

BAB 2 - KAJIAN PUSTAKA

2.1 Konsep *Physical Availability* dan Pemeliharaan

Keandalan (*reliability*) didefinisikan sebagai probabilitas suatu sistem atau komponen berfungsi sesuai tujuan dalam kondisi tertentu selama periode waktu yang telah ditentukan (Wahyudi *et al.*, 2010). Dalam konteks sistem industri, keandalan menjadi salah satu indikator utama keberhasilan operasi karena menentukan ketersediaan (*availability*) dan efisiensi produksi. Parameter yang sering digunakan untuk mengukur keandalan antara lain *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time to Repair* (MTTR), dan *availability*. Keandalan ditentukan oleh waktu yang mempunyai variabel random yang mengikuti distribusi eksponensial dan distribusi norma.

Pemeliharaan (*maintenance*) didefinisikan sebagai usaha atau tindakan perbaikan yang dilakukan untuk menjaga kondisi dan performa dari sebuah mesin/unit selalu seperti kondisi dan performa dari mesin/unit tersebut masih baru, dengan biaya perawatan yang serendah-rendahnya. Dari definisi tersebut bisa dikatakan semakin berjalannya waktu maka fungsi dari komponen mesin atau dari keseluruhan sistem mesin tersebut mengalami penurunan sehingga dari produksi menurun juga. Namun dengan adanya program pemeliharaan secara berkala dan tepat yang dilakukan, maka umur dari komponen mesin atau dari keseluruhan sistem mesin tersebut dapat diperpanjang sesuai dengan target dari manufaktur pembuatnya (Hamdaniaty, 2024). Pemeliharaan memiliki tujuan yang utama, yaitu: 1) Memperpanjang umur dari mesin; 2) Ketersediaan unit terjaga (*High Availability*); 3) Mesin selalu kondisi yang prima (*Best Performance*); 4) Biaya perbaikan lebih rendah atau hemat (*Reduce Cost*). Pada pemeliharaan memiliki beberapa jenis pemeliharaan yang dibagi menjadi dua kelompok, yaitu:

1. Pemeliharaan terencana (*Planned Maintenance*)

Pemeliharaan terencana adalah perawatan yang telah direncanakan sebelumnya dan sudah memiliki jadwal untuk dilakukan pekerjaan itu. Pada

program ini memiliki tiga jenis kegiatan pemeliharaan (Hamdaniaty, 2024), yaitu:

a. *Reactive* atau *corrective maintenance*

Corrective maintenance adalah kegiatan perawatan pada mesin yang dilakukan pada saat mesin tersebut mengalami *breakdown*. Kegiatan ini mengharuskan mekanik dan teknisi melakukan analisa kerusakan terjadi dan mencari tahu penyebab terjadinya *breakdown* mesin tersebut, kemudian memberika laporan dan rekomendasi agar *breakdown* tersebut tidak terulang lagi.

b. *Preventive maintenance*

Preventive maintenance adalah kegiatan perawatan yang dilakukan sebelum mesin tersebut mengalami *breakdown*. Secara konsep pemeliharaan ini mencegah mesin terjadinya kerusakan pada mesin tersebut. Untuk pencegahannya bisa dibuatkan jadwal pemeliharaan secara periodik baik secara harian, mingguan, atau bulanan (Muhaemin and Nugraha, 2022). Misalnya pada kegiatan ini dibuatkan jadwal *service* mesin secara berkala dan sudah tersedia *checksheets* uraian pekerjaannya seperti penggantian oli mesin setiap 250 jam, penggantian *filter* oli setiap 250 jam. Jadi kegiatan ini bersifat wajib dan rutin untuk dilakukan agar mesin selalu dalam kondisi yang prima waktu dioperasikan.

c. *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance adalah kegiatan pemeliharaan secara prediktif meliputi pemantauan terhadap kondisi unit di masa depan dimana pengambilan keputusan pemeliharaan diambil dari beberapa parameter yang telah dibuat atau ditentukan. Untuk parameter yang dibuat dari standarisasi yang ada di *shop manual* unit tersebut. Dari parameter yang dibuat dikomparasikan dengan hasil pengambilan sampel, seperti sampel oli, pemeriksaan mesin, pemeriksaan

attachment, dll. Hasil komparasi tersebut dianalisis dan menjadi acuan kapan dilakukan pemeliharaan mesin tersebut dilaksanakan.

2. Pemeliharaan tidak terencana (*Unplanned Maintenance*)

Pemeliharaan tidak terencana adalah kegiatan pemeliharaan suatu mesin yang tiba-tiba terjadi kerusakan dan harus diperbaiki dengan segera, bila tidak diperbaiki dengan segera mesin tersebut akan mengalami kerusakan yang lebih serius (Muhaemin and Nugraha, 2022).

Hubungan antara reliability dan maintenance sangat erat: semakin tepat strategi perawatan yang dipilih, semakin tinggi pula tingkat keandalan sistem, sehingga biaya downtime dan kerugian produksi dapat ditekan.

2.2 Reliability Centered Maintenance (RCM)

Reliability-Centered Maintenance (RCM) adalah pendekatan sistematis untuk menentukan strategi pemeliharaan berdasarkan fungsi peralatan, mode kegagalan, serta konsekuensi kegagalan tersebut terhadap sistem (Wibowo *et al.*, 2021). Konsep ini pertama kali dikembangkan pada industri penerbangan tahun 1960-an, kemudian dipopulerkan oleh John Moubray.

RCM memiliki langkah utama berupa identifikasi fungsi, penentuan kegagalan fungsional, analisis mode kegagalan, evaluasi konsekuensi, dan penentuan strategi pemeliharaan yang paling sesuai. Metode RCM memiliki sejumlah keuntungan diantaranya (Suryana, 2021):

1. Menjadi program pemeliharaan yang lebih efisien.
2. Mengurangi probabilitas terjadinya kerusakan mesin secara tiba-tiba.
3. Meningkatkan keandalan mesin guna meningkatkan produksi.
4. Meningkatkan angka ketersediaan unit dan performa unit
5. Memiliki umur komponen yang lebih panjang.

Strategi tersebut dapat berupa *preventive*, *predictive*, *redesign*, atau *run to failure* tergantung pada tingkat risiko.

2.3 Fault Tree Analysis (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan metode analisis deduktif yang digunakan untuk mengidentifikasi penyebab suatu kegagalan puncak (*top event*). Melalui pendekatan diagram pohon kesalahan, FTA memecah suatu kejadian kegagalan menjadi serangkaian *basic events* dengan hubungan logika AND dan OR (Hanif, Rukmi and Susanty, 2015).

Tahapan utama dalam FTA meliputi penentuan *top event*, penyusunan diagram pohon, identifikasi jalur kritis (*minimal cut set*), hingga perhitungan probabilitas kegagalan sistem. Kelebihan metode ini adalah kemampuannya memberikan gambaran jalur penyebab kegagalan yang paling berkontribusi, sehingga manajemen dapat fokus pada pencegahan akar masalah. Namun demikian, FTA biasanya hanya efektif bila *top event* sudah jelas, dan dapat menjadi rumit ketika sistem memiliki banyak komponen dengan interaksi kompleks. Adapun untuk langkah-langkah penyusunan dari FTA sebagai berikut (Hanif, Rukmi and Susanty, 2015):

1. Mengidentifikasi *top event*

Pada langkah ini untuk mengidentifikasi kesalahan sistem. Jadi perlu memahami tentang keseluruhan sistem dan ruang lingkupnya.

2. Membuat diagram pohon kesalahan

Pada langkah ini diagram pohon kesalahan akan menunjukkan *top event* kesalahan yang terjadi.

3. Menganalisa pohon kesalahan

Pada langkah ini perlunya untuk menganalisa pohon kesalahan guna memperoleh informasi dari sistem dan perbaikan yang akan dilakukan.

2.4 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) adalah metode analisis induktif yang bertujuan mengidentifikasi berbagai mode kegagalan pada komponen, menganalisis efek kegagalan tersebut terhadap sistem, serta menentukan tingkat prioritas risiko. Setiap kegagalan dinilai berdasarkan tiga parameter: *Severity* (tingkat keparahan dampak), *Occurrence* (frekuensi kejadian), dan *Detection* (kemungkinan terdeteksi).

Nilai dari ketiga parameter tersebut kemudian dikalikan untuk menghasilkan *Risk Priority Number* (RPN) (Kusuma, 2024).

Kelebihan metode ini adalah sistematis dan mudah diaplikasikan, sehingga sering digunakan di berbagai industri. Berikut tahapan penilaian FMEA:

1. Identifikasi system dan kegagalan, serta akibat yang ditimbulkan.
2. Menentukan tingkat keparahan (*severity*).
3. Menentukan tingkat frekuensi kemungkinan resiko terjadi kerusakan (*occurrence*).
4. Menentukan tingkat deeteksi (*detection*).
5. Menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN).

Kemudian dilakukan perhitungan RPN dengan mengalikan nilai skala S-O-D. untuk rumus dari RPN sebagai berikut:

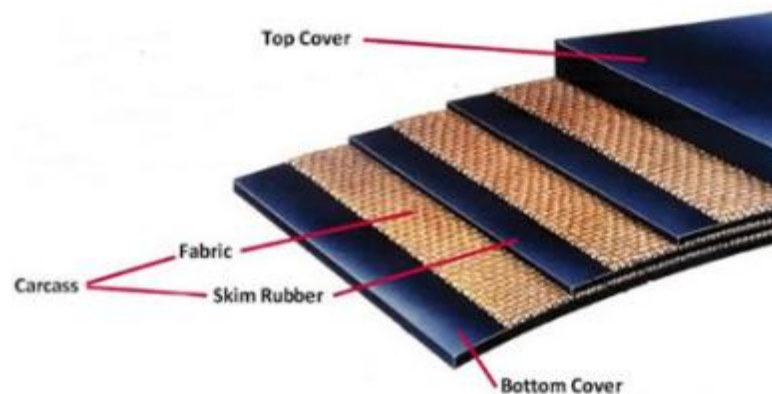
$$RPN = Severity (S) \times Occurrence (O) \times Detection (D) \dots\dots\dots(2.1)$$

Dari rumus tersebut digunakan untuk acuan rekomendasi perbaikan agar dapat mengurangi resiko kegagalan mesin/alat.

2.5 Barge Loader di Industri Pertambangan

Dalam industri pertambangan batubara, *barge loader* merupakan salah satu peralatan utama yang berfungsi untuk mengangkut material dari lokasi penambangan ke tempat penyimpanan atau pengolahan. Jenis *barge loader* yang paling banyak digunakan adalah *belt conveyor*, karena mampu memindahkan material dalam jumlah besar secara kontinu dengan biaya operasional relatif rendah (Aosoby, Rusianto and Waluyo, 2016).

1. Belt Conveyor



Gambar 3 Konstruksi Belt Conveyor

(Sumber: Bando, 2025)

Belt conveyor merupakan komponen yang menerima material dari *on ground*. Konstruksi *belt conveyor* sesuai dengan Gambar 3 terdiri dari tiga komponen utama antara lain *carcass* yang berfungsi melindungi *belt* dari hantaman material yang menyebabkan *belt* tersebut sobek, *skims* berfungsi sebagai *adhesive*/perekat di bagian dalam *belt*, membantu dalam ketahanan *belt*, dan memainkan peran penting dalam menentukan dukungan *belt* dan jarak tempuh, *cover* yang terdiri dari *top* dan *bottom*, untuk bagian *top* sebagai tempat material yang akan didistribusikan oleh *belt conveyor* dan bagian *bottom* berfungsi sebagai menopang *belt conveyor* dan mengarahkan *belt* tetap lurus pada jalurnya.

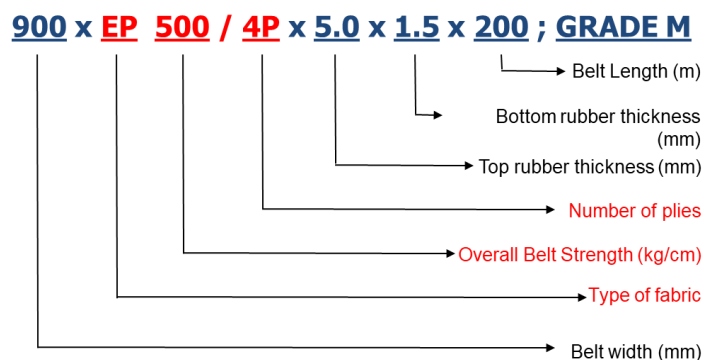
Kemudian untuk karakteristik *belt conveyor* sesuai dengan Tabel 1. Dimana dijelaskan *belt conveyor* memiliki empat tipe, yaitu JIS L, JIS G, JIS S, dan *GRADE M*. Untuk tipe JIS L memiliki *tensile strength* sebesar 80 N/cm², *elongation at break* 300%, dan *abrasion loss* 400 mm³, kemudian tipe JIS G memiliki *tensile strength* sebesar 140 N/cm², *elongation at break* 400%, dan *abrasion loss* 250 mm³, kemudian tipe JIS S memiliki *tensile strength* sebesar 180 N/cm², *elongation at break* 450%, dan *abrasion loss* 200 mm³, kemudian tipe *Grade M* memiliki *tensile strength* sebesar 250 N/cm², *elongation at break* 450%, dan *abrasion loss* 120 mm³.

