

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tri Novita Sari (2017) melakukan audit terhadap kualitas daya listrik blok A Gedung Keuangan Negara Yogyakarta, dan didapatkan hasil bahwa akibat adanya ketidak seimbangan beban dan pengaruh harmonik mengakibatkan terjadinya *losses* murni sebesar 2,087 kW, atau sebesar 8,06% dari total daya nyata yang digunakan. Jumlah total kerugian yang diakibatkan oleh ketidak seimbangan beban dan pengaruh harmonik yang harus dibayar sebesar Rp. 30.646.647,52 per-tahun.

Hadi Sugiarto (2012) melakukan kajian terhadap harmonik arus dan tegangan listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak. Diperoleh hasil THD arus sebesar 10,6% dan masih berada pada batas standar yaitu 15%. Nilai THD tegangan sebesar 2,7% masih dibawah batas yaitu 5%. Namun ada ketidak seimbangan beban pada fasa T yang jumlahnya hampir dua kali fasa R, dan akibatnya terjadi arus pada kawat netral serta menimbulkan rugi-rugi daya pada kawat netral dengan nilai 2389 Watt.

Robby Davitra, Firdaus, Ferranita (2015) melakukan penelitian mengenai dampak dari *Total Harmonic Distortion* pada *transformator* distribusi di Fakultas Teknik Universitas Riau. Didapat hasil bahwa nilai dari TDD sebesar 12,57 %, dan melebihi dari standar IEEE 519-1992 yaitu 5%. Kemudian untuk nilai THD tegangan yang terukur tidak melebihi standar, namun harmonik arus yang terukur melebihi standar dengan nilai THD arus sebesar 18,57%, hal ini menimbulkan kerugian *losses* sebesar 19,3 kW . Untuk nilai THD arus sebesar 18,57% memiliki nilai THDF sebesar 27,4% sehingga mengalami penurunan kapasitas daya (kVA) terpasang menjadi 219,28 kVA atau *derating* 72,6%.

Iskandar Zulkarnain (2009) melakukan penelitian tentang pengaruh harmonik pada arus netral, rugi rugi, dan penurunan kapasitas *transformator* distribusi di Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Didapatkan hasil bahwa THD arus pada waktu tertentu melebihi batas standar yang ditentukan tetapi untuk

THD tegangan masih dalam batas toleransi. Komposisi harmonik arus yang terjadi pada *transformator* dominan berada pada orde harmonik ke 3, 5, dan 7. Harmonik menyebabkan sumbangan yang besar terhadap arus netral, yaitu sebesar 20%. Untuk pembebanan terbesar terjadi pada *transformator* teknik sipil, dengan pembebanan rata-rata *transformator* sebesar 19,364%, THD arus sebesar 57,37%, penambahan rugi-rugi sebesar 48,7%, dan penurunan kapasitas sebesar 4,875%.

Djodi Antono, Adi Wasono, Lukas Joko Dwi Atmanto (2015) melakukan penelitian terhadap harmonik arus dan tegangan pada jaringan listrik akibat pembebanan *Air Conditioning* (AC) inverter tiga fasa. Hasil yang diperoleh dari pengukuran dengan pembebanan AC inverter tiga fasa 6HP jenis VRV, diperoleh nilai THD arus sebesar 75,5 % sedangkan THD tegangan 4,7%.

Adha Rizky Juniawan, Wasimudin Surya S, Dadang Lukman Hakim (2014) melakukan perancangan dan pemasangan filter aktif 3 fasa untuk mereduksi harmonik yang diakibatkan oleh beban-beban non-linear di gedung TIK Universitas Pendidikan Indonesia. Nilai THD arus yang terukur sebelum dipasang filter aktif yaitu 84% dan melebihi batas standar IEEE 519-1992. Setelah dilakukan perancangan dan pemasangan filter aktif, diperoleh hasil nilai THD arus sebesar 5,12%. Jika dibandingkan dengan nilai THD arus sebelumnya, filter aktif ini cukup berhasil meredam harmonik.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kualitas Daya Listrik

Kualitas daya listrik merupakan sebuah konsep pada sistem tenaga listrik yang berkaitan mengenai mutu daya yang ada pada sistem. Kualitas daya listrik memberikan konsep mengenai baik atau buruknya kualitas dari tegangan, arus, dan frekuensi listrik. ketiga hal tersebut merupakan parameter yang harus memenuhi standar acuan yang ada. Jika parameter tersebut tidak memenuhi standar, maka kualitas daya akan terganggu, sehingga dapat menimbulkan gangguan dan kerusakan pada peralatan listrik disisi penyuplai maupun konsumen, selain itu juga dapat membahayakan terhadap keselamatan manusia.

Eward F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum dalam bukunya yang berjudul *Power Quality in Power Systems and Electrical machines* mendefinisikan bahwa kualitas daya merupakan suatu bentuk yang mengekspresikan kualitas tegangan, dan atau kualitas dari arus dan dapat didefinisikan sebagai: pengukuran, analisis, dan peningkatan tegangan bus untuk mempertahankan gelombang sinusoidal pada tegangan dan frekuensi. Definisi ini termasuk semua fenomena sesaat dan fenomena yang stabil.

Seiring dengan semakin banyaknya penggunaan terhadap energi listrik dan utilitas listrik, memberikan perhatian terhadap para ahli sistem tenaga listrik untuk meningkatkan mutu dari daya listrik. Ada beberapa indikator yang dijadikan perhatian terhadap kualitas daya listrik saat ini (BPPT, 2014), yaitu:

1. Banyaknya penggunaan beban beban listrik yang sensitif terhadap kualitas daya listrik seperti peralatan berbasis elektronika daya dan sistem kendali.
2. Meningkatnya pemahaman dan kesadaran akan pentingnya penghematan energi dengan menggunakan peralatan yang memiliki efisiensi tinggi, seperti penggunaan lampu LED, AC inverter, penggunaan kapasitor bank untuk perbaikan faktor daya, dan kendali kecepatan motor listrik. Peralatan tersebut diklasifikasikan sebagai beban non-linear yang dapat menyebabkan peningkatan nilai harmonik pada sistem distribusi listrik. Efek dari harmonik ini dalam jangka panjang dapat mengakibatkan semakin menurunnya kualitas daya listrik dan kerusakan peralatan listrik.
3. Transmisi dan distribusi listrik yang saling terhubung menggunakan jaringan interkoneksi akan berakibat pada komponen jika terjadi suatu kegagalan atau gangguan dari komponen lainnya.

Dalam kualitas daya listrik ada beberapa hal yang dapat dijadikan sebagai tolak ukur baik atau tidaknya suatu daya yang disuplai pada suatu sistem tenaga listrik, yaitu:

1. Dapat memenuhi beban puncak.
2. Memiliki urutan fase yang benar.
3. Memiliki jaminan tegangan yang setimbang.

4. Memiliki deviasi tegangan dan frekuensi yang minimum
5. Menjamin distorsi gelombang tegangan dan distorsi harmonik yang minimal dan bebas dari surja tegangan.
6. Memberikan suplai daya yang memiliki keandalan tinggi dengan prosentase pelayanan yang tinggi dimana beban dapat dilayani secara efektif.

2.2.2 Daya

Dalam ilmu fisika dasar, daya merupakan suatu energi yang digunakan untuk melakukan sebuah usaha. Daya sama dengan jumlah energi yang digunakan per satuan waktu. Dalam sistem Satuan Internasional (SI), daya memiliki simbol umum yaitu “P” dan satuannya adalah Watt, atau Joule per detik (J/s). secara rumus dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$1 \text{ watt} = \frac{1 \text{ joule}}{\text{sekon}}$$

Pada sistem tenaga listrik, daya listrik didefinisikan sebagai banyaknya energi yang digunakan untuk melakukan usaha atau kerja per satuan waktu pada suatu rangkaian listrik tertutup.

$$P = \frac{W}{t}$$

Biasanya daya listrik dinyatakan dalam satuan Watt, dimana 1 Watt memiliki daya yang setara dengan perkalian antara tegangan 1 Volt dengan arus 1 Ampere. Secara rumus dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = V \times I$$

Dalam sistem tenaga listrik, daya diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu daya semu, daya aktif, dan daya reaktif.

2.2.2.1 Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya listrik yang diperlukan oleh mesin- mesin listrik untuk melakukan kerja. Daya aktif dihasilkan oleh beban listrik yang bersifat resistif murni. Satuan yang digunakan oleh daya Aktif yaitu Watt atau kilo-Watt (kW), dimana merupakan hasil perkalian antara tegangan, arus, dan faktor daya yang dimiliki oleh beban. Secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

Untuk listrik satu fasa:

$$P = V \times I \times \cos \varphi$$

Untuk listrik tiga fasa

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I \times \cos \varphi$$

Keterangan:

P = Daya aktif (killo-Watt/kW)

V = Tegangan listrik (Volt/V)

I = Arus Listrik (Ampere/A)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.2.2.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang dibutuhkan untuk pembentukan medan magnet dan dihasilkan dari beban-beban yang bersifat reaktif. Daya reaktif merupakan perkalian antara tegangan, arus, dan faktor reaktif yang bersumber dari beban. Secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

Untuk listrik satu fasa:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi$$

Untuk listrik tiga fasa:

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \varphi$$

Keterangan:

Q = Daya reaktif (killo Volt Ampere Reaktan/ KVAR)

V = Tegangan listrik (Volt/V)

I = Arus Listrik (Ampere/A)

$\sin \varphi$ = Faktor reaktan

2.2.2.3 Daya Semu

Daya semu adalah hasil penjumlahan secara vektor antara daya aktif dan daya reaktif, dimana :

$$S = P + jQ$$

Daya semu berfungsi sebagai pembangkitan energi listrik pada *transformator* atau pada generator. Satuan dari daya semu yaitu Volt Ampere (VA), yang merupakan hasil perkalian antara besarnya tegangan dan arus yang mengalir pada suatu penghantar transmisi atau distribusi listrik. Secara teoritis dinyatakan dengan persamaan:

$$S = V \times I$$

Keterangan:

S = Daya semu (Volt-Ampere/VA)

P = Daya aktif (kilo-Watt/kW)

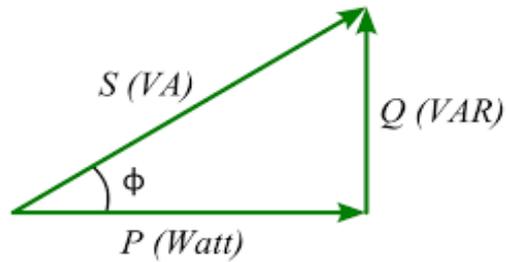
Q = Daya reaktif (kilo Volt Ampere Reaktan/ kVAR)

V = Tegangan Listrik (Volt/V)

I = Arus listrik (Ampere/A)

2.2.2.4 Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu berdasarkan dengan konsep trigonometri.



Gambar 2.1 Segitiga daya

(Sumber: Ibnu, 2010)

Pada gambar 2.1 diatas menjelaskan bahwa daya semu (S) merupakan resultan dari dua komponen, yaitu daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). Hubungan tersebut merupakan segitiga daya dan rumusnya didefinisikan sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos \varphi$$

$$Q = V \times I \times \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Keterangan:

P = Daya aktif (Watt /kW)

Q = Daya reaktif (Volt Ampere Reaktan /VAR)

S = Daya semu (Volt Ampere)

 φ = Beda sudut fasa (Rad/deg)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.2.3 Faktor Daya

Merupakan cosinus sudut yang dihasilkan dari perbandingan nilai daya aktif (P) dengan daya semu (S). Secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya (Pf)} &= \frac{\text{Daya aktif (P)}}{\text{Daya semu (S)}} \\ &= \frac{kW}{kVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{V \times I \times \cos \varphi}{V \times I} \\
 &= \cos \varphi
 \end{aligned}$$

PT. PLN (persero) selaku penyedia daya listrik memberikan batasan terhadap faktor daya, untuk bangunan gedung diberi batas sebesar 0.85. jika faktor daya rata-rata dibawah angka tersebut maka dikenakan denda Penalti oleh PLN. Penyebab faktor daya rendah pada suatu sistem jaringan listrik adalah beban induktif. Pada suatu rangkaian induktif murni, arus akan tertinggal sebesar 90° terhadap tegangan, perbedaan sudut fase ini yang akan menyebabkan faktor daya untuk mendekati nol. Beban-beban listrik yang menyebabkan rendahnya faktor daya antara lain motor induksi, unit-unit *ballast* dari lampu, dan alat-alat las busur listrik.

Efek lain yang ditimbulkan oleh rendahnya faktor daya selain terkena penalti dari penyedia layanan listrik (PLN) jika dibawah batas, yaitu

1. Mengalami kerugian daya pada jalur penghantar, karena pada sebuah penghantar, kerugian yang timbul akibat arus yang mengalir adalah berbanding lurus dengan nilai arusnya (I^2). Jika suatu penghantar dialiri arus semakin besar, maka akan semakin besar pula *losses* pada jaringan tersebut.
2. Ukuran penghantar harus lebih besar karena ketika faktor daya rendah, arus yang mengalir akan meningkat, dengan demikian untuk mengalirkan arus yang besar diperlukan kabel yang memiliki luas penampang yang semakin besar, dan biaya yang dibutuhkan besar.
3. Mengakibatkan efisiensi rendah. Hal ini karena jika faktor daya rendah akan mengakibatkan drop tegangan yang cukup besar dan kerugian disepanjang penghantar.

2.2.4 Ketidakseimbangan Beban

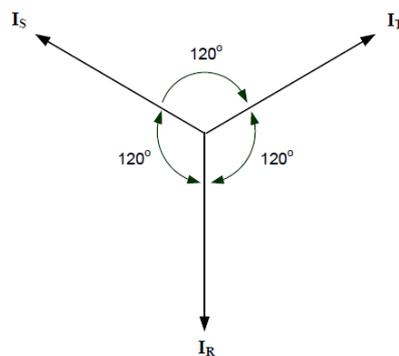
Ketidakseimbangan beban atau *Unbalance* merupakan kondisi dimana besarnya arus yang mengalir pada tiap fasa berbeda besarnya. Suatu sistem

kelistrikan pada sebuah bangunan dikatakan memiliki beban seimbang jika memenuhi dua hal berikut:

1. Ketiga Vektor arus atau tegangan sama besar.
2. Ketiga vektor arus saling membentuk sudut 120^0 satu sama lain.

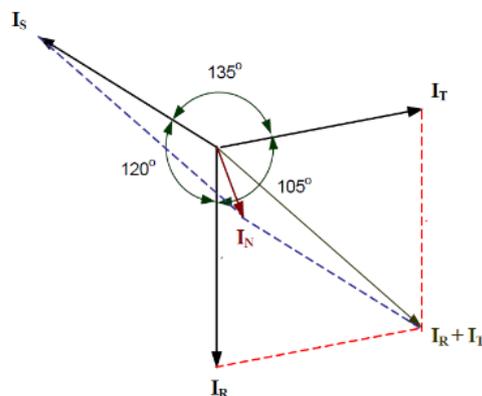
Ada 3 kondisi ketidakseimbangan beban yaitu:

1. Ketika masing-masing vektor seimbang namun tidak membentuk sudut 120^0 satu sama lain.
2. Ketika masing masing vektor tidak seimbang namun membentuk sudut 120^0 satu sama lain.
3. Ketika masing masing vektor tidak seimbang dan tidak membentuk sudut 120^0 satu sama lain.



Gambar 2.2 Vektor arus dalam keadaan seimbang

(Sumber: Setiadji, 2006)



Gambar 2.3 Vektor arus dalam keadaan tidak seimbang

(Sumber: Setiadji, 2006)

Unbalance menyebabkan penjumlahan ketiga vektor arus (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol, sehingga menyebabkan adanya arus netral (I_N). Dapat dilihat pada gambar 2.2 bahwa vektor arus dalam keadaan seimbang sehingga penjumlahan vektornya sama dengan nol dan tidak menimbulkan arus netral, sedangkan pada gambar 2.3 adalah gambar diagram vektor arus yang tidak setimbang sehingga menimbulkan adanya arus netral.

2.2.4.1 Akibat Ketidakseimbangan Beban

Unbalance load menyebabkan adanya arus pada titik netral yang disebabkan oleh penjumlahan ketiga vektor arus (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol. Adanya arus netral menyebabkan rugi-rugi daya (*losses*). Untuk menghitung nilai rugi rugi daya dapat digunakan rumus berikut:

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

Keterangan:

P_N = Rugi-rugi daya pada penghantar netral (W)

I_N = Arus pada Penghantar netral (Ampere)

R_N = Hambatan penghantar (ohm)

2.2.4.2 Menghitung Besarnya Ketidakseimbangan Beban

Dalam menghitung besarnya ketidakseimbangan beban digunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

Dimana:

$$I_R = a \times I_{Rata-rata}$$

$$\text{Maka: } a = \frac{I_R}{I_{Rata-rata}}$$

$$I_S = b \times I_{Rata-rata}$$

$$\text{Maka: } b = \frac{I_S}{I_{Rata-rata}}$$

$$I_T = c \times I_{Rata-rata}$$

$$\text{Maka: } c = \frac{I_T}{I_{Rata-rata}}$$

Sehingga :

$$\text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \%$$

2.2.5 Menghitung Power Losses

Untuk menghitung *Power Losses* akibat harmonik pada tiap fasa R, S, T dan penghantar netral digunakanlah persamaan berikut:

$$\Delta P_R = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times IK_R^2 \text{ (W) - Power Losses fasa R}$$

$$\Delta P_S = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times IK_S^2 \text{ (W) - Power Losses fasa S}$$

$$\Delta P_T = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times IK_T^2 \text{ (W) - Power Losses fasa T}$$

$$\Delta P_N = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times IK_N^2 \text{ (W) - Power Losses Netral}$$

Dimana:

P_R : *Power Losses* fasa R (watt)

P_S : *Power Losses* fasa S (Watt)

P_T : *Power Losses* fasa T (Watt)

P_N : *Power Losses* penghantar Netral (Watt)

R_{ph} : Hambatan kabel penghantar (ohm)

IK_R^2 : Nilai Harmonik orde ke-n pada fasa R

IK_S^2 : Nilai Harmonik orde ke-n pada fasa S

IK_T^2 : Nilai Harmonik orde ke-n pada fasa T

IK_N^2 : Nilai Harmonik orde ke-n pada penghantar netral

2.2.6 Waktu Pemakaian Daya Listrik

Waktu Pemakaian daya listrik dibagi menjadi dua yaitu:

1. Waktu Beban Puncak (WBP)

Waktu beban puncak merupakan waktu tertentu pada rentang mulai jam 18.00 – 22.00 yang dimana konsumsi daya oleh konsumen mencapai puncak dari kapasitas pembebanan.

2. Luar Waktu Beban Puncak (LWBP)

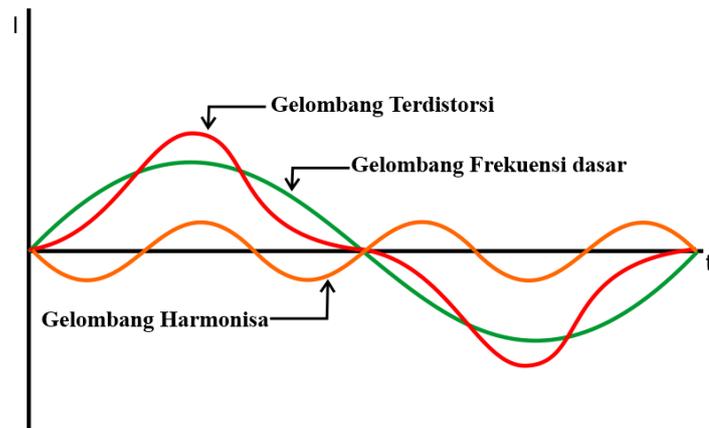
Luar waktu beban puncak merupakan waktu tertentu pada rentang mulai jam 22.00 – 18.00 yang dimana konsumsi daya oleh konsumen dibawah puncak kapasitas pembebanan.

Apabila faktor daya rata-rata setiap bulannya dibawah 0.85 maka akan dikenakan denda kelebihan pemakaian daya reaktif, dan harga per kVAr sudah ditentukan oleh PLN.

2.2.7 Harmonik

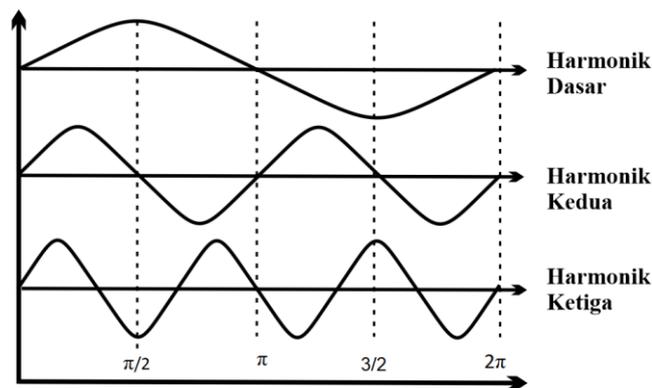
Harmonik merupakan sebuah permasalahan yang saat ini harus segera diatasi. Hal ini dikarenakan harmonik dapat menimbulkan banyak efek negatif pada sistem kelistrikan, baik itu sisi ekonomi maupun peralatan itu sendiri. Pada saat ini hampir semua peralatan listrik bersifat non-linear, seperti lampu hemat energi, *ballast* lampu, motor listrik, inverter, dan lainnya. Beban-beban non-linear tersebut penyebab terjadinya distorsi terhadap gelombang pada saluran daya listrik, padahal gelombang tegangan dan gelombang arus yang disalurkan serta dihasilkan dalam sistem listrik yang ideal adalah gelombang sinusoidal murni.

Definisi dari harmonik itu sendiri merupakan gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik akibat adanya distorsi gelombang tegangan dan gelombang arus. Gelombang akan terdistorsi karena adanya proses superposisi antara gelombang frekuensi dengan frekuensi dasar. Sehingga gelombang sinus pada sistem distribusi tidak lagi murni atau mengalami cacat riak-riak gelombang. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini akan membentuk gelombang-gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan bulat bilangan harmonik dengan frekuensi dasarnya (f , $2f$, $3f$, dst). Gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dengan frekuensi dasar merupakan orde ke- h harmonik. Di Indonesia frekuensi dasar pada sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka untuk nilai frekuensi pada harmonik kedua (orde ke-2) yaitu 100 Hz, frekuensi harmonik ketiga (orde ke-3) 150 Hz dan seterusnya.



Gambar 2.4 Gelombang harmonik

(Sumber: <https://indone5ia.files.wordpress.com/2012/02/harmonik.jpg>, diakses tanggal 8 November 2018)



Gambar 2.5 Gelombang terdistorsi dan hasilnya

(Sumber: Djodi, 2013)

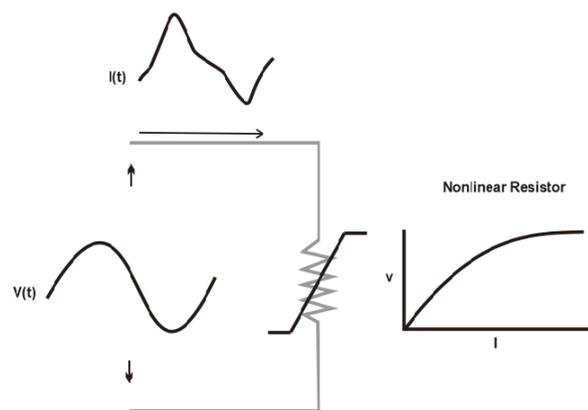
2.2.7.1 Penyebab Harmonik

Eward F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum dalam bukunya yang berjudul *Power Quality in Power Systems and Electrical machines* menerangkan bahwa sumber penyebab utama dari harmonik dalam sistem tenaga listrik terbagi dua yaitu:

- a. Beban-beban industri yang bersifat non-linear seperti peralatan elektronika daya, contohnya *rectifier* dan inverter kemudian beban yang menghasilkan busur listrik contohnya mesin las.

- b. Beban-beban perumahan atau komersil dengan pengatur daya, seperti televisi, komputer, lampu *fluorescent*, dan lampu hemat energi.

Kemudian Roger C. Dugan dalam bukunya yang berjudul *Electrical Power System Quality* edisi kedua, menyebutkan bahwa distorsi harmonik disebabkan oleh peralatan non-linear dalam sistem tenaga listrik. peralatan non-linear adalah peralatan yang arusnya tidak sebanding dengan tegangan yang diberikan. Gambar 2.6 dibawah ini mengilustrasikan konsep sebuah tegangan sinusoidal yang diterapkan pada sebuah resistor non-linear yang simpel, dimana arus dan tegangan bervariasi seperti yang ditampilkan pada kurva. ketika tegangan yang diberikan sangat baik, hasilnya arus akan terdistorsi. Menaikan nilai tegangan beberapa persen dapat menyebabkan arus meningkat hingga berlipat ganda, dan menjadi bentuk gelombang yang berbeda. hal tersebut merupakan penyebab terbanyak terjadinya distorsi harmonik



Gambar 2.6 Distorsi gelombang arus disebabkan oleh beban non-linear

(Sumber: Akhmad, 2012)

2.2.7.2 Total Harmonic Distortion

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan sebuah ukuran harmonik yang paling umum digunakan untuk menunjukkan tinggi rendahnya kandungan dari jumlah harmonik pada suatu gelombang yang terdistorsi. THD merupakan sebuah perbandingan dari hasil penjumlahan komponen harmonik dengan

komponen fundamental (dasar). THD dinyatakan dalam ukuran prosentase (%). Semakin besar nilai prosentase THD arus atau tegangan, maka akan semakin besar pula tingkat resiko kerusakan yang akan dialami oleh sistem kelistrikan. Untuk gelombang arus, nilai THD nya didefinisikan seperti berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$

Sedangkan untuk gelombang tegangan, nilai THD nya didefinisikan sebagai berikut:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

Keterangan:

THD_V = Total Harmonic Distortion tegangan

THD_I = Total Harmonic Distortion arus

V_h = Nilai tegangan harmonik (V)

V_1 = Nilai tegangan fundamental (V)

I_h = Nilai arus harmonik (A)

I_1 = Nilai arus fundamental (A)

h = arus dan tegangan harmonik ke-h

2.2.7.3 Individual Harmonic Distortion

Merupakan ukuran yang digunakan untuk melihat seberapa besar nilai harmonik yang terkandung pada tiap orde. *Individual harmonic distortion* adalah hasil perbandingan antara RMS harmonik individu dengan RMS fundamental, secara rumus perhitungan didefinisikan sebagai berikut:

$$IHD = \frac{I_{rms}^h}{I_{rms}^{(1)}}$$

Keterangan :

IHD = Individual harmonic distortion orde harmonik ke-h ($h=2,3,4,..$)

I_{rms}^h = Nilai RMS arus atau tegangan orde harmonik ke-h

$I_{rms}^{(1)}$ = Nilai RMS arus atau tegangan fundamental (dasar)

2.2.7.4 Batas Standar Harmonik

Beberapa dokumen mengenai standar batasan harmonik pada sistem tenaga listrik telah dipublikasikan, diantaranya adalah standar IEEE 519-1992, IEC 61000-3-4, IEC61000-3-6, dan lain lain. Standar IEC biasanya digunakan untuk daerah Eropa dan standar ANSI dan IEEE banyak digunakan di Amerika. Mengenai standar yang digunakan pada penelitian ini adalah standar IEEE no 519 tahun 1992.

Nugroho S.S (2018) menyebutkan bahwa *Institute of Electrical and Electronic Engineering* (IEEE) adalah suatu lembaga internasional yang memiliki wewenang untuk melakukan riset dan penelitian dan analisa untuk memberikan sebuah batas standar untuk dijadikan acuan referensi dalam bidang kelistrikan dan elektronika di beberapa negara.

Ewarld F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) menerangkan bahwa IEEE 519-1992 adalah praktik dan persyaratan yang direkomendasikan untuk mengendalikan harmonik dalam sistem tenaga listrik dan IEEE-519 lebih komprehensif dibandingkan dengan standar IEC.

Standar harmonik tegangan memiliki acuan berdasarkan nilai tegangan yang digunakan pada sebuah sistem, sedangkan untuk acuan harmonik arus adalah nilai perbandingan dari arus hubung singkat dengan arus yang bekerja pada beban.

Tabel 2.1 Batas *Total Harmonic Distortion* tegangan

Nominal Voltage	Individual Harmonic Order	THD
$V \leq 69 \text{ KV}$	3,0 %	5,0 %
$69 \text{ KV} < V < 161 \text{ KV}$	1,5 %	2,5 %
$V \geq 161 \text{ KV}$	1,0 %	1,5 %

