesar Rp 35,916,735,977

DAFTAR PUSTAKA

- Bogiatzidis, I. X., Safacas, A. N., & Mitronikas, E. D. (2013). Detection of backlash phenomena appearing in a single cement kiln drive using the current and the electromagnetic torque signature. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8). <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2194950>
- Choudhary, D., Tripathi, M., & Shankar, R. (2019). Reliability, availability and maintainability analysis of a cement plant: a case study. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 36(3). <https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2017-0215>
- Darestani, S. A., Palizban, T., & ... (2020). Maintenance strategy selection: a combined goal programming approach and BWM-TOPSIS for paper production industry. *Journal of Quality in ...*
- El Fakkoussi, S., Moustabchir, H., Elkhalfi, A., & Pruncu, C. I. (2020). Analytical and numerical analysis of the tire tightening system of a cement kiln. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 14(2). <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00592-5>
- Hartini, E., Dibyo, S., & Pujiarta, S. (2018). Determination Of Maintenance Priority Index (Mpi) For Components On RSG-Gas Safety System. *JURNAL TEKNOLOGI*

- REAKTOR NUKLIR TRI DASA MEGA, 20(2).
<https://doi.org/10.17146/tdm.2018.20.2.4283>
- Jatmiko, E. D. (2019). Penentuan Interval Pemeliharaan Pencegahan Dengan System Equipment Reliability Prioritization (Serp) Dan Optimasi Keandalan Pada Turbin Gas Seri M701d (Studi Kasus Di Pt. Z). In *Tesis*.
- Kurian, M. C., P.R, S., & V.R, P. (2020). Maintenance strategy selection in a cement industry using analytic network process. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 26(4).
<https://doi.org/10.1108/JQME-07-2017-0048>
- Li, H., Xie, B., Zhu, X., Li, Q., & Yang, J. (2023). Erosion behaviour of rotary kiln refractory and its effects on ringing during steel-rolling oily sludge incineration. *Waste Management*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.005>
- Mappanganro, R. (2020). Produksi Semen Segar (Volume dan Konsentrasi) dan Beku dari Sapi Pejantan dengan Skor Kondisi Tubuh (SKT) yang Berbeda. *Jurnal Ilmu Dan Industri Peternakan (Journal of Animal Husbandry Science and Industry)*, 6(1).
<https://doi.org/10.24252/jiip.v6i1.14444>
- Nugroho, S. D. (2021). Penentuan Tingkat Kritikalitas Peralatan Pembangkit Dengan Metode Equipment Criticality Management Dalam Rangka Penentuan Prioritas Pemeliharaan. *KILAT*, 10(1). <https://doi.org/10.33322/kilat.v10i1.1178>
- Patil, S. S., & Bewoor, A. K. (2022). Optimization of maintenance strategies for steam boiler system using reliability-centered maintenance (RCM) model – A case study from Indian textile industries. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 39(7). <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2021-0216>
- Putri, D. E., & Rimantho, D. (2022). Analisis Pengendalian Kualitas Menggunakan Kapabilitas Proses Produksi Kantong Semen. *Jurnal INTECH Teknik Industri Universitas Serang Raya*, 8(1). <https://doi.org/10.30656/intech.v8i1.4385>
- Riskiah, D. A., & Safaruddin, S. (2022). Proses Produksi Semen Portlant Pt. Semen Baturaja. *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 1(04).
<https://doi.org/10.62668/bharasumba.v1i04.297>
- Saputro, A., & Purwanggono, B. (2016). Peramalan Perencanaan Produksi Semen dengan Metode Exponential Smoothing pada PT. Semen Indonesia. *Industrial Engineering Online Jurnal*, 5(4).
- Szczerba, J., Śnieżek, E., & Antonovič, V. (2017). Evolution of Refractory Materials for Rotary Cement Kiln Sintering Zone. *Refractories and Industrial Ceramics*, 58(4).
<https://doi.org/10.1007/s11148-017-0123-y>
- Yuandi, A., & Safaruddin, S. (2022). Proses Crushing Material Limestone Untuk Bahan Baku Dalam Proses Produksi Semen Di PT Semen Baturaja (Persero) TBK. *JIMR : Journal Of International Multidisciplinary Research*, 1(02).
<https://doi.org/10.62668/jimr.v1i02.482>

Copyright holder:

Dwi Agus Arvianto (2025)

First publication right:

Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia

This article is licensed under:

