

MAINTENANCE PADA VERTICAL RAW MILL CK-310 TIPE ROLLER MILL PLANT - 10

Maintenance Activities on Vertical Raw Mill CK-310 (Roller Mill Type) at Plant 10

Nurbaiti*, Hendri Van Hoten

Program Studi Teknik Mesin Universitas Bengkulu, Jl. W.R. Supratman Kandang Limun, Bengkulu

*) Email: nurbaiti@unib.ac.id

Submitted: 14 Oktober 2025

Revised: 23 Oktober 2025

Accepted: 25 Oktober 2025

ABSTRACT

A vertical raw mill is one of the main tools in cement production, which functions as a material grinder measuring from 5-7 cm to 90 microns. The tool also performs in the drying process of raw materials to reduce the water content before entering the suspension preheater section. The maintenance process on the vertical raw mill is carried out while the machines are operating. The maintenance is used to prevent and predict the production machine. The method is inspection using an infrared thermometer and vibrascanner. Test results show that the vertical raw mill can operate normally.

Keywords: cement, material grinder, maintenance, vertical raw mill

1. PENDAHULUAN

. Salah satu alat pendukung dalam kualitas produksi semen adalah *vertical raw mill*. *Vertical raw mill* atau proses penggilingan merupakan suatu proses membuat ukuran partikel menjadi lebih kecil atau membuat luas permukaan menjadi lebih besar (untuk mendapatkan reaktivitas yang cukup, baik aspek fisika maupun kimianya) [1]. *Vertical raw mill* juga berfungsi sebagai pengeringan material dengan target kadar *moisture max* 1% [2]. Proses ini memanfaatkan panas gas sisa dari atau proses pembakaran, dengan suhu sekitar 300-400°C. Material yang telah digiling akan kontak langsung dengan gas panas yang masuk melalui *nozzle louvre ring*. Material keluar *raw mill* bersuhu sekitar 80°C.

Penggilingan terjadi karena adanya tekanan spesifik *roller* pada material yang membentuk bed pada meja penggiling yang berputar. Material akan digiling dari ukuran masuk sekitar 7,5 cm menjadi maksimum 90 mikron. Penggilingan menggunakan gaya centrifugal di mana material yang diumpankan dari atas akan terlempar ke samping karena putaran dari *grinding table* dan akan tergerus oleh *roller* yang berputar karena putaran dari *grinding table* itu sendiri [3]. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis terhadap hasil inspeksi temperatur dan vibrasi (getaran) terhadap *Vertical raw mill*. Karena putaran dari *grinding table* yang bergesekan dengan *roller* menghasilkan getaran yang sangat kuat, sehingga dilakukan pengecekan secara periodik [4], [5]. Hasil analisis dan inspeksi ini untuk menjaga performance dari *Vertical raw mill* agar tidak mengalami kerusakan secara tiba-tiba [6].

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pengertian *Vertical Raw Mill* merupakan peralatan yang digunakan untuk menghaluskan raw material menjadi butiran halus hingga berukuran mikron yang disebut *raw mill* [1][4][5]. Selain untuk menghaluskan, *raw mill* juga berfungsi untuk mengeringkan material sehingga proses pembakaran nanti di *kiln* akan lebih baik. Dalam proses penggilingan melalui *raw mill*, kualitas produk yang dihasilkan juga harus sesuai dengan target kualitas yang diinginkan untuk proses produksi. *Raw Mill* pada umumnya terdiri dari dua jenis yaitu *Horizontal Mill (Tube Mill)* dan *Vertical Raw Mill (VRM)*. Dan di era modern seperti ini, teknologi penggilingan *raw material* pada umumnya menggunakan VRM karena selain mudah dalam pengoperasian dan *maintenance*, VRM juga lebih efisien dan hemat energi. *Vertical raw mill* dapat dilihat pada Gambar 1

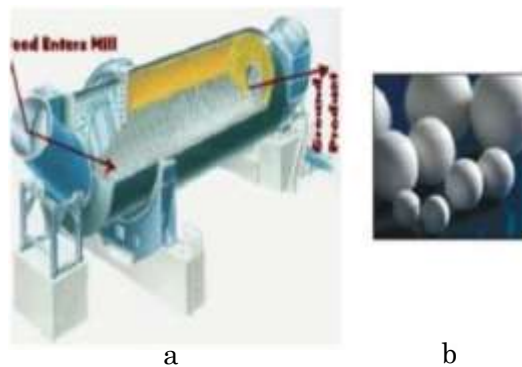


Gambar 1. *Vertical Raw Mill* [1]

2.1 Jenis-jenis *Raw mill*

2.1.1. *Ball-tube mills*

Jenis ini terdiri dari sebuah tabung silinder yang berputar dimana didalam *pulverizer* jenis ini terdiri dari sebuah tabung silinder yang berputar didalam tabung silinder tersebut diisi dengan bola-bola yang terbuat dari campuran (*alloy*) seperti tabung silinder tersebut diisi dengan bola-bola yang terbuat dari campuran (*alloy*) seperti aluminium. *Ball tube mill* dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2. *Vertical Raw Mill*, a. *Ball tube mills*, b. Bola-bola aluminium

Terlihat pada gambar di atas, material masuk ke *feed enters mill* melalui sebuah pipa terlihat pada Gambar 2 diatas, pada setiap sisi tabung yang berisi bola-bola aluminium seperti pada gambar tabung berongga pada setiap sisi tabung yang berisi bola-bola aluminium seperti pada gambar diatas. Ketika tabung berputar maka bola-bola tersebut menggilas material, dan menghaluskan hingga menjadi serbuk halus untuk kemudian ke proses selanjutnya. Karakteristik *pulverizer* tipe *ball tube mills*:

- Biaya investasi tinggi.
- Biaya pemeliharaan rendah.
- Menghasilkan serbuk material dengan tingkat kehalusan yang tinggi.

2.1.2. *Impact mills*

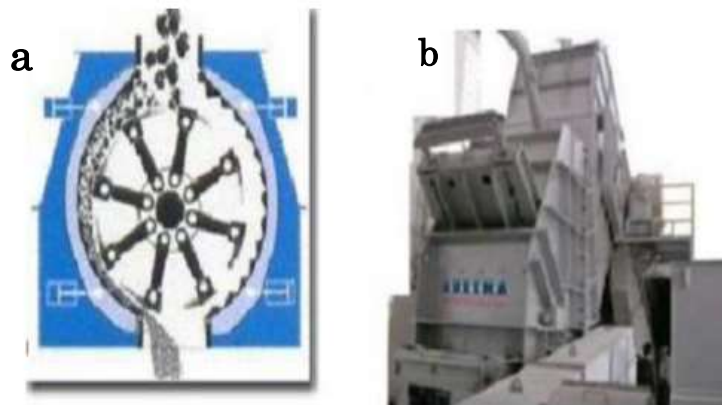
Mill jenis ini terdiri dari serangkaian palu berengsel yang berputar di ruang tertutup dengan piringan tahan aus. Material yang masuk melalui pipa bagian atas kemudian dihancurkan oleh palu-palu tersebut dan mendorongnya ke piringan. *Impact mill* biasa digunakan dalam penghacuran batu-batu besar menjadi ukuran yang kecil, dapat dilihat pada Gambar 3. Karakteristik *pulverizer* tipe *impact mills* :

- Biaya investasi dan pemeliharaan rendah.
- Cocok untuk jenis material yang lunak.
- Menghasilkan serbuk material dengan tingkat kehalusan rendah.

2.1.3. *Vertical roller mills*

Mill jenis ini terdiri dari *hydraulically loaded vertical rollers* (bagian yang berwarna biru) yang menyerupai ban besar untuk menghancurkan material dibawahnya terdapat sebuah piringan untuk tempat material dihancurkan. Proses penghancuran material akan terjadi jika bagian roller tersebut berputar dan

menghancurkan material yang terdapat di piringan tersebut yang berasal dari bagian atas, kemudian udara panas dialirkan melalui bagian bawah ruang penghancuran untuk menghilangkan kelembaban yang tidak diinginkan dan mengangkut serbuk batubara tersebut melalui bagian atas pulverizer dan keluar dari *exhaust pipes* langsung ke *expansion preheater*. *Vertical roller mills* dapat dilihat pada Gambar 4



Gambar 3. a. Palu-palu berengsel, b. *Impact mills*



Gambar 4. *Vertical roller mills*

2.2 Maintenance (Perawatan)

Perawatan adalah suatu tindakan perbaikan yang dilakukan terhadap suatu alat yang telah mengalami kerusakan agar alat tersebut dapat digunakan kembali [7]. Perawatan adalah suatu konsepsi dari semua aktivitas yang diperlukan untuk menjaga atau mempertahankan kualitas peralatan agar tetap berfungsi dengan baik seperti dalam kondisi sebelumnya[5]. Kegiatan perawatan dilakukan untuk perbaikan yang bersifat kualitas, meningkatkan suatu kondisi ke kondisi lain yang lebih baik. Kesimpulannya yaitu pemeliharaan dilakukan sebelum suatu alat/produk mengalami kerusakan dan mencegah terjadinya kerusakan, sedangkan perawatan yaitu dilakukan setelah suatu alat mengalami kerusakan (perbaikan) Secara umum, ditinjau dari saat pelaksanaan pekerjaan perawatan, dapat dibagi menjadi dua cara yaitu perawatan yang direncanakan (*planned maintenance*) dan perawatan yang tidak direncanakan (*unplanned maintenance*) [7]. Secara skematik pembagian perawatan bisa dilihat pada Gambar 6. Jenis-jenis perawatan yang biasa dilakukan di industri adalah perawatan preventif, perawatan korektif, perawatan berjalan, perawatan prediktif, perawatan setelah terjadi kerusakan, perawatan darurat dan perawatan *breakdown*.

1. Perawatan preventif

Adalah jenis pekerjaan perawatan yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan, atau cara perawatan yang direncanakan untuk pencegahan (*preventive*). Ruang lingkup pekerjaan preventif meliputi inspeksi, perbaikan kecil, pelumasan dan penyetelan, sehingga peralatan atau mesin-mesin selama beroperasi terhindar dari masalah-masalah kerusakan [3], [7].

2. Perawatan korektif

Adalah jenis pekerjaan perawatan yang dilakukan untuk memperbaiki dan meningkatkan kondisi peralatan sehingga mencapai standar yang dapat diterima. Dalam perbaikan dapat dilakukan

peningkatan-peningkatan sedemikian rupa, seperti melakukan perubahan atau modifikasi rancangan agar peralatan menjadi lebih baik.

3. Perawatan berjalan

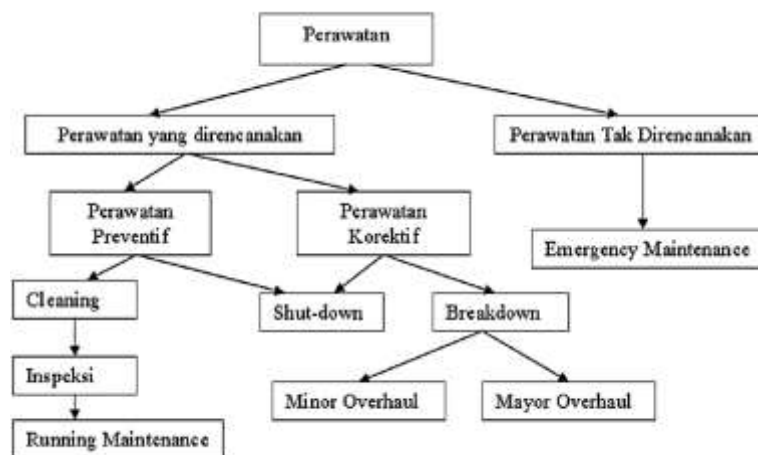
Di mana jenis pekerjaan perawatan dilakukan ketika fasilitas atau peralatan dalam keadaan bekerja. Perawatan berjalan diterapkan pada peralatan-peralatan yang harus beroperasi terus dalam melayani proses produksi.

4. Perawatan prediktif

Perawatan dilakukan untuk mengetahui terjadinya perubahan atau kelainan dalam kondisi fisik maupun fungsi dari sistem peralatan. Biasanya perawatan prediktif dilakukan dengan bantuan panca indra atau alat-alat monitor yang canggih.

5. Perawatan setelah terjadi kerusakan

Pekerjaan perawatan dilakukan setelah terjadi masalah kerusakan pada peralatan, dan untuk memperbaikinya harus disiapkan suku cadang, material, alat-alat dan tenaga kerjanya.



Gambar 6. Skematik perawatan [4]

6. Perawatan darurat

Adalah pekerjaan perbaikan yang harus segera dilakukan karena terjadi kemacetan atau kerusakan yang tidak terduga. Di samping jenis-jenis perawatan yang telah disebutkan di atas, terdapat juga beberapa jenis pekerjaan lain yang bisa dianggap merupakan jenis pekerjaan perawatan seperti:

a. Perawatan dengan cara penggantian (*Replacement Instead of Maintenance*)

Perawatan dilakukan dengan cara mengganti peralatan tanpa dilakukan perawatan, karena harga peralatan pengganti lebih murah bila dibandingkan dengan biaya perawatannya. Atau alasan lainnya adalah apabila perkembangan teknologi sangat cepat, peralatan tidak dirancang untuk waktu yang lama, atau banyak komponen rusak tidak memungkinkan lagi diperbaiki.

b. Penggantian yang direncanakan (*planned replacement*)

Dengan telah ditentukan waktu mengganti peralatan dengan peralatan yang baru, berarti industri tidak memerlukan waktu lama untuk melakukan perawatan, kecuali untuk melakukan perawatan dasar yang ringan seperti pelumasan dan penyetelan. Ketika peralatan telah menurun kondisinya langsung diganti dengan yang baru. Cara penggantian ini mempunyai keuntungan antara lain, pabrik selalu memiliki peralatan yang baru dan siap pakai.

c. *Breakdown maintenance*

Breakdown atau *corrective maintenance* adalah kegiatan pemeliharaan dan perawatan yang dilakukan setelah terjadinya suatu kerusakan. Kegiatan *breakdown maintenance* yang dilakukan sering disebut dengan kegiatan perbaikan atau reparasi. Perbaikan ini dilakukan karena adanya kerusakan yang dapat terjadi akibat tidak dilakukannya preventive maintenance dengan baik ataupun telah dilakukan tetapi sampai pada waktu tertentu fasilitas atau peralatan tersebut rusak.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Objek yang diamati

Objek yang diamati pada penelitian ini adalah *Vertical raw mill*. *Vertical raw mill* merupakan peralatan untuk menggiling dan mengeringkan bahan mentah semen. Pada proses produksi semen, posisi *raw grinding mill* diberikan pada gambar dibawah ini, dimana pengeringan dan penggilingan merupakan tahap kedua dari

tahapan proses produksi secara umum.

Material yang digiling dengan mesin raw grinding mill ini yaitu *limestone, clay, silica sand* dan *iron sand*. Ukuran material yang dikecilkan (kecuali *iron sand*) dari ukuran panjang 5–7 cm menjadi partikel debu sampai dengan 0–90 mikron serta mengurangi kelembaban dari material tersebut dengan cara dikeringkan. Mesin ini bekerja selama 24 jam sehari secara terus menerus. Bentuk *Vertical raw mill* dapat dilihat pada Gambar 7. Data Spesifikasi alat *Vertical raw mill P-10* ditunjukkan pada table 1



Gambar 7. *Vertical raw mill P-10.*

3.2 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan inspeksi secara langsung kondisi peralatan yang ada di lapangan. Proses inspeksi dilakukan menggunakan *Infrared thermometer* dan *vibrascanner*.

1 *Infrared thermometer*

Infrared Thermometer berguna untuk mengukur suhu menggunakan radiasi kotak hitam (biasanya inframerah) yang dipancarkan objek. Kadang disebut juga termometer laser jika menggunakan laser untuk membantu pekerjaan pengukuran, atau termometer tanpa sentuhan untuk menggambarkan kemampuan alat mengukur suhu dari jarak jauh. Dengan mengetahui jumlah energi inframerah yang dipancarkan oleh objek dan emisinya. *Infrared Thermometer* dapat dilihat pada Gambar 8.

2 *Vibrascanner*

Vibration Meter adalah alat uji atau instrument yang berfungsi untuk mengukur getaran sebuah benda, misalnya motor, pompa, screen, atau benda bergetar lainnya terutama dalam dunia industri. Cara kerja produk ini adalah dengan menempelkan vibration sensor atau magnetic base nya ke benda/mesin yang akan di ukur, lalu magnetic base mengirimkan data melalui kabel ke unit pembaca. dengan demikian vibration meter menunjukkan nilai kuatnya getaran pada benda atau mesin yang di ukur, sehingga bisa menentukan tindakan penyetelan atau kah sudah masuk ambang batas yang ditentukan. Dengan melakukan kontrol dan analisa getaran secara berkala, maka sesuatu yang tidak normal pada mesin dapat dideteksi sebelum kerusakan besar terjadi. Dengan pengukuran *vibration* meter ini, para pelaku industri juga dapat mencegah para pekerjanya mendapat bahaya getaran yang tinggi. *Vibrascanner* dapat dilihat pada Gambar 9.

Tabel 1 Data Spesifikasi *Vertical Raw Mill P-10*

Vertical Raw Mill P-10	
Jumlah	1
Tipe	<i>CK-310 tipe Roller Mill</i>
Sistem Penggiling	Stimulan penggilingan dan pengeringan
Sistem Pemasukan Material	Center chutel, center charge
Lokasi	<i>Outdoor</i>
Diameter table grinding	3100 mm
Putaran Table grinding	29,4 rpm
Rotasi arah table grinding	Searah jarum jam
Ukuran roller	D= 2410 mm x L= 850 mm
Jumlah roller	3 buah roller
Material yang digiling	<i>Clay, iron sand, silica sand dan limestone</i>
Kapasitas penggilingan	280 ton/jam



Gambar 8. Infrared Thermometer



Gambar 9. Vibrascanner

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil *Inspection*

Hasil *inspection* yang dilakukan pada *vertical raw mill* dengan cara melakukan pengamatan secara visual pada bagian-bagiannya, dapat dilihat pada Tabel 2.

4.2 Hasil Pengukuran *Vibration*

Pengukuran *vibration* dan temperatur dilakukan agar dapat mengetahui getaran yang dihasilkan dan temperatur yang dihasilkan pada alat tersebut, karena mesin *vertical raw mill* selalu bekerja selama 24 jam, maka komponen-komponen pendukung yang menghasilkan getaran akan selalu diperiksa demikian juga temperatur pada alat tersebut, karena terjadinya gesekan antara komponen maka akan menghasilkan panas. Pemeriksaan ini dilakukan untuk mengetahui batas maximum dari komponen tersebut. Data pengukuran *vibration* pada *vertical raw mill* dapat dilihat pada Tabel 3. Dari Tabel 3 didapat bahwa rata-rata *vibration* yang dihasilkan tidak melewati batas yang diizinkan. Dapat disimpulkan bahwa komponen dalam keadaan normal dan tidak mengalami kerusakan. Jika pada roller mengalami *vibration* melewati dari batas yang diizinkan, berarti roller mengalami masalah pada dinding roller, yang dimana material mengalami pengeringan tidak sempurna dan material tersebut menempel pada dinding roller yang mengakibatkan getaran.

Tabel 2 Hasil *Inspection*

No	<i>Inspection Point</i>	Pemeriksaan	Keadaan
1	Pelumasan untuk <i>roller bearing</i>	Operasi dari oli <i>pump</i> , oli <i>filter</i> , oli <i>cooler</i> , <i>control unit</i>	Baik
		Jumlah oli	Baik
2	Shell (Cover)	Abrasi pada material dari <i>shell cover</i>	Tidak terjadi abrasi
		suara yang bising dan abnormal	Baik
3	Roller preassing system	Keadaan oli pada hidrolik silinder	Tidak terjadi kebocoran
		Kondisi baut	Tidak ada baut yang longgar
		Level oli pada tangki < 140 liter	Baik
		Tekanan = 60 bar	Baik
4	<i>Gear reducer</i>	Cek kondisi baut <i>reducer</i> yang pada casing	Tidak ada baut yang longgar
		tekanan oli = 0,9 bar	Baik
		Temperatur bantalan input < 80 °C	Baik
		Kondisi oli pada tangki	Baik
5	Hidrolik unit	Operasi pada kontrol unit seperti hidrolik pompa, oli filter	Baik
		Kondisi oli pada tangki	Baik
6	Roller dan grinding table	kebocoran oli pada <i>seal</i>	Tidak terjadi kebocoran
		suara yang bising dan abnormal	Tidak terjadi suara yang abnormal

Tabel 3 Data Pengukuran *Vibration*

No	Vibration (mm/s)				
	Roller 1	Roller 2	Machine 341	Machine 342	CK Mill
1	3,61	3,37	1,00	1,4	0,78
2	1,06	0,98	1,10	0,6	0,21
3	2,89	2,66	1,20	1,4	0,55
4	3,87	3,58	1,40	1,1	0,73
5	4,39	4,42	1,00	1,3	0,77
6	4,51	4,32	1,00	1	0,76
7	4,36	4,35	0,80	1,4	0,72
8	1,64	1,51	0,70	0,9	0,3
9	3,66	3,61	0,90	1,1	0,66
10	2,26	2,25	1,00	0,8	0,44
11	2,18	2,04	1,10	0,8	0,46
12	3,22	2,49	0,90	0,7	0,63
AVG	3,13	2,97	1,01	1,04	0,58
Vib.max.	5	5	2	2	2

4.3 Data Pengukuran Temperatur

Data pengukuran Temperatur pada *vertical raw mill* dapat dilihat pada Tabel 4. Dari hasil pengolahan data didapat bahwa rata-rata temperatur yang dihasilkan tidak melewati batas yang diizinkan. Dapat disimpulkan bahwa komponen dalam keadaan normal dan tidak mengalami temperatur yang berlebih. Jika temperatur melewati batas yang diizinkan maka, sirkulasi dari pendinginan oli tidak berjalan dengan baik.

Tabel 4 Data Pengukuran Temperatur

No	Temperatur (°C)				Reducer Grinding
	Bearing 1	Bearing 2	RM. Roller 1	RM. Roller 2	
1	55	40	50	52	44
2	41	37	39	40	36
3	51	39	44	45	40
4	56	41	53	55	45
5	54	41	52	55	45
6	54	40	52	53	45
7	55	37	44	54	45
8	45	37	45	46	45
9	48	37	46	47	39
10	45	42	48	46	41
11	46	42	52	49	39
12	57	42	51	50	40
AVG	50,58	39,58	48,00	49,33	42,00
Temp.max.	<80	<80	<80	<80	<80

4.4 Pembahasan

Roller mill terdiri dari *roller* yang memiliki bentuk *roller grinding* yang dapat menghasilkan kehalusan yang baik dan pada bagian atasnya terdapat *classifying* part dari baling-baling berputar tipe separator dengan bagian dalam berbentuk kerucut. Material yang telah dipisahkan dan ditransportasikan dengan tipe *belt* tertutup diumpankan pada ruangan tertutup ditengah-tengah mill. Material yang akan digiling sekali melewati roller mill akan dibawa oleh gaya sentrifugal yang dihasilkan dari putaran table dan digiling, dikeringkan kemudian dibawa oleh aliran gas yang naik dari nozzle diluar table sehingga dapat memasuki separator pada mill bagian dalam.

Pada kegiatan *inspection* terutama pada pemeriksaan vibration dan temperatur didapatkan pada data bahwa rata rata vibration yang dihasilkan pada pemeriksaan komponen antara lain ,*roller 1* sebesar 3,13 mm/s, roller 2 sebesar 2,97 mm/s, machine 341 sebesar 1,01 mm/s, machine 342 sebesar 1,04 mm/s, dan pada CK mill sebesar 0,58 mm/s. Dapat disimpulkan bahwa dari hasil data yang didapat bahwa rata-rata vibrasi yang dihasilkan tidak melewati batas yang diizinkan. Keadaan komponen dalam keadaan normal dan tidak mengalami kerusakan. Jika pada roller mengalami vibration melewati dari batas yang diizinkan, berarti roller

mengalami masalah pada dinding *roller*, yang dimana material mengalami pengeringan tidak sempurna dan material tersebut menempel pada dinding *roller* yang mengakibatkan getaran. Pada *machine* 341 dan 342 jika mengalami *vibration* melewati batas yang diizinkan, maka pada *machine* mengalami kerusakan seperti keausan pada bearing. Namun pada saat pemeriksaan, *machine* tidak mengalami kerusakan dan dapat dioperasikan sampai waktu yang tidak ditentukan.

Pada pemeriksaan temperatur dari hasil data diatas, didapat bahwa rata-rata temperatur yang dihasilkan pada bearing 1 sebesar 50,58 °C, pada bearing 2 sebesar 39,58 °C, RM roller 1 sebesar 48 °C, RM roller 2 sebesar 49,33 °C dan pada reduser grinding sebesar 42 °C. Temperatur dari komponen yang di periksa tidak melewati batas yang diizinkan. Dapat disimpulkan bahwa komponen dalam keadaan normal dan tidak mengalami temperatur yang berlebih. Jika temperatur melewati batas yang diizinkan maka, sirkulasi dari pendinginan oli tidak berjalan dengan baik. Karena dalam komponen-komponen mesin yang bergerak menggunakan pelumasan oli yang bersifat sirkulasi. Jika pada bearing dan reduser mengalami temperatur melewati batas, maka sirkulasi pada oli mengalami penyumbatan atau masalah lainnya.

5. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah Inspection pada Vertical raw mill dilakukan untuk dapat mengetahui kerusakan-kerusakan yang terjadi di Vertical raw mill agar komponen komponen tidak mengalami kerusakan parah sebelum mesin berhenti dan juga untuk menjaga agar tetap dalam kondisi baik dan tidak mengganggu proses produksi. Pada penelitian ini ditemukan kondisi alat Vertical raw mill masih berada dalam kondisi yang layak jalan. Tapi alat tersebut sudah memasuki kondisi signifikan, sehingga perlu dilakukan pengecekan atau inspeksi secara rutin untuk menghindari terjadinya shutdown pada kegiatan produksi semen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Pareek and V. S. Sankhla, 2020. Review on vertical roller mill in cement industry & its performance parameters, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, 4621–4627. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.916.
- [2] S. Hassan, H. Salah, and N. Shehata, 2021. Effects of alternative calcium sulphate-bearing materials on cement characteristics in vertical mill and storing, *Case Study. Constr. Mater.* Vol. 14. doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00489.
- [3] D. W. Lee, S. S. Cho, and W. S. Joo, 2008. Safety evaluation of table liner for vertical roller mill by modified fatigue limit, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 15, No. 8. 989–999. doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.04.008.
- [4] L. R. D. Jensen, E. Fundal, P. Møller, and M. Jespersen, 2011. Wear mechanism of abrasion resistant wear parts in raw material vertical roller mills, *Wear*, Vol. 271, No. 11–12, 2707–2719. doi: 10.1016/j.wear.2011.03.018.
- [5] L. R. D. Jensen, H. Friis, E. Fundal, P. Møller, P. B. Brockhoff, and M. Jespersen, 2010. Influence of quartz particles on wear in vertical roller mills. Part I: Quartz concentration, *Miner. Eng.* Vol. 23, No. 5, 390–398. doi: 10.1016/j.mineng.2009.11.014.
- [6] H. Hu, Y. Li, Y. Lu, X. Wang, and G. Song, 2025. Study of influencing factors of performance in novel vertical roller mills, *Adv. Eng. Softw.* Vol. 202. doi: 10.1016/j.advengsoft.2024.103858.
- [7] G. Li et al., 2025. A predictive maintenance method for rotating mechanical components based on anchored backward algorithm, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* Vol. 255. doi: 10.1016/j.measurement.2025.118048.