Tabel 2.2 Batas *Total Harmonic Distortion* arus

SCA/ I_L	Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit					THD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$V_{Supply} \leq 69 \text{ KV}$						
< 20	4,0 %	2,0 %	1,5 %	0,6 %	0,3 %	5,0 %
20 – 50	7,0 %	3,5 %	2,5 %	1,0 %	0,5 %	8,0 %
50 - 100	10,0 %	4,5 %	4,0 %	1,5 %	0,7 %	12,0 %
100 - 1000	12,0 %	5,5 %	5,0 %	2,0 %	1,0 %	15,0 %
>1000	15,0 %	7,0 %	6,0 %	2,5 %	1,4 %	20,0 %
SCA/ I_L	Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit					THD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$69 \text{ KV} \leq V_{Supply} < 161 \text{ KV}$						
< 20	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
20 – 50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %
50 - 100	5,0 %	2,25 %	2,0 %	1,25 %	0,35 %	6,0 %
100 - 1000	6,0 %	2,75 %	2,5 %	2,0 %	0,5 %	7,5 %
>1000	7,5 %	3,5 %	3,0 %	2,5 %	0,7 %	10,5 %
SCA/ I_L	Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit					THD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$V_{Supply} \geq 161 \text{ KV}$						
< 50	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
≥ 50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %

2.2.7.5 Efek Harmonik

Banyak sekali efek dari harmonik pada sistem tenaga listrik, baik itu sisi penyuplai maupun pada sisi pengguna listrik. selain mengakibatkan adanya kerusakan atau gangguan pada sistem distribusi listrik, efek harmonik juga dapat menimbulkan pengaruh ekonomis yang sangat signifikan. dampak yang paling besar dari efek harmonik yaitu terjadinya peningkatan panas pada peralatan sistem tenaga listrik terutama pada *transformator*. Kenaikan panas ini disebabkan karena selain oleh arus pada frekuensi dasar, harmonik juga menghasilkan arus eddy (*Eddy current losses*). Peningkatan arus eddy ini juga dapat mengurangi umur *transformator*. Berikut ini adalah beberapa efek yang ditimbulkan oleh harmonik:

1. Merusak kapasitor bank karena terjadinya resonansi harmonik.
2. Meningkatnya panas *eddy current* , menimbulkan fluk harmonik dan fluk *density* pada *transformator* meningkat.
3. Adanya arus pada kawat netral sehingga menyebabkan kabel menjadi panas.
4. Pemutus beban dapat bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal, sehingga menimbulkan kegagalan proteksi.
5. Timbulnya getaran mekanik pada panel listrik yang merupakan getaran akibat resonansi mekanis akibat harmonik arus frekuensi tinggi.
6. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWH meter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar, sehingga bisa mengakibatkan kesalahan penunjukan kWH meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.

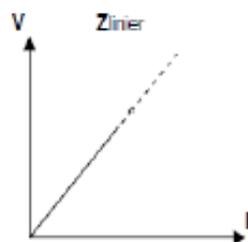
2.2.8 Jenis Beban-Beban Listrik

Jenis beban yang terpasang pada sistem kelistrikan dibedakan menjadi dua, yaitu beban linear dan beban non-linear.

2.2.8.1 Beban *Linear*

Beban linear merupakan jenis beban yang komponen arusnya proporsional terhadap tegangan dan memberikan bentuk keluaran yang linear sehingga arus

yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Apabila tegangan sumber bentuknya sinusoidal, maka arus yang melewati beban juga harus sama sinusoidal. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linear akan sama bentuknya dengan bentuk gelombang tegangan. Contoh yang termasuk kedalam jenis beban linear adalah resistor, lampu pijar, pemanas, dan lain-lain. Berikut ini adalah gambar 2.7 yang menunjukkan hubungan antara gelombang tegangan dan arus yang dimiliki beban linear:

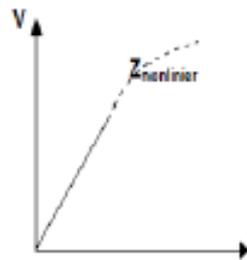


Gambar 2.7 Resultan beban linear

(Sumber: Yudi, 2016)

2.2.8.2 Beban Non-Linear

Beban non-linear merupakan kebalikan dari beban linear, yaitu beban listrik yang komponen arusnya tidak proporsional terhadap komponen tegangannya, sehingga bentuk gelombang arusnya tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan atau mengalami distorsi. Apabila tegangan sumber berbentuk gelombang sinusoidal, maka arus yang melewati beban tidak lagi sinusoidal, hal ini karena beban non-linear akan menyerap arus nonsinusoidal dan arus harmonik. Walaupun disuplai oleh tegangan sinusoidal. Contoh jenis beban non-linear adalah peralatan elektronik yang menggunakan bahan semi konduktor seperti dioda, transistor, *silicon controller rectifier* (SCR), dan lain-lain. Berikut adalah gambar 2.8 yang menunjukkan hubungan antara gelombang tegangan dan arus yang dimiliki beban non-linear:



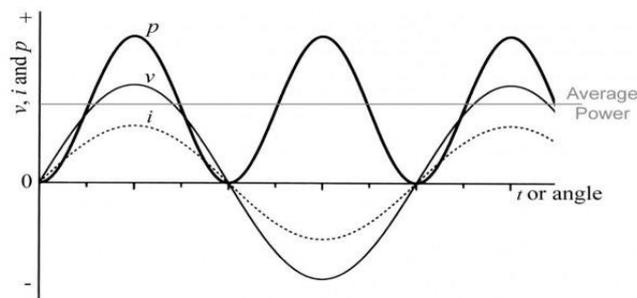
Gambar 2.8 Resultan beban non-linear
(Sumber: Yudi, 2016)

2.2.9 Sifat Beban-Beban Listrik

Dalam sistem listrik arus bolak balik, terdapat 3 sifat beban listrik, yaitu:

2.2.9.1 Beban Resistif

Beban resistif (R) yaitu beban yang terdiri dari komponen tahanan ohm saja (*resistance*). Beban jenis ini hanya mengkonsumsi daya aktif dan memiliki faktor daya sama dengan satu. Contoh dari beban resistif adalah pemanas dan lampu pijar. Berikut adalah gambar 2.9 yang mengilustrasikan gelombang beban resistif:



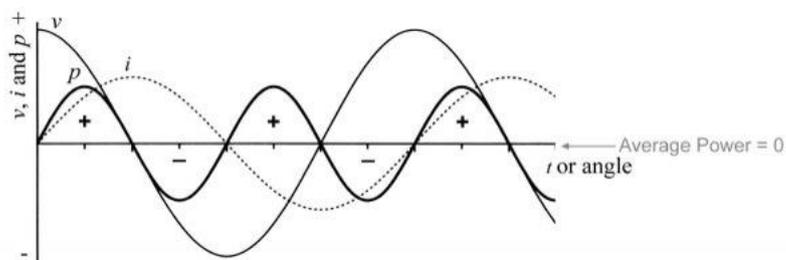
Gambar 2.9 Gelombang listrik AC dengan beban resistif

(Sumber: http://artikel-teknologi.com/wp-content/uploads/2015/05/IMG_2113.jpg , Diakses pada 14 November 2018)

2.2.9.2 Beban Induktif

Beban induktif (L) adalah beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti besi, seperti *solenoida*, *transformator*, *coil*, dan lain lain. beban induktif memiliki energi yang tersimpan berupa medan magnetis yang akan mengakibatkan pergeseran fasa (*Phase shift*). Fasa arus akan tertinggal sejauh 90°

terhadap tegangan atau dikenal dengan istilah *Lagging*. Jenis beban ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Contoh dari beban induktif adalah motor listrik.

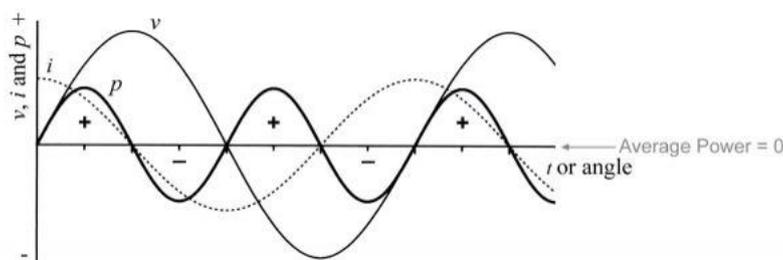


Gambar 2.10 Gelombang listrik AC dengan beban induktif

(Sumber: http://artikel-teknologi.com/wp-content/uploads/2015/05/IMG_2115.jpg, diakses pada 14 November 2018)

2.2.9.3 Beban Kapasitif

Beban kapasitif (C) adalah beban pada suatu rangkaian listrik yang memiliki kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*Electrical discharge*). Beban ini memiliki pergeseran fasa arus yang mendahului tegangan sejauh 90^0 sehingga disebut *leading*. Jenis beban ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif.



Gambar 2.11 Gelombang listrik AC dengan beban kapasitif

(Sumber: http://artikel-teknologi.com/wp-content/uploads/2015/05/IMG_2114.jpg, diakses pada 14 November 2018)

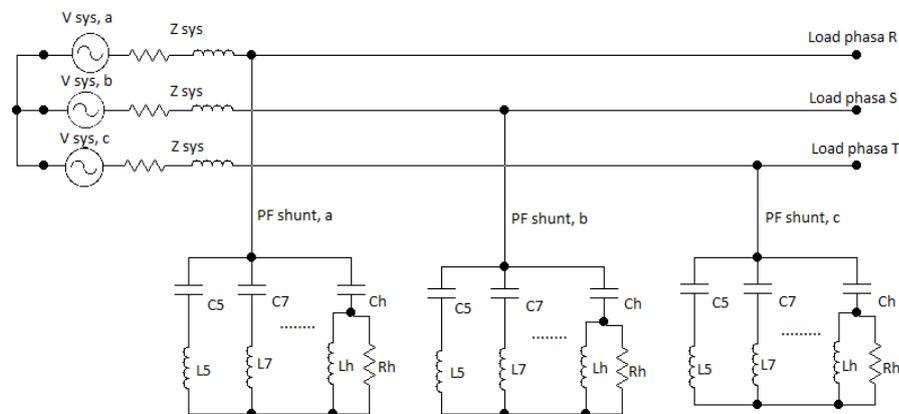
2.2.10 Filter

Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan harmonik dari beban non-linear adalah dengan memasang Filter pada sistem distribusi listrik. Filter yang digunakan dalam mengatasi permasalahan harmonik merupakan filter yang dapat menyaring atau memperbaiki frekuensi dari arus dan tegangan, sehingga didapatkan frekuensi yang diinginkan. Filter mampu mengkompensasi harmonik

yang berasal dari beban non-linear seperti mengkompensasi arus fundamental, Selain itu juga mampu memperbaiki kualitas dari suplai listrik arus bolak balik seperti *sags*, *swells*, dan *spikes*. Filter biasanya dipasang dekat dengan titik yang terkena distorsi. Eward F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) mengklasifikasikan jenis-jenis filter yang digunakan pada sistem untuk mereduksi harmonik menjadi filter pasif dan filter aktif.

2.2.10.1 Filter Pasif

Filter pasif adalah filter yang hanya terbuat dari element pasif saja, yaitu induktor (L), Kapasitor (C), dan Resistor (R). Filter pasif digunakan untuk mereduksi amplitudo dari arus dan tegangan serta digunakan untuk memberikan nilai kompensasi terhadap daya reaktif yang hilang akibat adanya harmonik. Dalam perancangan filter ini, haru diketahui dahulu nilai dari daya reaktif. daya reaktif yang dibutuhkan oleh sistem, digunakan untuk menentukan nilai dari kapasitor (C) dan Induktor (L). Pemasangan filter pasif harus berada pada titik yang paling dekat dengan beban non-linear yang menghasilkan harmonik karena filter ini memiliki sifat resonansi paralel yang berimpedansi tinggi sehingga ketika frekuensi yang mengandung harmonik dari beban non-linear akan menuju sumber daya akan dihalangi oleh filter ini. Dalam pemasangannya, filter pasif biasanya ketika akan menyaring harmonik di orde ke-h maka akan ditambahkan pula pada orde terendah sebelum orde ke-h tersebut. Filter ini dalam pemasangan dan pengontrolannya lebih susah dibanding filter aktif, oleh karena itu harga filter pasif lebih murah.