Tabel 1 Karakteristik Belt Conveyor

(Sumber: Bando, 2025)

KARAKTERISTIK <i>COVER</i>					
<i>TEST TYPE</i>	UNIT	JIS L	JIS G	JIS S	<i>GRADE M</i>
<i>TENSILE STRENGTH</i>	N/CM ²	80	140	180	250
<i>ELONGATION AT BREAK</i>	%	300	400	450	450
<i>ABRASION LOSS</i>	MM ³	400	250	200	120

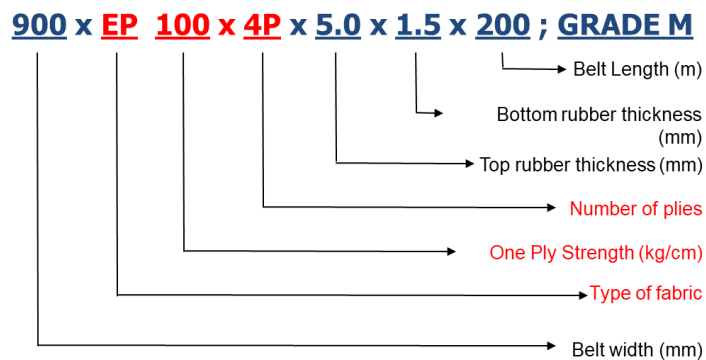
Untuk kode ukuran yang terpasang di *belt conveyor* dibedakan menjadi dua, yaitu *size code of overall belt strength* dan *size code of one ply belt strength*. Berdasarkan Gambar 4 berikut merupakan dekripsi pengkodean untuk *size code of overall belt strength*, dimana 900 menandakan lebar *belt conveyor*, EP menandakan tipe dari susunan *ply*, 500 menandakan kekuatan dari *belt conveyor*, 4P menandakan jumlah *ply*, 5 menandakan ketebalan dari karet bagian atas, 1.5 menandakan ketebalan dari karet bagian bawah, 200 menandakan panjang dari *belt*, *GRADE M* menandakan jenis *belt conveyor* yang dipakai.



Gambar 4 Size Code of Overall Belt Conveyor

(Sumber: Bando, 2025)

Kemudian deskripsi pengkodean untuk *size code of one ply belt strength* sesuai dengan Gambar 5 berikut. Dimana 900 mendakan lebar *belt conveyor*, EP menandakan tipe dari susunan *ply*, 100 menandakan kekuatan per *ply* dari *belt conveyor*, 4P menandakan jumlah *ply*, 5 menandakan ketebalan dari karet bagian atas, 1.5 menandakan ketebalan dari karet bagian bawah, 200 menandakan panjang dari *belt*, *GRADE M* menandakan jenis *belt conveyor* yang dipakai.



Gambar 5 Size Code of One Ply Belt Conveyor

(Sumber: Bando, 2025)

2. On Ground



Gambar 6 On Ground

Dari Gambar 6 bisa dilihat bagian *on ground* dari *belt conveyor* berfungsi untuk mengendalikan aliran material dan mengatur aliran material yang masuk ke dalam *belt conveyor*.

3. *Transfer Chute*



Gambar 7 *Transfer Chute*

Dari Gambar 7 merupakan *transfer chute* yang berfungsi untuk mengatur aliran material yang didistribusikan antara *belt conveyor* satu dengan lainnya, meminimalkan material tumpah atau keluar dari jalur pada saat didistribusikan antar *belt conveyor*, dan mengurangi efek debu yang ditimbulkan. Adapun *transfer chute* dibagi menjadi empat bagian penting, yaitu *head chute*, *drop chute*, *loading chute*, dan *settling chute*.

2.6 Sistem Kelistrikan di Barge Loader

Sistem kelistrikan pada *belt conveyor* terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu motor penggerak (*drive motor*), panel kontrol, *inverter* atau *Variable Frequency Drive* (VFD), serta sistem proteksi seperti *relay* dan *circuit breaker* (Sadi, 2012). Selain itu, terdapat sensor dan instrumen pendukung yang memastikan *conveyor* beroperasi sesuai kondisi aman.

