

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri kelapa sawit merupakan salah satu pilar ekonomi utama Indonesia, berkontribusi signifikan terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) dan menciptakan lapangan kerja yang luas. Sebagai produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia, efisiensi dalam setiap tahapan proses produksi dan distribusi menjadi krusial untuk menjaga daya saing global dan keberlanjutan bisnis (Badan Pusat Statistik, 2024). Salah satu tahapan penting dalam rantai pasok minyak kelapa sawit, khususnya *Refined Bleached Deodorized (RBD) Palm Oil*, adalah proses pemindahan dari *storage tank* menuju kapal *tanker* untuk pengiriman ke pasar domestik maupun internasional. Proses ini melibatkan penggunaan pompa yang digerakkan oleh elektromotor, di mana efisiensi operasionalnya secara langsung berdampak pada biaya energi, waktu pemuatan, dan pada akhirnya profitabilitas perusahaan.

PT. Smart Tbk, sebagai salah satu perusahaan agribisnis terkemuka di Indonesia, memiliki fasilitas pengolahan dan distribusi kelapa sawit yang berlokasi strategis di area Pelabuhan PT. Pelindo (Persero). Lokasi ini memungkinkan akses yang efisien untuk kegiatan *ekspor* dan *impor*. Dalam operasional sehari-hari, PT. Smart Tbk mengandalkan sistem pemompaan yang robust untuk memindahkan volume *RBD Palm Oil* yang besar. Namun, seperti halnya sistem mekanis lainnya, terdapat potensi optimasi yang dapat dieksplorasi untuk meningkatkan efisiensi. Salah satu parameter yang seringkali menjadi fokus perhatian dalam optimasi sistem pemompaan adalah variasi putaran elektromotor, (Buku Referensi PT. Smart Tbk).

Putaran elektromotor memiliki pengaruh *fundamental* terhadap karakteristik kinerja pompa, termasuk laju aliran (kapasitas), tekanan (head), dan konsumsi daya. Menurut *Affinity Laws* untuk pompa sentrifugal, perubahan putaran (*speed*) akan secara proporsional mempengaruhi laju aliran, kuadrat

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang akan dijawab dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi putaran elektromotor terhadap laju aliran dan kecepatan alir RBD *Palm Oil* dari *storage tank* menuju kapal *tanker* di PT Smart Tbk?
2. Seberapa besar pengaruh variasi putaran elektromotor terhadap efisiensi pemompaan RBD *Palm Oil* dari *storage tank* menuju kapal *tanker* di PT Smart Tbk?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus dan kedalaman penelitian, maka studi ini memiliki beberapa batasan sebagai berikut:

1. Penelitian hanya terbatas pada analisis tiga putaran elektromotor yang spesifik: 1400 rpm, 1500 rpm dan 1600 rpm.
2. Studi ini hanya melibatkan pemompaan RBD *Palm Oil* di fasilitas PT Smart Tbk area Pelabuhan PT Pelindo.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, penelitian ini memiliki dua tujuan utama yang saling berkaitan, yaitu:

1. Menganalisis pengaruh variasi putaran elektromotor terhadap karakteristik aliran RBD *Palm Oil*.
2. Mengevaluasi dampak variasi putaran elektromotor terhadap efisiensi sistem pemompaan.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan, baik bagi industri maupun dunia akademis, sebagai berikut:

1. Bagi Perusahaan (PT Smart Tbk): Memberikan data dan analisis kuantitatif mengenai efisiensi pemompaan RBD *Palm Oil* pada berbagai putaran elektromotor, yang dapat menjadi dasar untuk optimasi operasional,

penghematan energi, dan pengambilan keputusan terkait pengaturan kecepatan pompa.

2. Bagi Dunia Akademis: Menambah ilmu pengetahuan di bidang mekanika fluida dan teknik pemompaan, khususnya aplikasi pada industri minyak kelapa sawit, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

BAB 2

TEORI DASAR

2.1 Konsep Dasar Fluida

Fluida adalah zat yang dapat mengalir dan tidak dapat menahan tegangan geser (*shear stress*) secara permanen. Perbedaan utamanya dengan zat padat adalah fluida akan terus mengalami deformasi selama tegangan geser diterapkan, tidak peduli seberapa kecil tegangan tersebut. Kategori fluida mencakup cairan dan gas.

2.1.1 Definisi Fluida

Fluida merupakan salah satu dari tiga wujud materi utama (selain padat dan plasma) yang memiliki karakteristik unik dalam merespons gaya eksternal. Secara *fundamental*, fluida didefinisikan sebagai zat yang tidak memiliki bentuk tetap dan akan secara terus-menerus mengalami deformasi atau mengalir ketika dikenai tegangan geser (*shear stress*), tidak peduli seberapa kecil tegangan geser tersebut. Berbeda dengan benda padat yang akan mengalami deformasi terbatas dan kemudian menahan gaya geser, fluida akan terus mengalir selama gaya geser tersebut diterapkan. Sifat "mengalir" inilah yang membedakan fluida dari benda padat.

Dalam konteks *makroskopik*, fluida dapat berupa cairan atau gas. Meskipun keduanya adalah fluida, terdapat perbedaan signifikan dalam sifat-sifat fisiknya: cairan memiliki volume yang relatif tetap pada suhu dan tekanan tertentu tetapi tidak memiliki bentuk yang tetap dan akan menempati bentuk wadahnya, sedangkan gas tidak memiliki volume maupun bentuk yang tetap dan akan mengembang untuk memenuhi seluruh volume wadah yang ditempatinya. Perbedaan ini berasal dari kekuatan ikatan antarmolekul; ikatan pada cairan cukup kuat untuk mempertahankan volume namun longgar untuk memungkinkan pergerakan molekul, sementara ikatan pada gas sangat lemah sehingga molekul bergerak sangat bebas.

2.1.2 Sifat Fisik Fluida

Untuk memahami perilaku fluida secara kuantitatif, kita perlu mengenal sifat-sifat fisik utamanya. Tiga sifat yang paling mendasar adalah densitas,

viskositas, dan tegangan permukaan, yang masing-masing memainkan peran krusial dalam dinamika fluida.

1. Densitas (Massa Jenis), ρ (*rho*):

Densitas didefinisikan sebagai massa per unit volume fluida ($\rho=m/V$), yang merupakan ukuran seberapa "padat" suatu fluida. Satuan SI untuk densitas adalah kilogram per meter kubik (kg/m^3). Untuk cairan, densitas relatif tidak sensitif terhadap perubahan tekanan, tetapi sedikit menurun dengan peningkatan suhu. Sebaliknya, densitas gas sangat bergantung pada suhu dan tekanan, mengikuti hukum gas ideal ($\rho=P/(RT)$), di mana peningkatan tekanan akan meningkatkan densitas, sementara peningkatan suhu akan menurunkannya.

2. Viskositas, μ (*mu*) - Viskositas Dinamis/Absolut & ν (*nu*) - Viskositas Kinematik:

Viskositas adalah ukuran ketahanan internal fluida terhadap aliran atau deformasi geser, sering disebut sebagai "gesekan internal" fluida. Viskositas dinamis (μ) mengukur gaya geser yang diperlukan untuk menghasilkan laju regangan geser tertentu, sesuai dengan Hukum Viskositas Newton: $\tau=\mu(du/dy)$. Satuan SI untuk viskositas dinamis adalah Pascal-detik ($\text{Pa}\cdot\text{s}$). Viskositas kinematik (ν) didefinisikan sebagai rasio viskositas dinamis terhadap densitas fluida ($\nu=\mu/\rho$), mengukur resistansi fluida terhadap aliran di bawah pengaruh gravitasi.

3. Tegangan Permukaan, σ (*sigma*):

Tegangan permukaan adalah gaya *kohesif* antara molekul-molekul pada membran elastis yang tegang. Fenomena ini muncul karena molekul-molekul di permukaan cairan hanya ditarik ke samping dan ke bawah oleh molekul tetangga, menciptakan gaya netto ke dalam yang menyebabkan permukaan mengerut dan meminimalkan luas permukaannya.

2.1.3 Klasifikasi Fluida

Klasifikasi fluida berdasarkan responsnya terhadap tegangan geser adalah konsep kunci dalam *rheologi*, studi tentang deformasi dan aliran materi. Pembagian utama adalah antara fluida *Newtonian* dan fluida *non-Newtonian*,

yang memiliki implikasi besar dalam desain dan operasi sistem yang melibatkan fluida.

1. *Fluida Newtonian*

Fluida Newtonian adalah fluida yang mematuhi Hukum Viskositas *Newton*, di mana tegangan geser (τ) berbanding lurus secara linear dengan laju regangan geser (du/dy). Konstanta proporsionalitas dalam hubungan ini adalah viskositas dinamis (μ), yang diasumsikan konstan pada suhu dan tekanan tertentu, tidak tergantung pada laju regangan geser atau durasi penerapan gaya.

2. *Fluida Non-Newtonian*

Fluida non-Newtonian adalah fluida yang tidak mematuhi Hukum Viskositas *Newton*. Hubungan antara tegangan geser dan laju regangan geser tidak linear, atau viskositasnya berubah tergantung pada laju regangan geser, waktu, atau riwayat gaya. Studi tentang fluida *non-Newtonian* sangat penting dalam berbagai industri seperti pangan, kosmetik, *polimer*, dan farmasi, karena banyak produk sehari-hari menunjukkan perilaku *non-Newtonian*.

2.1.4 Karakteristik *RBD Palm Oil*

Refined, Bleached, and Deodorized (RBD) Palm Oil adalah salah satu komoditas minyak nabati paling banyak diperdagangkan di dunia, dengan aplikasi luas dalam industri pangan, kosmetik, dan bahan bakar nabati. Memahami karakteristik fisiknya sebagai fluida sangat penting untuk perancangan, operasi, dan optimasi proses yang melibatkan transportasi, penyimpanan, dan pemrosesan minyak ini.

Karakteristik kunci *RBD Palm Oil* yang relevan dari perspektif mekanika fluida meliputi:

1. Densitas (ρ): Densitas *RBD Palm Oil* bervariasi dengan suhu. Pada suhu kamar (sekitar 25-30°C), densitasnya berkisar antara 900-920 kg/m³. Densitas ini umumnya menurun secara linear dengan peningkatan suhu dalam fase cair karena ekspansi termal.
2. Viskositas (μ): Viskositas adalah parameter paling krusial untuk *RBD Palm Oil* karena sangat sensitif terhadap suhu. *RBD Palm Oil* umumnya bersifat *Newtonian* dalam fase cair penuh. Pada suhu tinggi (di atas titik lelehnya

secara signifikan), viskositasnya relatif rendah, memungkinkan pemompaan yang mudah dan efisien.

3. Titik Leleh/Pembekuan (*Melting/Freezing Point*): *RBD Palm Oil* bukanlah zat murni tunggal; ia adalah campuran kompleks trigliserida dengan titik leleh yang bervariasi. Oleh karena itu, ia memiliki rentang titik leleh, bukan titik leleh tunggal. Rentang titik leleh tipikal untuk *RBD Palm Oil* adalah sekitar 24°C hingga 38°C, yang berarti pada suhu di bawah rentang ini, minyak akan mulai memadat.
4. Panas Spesifik (C_p) dan Konduktivitas Termal (k): Panas spesifik adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu satu unit massa minyak sebesar satu derajat *Celsius/Kelvin*, yang penting untuk menghitung beban panas yang dibutuhkan untuk memanaskan minyak, (Atchelor, G. K. 2000).



Gambar : 2.1 Karakteristik *RBD (Palm Oil)*

2.2 Prinsip Dasar Pemompaan

Pemompaan adalah proses mentransfer fluida (cairan atau gas) dari satu lokasi ke lokasi lain dengan meningkatkan energi mekanik fluida tersebut. Energi ini biasanya diubah menjadi energi tekanan atau energi kinetik, memungkinkan fluida bergerak mengatasi hambatan seperti gravitasi, gesekan, atau tekanan yang lebih tinggi.

2.2.1 Definisi dan Fungsi Pompa

Pompa adalah salah satu jenis mesin fluida yang paling umum digunakan dalam berbagai sektor industri, komersial, dan domestik. Secara esensial, pompa adalah perangkat mekanis yang berfungsi untuk mentransfer atau menggerakkan

fluida dari satu lokasi ke lokasi lain dengan menambahkan energi pada fluida tersebut. Proses penambahan energi oleh pompa melibatkan peningkatan salah satu atau beberapa bentuk energi fluida. Pompa dapat meningkatkan energi tekanan statis fluida, memungkinkannya mengalir melawan gradien tekanan atau mengatasi hambatan dalam sistem perpipaan.

Berdasarkan mekanisme transfer energinya, fungsi pompa dapat diringkas sebagai berikut: Pertama, mengalirkan fluida dari satu titik ke titik lain, baik dari tangki penyimpanan ke tangki lain atau melalui proses produksi yang kompleks. Secara garis besar, pompa diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, masing-masing dengan prinsip kerja yang berbeda dan aplikasi yang optimal. Pompa Perpindahan Positif bekerja dengan menjebak volume fluida yang tetap dan kemudian memindahkannya secara paksa.

2.2.2 Jenis-jenis Pompa (Fokus pada Pompa Sentrifugal)

Dalam banyak aplikasi industri, khususnya untuk pemindahan cairan dengan laju aliran tinggi dan *viskositas* rendah hingga menengah, pompa sentrifugal adalah pilihan yang paling dominan di antara kategori pompa dinamik. Meskipun demikian, penting untuk memahami perbedaan mendasar antara pompa perpindahan positif dan pompa dinamik untuk pemilihan yang tepat.

1. Pompa Perpindahan Positif (*Positive Displacement Pumps*)

Pompa ini beroperasi dengan memindahkan volume fluida yang tetap dari saluran masuk ke saluran keluar untuk setiap siklus operasinya. Mereka ideal untuk aplikasi yang membutuhkan tekanan tinggi, laju aliran yang relatif konstan tidak terpengaruh oleh variasi tekanan di sisi *discharge*, dan kemampuan menangani fluida kental secara efisien.

2. Pompa Dinamik (*Dynamic Pumps*)

Pompa ini mentransfer energi ke fluida secara kontinu melalui komponen berputar yang disebut *impeller* atau rotor. Energi kinetik diberikan ke fluida dan kemudian sebagian besar diubah menjadi energi tekanan.

Pompa *sentrifugal* adalah jenis pompa dinamik yang paling banyak digunakan karena desainnya yang sederhana, keandalannya yang tinggi,

fleksibilitas dalam menangani berbagai jenis cairan (kecuali yang sangat kental atau mengandung padatan abrasif dalam jumlah besar).

Fluida masuk ke mata *impeller* (pusat *impeller*) melalui saluran hisap. *Impeller* yang berputar dengan kecepatan tinggi memberikan gaya sentrifugal pada fluida, "melemparkan" fluida keluar secara radial dari pusat *impeller* menuju ujung sudu-sudu. Saat fluida bergerak dari mata *impeller* ke jari-jari yang lebih besar, kecepatan absolutnya meningkat. Fluida bertekanan tinggi ini kemudian keluar melalui saluran *discharge*, (Cimbala, J. M. 2014)



Gambar 2.2 : Jenis Pompa

2.2.3 Komponen Utama Pompa *Sentrifugal*

Meskipun pompa *sentrifugal* terlihat sederhana, ia terdiri dari beberapa komponen kunci yang bekerja sama secara harmonis untuk mentransfer energi ke fluida dan memastikan operasi yang andal dan efisien. Memahami fungsi masing-masing komponen sangat penting untuk pemeliharaan, pemecahan masalah, dan perancangan sistem pemompaan.

1. *Casing* (Rumah Pompa)

Casing adalah selubung luar pompa yang berfungsi sebagai wadah untuk semua komponen internal yang berputar dan mengarahkan aliran fluida. Fungsi utamanya meliputi pengumpulan fluida yang keluar dari *impeller*.



Gambar 2.3 : *casing* (rumah)

2. *Impeller*

Impeller adalah komponen berputar yang merupakan "jantung" pompa sentrifugal, bertanggung jawab langsung dalam mentransfer energi dari motor ke fluida. Fungsinya adalah menerima fluida di bagian tengah (mata *impeller*) dan, melalui putarannya, memberikan gaya sentrifugal pada fluida, mendorongnya keluar secara radial dengan kecepatan tinggi.



Gambar 2.4 : *Impeller*

3. Poros (*Shaft*)

Poros adalah komponen yang menghubungkan *impeller* ke motor penggerak dan bertanggung jawab untuk mentransmisikan *torsi* dan putaran. Fungsinya adalah mendukung *impeller* dan komponen berputar lainnya, serta mentransmisikan daya secara efisien.



Gambar 2.5 : poros

4. *Bearing* (Bantalan)

Bearing adalah komponen yang mendukung poros dan memungkinkan rotasi yang halus dengan gesekan minimal. Mereka menyerap gaya radial dan aksial yang bekerja pada poros, menjaga posisi poros yang tepat. *Bearing* bola (*ball bearings*) dan bearing rol (*roller bearings*).



Gambar 2.6 : *Bearing*

5. *Seal* (Penyekat)

Seal adalah komponen kritis yang mencegah kebocoran fluida dari *casing* pompa di sekitar poros yang berputar dan, sama pentingnya, mencegah udara masuk ke pompa (terutama di sisi hisap, yang dapat menyebabkan kavitasi). Fungsi utamanya adalah mengisolasi fluida di dalam pompa dari lingkungan luar, (Cherkassky, V. N. 1986).



Gambar 2.7 : Seal

2.2.4 Prinsip Kerja Pompa Sentrifugal

Prinsip kerja pompa sentrifugal didasarkan pada konversi energi mekanik rotasi menjadi energi tekanan dan energi kinetik fluida melalui aplikasi gaya sentrifugal. Proses ini melibatkan serangkaian langkah yang terkoordinasi untuk secara efisien memindahkan fluida.

1. *Priming* (Pengisian Awal)

Sebelum pompa sentrifugal dapat beroperasi dengan efisien, *casing* pompa dan saluran hisap harus terisi penuh dengan fluida yang akan dipompa. Proses ini dikenal sebagai *priming*. Pompa sentrifugal tidak dapat memompa udara atau uap karena densitasnya yang sangat rendah, yang berarti impeller tidak akan dapat menciptakan tekanan yang cukup untuk menarik fluida dari *reservoir* hisap.

2. Aktivasi Motor dan Putaran *Impeller*

Motor penggerak, yang umumnya adalah motor listrik, dihidupkan untuk memutar poros pompa. Poros ini terhubung langsung ke *impeller*. *Impeller* kemudian mulai berputar dengan kecepatan tinggi di dalam *casing* pompa.

3. Penciptaan Tekanan Rendah di Mata *Impeller* (Hisap)

Saat *impeller* berputar, sudu-sudu *impeller* menangkap fluida di bagian tengahnya, yang disebut "mata *impeller*". Karena sudu-sudu secara terus-menerus mendorong fluida keluar secara radial melalui gaya sentrifugal, area di sekitar mata *impeller* mengalami penurunan tekanan. Tekanan di mata *impeller* menjadi lebih rendah dari tekanan di permukaan fluida.

4. Akselerasi Fluida dan Peningkatan Energi Kinetik

Ketika fluida masuk ke mata *impeller*, ia dipercepat oleh gaya sentrifugal dari putaran *impeller*. Fluida bergerak dari pusat *impeller* ke arah luar menuju ujung sudu-sudu dengan kecepatan tangensial yang tinggi.

5. Konversi Energi Kinetik Menjadi Energi Tekanan (di *Casing*)

Setelah fluida meninggalkan ujung sudu-sudu *impeller* dengan kecepatan tinggi, ia masuk ke dalam *casing* pompa, baik itu *volute* atau *diffuser*. Dalam *volute casing*, bentuk spiral yang melebar secara bertahap mengurangi kecepatan fluida. Menurut Prinsip Bernoulli, penurunan kecepatan ini dikonversi menjadi peningkatan energi tekanan statis.

6. Pelepasan Fluida Bertekanan Tinggi

Fluida yang kini memiliki energi tekanan tinggi meninggalkan *casing* pompa melalui saluran keluar (*discharge nozzle*) dan masuk ke sistem perpipaan *discharge*. Tekanan yang dihasilkan oleh pompa harus cukup untuk mengatasi semua kehilangan tekanan dalam sistem (akibat gesekan dalam pipa, *fitting*, perubahan elevasi, dan tekanan di titik *discharge* akhir), sehingga fluida dapat mencapai tujuan yang diinginkan, (Jack, L. B. 2011)

2.3 Elektromotor (Motor Listrik)

Elektromotor atau motor listrik, adalah komponen vital dalam hampir di setiap aplikasi industri modern, berfungsi sebagai penggerak utama untuk berbagai mesin, termasuk pompa, kipas, kompresor, dan *konveyor*. Fungsi

utamanya adalah mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (gerak rotasi). Prinsip kerja motor listrik didasarkan pada interaksi antara medan magnet dan arus listrik, yang menghasilkan gaya (prinsip gaya Lorentz) dan, pada akhirnya, torsi yang menyebabkan putaran. Prinsip dasar elektromagnetisme yang menjadi inti operasi motor listrik adalah dua hukum fundamental.

2.3.1 Definisi dan Fungsi Elektromotor

Elektromotor adalah perangkat elektromekanis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa gerakan rotasi. Konversi energi ini terjadi melalui interaksi gaya antara medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik pada belitan kawat (*coil*) dan medan magnet pada komponen berputar. Fungsi utama elektromotor sangat beragam, tergantung pada aplikasinya. Namun, secara umum, fungsi-fungsi tersebut meliputi menggerakkan mesin dan peralatan industri seperti pompa, kipas, kompresor, *konveyor*, dan mesin produksi. Faktor-faktor seperti daya yang dibutuhkan, tegangan suplai, frekuensi, kecepatan putar, efisiensi, dan kondisi lingkungan operasional harus dipertimbangkan secara cermat saat memilih motor untuk aplikasi tertentu.

2.3.2 Jenis Elektromotor

Elektromotor dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan suplai daya (AC atau DC) dan prinsip kerjanya. Dalam aplikasi industri, terutama untuk pompa, motor arus bolak-balik (AC) adalah yang paling dominan, dengan motor induksi AC menjadi jenis yang paling umum digunakan.

1. Motor Arus Searah (DC Motor)

Motor DC beroperasi dengan arus searah. Medan magnet *stator* dapat dihasilkan oleh magnet permanen atau belitan medan. Arus dialirkan ke belitan rotor (*armature*) melalui komutator dan sikat, menciptakan medan magnet rotor yang berinteraksi dengan medan *stator* untuk menghasilkan torsi. Kelebihan utamanya adalah kontrol kecepatan yang sangat baik dan mudah, serta torsi awal yang tinggi.

2. Motor Arus Bolak-balik (AC Motor)

Ini adalah jenis motor yang paling umum digunakan dalam aplikasi industri

karena keandalan, biaya, dan kemudahan perawatan yang lebih baik dibandingkan motor DC. Motor AC dibagi lagi menjadi motor induksi dan motor sinkron.

- Motor Induksi (*Asynchronous Motor*): Motor induksi adalah jenis motor AC yang paling banyak digunakan di industri. *Stator* memiliki belitan yang dialiri arus AC tiga fasa (atau satu fasa dengan bantuan kapasitor), menciptakan medan magnet berputar.
- Motor Sinkron (*Synchronous Motor*): Rotor motor sinkron berputar pada kecepatan yang sama persis dengan kecepatan medan magnet berputar *stator* (*sinkronisasi*), tanpa adanya *slip*. Rotor motor sinkron dapat berupa magnet permanen atau belitan *DC* yang diberi eksitasi eksternal, (Okiishi, T. H.2013).

2.3.3 Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi AC adalah mesin listrik yang beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Meskipun tampaknya kompleks, prinsip dasarnya relatif mudah dipahami.

1. Pembentukan Medan Magnet Berputar

Ketika suplai daya AC tiga fasa diterapkan pada belitan *stator* (kumparan yang ditempatkan di alur inti *stator*), arus yang mengalir melalui belitan ini menciptakan medan magnet. Interaksi dari ketiga medan magnet ini menghasilkan medan magnet gabungan yang berputar di sekitar stator dengan kecepatan sinkron (N_s), yang ditentukan oleh frekuensi suplai (f) dan jumlah kutub motor (P) dengan rumus $N_s = (120 \times f) / P$. Kecepatan ini disebut kecepatan sinkron karena merupakan kecepatan di mana medan magnet "berputar" di dalam stator.

2. Induksi Arus pada Rotor

Rotor yang biasanya adalah rotor sangkar tupai (*squirrel cage*), terdiri dari batang konduktor yang dihubungkan di kedua ujungnya oleh cincin ujung (*end rings*), membentuk sirkuit tertutup. Ketika medan magnet berputar dari *stator* melintasi konduktor rotor, medan magnet ini memotong konduktor rotor. Menurut Hukum Faraday tentang Induksi Elektromagnetik, gerakan

relatif antara medan magnet dan konduktor akan menginduksi tegangan (*electromotive force - EMF*) di dalam konduktor rotor.

3. Pembentukan Medan Magnet *Rotor* dan *Torsi*

Arus yang mengalir di dalam konduktor rotor juga menciptakan medan magnetnya sendiri di sekitar rotor. Medan magnet rotor yang terinduksi ini kemudian berinteraksi dengan medan magnet berputar dari stator.

4. Konsep *Slip*

Agar induksi arus di rotor dapat terus terjadi, harus ada gerakan relatif antara rotor dan medan magnet stator. Jika rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet stator (kecepatan sinkron), tidak akan ada pemotongan garis medan magnet oleh konduktor rotor, sehingga tidak ada arus yang terinduksi dan tidak ada torsi yang dihasilkan.

2.3.4 Hubungan Daya, Torsi, dan Putaran Motor

Dalam konteks kinerja elektromotor, hubungan antara daya, torsi, dan putaran (kecepatan) adalah konsep fundamental yang menjelaskan bagaimana motor menggerakkan beban dan bagaimana energinya dikonversi. Pemahaman ini sangat penting untuk pemilihan motor yang tepat dan analisis kinerja sistem secara keseluruhan (Siregar, H. 2020).

1. Daya Mekanik Keluaran (P_{out})

Daya mekanik keluaran dari motor adalah laju di mana pekerjaan dilakukan oleh motor pada porosnya. Ini adalah energi per unit waktu yang ditransfer dari motor ke beban (misalnya, pompa) dalam bentuk gerakan rotasi.

2. Torsi (T)

Torsi adalah gaya putar atau momen puntir yang dihasilkan oleh motor pada porosnya. Ini adalah ukuran kemampuan motor untuk memutar atau memelintir suatu objek.

3. Kecepatan Putaran Motor (N atau ω)

Kecepatan putaran motor adalah laju di mana poros motor berputar, umumnya diukur dalam revolusi per menit (RPM) atau radian per detik (rad/s). Kecepatan motor induksi sedikit lebih rendah dari kecepatan sinkron karena adanya slip.

2.3.5 Pengaturan Kecepatan Motor

Dalam banyak aplikasi industri, mempertahankan kecepatan motor konstan tidak selalu merupakan solusi yang paling efisien atau fleksibel, terutama untuk beban seperti pompa. Pengaturan kecepatan motor menjadi krusial untuk mengoptimalkan kinerja, menghemat energi, dan meningkatkan kontrol proses.

2.4 Efisiensi Pemompaan

Efisiensi adalah metrik kritis dalam analisis dan operasi sistem pemompaan, karena secara langsung berkaitan dengan penggunaan energi dan biaya operasional. Dalam konteks pemompaan, efisiensi mengacu pada seberapa efektif energi listrik yang disuplai diubah menjadi energi hidrolik yang berguna untuk memindahkan fluida.

2.4.1 Definisi Efisiensi Pompa

Efisiensi pompa, sering disebut efisiensi hidrolik atau efisiensi pompa-shaft, adalah ukuran seberapa baik pompa mengubah daya mekanik yang disuplai ke porosnya (*daya input*) menjadi daya hidrolik yang ditambahkan ke fluida (*daya output*). Dalam istilah yang lebih sederhana, ini adalah rasio daya keluaran hidrolik terhadap daya masukan poros.

2.4.2 Efisiensi Motor Listrik

Efisiensi motor listrik adalah ukuran seberapa efektif motor mengubah daya listrik yang masuk (*input*) menjadi daya mekanik yang keluar pada porosnya (*output*). Dalam motor listrik, tidak semua energi listrik yang disuplai dikonversi menjadi energi mekanik; sebagian energi hilang dalam bentuk panas akibat berbagai kerugian.

2.4.3 Faktor-faktor yang Memengaruhi Efisiensi Pompa

Efisiensi pompa dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang terkait dengan desain pompa maupun kondisi operasinya. Memahami faktor-faktor ini sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja pompa dan meminimalkan konsumsi energi.

1. Desain Hidrolik *Impeller* dan *Casing*

Ini adalah faktor paling signifikan dalam efisiensi pompa. Desain yang optimal dari sudu-sudu *impeller*, mata *impeller*, dan geometri *volute* atau *diff-*

user sangat krusial untuk meminimalkan kerugian hidrolis (gesekan fluida, turbulensi, pemisahan aliran, kerugian benturan) dan memaksimalkan konversi energi kinetik menjadi energi tekanan. Setiap penyimpangan dari desain hidrolis optimal akan menurunkan efisiensi.

2. Kondisi Operasi (Jauh dari BEP)

Pompa dirancang untuk mencapai efisiensi puncaknya pada satu titik operasi tertentu yang disebut *Best Efficiency Point* (BEP). Operasi pompa yang jauh dari BEP, baik pada laju aliran yang lebih rendah (*throttling*) atau lebih tinggi, akan menyebabkan penurunan efisiensi pompa yang sangat signifikan.

3. Kondisi Fluida:

- Viskositas: Pompa sentrifugal dirancang untuk memompa cairan dengan viskositas rendah (seperti air). Peningkatan viskositas fluida secara drastis akan meningkatkan kerugian gesekan internal dalam pompa dan di dalam pipa, sehingga mengurangi efisiensi pompa secara keseluruhan.
- Densitas: Meskipun densitas secara langsung mempengaruhi daya hidrolis, ia tidak secara langsung mengubah efisiensi pompa itu sendiri untuk laju aliran dan head tertentu, asalkan pompa dirancang untuk densitas tersebut.
- Kandungan Padatan: Keberadaan padatan abrasif dalam fluida dapat menyebabkan erosi pada impeller dan casing, yang secara progresif akan menurunkan efisiensi pompa seiring waktu. (Nurhadi, D. 2018).

