

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Konservasi Energi**

Konservasi energi menurut Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 Tentang Energi adalah upaya sistematis, terencana, dan terpadu guna melestarikan sumber daya energi dalam negeri serta meningkatkan efisiensi pemanfaatannya. Menurut undang-undang tersebut konservasi energi nasional menjadi tanggung jawab pemerintah, pemerintah daerah, pengusaha dan masyarakat. Konservasi energi nasional tersebut mencakup seluruh tahap pengelolaan energi. Pemerintah atau pemerintah daerah juga akan memberikan kemudahan dan insentif bagi pengguna energi dan produsen peralatan hemat energi yang melaksanakan konservasi energi. Melalui pengelolaan energi pemerintah memiliki tujuan antara lain untuk menjamin pengelolaan sumber daya energi secara optimal, terpadu, dan berkelanjutan. Selain itu pengelolaan energi juga bertujuan untuk menjamin termanfaatkannya energi secara efisien di semua sector (Ginting *et al.*, 2022; Setyanto & Putra, 2019).

#### **2.2 Audit Energi**

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 70 Tahun 2009 tentang audit energi, audit energi didefinisikan sebagai proses evaluasi pemanfaatan energi dan identifikasi peluang penghematan energi serta rekomendasi peningkatan efisiensi pada pengguna energi dan pengguna sumber energi dalam rangka konservasi energi. Selain itu pada Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 14 Tahun 2012 Tentang Manajemen Energi Pasal 8 disebutkan bawasannya audit energi sendiri dilaksanakan secara berkala sekurang – kurangnya pada peralatan pemanfaatan energi utama paling sedikit 1 kali dalam 3 tahun (Andini *et al.*, 2020; Parwito *et al.*, 2018).

Pada pelaksanaannya audit energi terdiri atas beberapa jenis atau tingkatan, yaitu :

- 1) *Walk-Through Audit* (Pengamatan Singkat) merupakan audit energi dengan tingkat kegiatan paling rendah, yaitu level 1 (satu).
- 2) *Audit Energi Awal (Preliminary Audit)* merupakan level kedua dari tingkat kegiatan audit energi. Kegiatan ini dimaksudkan untuk mengetahui besarnya potensi penghematan energi.
- 3) *Audit Energi Terinci* merupakan level ketiga dan tertinggi dalam kegiatan audit energi. Audit ini lebih mendalam dengan lingkup yang lebih luas, rekomendasi didasarkan atas kajian teknis dengan urutan prioritas yang jelas (Parwito *et al.*, 2018).

Dalam penelitian ini akan dilakukan audit energi rinci atau level 3 untuk audit energi listrik dan termal. Audit listrik adalah proses evaluasi pemanfaatan energy listrik guna mengidentifikasi peluang penghematan energi dan untuk meningkatkan efisiensi penggunaannya. Sedangkan audit energi termal adalah proses evaluasi pemanfaatan energi termal guna mengidentifikasi peluang penghematan energi dan untuk meningkatkan efisiensi penggunaannya. Langkah langkah yang harus dilakukan berdasarkan Keputusan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 58 Tahun 2018 Tentang Penetapan Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia Kategori Aktivitas Personal, Ilmiah, dan Teknis Golongan Pokok Aktivitas Profesional, Ilmiah dan Teknis Lainnya Bidang Audit Energi meliputi (Ginting *et al.*, 2022; Parwito *et al.*, 2018):

- 1) Merencanakan audit energi.
- 2) Mengumpulkan data termal dan sistem kelistrikan.
- 3) Merencanakan pengukuran energi termal dan sistem kelistrikan.
- 4) Melakukan survei lapangan dan pengukuran pada sistem termal dan sistem kelistrikan.
- 5) Melakukan analisis termal dan analisis sistem kelistrikan.
- 6) Melaporkan hasil audit energi dan rekomendasi penghematan energi.

### **2.3 PT Phapros Tbk**

PT Phapros, Tbk adalah perusahaan farmasi penghasil obat-obatan yang merupakan anak perusahaan PT Kimia Farma Tbk. Pada akhir 2002 Phapros

memproduksi 137 item obat, 124 diantaranya adalah obat hasil pengembangan sendiri. Pada pertengahan 2004 Phapros memperkenalkan produk alam dalam kelompok Agro Medicine, Agromed. Saat ini, perusahaan telah memproduksi lebih dari 250 macam obat, sebagian besar diantaranya adalah hasil pengembangan sendiri (non-lisensi) yang diklasifikasi dalam kelompok produk etikal, generic, OTC, dan Agromed. Produk – produk yang dihasilkan oleh PT Phapros Tbk dikelompokkan menjadi 11 jenis produk diantaranya yaitu tablet (kg), tablet salut (kg), kapsul (kg), injeksi cair (liter), injeksi serbuk (kg), salep (kg), *syrup* cair (liter), *syrup* kering (kg), *sachet* cair (liter), *sachet* powder (kg) dan produk lain-lain yang terdiri dari MKP, marimer dan balsem (liter).

#### **2.4 Sumber Energi PT Phapros Tbk**

Sumber energi utama yang digunakan di PT Phapros Tbk adalah listrik dan sumber energi untuk peralatan boiler menggunakan solar dan CNG. Penggunaan solar sudah berkurang sejak awal tahun 2019 karena ada boiler yang menggunakan bahan bakar CNG (Arif, 2020).

Energi listrik adalah energi yang tersimpan dalam arus listrik dan tegangan listrik dengan kebutuhan konsumsi daya listrik untuk menggerakkan motor, lampu penerangan, memanaskan, mendinginkan atau menggerakkan kembali suatu peralatan mekanik untuk menghasilkan bentuk energi yang lain. Energi listrik menjalankan peralatan rumah tangga, peralatan perkantoran, mesin industri, kereta api listrik, lampu umum, alat pemanasan, memasak, dan lain-lain. Satuan pokok dari energi listrik adalah joule dan satuan lainnya adalah kWh. 1 kWh setara dengan  $3,6 * 10^6$  joule atau 0,036 gigajoule (Atmam *et al.*, 2018).

Minyak solar ialah fraksi minyak bumi berwarna kuning coklat yang jernih yang mendidih sekitar  $175^{\circ}\text{C} - 370^{\circ}\text{C}$  dan yang digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel. Umumnya, solar mengandung belerang dengan kadar yang cukup tinggi. Penggunaan solar pada umumnya adalah untuk bahan bakar pada semua jenis mesin diesel dengan putaran tinggi (diatas 1000 rpm) (Hernawan, 2021). Satuan pokok dari energi solar adalah liter dimana nilai kalori solar di PT Phapros Tbk berkisar  $35,872 \text{ GJ/m}^3$ .

CNG adalah singkatan dari Compressed Natural Gas. CNG adalah gas bumi yang dibuat dengan melakukan kompresi metana ( $\text{CH}_4$ ) dan dipampatkan pada tekanan tinggi sehingga volumenya menjadi sekitar 1/250 dari volume gas bumi pada keadaan standar. Tujuan pemampatan gas bumi menjadi CNG adalah agar dapat diperoleh lebih banyak gas yang dapat ditransportasikan per satuan volume vessel. Pada umumnya, CNG digunakan sebagai alternatif bahan bakar selain bensin atau diesel (Husen, 2022). Satuan pokok dari energi CNG adalah  $\text{m}^3$  dimana nilai kalori CNG di PT Phapros Tbk berkisar 22,588  $\text{m}^3/\text{MMBtu}$ . 1 MMBtu setara dengan 1,055056 gigajoule.

Energi yang digunakan di PT Phapros Tbk pada tahun 2019 sebesar 69.188 GJ (setara 1.653 TOE), tahun 2020 sebesar 69.952 GJ (setara 1.671 TOE) dan tahun 2021 sebesar 77.537 GJ (setara 1.852 TOE).

## **2.5 Specific Energy Consumption (SEC)**

*Specific Energy Consumption* (SEC) atau Konsumsi Energi Spesifik (KES) merupakan istilah yang dipakai untuk menyatakan besarnya pemakaian energi yang diperlukan untuk memproduksi suatu produk. Untuk mengukur besarnya SEC dapat dilakukan jika diketahui konsumsi energi industri selama proses periode tertentu ( $\text{kWh/periode}$ ,  $\text{GJ/periode}$ ) dan jumlah total produksi yang diproses selama periode tertentu ( $\text{Ton/periode}$ ). SEC dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Pandey & Prakash, 2018):

$$\text{SEC} = \frac{\text{Konsumsi Energi}}{\text{Jumlah Produksi}} \quad (2.1)$$

Regresi linier merupakan pendekatan untuk memodelkan hubungan antara suatu (satu atau lebih) variabel dependen dengan satu (regresi linear sederhana) atau lebih variabel independen (regresi linier banyak). Salah satu aplikasi dari regresi linier adalah untuk melakukan prediksi berdasarkan data-data yang telah dimiliki sebelumnya. Dengan asumsi hubungan di antara variabel-variabel tersebut dapat didekati oleh suatu persamaan garis lurus, maka model yang mendekati hubungan antar variabel di data tersebut disebut sebagai model regresi linear. Persamaan regresi linier ini dapat digunakan sebagai metode penetapan

baseline. Baseline adalah nilai acuan kinerja energi pada saat base year yang akan digunakan sebagai pembandingan dan menetapkan apakah kinerja energi meningkat (hemat) atau menurun (boros). Metode penetapan baseline dapat dilakukan dengan persamaan regresi linear sebagai berikut (Roback & Legler, 2021):

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (2.2)$$

Dimana  $y$  adalah konsumsi energi total dalam GJ yang digunakan dan  $x_1, x_2, x_3$  adalah jumlah produksi yang dihasilkan meliputi 11 jenis produk. Untuk mencari persamaan regresi linier maka dapat menggunakan software microsoft excel.

## 2.6 Significant Energy Uses (SEU)

Pengguna Energi Signifikan (PES) atau dalam bahasa inggris biasa disebut dengan *Significant Energy Uses* (SEU) adalah suatu langkah pemetaan dimana sebagian besar energi pada suatu konsumen digunakan. Tujuan dari penggolongan PES ini adalah agar kita bisa memfokuskan sumber daya yang kita miliki untuk melakukan analisis potensi penghematan energi pada beban – beban yang memiliki potensi paling besar dalam penghematan energi. Untuk mendapatkan PES, kita harus mengetahui berapa banyak energi yang digunakan pada setiap proses atau peralatan. Dalam keadaan ideal, seharusnya ada alat ukur konsumsi energi pada setiap peralatan atau sistem dengan tingkat konsumsi energi tinggi. Alat ukur ini digunakan untuk memudahkan dalam mengetahui tingkat konsumsi energi dari suatu peralatan/ sistem.

Tetapi kenyataannya masih sedikit konsumen yang menggunakan submeter pada peralatan yang mereka gunakan. Dalam masalah ini diperlukan cara untuk memperkirakan jumlah konsumsi energi yang digunakan. Pada penyusunan PES setidaknya harus dapat mengidentifikasi 80% dari total konsumsi energi yang kita gunakan selama 1 tahun. Mengelompokkan peralatan berdasarkan energi sistem (proses pemanasan, proses kompressor udara, proses pendinginan ruangan, proses pencahayaan, dll) adalah praktek terbaik yang sering digunakan. Memahami penggunaan energi yang dinamis dalam suatu sistem akan menuntun pada penghematan energi yang optimal (Ginting *et al.*, 2022; Parwito *et al.*, 2018).

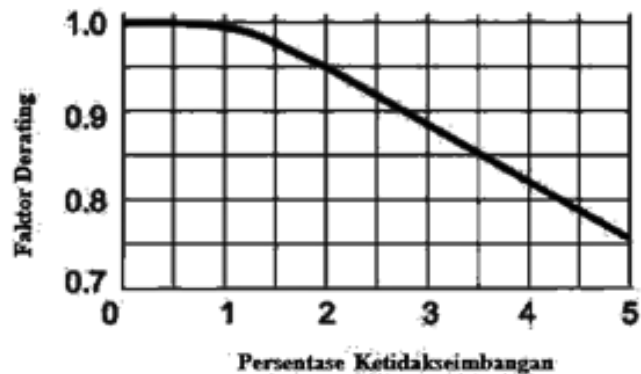
## 2.7 Sistem Kelistrikan

Sistem kelistrikan atau sistem tenaga listrik adalah sebuah jaringan terinterkoneksi yang berfungsi untuk mendistribusikan listrik dari pembangkit ke pengguna. Sistem tenaga listrik terdiri atas pembangkit listrik yang berfungsi untuk memproduksi energi listrik dan saluran distribusi yang berfungsi membawa listrik dari gardu ke pengguna. Dalam pemanfaatannya sistem kelistrikan memiliki parameter operasi dari peralatan listrik yang disebut dengan kualitas daya yang meliputi ketidakseimbangan tegangan ketidakseimbangan arus, faktor daya. Audit energi pada sistem kelistrikan dapat dilakukan melalui identifikasi penggunaan peralatan kelistrikan seperti kabel atau busbar, trafo, kapasitor, dan motor listrik (Zuhal, 2000).

### 2.7.1 Tegangan Listrik

Tegangan listrik atau beda potensial adalah tegangan yang bekerja pada elemen atau komponen dari satu terminal/kutub ke terminal/kutub lainnya yang dapat menggerakkan muatan listrik. Dalam sistem kelistrikan tegangan listrik ini dapat mempengaruhi kualitas dari daya listrik yang dihasilkan. Ketidakseimbangan tegangan didefinisikan sebagai nilai penyimpangan maksimum dari rata-rata tegangan atau arus tiga fasa, dibagi dengan rata-rata tegangan atau arus tiga fasa yang dinyatakan dalam persen. Penyebab utama terjadinya ketidakseimbangan tegangan di bawah 2% adalah beban 1 fasa pada jaringan 3 fasa. Ketidakseimbangan tegangan pada sistem polyphase dirumuskan sebagai berikut (Yunanto *et al.*, 2016; Zuhal, 2000) :

$$\%V_{\text{unbalance}} = \frac{\text{Deviasi Maximum dari Tegangan Rata-Rata}}{\text{Tegangan Rata-Rata}} \times 100\% \quad (2.3)$$



**Gambar 2.1. Kurva Hubungan Persentase Ketidakseimbangan Tegangan dengan Derating Factor**

Pada motor, ketidakseimbangan fasa tegangan dapat menimbulkan tambahan arus urutan negatif mengalir pada motor, arus ini meningkatkan rugi-rugi daya terutama pada rotor. Oleh karena itu untuk tetap menjaga kondisi motor agar tidak rusak, pengoperasian motor harus disesuaikan daya keluarannya (derating) dengan nilai ketidakseimbangan tegangan (lihat gambar 2.1). Tidak dianjurkan mengoperasikan motor dalam kondisi ketidakseimbangan tegangan lebih dari 5%. Dalam publikasi standar ANSI/NEMA MG-1, nilai ketidakseimbangan tegangan dibatasi pada nilai dibawah 1% untuk mengoperasikan motor tiga fasa sesuai dengan ratingnya (Wildi, 2002).

### 2.7.2 Arus Listrik

Arus listrik adalah laju aliran muatan listrik melewati suatu titik atau bagian. Arus listrik dikatakan ada ketika ada aliran bersih muatan listrik melalui suatu bagian. Dalam sistem kelistrikan arus listrik ini dapat mempengaruhi kualitas dari daya listrik yang dihasilkan. Ketidakseimbangan arus adalah nilai ketidakseimbangan arus yang mengalir antar fasa. Akibat dari ketidakseimbangan ini akan menyebabkan adanya arus mengalir pada titik netral. Arus netral mengakibatkan terjadinya beda tegangan antara titik netral dengan ground. Selain itu dengan mengalirnya arus pada titik netral maka reference tegangan pada titik netral tidak terpenuhi sehingga menyebabkan tegangan fasa ke netral turun. Untuk

menghitung ketidakseimbangan arus ditunjukkan pada persamaan berikut (Yunanto *et al.*, 2016; Zuhail, 2000) :

$$\% I_{\text{unbalance}} = \frac{\text{Deviasi Maximum dari Arus Rata-Rata}}{\text{Arus Rata-Rata}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Dalam publikasi standar ANSI/ NEMA MG 1 disebutkan apabila motor tiga fasa dioperasikan pada tegangan, frekuensi, dan daya keluaran sesuai dengan nilai rating, maka nilai arus masukan tidak boleh berbeda dari nilai *rating* lebih dari 10% (Wildi, 2002).

### 2.7.3 Faktor Daya

Faktor daya adalah besaran yang menunjukkan besarnya perbedaan sudut antara tegangan dan arus. Jenis dan besarnya faktor daya ini bergantung pada jenis beban dan besar bebannya. Terdapat 3 jenis pembebanan dalam sistem tenaga listrik yang mempengaruhi jenis dan besarnya faktor daya, yaitu pembebanan resistif (tegangan dan arusnya sefasa), pembebanan induktif (sudut arusnya tertinggal dari sudut tegangan/lagging) dan pembebanan kapasitif (sudut arusnya mendahului sudut tegangan/leading) (Zuhail, 2000).

Sudut  $\varphi$  dinamakan sudut faktor daya, sudut ini menentukan kondisi tegangan yang terdahului atau tertinggal terhadap arus. Semakin tinggi nilai faktor daya maka arus yang dibutuhkan untuk mengantarkan daya ke beban semakin kecil. Semakin tinggi nilai arus semakin besar pula susut tegangan dan rugi daya  $I^2R$  pada saluran distribusi dan peralatan listrik lain. Untuk efisiensi dan operasi, diusahakan nilai faktor daya mendekati satu (Yunanto *et al.*, 2016; Zuhail, 2000).

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S} \quad (2.4)$$

Dimana :

$\cos \varphi$  = faktor daya

R = Nilai resistansi beban (ohm)

Z = Nilai impedansi beban (ohm)

P = Daya aktif (W)



$S$  = Daya semu (VA)

Perbaikan faktor daya pada beban memerlukan penambahan kapasitor untuk menyediakan sejumlah daya reaktif (VAR) yang akan dikonsumsi oleh beban induktif (Zuhal, 2000).

#### 2.7.4 Daya Listrik

Daya aktif adalah daya yang digunakan oleh komponen beban resistif sedangkan daya reaktif adalah daya yang digunakan oleh komponen beban induktif dan beban kapasitif. Daya aktif dan daya reaktif dapat dirumuskan sebagai berikut (Wildi, 2002; Zuhal, 2000):

$$P = 3I_B^2 R = 3V_{LN} I_B \cos \varphi \quad (2.5)$$

$$Q = 3I_B^2 X = 3V_{LN} I_B \sin \varphi \quad (2.6)$$

Dimana :

$P$  = Daya aktif (W)

$Q$  = Daya reaktif (VAr)

$R$  = Nilai resistansi beban (ohm)

$X$  = Nilai reaktansi beban (ohm)

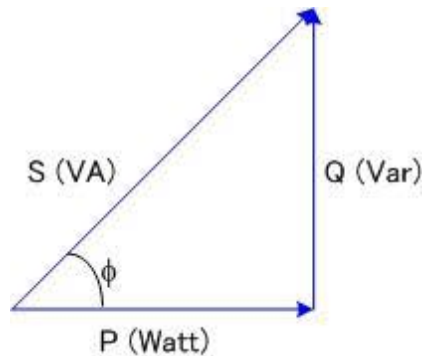
$V_{LN}$  = Tegangan line to netral (V)

$I_B$  = Arus beban (A)

$\cos \varphi$  = faktor daya

$\sin \varphi$  = faktor daya reaktif

Komponen daya dalam sistem kelistrikan bolak – balik (AC) dapat digambarkan dalam bentuk segitiga daya seperti pada gambar 2.2.



**Gambar 2.2. Segitiga Daya (Barlian *et al.*, 2020)**

Berdasarkan gambar 2.2, nilai penjumlahan phytagoras dari daya aktif dan daya reaktif akan menghasilkan daya semu yang dapat dirumuskan sebagai berikut (Barlian *et al.*, 2020) :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = P + jQ = 3V_{LN}I_B \quad (2.7)$$

Dimana :

S = Daya semu (VA)

P = Daya aktif (W)

Q = Daya reaktif (VAr)

$V_{LN}$  = Tegangan line to netral (V)

$I_B$  = Arus beban (A)

## 2.8 Motor Listrik

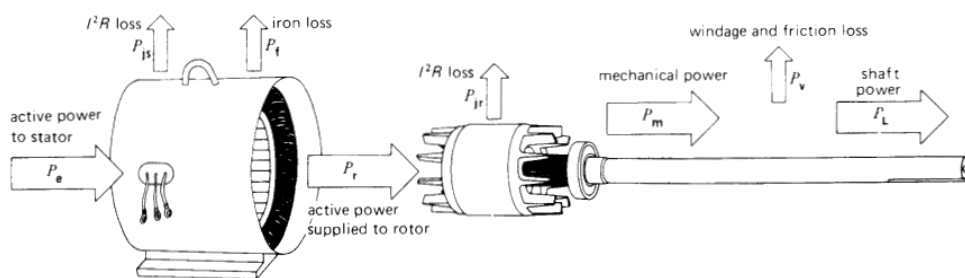
Motor listrik adalah alat untuk mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Dalam operasinya efisiensi dari motor listrik dipengaruhi oleh umur, kapasitas, putaran, tipe, temperatur, rewinding, dan beban kerja motor listrik. Berdasarkan sumber daya listrik, motor listrik terbagi menjadi 3 jenis yaitu motor DC, motor AC 1 fasa dan motor AC 3 fasa. Sedangkan berdasarkan prinsip kerjanya, motor listrik terbagi menjadi 2 jenis yaitu motor sinkron dan motor asinkron/motor induksi (Siswoyo, 2008; Zuhail, 2000).

Peralatan – peralatan di industri pada saat ini menggunakan motor induksi dengan sumber tegangan tiga fasa sebagai penggerakannya. Hal ini disebabkan karena motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang sederhana, harga yang

lebih murah dan perawatannya lebih mudah. Jika dibandingkan dengan motor listrik yang lain, motor sinkron membutuhkan eksitasi dari sumber tegangan DC dari luar mesin dan motor induksi satu fasa tidak dapat start awal sehingga membutuhkan bantuan kumparan bantu yang terhubung seri dengan kapasitor tambahan (Atmam *et al.*, 2016; Wildi, 2002; Zuhail, 2000).

Pada dasarnya, motor induksi tiga fasa memiliki kecepatan yang konstanta saat keadaan tidak berbeban (*zero/no load*) maupun beban penuh (*full load*). Kecepatan motor induksi tiga fasa tergantung pada frekuensi kerjanya sehingga sulit untuk mengatur kecepatannya. Meskipun begitu, peralatan pengatur frekuensi (*variable frequency drive*) semakin banyak digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi (Wildi, 2002).

Efisiensi motor sendiri dapat didefinisikan sebagai perbandingan keluaran daya motor yang digunakan terhadap keluaran daya totalnya. Beberapa motor listrik didesain untuk beroperasi pada 50% hingga 100% beban nominal. Efisiensi maksimum adalah yang mendekati 75% pada beban nominal (Suyamto, 2009; Wildi, 2002). Gambar 2.3 menunjukkan *flow diagram* daya aktif yang menggambarkan efisiensi dari motor induksi tiga fasa.



**Gambar 2.3. Flow Diagram Daya Aktif Motor Induksi Tiga Fasa (Wildi, 2002)**

Daya aktif yang masuk ke motor induksi tiga fasa dapat dihitung sebagai berikut (Suyamto, 2009; Wildi, 2002) :

$$P_i = \frac{\sqrt{3} \times V_{LL} \times I_B \times \cos \varphi}{1.000} \quad (2.8)$$

Daya aktif  $P_c$  mengalir dari sumber tegangan 3 fasa ke stator. Di dalam stator terdapat kerugian daya aktif akibat tembaga stator ( $P_{js}$ ) dan inti besi  $I^2R$  ( $P_f$ )

dan menyisakan daya aktif  $P_r$  yang dibawa melintasi celah udara dan ditransfer ke rotor dengan induksi elektromagnetik (Wildi, 2002).

$$P_r = P_c - (P_{js} + P_f) \quad (2.9)$$

Di bagian rotor, terdapat kerugian daya aktif akibat inti besi  $I^2R$  ( $P_{jr}$ ) dimana besarnya sama dengan slip dikalikan  $P_r$  dan menyisakan daya mekanik  $P_m$  (Wildi, 2002).

$$P_m = P_r - P_{jr} \quad (2.10)$$

$$P_m = P_r - sP_r \quad (2.11)$$

$$P_m = (1-s)P_r \quad (2.12)$$

Di bagian poros/*shaft* terdapat kerugian daya aktif akibat *windage* dan gesekan *bearing* ( $P_v$ ) dan menyisakan  $P_L$ , daya mekanik yang tersedia di poros/*shaft* untuk menggerakkan beban (Wildi, 2002).

$$P_L = P_m - P_v \quad (2.13)$$

Berdasarkan flow diagram pada gambar 2.3, maka nilai efisiensi motor induksi tiga fasa dapat dihitung sebagai berikut (Wildi, 2002) :

$$\eta = \frac{P_L}{P_c} \times 100\% \quad (2.14)$$

$$\eta = \frac{P_m - P_v}{P_c} \times 100\% \quad (2.15)$$

$$\eta = \frac{P_r - P_{jr} - P_v}{P_c} \times 100\% \quad (2.16)$$

$$\eta = \frac{P_c - P_{js} - P_f - P_{jr} - P_v}{P_c} \times 100\% \quad (2.17)$$

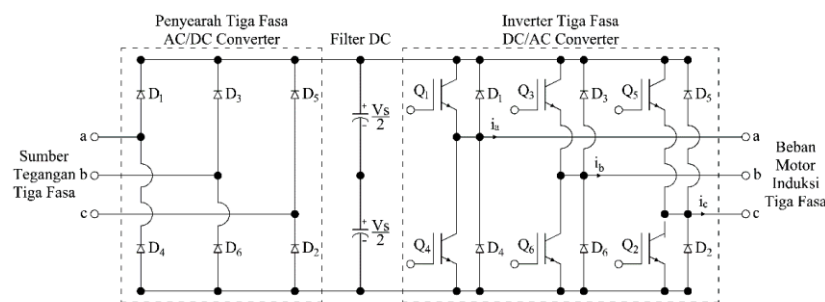
Torsi pada motor induksi tiga fasa dapat dihitung sebagai berikut (Wildi, 2002) :

$$\tau = 9,55 \times \frac{P_m}{n_r} \quad (2.18)$$

$$\tau = 9,55 \times \frac{P_r}{n_s} \quad (2.19)$$

## 2.9 Variable Speed Drive (VSD)

*Variable speed drive* adalah perangkat yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor sesuai dengan kebutuhan. Pada aplikasi motor induksi tiga fasa, kecepatannya bergantung pada nilai frekuensi tegangan sesuai dengan persamaan (2.3) dan perangkat pengendalian kecepatannya disebut dengan *variable voltage frequency drive* dimana masukannya adalah tegangan tiga fasa (umumnya memiliki tegangan line to line 380 V dan frekuensi 50 Hz) dan keluarannya adalah tegangan tiga fasa yang nilai tegangan dan frekuensinya dapat diatur sesuai kebutuhan (Pachanawan *et al.*, 2017; Prasetyo *et al.*, 2018). Rangkaian dasar dari *variable voltage frequency drive* ditunjukkan pada gambar 2.4.



**Gambar 2.4. Rangkaian Dasar Variable Voltage Frequency Drive (Herman, 2010)**

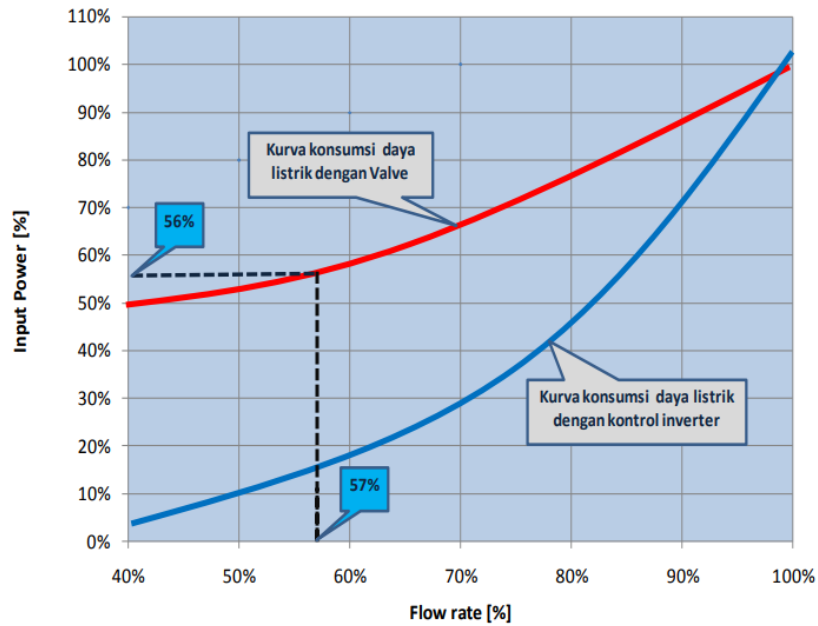
Pada gambar 2.4, sumber tegangan tiga fasa yang umumnya memiliki tegangan line to line 380 V dan frekuensi 50 Hz dialirkan menuju penyearah dan diubah menjadi DC. Pada dasarnya, tegangan AC yang diubah menjadi DC tidak dapat berubah berubah menjadi DC murni karena masih terdapat tegangan *ripple* dan nilainya masih berubah, untuk itu diperlukan sebuah filter untuk mengurangi tegangan *ripple* tersebut. Tegangan keluaran dari filter DC dialirkan menuju inverter tiga fasa dan diubah menjadi tegangan tiga fasa yang besar tegangan dan frekuensinya dapat diubah sesuai dengan kebutuhan (Herman, 2010; Meng *et al.*, 2021).

Perubahan frekuensi dilakukan melalui sinyal pemicuan transistor inverter tiga fasa karena frekuensi tegangan keluaran inverter tiga fasa akan mengikuti

frekuensi sinyal pemicuan. Sinyal pemicuan biasanya dihasilkan melalui IC (*integrated circuit*) atau dari mikroprosesor (Herman, 2010; Meng *et al.*, 2021).

Perubahan besar tegangan dapat dilakukan melalui banyak cara, salah satunya adalah mengganti rangkaian penyearah yang semula menggunakan dioda menjadi thyristor. Cara lainnya dapat dilakukan dengan menambahkan rangkaian DC – DC *Converter* di antara penyearah dengan filter DC. Dengan begitu, besar tegangan DC dari penyearah atau dari DC – DC *Converter* dapat diatur dan disesuaikan dengan sinyal pemicuan inverter tiga fasa. Pada umumnya, *variable voltage frequency drive* bekerja dengan mengendalikan nilai rasio V/f tetap konstan karena perubahan frekuensi tanpa mengubah tegangan akan mempengaruhi parameter listrik seperti arus dan faktor daya ketika mengoperasikan motor induksi tiga fasa (Herman, 2010; Meng *et al.*, 2021; Pachanawan *et al.*, 2017).

Dalam implementasi efisiensi energi, pemasangan VSD berfungsi untuk mengendalikan kecepatan motor induksi tiga fasa sesuai dengan kebutuhan proses di industri dan mengurangi penggunaan energi listrik. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Atmam (2020) tentang analisis penggunaan energi listrik motor induksi tiga fasa menggunakan *variable speed drive* (VSD) memberikan hasil bahwa dengan memasang VSD akan mengurangi penggunaan energi sebesar 31,1% dibandingkan pada saat tidak menggunakan VSD. Gambar 2.5 menunjukkan perbandingan konsumsi energi listrik pada motor induksi tiga fasa tanpa VSD dan dengan VSD (Ahadi & Setiadanu, 2019; Atmam *et al.*, 2018).