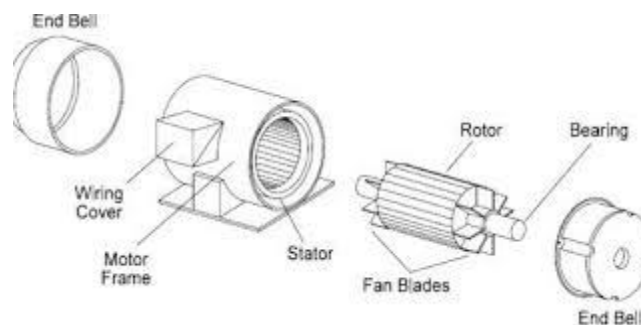
Fungsi motor penggerak adalah memberikan daya mekanis untuk menggerakkan *belt*, sedangkan panel kontrol dan *inverter* mengatur kecepatan serta arah operasi. Sistem proteksi berfungsi melindungi peralatan dari kerusakan lebih lanjut akibat gangguan arus lebih, hubung singkat, atau kegagalan lainnya. Kegagalan pada salah satu komponen elektrik umumnya mengakibatkan *conveyor* berhenti total, sehingga aspek

keandalan sistem kelistrikan menjadi sangat penting dalam mendukung keberlangsungan operasi pelabuhan batubara.

Pada umumnya *belt conveyor* digerakkan oleh komponen kelistrikan 3 fasa. Berikut merupakan komponen – komponen kelistrikan di *belt conveyor*:

1. Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi 3 fasa merupakan motor induksi yang paling banyak digunakan di industri. Hal ini dikarenakan motor induksi 3 fasa memiliki konstruksi yang kokoh, sederhana, harga relative murah, serta perawatannya mudah (Sadi, 2012). Motor ini bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yaitu arus listrik pada *rotor* timbul akibat pengaruh medan magnet berputar yang dihasilkan oleh *stator* tanpa adanya hubungan listrik langsung. Ketika *stator* diberi suplai listrik 3 fasa, maka terbentuk medan magnet yang berputar dan memotong konduktor pada *rotor*. Hal ini menimbulkan arus induksi pada *rotor* yang selanjutnya menghasilkan medan magnet baru. Interaksi antara medan magnet *stator* dan *rotor* membuat *rotor* ikut berputar dengan kecepatan sedikit lebih rendah daripada kecepatan medan *stator*. Perbedaan kecepatan ini disebut *slip*, dan *slip* inilah yang memungkinkan motor induksi bekerja.



Gambar 8 Motor Induksi 3 Fasa

(Sumber: Automationforum, 2025)

Pada Gambar 8 merupakan gambar bagian motor induksi 3 fasa, bagian utama motor induksi 3 fasa terdiri dari *stator*, *rotor*, rangka, dan *bearing*. *Stator* berfungsi menghasilkan medan magnet berputar, sedangkan *rotor* berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. *Rotor* sendiri terbagi menjadi dua jenis, yaitu *rotor*

sangkar tupai yang paling umum digunakan karena konstruksinya sederhana dan kuat, serta *rotor* belitan yang memungkinkan pengaturan torsi awal melalui cincin geser.

2. *Inverter* atau *Variable Frequency Drive* (VFD)

Inverter digunakan untuk mengubah sumber DC (*direct current*) menjadi sumber AC (*alternating current*), dimana tegangan yang dihasilkan dapat merupakan nilai konstan atau *variable*. Dalam pengoperasian motor induksi, *inverter* memiliki peran penting karena mampu mengatur kecepatan dan torsi motor sesuai kebutuhan beban (Nasution and Hasibuan, 2018). Prinsipnya, *inverter* mengatur frekuensi suplai listrik yang diberikan ke motor, karena kecepatan putar motor induksi berbanding lurus dengan frekuensi sumbernya. Dengan demikian, semakin tinggi frekuensi keluaran *inverter*, semakin tinggi pula kecepatan motor, dan sebaliknya.

Selain mengatur kecepatan, *inverter* juga berfungsi menurunkan arus awal (*starting current*) yang biasanya sangat besar ketika motor induksi dinyalakan secara langsung ke jaringan listrik. Tanpa *inverter*, motor induksi 3 fasa bisa menarik arus start hingga 6–8 kali arus nominalnya, yang dapat membebani sistem kelistrikan. Dengan *inverter*, tegangan dapat dinaikkan secara bertahap (*soft start*), sehingga arus awal menjadi lebih rendah dan operasi motor lebih aman.

Inverter modern untuk motor induksi 3 fasa umumnya menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) yang mampu menghasilkan gelombang mendekati sinus murni. Hal ini membuat motor bekerja lebih halus, efisien, dan menghasilkan torsi yang stabil. Aplikasi *inverter* pada motor induksi banyak ditemukan di berbagai industri, misalnya pada *conveyor*, pompa, kompresor, kipas, dan mesin produksi. Dengan penggunaan *inverter*, perusahaan tidak hanya mendapatkan fleksibilitas dalam pengaturan kecepatan mesin, tetapi juga efisiensi energi yang lebih tinggi serta umur peralatan yang lebih panjang.