2.5 Sistem Pemindahan Minyak Kelapa Sawit di Pelabuhan

Sistem pemindahan minyak kelapa sawit (terutama *Refined, Bleached, and Deodorized - RBD Palm Oil*) di pelabuhan adalah operasi logistik yang kompleks dan krusial dalam rantai pasok minyak nabati global. Proses ini melibatkan serangkaian tahapan yang dirancang untuk memastikan transfer minyak yang efisien, aman, dan menjaga kualitas dari fasilitas penyimpanan darat ke kapal *tanker*, atau sebaliknya. Karena sifat *RBD Palm Oil* yang dapat memadat pada suhu rendah, kontrol suhu adalah aspek fundamental dari seluruh sistem.

2.5.1 Proses Penerimaan dan Penyimpanan (*Storage Tank*)

Proses penerimaan dan penyimpanan minyak kelapa sawit di Pelabuhan

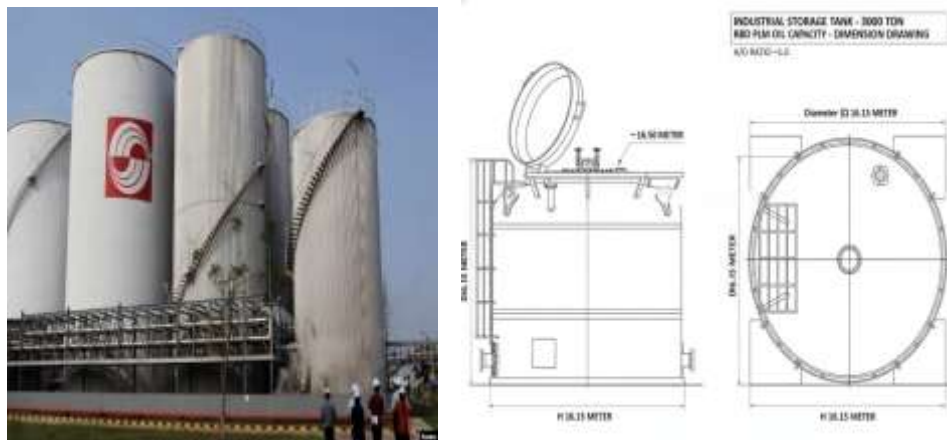
merupakan tahap awal yang krusial dalam rantai logistik. Tahap ini memastikan bahwa minyak yang datang dapat diterima, disimpan dengan aman, bersih, minyak tidak terkontaminasi dengan minyak lainnya dan kualitasnya terjaga sebelum diproses lebih lanjut atau dimuat ke kapal .

1. Inspeksi Awal

Sebelum pembongkaran, sampel minyak diambil untuk pengujian kualitas (misalnya, kadar asam lemak bebas, kadar air, warna, titik leleh) untuk memastikan minyak memenuhi spesifikasi yang disepakati.

2. Koneksi dan Pembongkaran

Selang atau lengan pemuatan/pembongkaran (*loading arms*) disambungkan dari moda transportasi ke sistem perpipaan pelabuhan. Pompa (seringkali pompa perpindahan positif atau sentrifugal yang dirancang untuk fluida kental) digunakan untuk memindahkan minyak dari kapal/truk ke tangki penyimpanan. Selama pembongkaran, penting untuk memantau laju aliran, tekanan, dan suhu.



Gambar 2.8 : *Storage Tank*

2.5.2 Jalur Pipa dan Katup

Jalur pipa dan katup merupakan tulang punggung sistem pemindahan minyak kelapa sawit di pelabuhan, menghubungkan tangki penyimpanan dengan fasilitas pemuatan kapal *tanker*. Desain, material, dan konfigurasi komponen ini sangat penting untuk memastikan aliran minyak yang efisien, aman, dan tanpa kontaminasi, dengan mempertimbangkan sifat fisik *RBD Palm Oil*.



Gambar 2.9 : Jalur pipa dan Katup

1. Material Pipa

Pipa yang digunakan umumnya terbuat dari baja karbon (*carbon steel*) karena kekuatan mekanisnya, biaya yang relatif rendah, dan ketahanannya terhadap tekanan.

2. Diameter Pipa

Diameter pipa dipilih berdasarkan laju aliran yang diinginkan dan viskositas minyak. Pipa berdiameter lebih besar akan mengurangi kecepatan aliran dan kerugian gesekan (*pressure drop*), yang pada gilirannya mengurangi kebutuhan daya pompa dan meningkatkan efisiensi.

Berbagai jenis katup digunakan dalam sistem perpipaan untuk mengontrol aliran, mengisolasi bagian sistem, dan mencegah aliran balik antara lain

1. Gate Valves

Digunakan untuk isolasi penuh (membuka atau menutup penuh aliran). Mereka menawarkan resistansi aliran yang sangat rendah saat terbuka penuh tetapi tidak cocok untuk pengaturan aliran (*throttling*).



Gambar 2.10 : Gate Valves

2. *Globe Valve*

Ideal untuk pengaturan aliran (*throttling*) karena desainnya memungkinkan kontrol yang baik atas laju aliran. Namun, mereka memiliki kerugian tekanan yang lebih tinggi dibandingkan *gate valves* saat terbuka penuh.



Gambar 2.11 : *Globe Valve*

3. *Check Valves*

Mencegah aliran balik fluida dalam pipa. Ini sangat penting di sisi *discharge* pompa untuk mencegah minyak mengalir kembali ke pompa saat pompa berhenti.



Gambar 2.12 : *Check Valve*

4. *Ball Valves*

Katup serbaguna yang menawarkan penutupan cepat dan ketat dengan kerugian tekanan rendah saat terbuka penuh. Sering digunakan untuk isolasi dan kadang-kadang untuk pengaturan kasar.



Gambar 2.13 : *Ball Valves*

5. *Emergency Shut-off Valves (ESDV)*

Katup yang dioperasikan secara otomatis (seringkali pneumatik atau hidrolis) yang dirancang untuk menutup secara cepat dalam keadaan darurat (misalnya, kebocoran, kebakaran) untuk mengisolasi bagian sistem dan mencegah tumpahan besar.



Gambar 2.14 : *Shout-off Valves*

2.5.3 Proses Pemuatan ke Kapal *Tanker*

Proses pemuatan minyak kelapa sawit ke kapal *tanker* merupakan tahap penting dalam distribusi produk dari tangki penyimpanan darat menuju transportasi laut. Kegiatan ini membutuhkan koordinasi yang baik antara pihak pelabuhan dan kru kapal agar pemindahan berlangsung aman, efisien, dan sesuai prosedur. Tahapan pemuatan meliputi persiapan kapal *tanker*, pengecekan fasilitas pemuatan, serta pengaturan suhu dan tekanan agar minyak tetap dalam kondisi stabil. Selain itu, penggunaan peralatan seperti *loading arm*

atau selang *kargo* fleksibel harus dipastikan terhubung dengan benar untuk menghindari kebocoran maupun tumpahan. Dengan pengawasan ketat dan penerapan standar keselamatan, proses pemuatan ini tidak hanya menjamin kualitas produk tetap terjaga, tetapi juga mencegah terjadinya insiden yang dapat merugikan perusahaan maupun lingkungan sekitar.

1. Persiapan Kapal Tanker

Sebelum pemuatan dimulai, kapal tanker harus menjalani serangkaian persiapan. Ini termasuk:

- Inspeksi Tangki Kapal: Tangki kargo kapal harus diperiksa untuk kebersihan, kekeringan, dan bebas dari kontaminasi dari *kargo* sebelumnya.
- Sertifikasi: Semua sertifikat kapal dan kargo harus diperiksa dan divalidasi.
- Penyesuaian Suhu: Tangki kapal yang akan menerima minyak mungkin perlu dipanaskan terlebih dahulu hingga suhu yang sesuai (misalnya, 40-50°C).
- Koneksi: Lengan pemuatan (*loading arms*) atau selang kargo fleksibel disambungkan dari *manifold* darat ke *manifold* kapal. Koneksi ini harus aman dan bebas bocor.

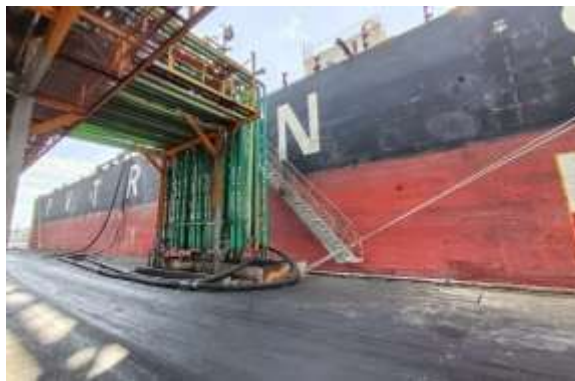
2. Prosedur Pemuatan

Setelah persiapan selesai, pemuatan dapat dimulai dengan mengikuti prosedur yang ketat:

- *Start-up Awal (Initial Loading)*: Pemuatan dimulai dengan laju aliran yang rendah untuk memastikan semua koneksi aman dan tidak ada kebocoran.
- Pemuatan Penuh (*Bulk Loading*): Setelah verifikasi awal, laju aliran ditingkatkan ke tingkat yang optimal. Pompa di fasilitas darat (seringkali pompa sentrifugal berkapasitas tinggi) digunakan untuk memompa minyak dari tangki penyimpanan ke kapal.
- Pemantauan Suhu: Suhu minyak di dalam pipa dan di tangki kapal terus dipantau untuk memastikan minyak tetap cair dan viskositasnya terkontrol.
- Pengukuran Level dan Volume: Level minyak di tangki kapal dipantau secara terus-menerus menggunakan sistem pengukuran level tangki.

Volume yang dimuat dihitung berdasarkan level, suhu, dan densitas minyak.

- Pemuatan Akhir (*Topping Off*): Saat tangki kapal mendekati kapasitas penuh, laju aliran dikurangi secara bertahap untuk mencegah pengisian berlebih (*overflowing*) dan memungkinkan kontrol yang presisi.
- Pembersihan Jalur (*Line Clearing*): Setelah pemuatan selesai, jalur pipa dari darat ke kapal seringkali dibersihkan (misalnya, dengan meniup udara atau nitrogen, atau menggunakan *pigging*) untuk mengosongkan sisa minyak di pipa dan mencegah pematatan atau kontaminasi, (Wibowo, A. 2019).



Gambar 2.15 : Proses Pemuatan ke Kapal Tanker

2.5.4 Peralatan Pengukuran

Dalam sistem pemindahan minyak kelapa sawit di pelabuhan, pengukuran yang akurat terhadap parameter aliran, tekanan, dan daya sangat penting untuk operasi yang aman, efisien, dan akuntabel. Berbagai instrumen pengukuran digunakan untuk memantau kinerja sistem secara *real-time* dan untuk tujuan inventarisasi.

- ***Flow Meter (Pengukur Aliran)***

Flow meter digunakan untuk mengukur laju aliran volumetrik atau massa minyak yang dipindahkan. Akurasi pengukuran aliran sangat penting untuk tujuan komersial (penghitungan kargo), operasional (memantau laju pemuatan), dan analisis kinerja pompa.

- ***Pressure Gauge (Pengukur Tekanan)***

Pressure gauge digunakan untuk memantau tekanan fluida di berbagai titik dalam sistem perpipaan, seperti di sisi hisap dan *discharge* pompa, atau di jalur pipa utama. Pemantauan tekanan sangat penting untuk keselamatan operasional, diagnosa masalah, dan perhitungan head pompa.

- **Wattmeter (Pengukur Daya Listrik)**

Wattmeter atau *Power Meter* digunakan untuk mengukur daya listrik aktif (kW) yang dikonsumsi oleh motor penggerak pompa. Pengukuran ini sangat penting untuk analisis efisiensi motor dan sistem keseluruhan, serta untuk manajemen energi.

2.6 Aspek Keselamatan Kerja

Keselamatan kerja merupakan prioritas utama dalam setiap operasi industri, terutama yang melibatkan penanganan fluida yang mudah terbakar atau panas seperti *RBD Palm Oil*, dan peralatan bertegangan tinggi seperti elektromotor. Penerapan prosedur keselamatan yang ketat dan kepatuhan terhadap standar industri sangat penting untuk melindungi personel, peralatan, dan lingkungan.

2.6.1 Prosedur Keselamatan dalam Operasi Pemompaan

Operasi pemompaan, khususnya di fasilitas pelabuhan yang melibatkan *transfer kargo* dalam skala besar, memiliki risiko *inheren*. Oleh karena itu, prosedur keselamatan yang komprehensif harus diterapkan untuk memitigasi bahaya.

1. Pelatihan dan Kompetensi Personel

Semua personel yang terlibat dalam operasi pemompaan harus mendapatkan pelatihan yang memadai tentang bahaya yang terkait dengan fluida (*RBD Palm Oil*) dan peralatan, prosedur operasi standar (SOP), dan prosedur darurat. Kompetensi harus dinilai dan diperbarui secara berkala.

2. Izin Kerja (*Permit-to-Work System*)

Untuk pekerjaan non-rutin atau berisiko tinggi (misalnya, perbaikan pompa, pekerjaan listrik), sistem izin kerja harus diterapkan. Ini memastikan bahwa semua bahaya telah diidentifikasi.

3. Alat Pelindung Diri (APD/PPE)

Personel harus menggunakan APD yang sesuai, termasuk:

- Pakaian Pelindung: Untuk melindungi dari percikan minyak panas atau bahan kimia.
- Sarung Tangan: Tahan minyak dan panas.
- Pelindung Mata dan Wajah: Kacamata keselamatan atau pelindung wajah untuk melindungi dari percikan.
- Sepatu Keselamatan: Dengan ujung baja dan sol anti-slip.
- Helm Keselamatan: Jika ada risiko benda jatuh.

2.6.2 Penanganan *RBD Palm Oil*

Penanganan *Refined, Bleached, and Deodorized (RBD) Palm Oil* memerlukan perhatian khusus terhadap sifat fisiknya, terutama titik lelehnya yang relatif tinggi dan viskositasnya yang berubah dengan suhu. Penanganan yang tidak tepat dapat menyebabkan masalah operasional seperti penyumbatan pipa, kerusakan peralatan, dan masalah kualitas produk.

1. Kontrol Suhu

Pemanasan (*Heating*): *RBD Palm Oil* harus dijaga pada suhu di atas titik lelehnya (biasanya 40-50°C) selama penyimpanan, pemindahan, dan pemuatan/pembongkaran.

2. Termometer

Pemantauan suhu yang berkelanjutan dengan termometer yang terkalibrasi sangat penting untuk memastikan minyak tetap dalam keadaan cair dan viskositasnya terkontrol.

3. Pencegahan *Overheating*

Meskipun pemanasan penting, pemanasan berlebihan harus dihindari karena dapat menyebabkan degradasi kualitas minyak (misalnya, peningkatan kadar asam lemak bebas, perubahan warna).

4. Manajemen Viskositas:

Viskositas *RBD Palm Oil* sangat sensitif terhadap suhu. Pada suhu yang lebih tinggi, viskositas akan menurun, membuat minyak lebih mudah dipompa dan mengurangi kerugian gesekan di pipa.

5. Pencegahan Kontaminasi

Kebersihan Peralatan: Semua tangki, pipa, pompa, dan peralatan lainnya harus bersih dan bebas dari sisa-sisa kargo sebelumnya atau kontaminan lainnya.

6. Segel dan Koneksi

Pastikan semua segel dan koneksi pada pompa, katup, dan flensa pipa rapat untuk mencegah kebocoran dan masuknya kontaminan.

7. Pencegahan Kebocoran dan Tumpahan:

Sistem Penahanan Sekunder: Fasilitas penyimpanan dan area pemuatan/pembongkaran harus dilengkapi dengan sistem penahanan sekunder (misalnya, *dikes* atau *berms*) untuk menampung tumpahan jika terjadi kebocoran atau kegagalan peralatan.

8. Prosedur Darurat Tumpahan

Personel harus dilatih dalam prosedur penanganan tumpahan, termasuk penggunaan *spill containment kit* dan pelaporan, (Tahara, H. 2000).

2.6.3 Penelitian tentang Pengaruh Viskositas Fluida terhadap Efisiensi Pompa

Viskositas fluida adalah parameter krusial yang secara signifikan memengaruhi kinerja dan efisiensi pompa, terutama pompa sentrifugal. Banyak penelitian telah difokuskan untuk memahami hubungan ini dan mengembangkan metode untuk memprediksi kinerja pompa saat memompa fluida kental.

1. Dampak Viskositas pada Kurva Kinerja Pompa

Studi menunjukkan bahwa peningkatan viskositas fluida akan menyebabkan penurunan laju aliran (Q), *head* (H), dan efisiensi pompa. Daya yang dibutuhkan oleh pompa juga akan meningkat saat memompa fluida yang lebih kental.

2. Koreksi Kinerja untuk Fluida Kental

Berbagai metode koreksi telah dikembangkan untuk memprediksi kinerja pompa sentrifugal saat memompa fluida kental, berdasarkan data uji air. Salah satu standar yang banyak digunakan adalah yang diterbitkan oleh *Hydraulic Institute* (HI), yang menyediakan grafik koreksi berdasarkan titik operasi pompa dan viskositas fluida.

3. Pengaruh Viskositas Terhadap Efisiensi Operasi

Fluida kental dapat menyebabkan titik *Best Efficiency Point* (BEP) bergeser dan menurunkan nilai efisiensi puncak. Studi menunjukkan bahwa untuk fluida dengan viskositas yang sangat tinggi, pompa sentrifugal mungkin bukan pilihan yang paling efisien, dan pompa perpindahan positif (misalnya, pompa roda gigi atau sekrup) mungkin lebih cocok digunakan dari pada yang lain.

2.6.4 Studi Kasus Pemindahan Fluida di Industri Minyak Sawit

Industri minyak sawit memiliki tantangan unik dalam pemindahan fluida karena sifat fisik produknya, terutama *RBD Palm Oil*, yang viskositasnya sangat sensitif terhadap suhu dan dapat memadat pada suhu kamar.

1. Manajemen Suhu dalam Rantai Pasok

Penelitian sering menyoroti pentingnya menjaga suhu *RBD Palm Oil* di seluruh rantai pasok, mulai dari pabrik pengolahan hingga fasilitas penyimpanan dan pelabuhan.

2. Pemilihan Jenis Pompa

Studi kasus sering membahas pemilihan jenis pompa yang tepat untuk *RBD Palm Oil*. Meskipun pompa sentrifugal banyak digunakan, penelitian juga mengeksplorasi aplikasi pompa perpindahan positif (misalnya, pompa roda gigi, pompa sekrup, pompa lobus) untuk aplikasi dengan viskositas yang lebih tinggi atau kebutuhan tekanan tinggi..

3. Optimasi Desain Pipa dan Tata Letak

Penelitian di industri minyak sawit juga melibatkan optimasi desain pipa untuk meminimalkan kerugian gesekan dan memastikan aliran yang lancar. Studi kasus telah menganalisis dampak diameter pipa, panjang, jumlah *fitting*, dan tata letak keseluruhan pada kinerja sistem pemindahan dan konsumsi energi.

4. Pengaruh Kualitas Minyak

Meskipun fokus utama adalah fisika fluida, beberapa studi kasus mungkin juga menyentuh bagaimana penanganan dan pemindahan memengaruhi kualitas *RBD Palm Oil* (misalnya, peningkatan FFA atau perubahan warna karena panas berlebih atau oksidasi).

2.7 Sistem Pengendalian Otomatis

Sistem pengendalian otomatis sangat penting dalam operasi modern industri, termasuk fasilitas pemindahan *RBD Palm Oil* di pelabuhan. Sistem ini memungkinkan operasi yang lebih efisien, aman, dan konsisten dengan mengurangi intervensi manual dan mengoptimalkan kinerja peralatan.

2.7.1 Konsep Dasar Kontrol Otomatis

Kontrol otomatis adalah disiplin ilmu teknik yang berfokus pada perancangan sistem yang dapat mengatur dirinya sendiri tanpa campur tangan manusia yang berkelanjutan. Konsep dasar ini menjadi fondasi bagi otomatisasi proses industri, termasuk dalam sistem pemindahan fluida seperti *RBD Palm Oil*.

1. Sistem Kontrol Loop Tertutup (*Closed-Loop Control System*)

Ini adalah inti dari kontrol otomatis, juga dikenal sebagai kontrol umpan balik (*feedback control*). Dalam sistem ini, variabel proses yang diukur (misalnya, laju aliran atau tekanan) dibandingkan dengan nilai yang diinginkan (*setpoint*).

2. Sistem Kontrol Loop Terbuka (*Open-Loop Control System*)

Dalam sistem ini, *output* kontrol tidak bergantung pada umpan balik variabel proses. Sinyal kontrol diterapkan secara langsung ke *aktuator* tanpa pengukuran variabel proses untuk verifikasi. Sistem ini lebih sederhana tetapi kurang akurat dan tidak dapat mengoreksi gangguan yang tidak terduga.

3. Sensor

Perangkat yang mengubah besaran fisik (misalnya, tekanan, suhu, laju aliran, level) menjadi sinyal listrik yang dapat dibaca dan diproses oleh *kontroler*. Akurasi dan keandalan sensor sangat penting untuk kinerja sistem kontrol yang digunakan.

4. Kontroler

Otak dari sistem kontrol otomatis, yang memproses sinyal dari sensor, membandingkannya dengan *setpoint*, dan menghasilkan sinyal kontrol untuk *aktuator*. Jenis kontroler yang umum meliputi kontroler *Proportional-Integral-Derivative (PID)* yang banyak digunakan di industri karena kemampuannya untuk memberikan respons yang cepat, stabil, dan menghilangkan *offset*., (Sutrisno.2014).

2.8 Material Pipa dan Kerugian *Head*

Pemilihan material pipa yang tepat dan perhitungan kerugian *head* yang akurat adalah aspek fundamental dalam desain dan analisis sistem pemindahan fluida. Ini secara langsung memengaruhi efisiensi, biaya operasional, dan keandalan sistem pemompaan *RBD Palm Oil*.

2.8.1 Jenis Material Pipa yang Digunakan

Pemilihan material pipa untuk sistem pemindahan *RBD Palm Oil* harus mempertimbangkan beberapa faktor, termasuk ketahanan korosi, kekuatan, biaya, kemudahan instalasi, dan kompatibilitas dengan suhu operasional serta sifat fisik minyak.

1. Baja Karbon (*Carbon Steel*):

- Ini adalah material pipa yang paling umum digunakan dalam aplikasi industri karena kekuatan mekaniknya yang tinggi, ketersediaan yang luas, dan biaya yang relatif rendah.
- Baja karbon sering dilapisi dengan cat atau insulasi eksternal untuk mencegah korosi *atmosferik*.

2. Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*):

- Digunakan di area di mana kebersihan dan ketahanan korosi yang unggul sangat penting, misalnya untuk area pengolahan atau jalur yang sangat sering dibersihkan.
- Jenis yang umum adalah 304 atau 316, dengan 316 menawarkan ketahanan korosi yang lebih baik, terutama terhadap klorida.