**Gambar 2.5. Perbandingan Konsumsi Listrik Tanpa Inverter dan Dengan Inverter (Atmam *et al.*, 2018)**

Pemilihan inverter harus memperhatikan spesifikasi motor serta keperluan dalam pemakaian inverter itu sendiri. VSD yang dipasang pada motor harus memiliki spesifikasi daya di atas motor. Berikut adalah perhitungan penghematan daya listrik pada motor listrik jika menggunakan inverter (Atmam *et al.*, 2018; Malik *et al.*, 2013) :

a) Sebelum menggunakan VSD

$$P_{FL} = \frac{P_N \times 0,746}{\eta_m} \quad (2.20)$$

Dimana :

$P_{FL}$  = Daya beban penuh (kW)

$P_N$  = Daya pada *nameplate* (HP)

$\eta_m$  = Efisiensi motor (%)

$$\text{Load Factor (\%)} = \frac{P_{AC}}{P_{FL}} \times 100\% \quad (2.21)$$

Dimana :

$P_{AC}$  = Daya aktual hasil pengukuran (kW)

$P_{FL}$  = Daya beban penuh (kW)

b) Setelah menggunakan VSD (berdasarkan hasil perhitungan load factor (%), maka didapatkan nilai flowrate (%) berdasarkan Gambar 2.5).

$$P_S = P_N \times 0,746 \times (\text{flowrate})^3 \quad (2.22)$$

Dimana :

$P_S$  = Shaft Power (kW)

$P_N$  = Daya pada *nameplate* (HP)

$$P_{VSD} = \frac{P_S}{\eta_m \times \eta_{VSD}} \quad (2.23)$$

Dimana :

$P_{VSD}$  = Daya motor setelah menggunakan VSD (kW)

$P_S$  = Shaft Power (kW)

$\eta_m$  = Efisiensi motor (%)

$\eta_{VSD}$  = Efisiensi motor (%)

Berdasarkan hasil perhitungan daya sebelum dan sesudah menggunakan VSD, maka didapatkan penghematan sebagai berikut (Atmam *et al.*, 2018; Malik *et al.*, 2013) :

$$\text{Penghematan Daya} = P_{AC} - P_{VSD} \quad (2.24)$$

$$\text{Penghematan Energi per Hari} = \text{Penghematan Daya} \times \text{Jam Operasi} \quad (2.25)$$

## 2.10 Sistem Boiler

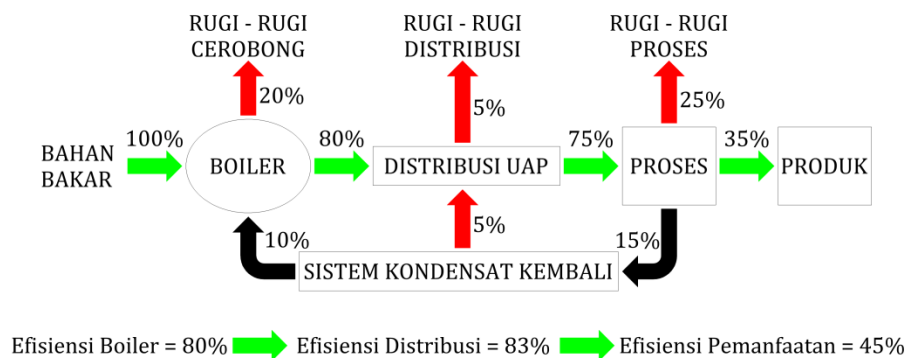
Boiler adalah salah satu peralatan dibidang industri yang merupakan bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air hingga menghasilkan uap yang bertekanan tinggi yang akan dimanfaatkan sesuai dengan kemauan pemakai produk tersebut. Uap (steam) yang dihasilkan dari boiler digunakan untuk berbagai proses dalam aplikasi industri, seperti penggerak, pemanas, dan lain-lain (Husen, 2022).

Prinsip kerja boiler adalah memanaskan air hingga mencapai titik didihnya, sehingga air berubah fasa dari air menjadi uap (*steam*). Boiler bekerja menggunakan prinsip kerja *heat transfer*, yaitu panas yang dihasilkan dair pembakaran bahan bakar ditransfer ke air melalui mekanisme konduksi, konveksi



dan radiasi (Husen, 2022). Proses awal sistem kerja boiler adalah pembakaran bahan bakar di *furnace*, dimana terjadi pelepasan energi dari bahan bakar oleh proses pembakaran. Pada dinding ruang bakar terjadi transfer panas secara radiasi. Selanjutnya gas hasil pembakaran melewati pipa dan terjadi transfer panas secara konduksi melewati dinding pipa. Gas asap hasil pembakaran tersebut mengalir menuju *stack* (cerobong) dan dilepas ke lingkungan. Di dalam *drum* yang berisi air terjadi perpindahan panas secara konveksi, dan merubah fase air dari *liquid* menjadi uap (*steam*). Perubahan fasa air menjadi uap terjadi pada suhu 100°C dengan tekanan 1 atm. Pada kondisi ini fase uap masih dalam kondisi bercampur dengan fase *liquid*, sehingga harus dialirkan ke *superheater pipe*, agar menjadi fase *steam* yang homogen (Hernawan, 2021; Saidah *et al.*, 2022).

Boiler merupakan *energy user*, dimana unjuk kerja yang diberikan tidak selalu konstan sehingga perlu dilakukan evaluasi dari pemanfaatan energi dan identifikasi peluang penghematan energi. Kegiatan ini biasa disebut dengan audit *steam*. Audit *steam* adalah cara yang paling efektif untuk mengidentifikasi peluang perbaikan distribusi *steam* yang terpasang (Saidah *et al.*, 2022).



**Gambar 2.6. Diagram Distribusi Steam (Hernawan, 2021)**

Gambar 2.6 menunjukkan diagram yang menggambarkan rugi – rugi panas pada boiler dan distribusi steam, yang mana masih banyak peluang untuk meningkatkan kinerja sistem *steam* jika dilihat dari isu efisiensi dan konservasi energi, dan *best practices* termasuk gejala *water hammer* dan kaidah instalasi distribusi *steam* (Hernawan, 2021).

Di dalam membangkitkan *steam* pada sistem boiler diperlukan beberapa sumber energi seperti listrik dan bahan bakar. Energi listrik pada sistem boiler digunakan untuk beberapa peralatan motor listrik dan *fan* seperti: pompa bahan bakar, *FD Fan*, *ID Fan* (boiler batubara) dan pompa *feed water* sedangkan bahan bakar yang digunakan untuk membangkitkan *steam* adalah jenis batubara, CNG dan solar (Saidah *et al.*, 2022).

Efisiensi boiler dapat didefinisikan sebagai seberapa optimal sebuah boiler dapat mengubah fluida yang berada pada boiler dan mengkonversi energi kimia pada bahan bakar untuk diubah menjadi *steam*/uap yang dihasilkannya. Efisiensi pada boiler bisa didapatkan dengan 2 metode yaitu metode langsung (*input-output*) dan metode tidak langsung (*heat loss*) (Husen, 2022; Papireddy *et al.*, 2018).

Metode langsung atau yang sering disebut dengan metode *direct* adalah suatu metode perhitungan untuk mencari efisiensi sebuah boiler yang membandingkan antara energi yang terkandung pada bahan bakar boiler dengan energi yang terkandung pada *steam* yang dihasilkan. Berikut perhitungan efisiensi dengan metode *direct* (Husen, 2022; Papireddy *et al.*, 2018; Saidah *et al.*, 2022) :

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{m_{\text{steam}} \times (h_{\text{steam}} - h_{\text{feedwater}})}{m_{\text{fuel}} \times \text{GCV}_{\text{fuel}}} \quad (2.26)$$

Dimana :

$\eta_{\text{boiler}}$  = efisiensi boiler (%)

$m_{\text{steam}}$  = laju alir uap (kg/jam)

$h_{\text{steam}}$  = entalpi uap (kJ/kg)

$h_{\text{feedwater}}$  = entalpi air umpan (kJ/kg)

$m_{\text{fuel}}$  = laju alir bahan bakar (kg/jam)

$\text{GCV}_{\text{fuel}}$  = nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

Metode tidak langsung atau yang sering disebut dengan metode *indirect* adalah suatu metode perhitungan untuk mencari suatu efisiensi sebuah boiler dengan cara menghitung nilai panas yang nilai (*heat loss*). Berikut ini perhitungan efisiensi untuk metode *indirect* (Kumar *et al.*, 2018; Papireddy *et al.*, 2018) :

$$\eta_{\text{boiler}} = 100\% - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) \quad (2.27)$$

Dimana :

$\eta_{\text{boiler}}$  = efisiensi boiler (%)

$L_1$  = Rugi-rugi gas buang kering (panas-sensibel)

$L_2$  = Rugi-rugi *steam* dalam panas bahan bakar ( $H_2$ )

$L_3$  = Rugi-rugi kandungan air bahan bakar ( $H_2O$ )

$L_4$  = Rugi-rugi kandungan air di udara pembakaran ( $H_2O$ )

$L_5$  = Rugi-rugi pembakaran tidak sempurna (CO)

$L_6$  = Rugi-rugi radiasi permukaan, konveksi

$L_7$  = Rugi-rugi karena *ash fly*

$L_8$  = Rugi-rugi karena *bottom ash*

### 2.11 Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)

HVAC merupakan sebuah peralatan yang digunakan sebagai unit pengkondisi udara ruangan atau gedung untuk memperoleh kenyamanan termal. Audit energi pada sistem HVAC dilakukan untuk mengetahui performa peralatan serta konsumsi energi dan mengevaluasi tingkat kelayakannya serta menentukan langkah perbaikannya untuk mendukung konservasi energi. Konservasi energi sistem HVAC diatur dalam SNI 03-6390-2011 dengan tujuan agar sasaran penggunaan energi yang efisien dapat tercapai (Andini *et al.*, 2020).

Peralatan pada sistem HVAC yang menggunakan *chiller* direkomendasikan untuk memenuhi kriteria efisiensi minimum (Husodo & Br. Siagian, 2014). Dasar – dasar perhitungan performansi sistem tata udara diantaranya, *Coefficient Of Performance* (COP), *Energy Efficiency Ratio* (EER), dan Daya Listrik yang dikonsumsi oleh *chiller* ditunjukkan sebagai berikut (Andini *et al.*, 2020; Husodo & Br. Siagian, 2014) :

$$COP = \frac{ER}{W_k} \quad (2.33)$$

$$TR = \frac{Q \times \rho \times H_{in} \times H_{out}}{3.024} \quad (2.34)$$

$$EER = COP \times 3,41 \quad (2.35)$$

Dimana:

COP = *Coefficient Of Performance*

ER = *Cooling Effect* (kW)

TR = *Tons Refrigeration*

Wk = *Daya Listrik Yang Dikonsumsi Oleh Chiller* (kW)

EER = *Energy Eficiency Ratio*

Q = *Air Flow* (m<sup>3</sup>/s) di *Air Handling Unit* (Anemometer)

$\rho$  = *Air Density* (kg/m<sup>3</sup>)

H<sub>in</sub> = *Entalpi Inlet Air* (kkal/kg) (*psychrocometric chart*)

H<sub>out</sub> = *Entalpi Outlet Air* (kkal/kg) (*psychrocometric chart*)


Standar nilai COP dan kW/TR dari peralatan tata udara yang dioperasikan dengan listrik ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1. Efisiensi Minimum dari Peralatan Tata Udara yang Dioperasikan dengan Listrik (Husodo & Br. Siagian, 2014)**

| Tipe Mesin Refrigerasi                                | Efisiensi Minimum |       |
|---|-------------------|-------|
|   | COP               | KW/TR |
| <i>Split &lt; 65.000 Btu/h</i>                        | 2,7               | 1,303 |
| <i>Variable Refrigerant Value</i>                     | 3,7               | 0,951 |
| <i>Split Duct</i>                                     | 2,6               | 1,353 |
| <i>Air Cooled Chiller &lt; 150 TR (recip)</i>         | 2,8               | 1,256 |
| <i>Air Cooled Chiller &lt; 150 TR (screw)</i>         | 2,9               | 1,213 |
| <i>Air Cooled Chiller &gt; 150 TR (recip)</i>         | 2,8               | 1,256 |
| <i>Air Cooled Chiller &gt; 150 TR (screw)</i>         | 3,0               | 1,172 |
| <i>Water Cooled Chiller &lt; 150 TR (recip)</i>       | 4,0               | 0,879 |
| <i>Water Cooled Chiller &lt; 150 TR (screw)</i>       | 4,1               | 0,858 |
| <i>Water Cooled Chiller &gt; 150 TR (recip)</i>       | 4,3               | 0,826 |
| <i>Water Cooled Chiller &gt; 150 TR (screw)</i>       | 4,4               | 0,799 |
| <i>Water Cooled Chiller &gt; 300 TR (centrifugal)</i> | 6,1               | 0,581 |

## 2.12 Tarif Dasar Listrik PLN

Tarif tenaga listrik yang disediakan oleh PLN mengacu pada Peraturan Menteri ESDM Nomor 3 Tahun 2020 Tentang Perubahan Keempat Atas Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor 28 Tahun 2016 Tentang Tarif Tenaga Listrik Yang Disediakan Oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero). Peraturan ini menjelaskan apabila terjadi perubahan terhadap realisasi indikator makro ekonomi (kurs, *Indonesian Crude Price/ICP*, inflasi, dan Harga Patokan Batubara/HPB), yang dihitung secara tiga bulanan maka akan dilakukan penyesuaian terhadap tarif tenaga listrik (*tariff adjustment*) (Kementerian ESDM, 2022). Gambar 2.8 menunjukkan tarif tenaga listrik yang ditetapkan dalam 3 bulan terakhir (Oktober – Desember 2022).