3. Panel Kontrol Dalam Panel *Box*

Dalam sebuah sistem kelistrikan *barge loader* selain menggunakan motor induksi 3 fasa dan *inverter*, *barge loader* juga perlu digerakkan oleh rangkaian daya yang ada di panel, antara lain:

a. *Molded Case Circuit Breaker (MCCB)*

MCCB (*Molded Case Circuit Breaker*) adalah salah satu jenis pemutus arus listrik (*circuit breaker*) yang berfungsi melindungi sistem tenaga listrik dari kerusakan akibat arus lebih (*overcurrent*), beban lebih (*overload*), maupun hubung singkat (*short circuit*) (Zidan, 2022). MCCB dirancang dengan kapasitas arus yang lebih besar dibandingkan MCB (*Miniature Circuit Breaker*), sehingga banyak digunakan pada instalasi listrik skala menengah hingga besar, seperti di gedung perkantoran, pabrik, dan instalasi industri.



Gambar 9 MCCB Schneider *Easypact* EZC100F

Gambar 9 merupakan salah satu bentuk fisik dari MCCB. MCCB memiliki rating arus yang bervariasi, mulai dari sekitar 100 *ampere* hingga ribuan *ampere*, dengan kemampuan pemutusan arus hubung singkat yang tinggi. Prinsip kerjanya menggunakan mekanisme termal dan elektromagnetik. Mekanisme termal digunakan untuk melindungi dari arus beban lebih dalam waktu tertentu, sedangkan mekanisme elektromagnetik bekerja sangat cepat untuk memutus arus saat terjadi hubung singkat. Selain itu, MCCB juga bisa dilengkapi dengan fitur tambahan seperti proteksi arus bocor, indikator posisi kontak, dan bahkan sistem pemantauan digital pada tipe modern.

b. *Kontaktor (Magnetic Contactor)*

Magnetic contactor adalah komponen listrik berupa saklar yang bekerja dengan prinsip elektromagnet untuk menghubungkan atau memutus aliran listrik pada rangkaian tenaga, terutama pada motor listrik, pemanas, penerangan, atau peralatan listrik dengan daya besar (Septiawan, Suherman and Murdiyat, 2020).



Gambar 10 *Magnetic Contactor* Schneider LC1D40AM7

Gambar 10 merupakan *magnetic contactor*, komponen ini digerakkan oleh kumparan elektromagnet (*coil*) pada terminal A1 dan A2 yang akan menciptakan medan magnet ketika dialiri arus listrik. Medan magnet tersebut menarik kontak bergerak sehingga rangkaian tenaga menjadi terhubung pada terminal 13 dan 14 (NO). Saat arus ke *coil* dihentikan, gaya magnet hilang dan kontak kembali terputus dengan bantuan pegas pada terminal 21 dan 22 (NC). Dengan cara kerja ini, *magnetic contactor* memungkinkan pengendalian peralatan listrik secara otomatis maupun jarak jauh dengan aman dan cepat.

c. *Relay*

Relay adalah saklar elektronik yang digunakan untuk membuka dan menutup rangkaian dengan menggunakan kontrol dari rangkaian elektronik lain, misalnya dikombinasikan dengan *magnetic contactor*. *Relay* tersusun atas kumparan, pegas, saklar, dan 2 kontak (*normally close* dan *normally open*).



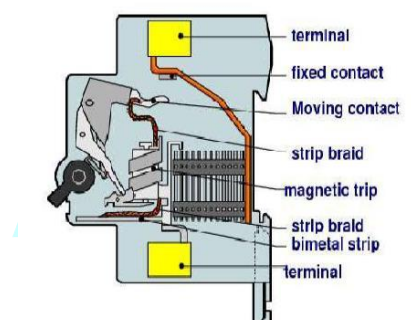
Gambar 11 *Relay* Schneider RXM4AB2P7

Gambar 11 merupakan *relay* yang dapat dioperasikan secara NO dan NC. Berdasarkan prinsip kerjanya, *relay* dapat bekerja dengan adanya medan magnet di sekitar kumparan untuk menggerakkan saklar. Saat kumparan diberikan tegangan sebesar tegangan kerja dari relay maka akan timbul medan magnet di sekitar kumparan sehingga akan menggerakkan saklar yang awal mulanya NO menjadi NC dan sebaliknya (Sadi, 2012).