2.9 Kavitasasi pada Pompa

Kavitasasi adalah fenomena serius dalam sistem pemompaan yang dapat menyebabkan kerusakan parah pada pompa, penurunan kinerja yang signifikan, dan peningkatan biaya perawatan. Memahami penyebab dan dampaknya, serta bagaimana mencegahnya melalui analisis *Net Positive Suction Head (NPSH)*, sangat krusial dalam operasi pemindahan *RBD Palm Oil*.

2.9.1 Definisi dan Penyebab Kavitasasi

Kavitasasi adalah pembentukan gelembung uap (rongga) di dalam fluida yang mengalir melalui pompa, diikuti dengan pecahnya gelembung-gelembung tersebut ketika mereka berpindah ke area dengan tekanan yang lebih tinggi.

1. Definisi Kavitasasi:

- Fenomena ini terjadi ketika tekanan absolut pada suatu titik dalam aliran fluida turun di bawah tekanan uap fluida pada suhu operasinya.
- Pada titik tekanan rendah ini (biasanya di sisi hisap pompa, khususnya di mata impeller), fluida "mendidih" dan membentuk gelembung uap.
- Saat gelembung-gelembung ini mengalir ke area bertekanan lebih tinggi (misalnya, di bagian luar *impeller* atau di *discharge* pompa), mereka dengan cepat kolaps (pecah) atau "meledak" dengan gaya yang sangat besar.

2. Penyebab Kavitasasi:

- Beberapa kondisi dapat menyebabkan tekanan di sisi hisap pompa turun di bawah tekanan uap fluida, memicu kavitasasi:

Tekanan Hisap yang Terlalu Rendah:

- Tingkat Cairan Tangki Hisap Rendah: Menurunnya level cairan di tangki hisap mengurangi *head statis* yang tersedia di sisi hisap pompa.
- Kerugian Gesekan Berlebihan di Pipa Hisap: Pipa hisap yang terlalu panjang, diameter terlalu kecil, atau terlalu banyak *fitting (elbow, katup)* akan meningkatkan kerugian gesekan dan menurunkan tekanan di inlet pompa.
- Penyumbatan pada Saringan (*Strainer*) atau Pipa Hisap: Adanya penyumbatan akan meningkatkan hambatan aliran dan menyebabkan penurunan tekanan yang signifikan di sisi hisap.
- Katup Hisap yang Tidak Sepenuhnya Terbuka: Jika katup di jalur hisap tidak terbuka penuh, hal itu akan menciptakan pembatasan aliran dan penurunan tekanan.

3. Suhu Fluida yang Terlalu Tinggi:

- Peningkatan suhu fluida akan meningkatkan tekanan uapnya. Jika suhu *RBD Palm Oil* terlalu tinggi, tekanan uapnya dapat mendekati tekanan hisap, sehingga mudah terjadi kavitasasi bahkan pada tekanan hisap yang normal. *RBD Palm Oil* memiliki viskositas tinggi pada suhu rendah, tetapi tekanan uapnya meningkat dengan suhu, sehingga kontrol suhu sangat penting.

- A. Kecepatan Pompa Terlalu Tinggi: Memutar pompa terlalu cepat (terutama jika tidak dirancang untuk kecepatan tersebut) dapat menciptakan daerah bertekanan sangat rendah di dalam *impeller*.
- B. Desain Pompa yang Tidak Tepat: Pompa yang tidak dirancang dengan baik atau tidak cocok untuk kondisi hisap tertentu dapat lebih rentan terhadap kavitasi.

2.10 Getaran dan Kebisingan pada Pompa

Getaran dan kebisingan yang berlebihan pada pompa adalah indikator umum adanya masalah operasional dan dapat menjadi tanda awal kegagalan peralatan. Pemantauan dan mitigasi fenomena ini sangat penting untuk keandalan, keselamatan, dan efisiensi sistem pemindahan *RBD Palm Oil*.

2.10.1 Sumber Getaran dan Kebisingan

Getaran dan kebisingan pada pompa dapat berasal dari berbagai sumber, baik mekanis, hidrolis, maupun elektrik. Mengidentifikasi sumbernya adalah langkah pertama dalam mitigasi yang efektif.

1. Sumber Mekanis:

- Ketidakseimbangan (*Imbalance*): *Impeller* atau kopling yang tidak seimbang (akibat manufaktur, keausan, atau penumpukan material).
- Ketidaklurusan (*Misalignment*): Poros pompa dan motor yang tidak sejajar (parallel atau angular misalignment).

2. Sumber Hidrolis:

- Kavitasi: Seperti yang dibahas kolapsnya gelembung uap menghasilkan gelombang kejut yang merusak dan suara gemuruh yang khas.
- Resirkulasi Internal: Aliran balik di dalam pompa pada kondisi aliran rendah atau tinggi (di luar *BEP*) dapat menyebabkan turbulensi, getaran, dan kebisingan.

3. Sumber Elektrik (dari Motor):

- Ketidakseimbangan Elektrik (*Electrical Imbalance*): Tegangan atau arus yang tidak seimbang dalam motor dapat menyebabkan getaran magnetik.
- Kerusakan Bantalan Motor: Sama seperti pompa, kerusakan bantalan motor akan menghasilkan getaran

2.10.2 Dampak Getaran dan Kebisingan

Getaran dan kebisingan yang berlebihan pada pompa tidak hanya mengganggu, tetapi juga memiliki dampak merugikan yang signifikan terhadap peralatan, personel, dan lingkungan operasional.

1. Dampak pada Peralatan

- Kerusakan Komponen Mekanis: Getaran berlebihan adalah penyebab utama keausan dini pada bantalan, segel mekanis, kopling, dan bahkan poros pompa dan motor.
- Kegagalan Segel: Getaran dapat merusak permukaan segel mekanis, menyebabkan kebocoran fluida (misalnya, *RBD Palm Oil*) yang tidak hanya membuang produk tetapi juga menciptakan bahaya keselamatan dan lingkungan.

2. Dampak pada Efisiensi Operasional

- Penurunan Efisiensi Pompa: Getaran seringkali merupakan indikasi inefisiensi hidrolis atau mekanis, yang berarti pompa tidak beroperasi pada titik optimalnya dan mengonsumsi lebih banyak energi dari yang seharusnya.
- Waktu Henti Produksi (*Downtime*): Kegagalan pompa akibat getaran dapat menyebabkan waktu henti produksi yang tidak terencana, mengakibatkan kerugian finansial yang besar bagi fasilitas.

2.11 Pengaruh Suhu terhadap Viskositas *RBD Palm Oil*

Suhu adalah salah satu parameter paling krusial yang memengaruhi sifat fisik *RBD Palm Oil*, terutama viskositasnya. Perubahan viskositas ini memiliki implikasi besar terhadap kinerja pemompaan dan efisiensi energi dalam sistem transfer.

2.11.1 Hubungan Suhu dan Viskositas

Hubungan antara suhu dan viskositas untuk sebagian besar cairan, termasuk *RBD Palm Oil*, adalah hubungan *invers* yaitu seiring dengan peningkatan suhu, viskositas cairan cenderung menurun, dan sebaliknya.

Viskositas RBD Palm Oil:

- *RBD Palm Oil* adalah cairan *Newtonian*, yang berarti viskositasnya hanya bergantung pada suhu dan tekanan (yang dianggap konstan dalam aplikasi pemompaan), bukan pada laju geser.
- Pada suhu kamar (sekitar 25°C), *RBD Palm Oil* dapat mulai memadat dan memiliki viskositas yang sangat tinggi, bahkan membeku menjadi padatan. Titik lelehnya bervariasi tergantung pada fraksi dan kemurnian, tetapi umumnya berkisar antara 30-40°C.
- Untuk pemindahan yang efisien, *RBD Palm Oil* biasanya dipanaskan hingga suhu yang membuatnya sepenuhnya cair dan memiliki viskositas yang dapat ditangani oleh pompa sentrifugal, seringkali di atas 50°C, (Syamsudin, F. 2017)