**PENETAPAN  
PENYESUAIAN TARIF TENAGA LISTRIK (TARIFF ADJUSTMENT)  
OKTOBER - DESEMBER 2022**

| NO. | GOL. TARIF   | BATAS DAYA                | REGULER                       |   | PRA BAYAR<br>(Rp/kWh) |
|-----|--------------|---------------------------|-------------------------------|---|-----------------------|
|     |              |                           | BIAYA BEBAN<br>(Rp/kVA/bulan) | BIAYA PEMAKAIAN (Rp/kWh)<br>DAN BIAYA kVArh (Rp/kVArh)                    |                       |
| 1.  | R-1/TR       | 900 VA-RTM                | *)                            | 1.352,00  | 1.352,00              |
| 2.  | R-1/TR       | 1.300 VA                  | *)                            | 1.444,70  | 1.444,70              |
| 3.  | R-1/TR       | 2.200 VA                  | *)                            | 1.444,70  | 1.444,70              |
| 4.  | R-2/TR       | 3.500 VA<br>s.d. 5.500 VA | *)                            | 1.699,53  | 1.699,53              |
| 5.  | R-3/TR       | 6.600 VA<br>ke atas       | *)                            | 1.699,53  | 1.699,53              |
| 6.  | B-2/TR       | 6.600 VA<br>s.d. 200 kVA  | *)                            | 1.444,70  | 1.444,70              |
| 7.  | B-3/TM       | di atas<br>200 kVA        | **)                           | Blok WBP = K x 1.035,78<br>Blok LWBP = 1.035,78<br>kVArh = 1.114,74 ****) | -                     |
| 8.  | I-3/TM       | di atas<br>200 kVA        | **)                           | Blok WBP = K x 1.035,78<br>Blok LWBP = 1.035,78<br>kVArh = 1.114,74 ****) | -                     |
| 9.  | I-4/TT       | 30.000 kVA ke atas        | ***)                          | Blok WBP dan<br>Blok LWBP = 996,74<br>kVArh = 996,74 ****)                | -                     |
| 10. | P-1/TR       | 6.600 VA<br>s.d. 200 kVA  | *)                            | 1.699,53  | 1.699,53              |
| 11. | P-2/TM       | di atas<br>200 kVA        | **)                           | Blok WBP = K x 1.415,01<br>Blok LWBP = 1.415,01<br>kVArh = 1.522,88 ****) | -                     |
| 12. | P-3/TR       |                           | *)                            | 1.699,53  | 1.699,53              |
| 13. | L/TR, TM, TT |                           | -                             | 1.644,52  | -                     |

Catatan :  
 \*) Diterapkan Rekening Minimum (RM):  
 $RM1 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian.}$   
 \*\*) Diterapkan Rekening Minimum (RM):  
 $RM2 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian LWBP.}$   
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.  
 \*\*\*) Diterapkan Rekening Minimum (RM):  
 $RM3 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian WBP dan LWBP.}$   
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.  
 \*\*\*\*) Biaya kelebihan pemakaian daya reaktif (kVArh) dikenakan dalam hal faktor daya rata-rata setiap bulan kurang dari 0,85 (delapan puluh lima per seratus).  
 K : Faktor perbandingan antara harga WBP dan LWBP sesuai dengan karakteristik beban sistem kelistrikan setempat ( $1,4 \leq K \leq 2$ ), ditetapkan oleh Direksi Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara.  
 WBP : Waktu Beban Puncak.  
 LWBP : Luar Waktu Beban Puncak.

**Gambar 2.7. Penetapan Penyesuaian Tarif Tenaga Listrik (Tariff Adjustment) Periode Oktober – Desember 2022 (Perusahaan Listrik Negara, 2022)**

### 2.13 Analisis Ekonomi Proyek

Analisis ekonomi suatu proyek dilakukan untuk menilai kelayakan suatu investasi, memprediksi nilai keuntungan, dan membandingkan dengan proyek alternatif. Salah satu jenis proyek yang terkait dengan energi adalah proyek konservasi energi. Proyek konservasi energi adalah proyek untuk meningkatkan performansi sistem penggunaa energi sehingga pemakaian energinya menjadi lebih optimal. Jenis proyek bersifat real (bukan investasi finansial) terdiri atas tanpa biaya, investasi berbiaya rendah, dan investasi berbiaya tinggi.

Dalam suatu proyek maka hal yang perlu dilakukan pada tahap awal adalah evaluasi aspek ketersediaan sumber daya energi, evaluasi aspek teknis dan teknologis, evaluasi aspek pasar dan pemasaran, evaluasi aspek sumberdaya manusia, dan evaluasi aspek akuntansi keuangan. Pada proyek konservasi energi, keuntungan netto tahunan didapat dari penghematan energi netto per tahun / *Annual Netto Profit* (ANP), untuk menentukan nilai ANP dapat menggunakan persamaan sebagai berikut (Kaya *et al.*, 2021):

$$ANP = R(C_{CE} - C_{VE}) - AFE \quad (2.36)$$

Dimana :

R = *Annual energy saving* (penghematan energi, kWh)

$C_{CE}$  = *Unit cost of energy* (harga energi)

$C_{VE}$  = *Unit cost of variable expend* (biaya tidak tetap)

AFE = *Annual Fixed Expend* (pengeluaran tetap tahunan)

Dalam proyek konservasi energi biaya tidak tetap adalah nol.

Pada dasarnya pada keuntungan suatu proyek konservasi energi perlu dievaluasi dan diuji. Alat untuk mengevaluasi atau menguji proyek tersebut adalah persentase *rate of return* (ROR) dan simple *Payback period* (PBP). Untuk menghitungnya dalam menggunakan persamaan sebagai berikut (Kaya *et al.*, 2021):

$$ROR = 100 \times \frac{AS}{INV} \quad (2.37)$$

$$PBP = \frac{INV}{AS} \quad (2.38)$$

Dimana :

ROR = *Rate of return*

PBP = *Payback Periode*

AS = *Annual Saving*

INV = *Invested Capital*