1. *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

Miniature circuit breaker memiliki fungsi sebagai pengaman dari arus berlebih pada sebuah komponen, pengaman dari termal berlebih dari jalur kabel yang dipasang ke komponen (Hutajulu, Malino and Tambunan, 2024).

Berdasarkan konstruksi MCB yang bisa dilihat dari Gambar 12, MCB memiliki dua cara pemutusan, yaitu:



Gambar 12 Konstruksi MCB

(Sumber: (Damayanti and Marfiyan, 2013))

1. Pemutusan secara thermis

Pada pemutusan ini berdasarkan pemuai panas dari batang *bimetal*, yang terdiri dari perpaduan dua jenis logam yang mempunyai koefisien muai berbeda. Bila arus yang melewati *bimetal* ini berlebih akan menyebabkan panas di daerah batang *bimetal* sehingga batang bimetal melengkung, kemudian mendorong tuas pemutus untuk melepas kunci mekanisnya dan terjadi *trip* atau memutus aliran listrik.

Pada pemutusan ini berdasarkan penggunaan koil/*solenoid* yang digunakan untuk mengalirkan aliran listrik, dimana saat terjadinya proses induksi berlebih pada koil tersebut membuat MCB mengalami hubung singkat maka akan terbentuk medan magnet di sekitarnya sehingga mengaktifkan tuas pemutus.

Thermal Overload Relay (TOR) adalah perangkat proteksi listrik yang berfungsi melindungi motor listrik, khususnya motor induksi, dari kondisi beban lebih (*overload*) yang berlangsung dalam jangka waktu tertentu (Lubis, Harahap and Putri, 2024). TOR biasanya dipasang bersama dengan *magnetic contactor* sebagai bagian dari sistem kendali motor. Alat ini bekerja dengan memutuskan aliran listrik pada motor jika arus yang mengalir melebihi batas nominalnya, sehingga motor tidak mengalami panas berlebih yang dapat merusak lilitan, mengurangi umur isolasi, atau bahkan menyebabkan kebakaran.



Gambar 13 TOR memiliki empat terminal bantu yaitu 2 NO (97,98) dan 2 NC (95,96), 3 terminal utama T1, T2, T3, tombol untuk *reset* dan *stop*. Cara kerja TOR didasarkan pada prinsip pemuaian *bimetal*. Di dalam TOR terdapat lempengan *bimetal* yang terdiri dari dua jenis logam dengan koefisien muai berbeda dan dipasang seri dengan beban (motor). Saat arus motor mengalir terlalu besar, *bimetal* memanaskan dan melengkung karena perbedaan pemuaian kedua logam. Lengkungan bimetal ini akan mendorong mekanisme kontak pada *relay* sehingga membuka (*trip*) rangkaian kontrol yang menghubungkan kumparan *magnetic contactor*. Akibatnya, contactor mati dan aliran

listrik ke motor terputus. Setelah TOR bekerja, motor tidak akan bisa dinyalakan kembali sampai kondisi *bimetal* mendingin dan *relay* di-*reset*, baik secara manual maupun otomatis tergantung jenisnya. Dengan cara kerja ini, TOR melindungi motor dari kerusakan akibat beban lebih yang tidak langsung memicu arus hubung singkat. TOR tidak dirancang untuk melindungi dari *short circuit* (hubung singkat), sehingga biasanya digunakan bersama MCB/MCCB yang bertugas sebagai proteksi hubung singkat. Dalam praktik industri, TOR sangat penting untuk menjaga keandalan operasi motor, terutama pada aplikasi yang bekerja terus-menerus seperti pompa, kompresor, dan *conveyor*.

2.7 Penelitian Terdahulu

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membahas penerapan RCM dan metode analisis keandalan pada berbagai sektor industri. Misalnya, penerapan RCM pada sistem kelistrikan pembangkit listrik menunjukkan penurunan *downtime* yang signifikan. Beberapa studi lain menggunakan FMEA untuk mengidentifikasi mode kegagalan pada *conveyor*, sementara FTA digunakan dalam analisis akar penyebab gangguan peralatan di industri manufaktur.

Tabel 2 *State of the Art*

Penulis & Tahun	Judul	Metodologi	Kesimpulan	Rekomendasi
Priyambada et al. (2024)	Analisa Penyebab Kerusakan pada <i>Belt Conveyor</i> di PT XYZ Menggunakan Metode FTA dan FMEA	Deskriptif-analitik, menggunakan FMEA (RPN) dan FTA	Sambungan <i>belt conveyor</i> memiliki RPN tertinggi (160), menjadi komponen paling kritis penyebab kegagalan.	Perlu perbaikan kualitas pemasangan dan pemilihan material sambungan; lakukan inspeksi berkala berbasis FMEA & FTA.komponen lebih optimal.
Waskito, Abdillah and	Analisis Perawatan	Studi kasus kualitatif	Perawatan harian,	Terapkan <i>preventive</i>

Dwiyanto (2025)	Mesin <i>Belt Conveyor</i> di PT. X	(wawancara, observasi); analisis <i>preventive & corrective maintenance</i>	mingguan, dan bulanan efektif mendeteksi masalah lebih dini, memperpanjang umur mesin, dan menekan biaya perbaikan darurat.	<i>maintenance</i> secara konsisten; fokus pada inspeksi harian & penggantian komponen aus.
Kurniawan and Wasiur Rizqi (2025)	<i>Conveyor Belt Machine Maintenance Planning Using FMEA and RCM Methods</i> at PT. SBM	FMEA (RPN) & <i>Reliability Centered Maintenance</i> (RCM)	<i>Belt</i> (RPN 180) dan <i>gear</i> (RPN 150) paling kritis; RCM menghasilkan jadwal perawatan optimal berbasis TTF & TTR.	Implementasi <i>IoT-based monitoring</i> , pelatihan teknisi, dan standardisasi pemeliharaan berbasis RCM.
Petrovic, Velickovic and Mikovic (2014)	<i>Belt Conveyor Analysis Using Fault Tree Analysis Method</i>	<i>Fault Tree Analysis</i> (FTA) pada mesin <i>conveyor</i> penyortir kentang	Identifikasi <i>subassembly</i> dan komponen kritis; FTA efektif menggambarkan alur kegagalan sistem <i>conveyor</i> .	Gunakan FTA sejak tahap desain maupun operasional; lakukan revisi desain pada komponen rawan gagal.
Rohmat (2022)	Analisis Perawatan Mesin <i>Conveyor</i> dengan Metode <i>Reliability Centered Maintenance</i> (RCM) di PT WINGS	<i>Reliability Centered Maintenance</i> (RCM), perhitungan MTTF, TTF, TTR	Komponen kritis: <i>carrier roller</i> , <i>support carrier</i> , <i>impact roller</i> , <i>rubber seal</i> . Jadwal perawatan optimal harus	Terapkan RCM dengan perawatan <i>time-directed</i> dan <i>condition-directed</i> ; ubah jadwal perawatan agar sesuai MTTF.

			<200 jam untuk <i>carrier roller</i> .	
--	--	--	---	--

Dari Tabel 2 sebagian besar penelitian terdahulu masih bersifat parsial, yaitu hanya menggunakan satu metode analisis (misalnya FMEA saja atau FTA saja). Selain itu, kajian yang secara khusus menyoroti sistem elektrik pada *belt conveyor* di industri pertambangan batubara masih terbatas.

2.8 Kesenjangan Penelitian

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa berbagai metode analisis pemeliharaan telah diterapkan pada sistem *conveyor* dengan fokus yang berbeda-beda. Priyambada et al. (2024) menggunakan FMEA dan FTA untuk mengidentifikasi komponen kritis pada *belt conveyor*, namun belum menghasilkan strategi perawatan menyeluruh. Waskito, Abdillah and Dwiyanto (2025) menekankan *preventive maintenance* harian, mingguan, dan bulanan yang terbukti efektif, meskipun belum didukung analisis kuantitatif kegagalan. Sementara itu, Petrovic, Velickovic dan Mikovic (2014) menerapkan FTA dalam analisis kegagalan *conveyor*, tetapi fokusnya lebih pada desain sistem daripada strategi perawatan operasional. Pendekatan integratif dilakukan oleh Kurniawan dan Wasiur Rizqi, (2025) yang menggabungkan FMEA dengan RCM untuk menyusun jadwal perawatan optimal, walau terbatas pada komponen mekanik. Di sisi lain (Rohmat, 2022) berhasil menerapkan RCM pada mesin *conveyor* di industri manufaktur untuk menentukan interval perawatan, namun belum menyentuh aspek sistem elektrik *conveyor* khususnya di industri batubara.

Dari penelitian-penelitian sebelum didapatkan gap yang teridentifikasi sebagai berikut:

1. Belum ada penelitian yang mengintegrasikan FTA dan FMEA sekaligus ke dalam kerangka RCM untuk menyusun strategi perawatan.
2. Penelitian terdahulu sebagian besar berfokus pada komponen mekanik conveyor, sedangkan aspek sistem elektrik (motor, panel kontrol, *inverter*) relatif belum banyak diteliti.