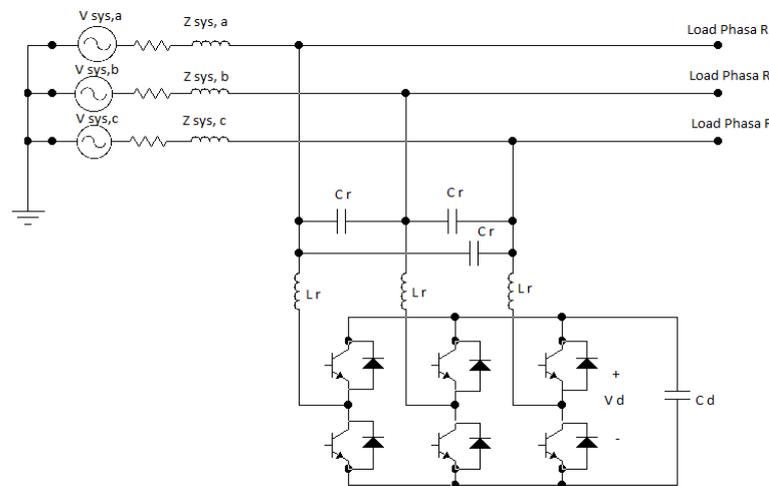


Gambar 2.12 Pemasangan filter pasif pada orde ke-5 dan ke-7 sistem tiga fasa
(Sumber: Ewald, 2008. Dengan modifikasi)

2.2.10.2 Filter Aktif

Filter aktif adalah sebuah filter yang tersusun dari komponen elektronika daya yang rangkaian utamanya adalah inverter dan rangkaian pengontrol, selain itu juga ada kapasitor dan induktor untuk memperbaiki output yang stabil dari filter aktif. Konfigurasi penyusunan filter ini bisa secara seri ataupun paralel. Pada penggunaannya filter aktif digunakan untuk mengkompensasi sebuah rangkaian yang terdistorsi harmonik dari beban non-linear yang berubah ubah. Sebuah filter aktif dapat diimplementasikan ketika harmonik yang terjadi pada sebuah orde berubah. Perubahan harmonik di tiap orde dikarenakan perubahan jumlah beban non-linear yang mengeluarkan arus harmonik berubah tiap beberapa saat. Sehingga filter ini cocok untuk menanggulangi harmonik pada suatu sistem kelistrikan sebuah gedung dengan beban yang tidak stabil.

Cara kerja dari filter aktif yaitu dengan menghasilkan harmonisa dari inverter. Harmonisa ini diatur sedemikian rupa oleh rangkaian kontrol elektronika yang berupa PID, limiter, dan komparator sehingga menghasilkan harmonisa yang nilainya sama dengan yang dihasilkan beban tetapi memiliki sudut fasa yang berbeda 180 derajat.



Gambar 2.13 Filter Aktif Shunt pada sistem tiga fasa

(Sumber: Ewald, 2008. Dengan modifikasi)

2.2.11 Perhitungan Nilai Kapasitor dan Induktor

Dalam melakukan kompensasi daya reaktif yang bertujuan untuk memperbaiki nilai faktor daya dan perbaikan harmonik digunakanlah komponen elektronik yang bersifat kapasitif dan induktif. Komponen yang memiliki sifat kapasitif adalah kapasitor sedangkan yang memiliki sifat induktif adalah induktor.

Kapasitor merupakan sebuah komponen elektronika yang dapat menyimpan muatan listrik. Struktur dari sebuah kapasitor terbuat dari 2 buah lempengan plat metal yang dipisahkan oleh suatu beban dielektrik. Bahan dielektrik merupakan bahan isolator yang diletak diantara keping kapasitor, bahan dielektrik yang umumnya digunakan adalah vakum udara, keramik, kaca, kertas dan lain lain. Suatu kapasitor mampu menyimpan muatan elektron dalam level tegangan tertentu, kemampuan tersebut adalah kapasitansi kapasitor. Jika sebuah kapasitor memiliki muatan elektron sebesar 1 coloumb atau sebanding dengan $6,25 \times 10^{18}$ elektron maka kapasitor tersebut memiliki nilai kapasitansi sebesar 1 Farad pada level tegangan 1 volt.

Induktor merupakan suatu komponen elektronik yang terbuat dari susunan atau lilitan kawat tembaga yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut ketika dilewati arus listrik akan menimbulkan medan magnet. Induktor dapat

menyimpan energi listrik dalam sebuah kumparan magnet atau yang disebut dengan induktansi. Induktansi memiliki satuan yaitu Henry (H), sedangkan induktor sendiri dilambangkan (L)

Berikut adalah rumus-rumus yang digunakan untuk menentukan nilai kapasitor, induktor dan resistor:

Untuk menghitung nilai resistor digunakan rumus berikut:

$$R = \frac{V}{I}$$

Untuk menghitung nilai rating daya resistor digunakan rumus berikut:

$$P = V \times I$$

Keterangan :

- R = Kapasitas resistor (ohm/ Ω)
- V = Tegangan sistem (Volt)
- I = Arus harmonisa orde ke-n (A)
- P = Kapasistas daya pada resisitor (Watt)

Sedangan untuk mencari nilai Q faktor digunakan rumus sebagai berikut:

$$X_n = X_L = X_C$$

$$Q = \frac{X_n}{R}$$

Maka : $X_n = Q \times R$

Keterangan:

- Q = Faktor kualitas filter (30-100)
- X_C = Reaktansi Kapasitif (ohm/ Ω)
- X_L = Reaktansi Induktif (ohm/ Ω)

Untuk mencari nilai Induktor digunakan rumus berikut:

$$X_l = \omega l$$

$$L = \frac{X_l}{\omega}$$

Untuk mencari nilai kapasitor adalah:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c}$$

Keterangan:

π = Phi 3,14

C = Kapasitansi kapasitor (F)

L = Kapasitansi Induktor (H)

2.2.12 Estimasi Biaya

Estimasi biaya merupakan perhitungan kebutuhan biaya yang akan dikeluarkan untuk menyelesaikan suatu kegiatan atau pekerjaan sesuai dengan persyaratan atau kontrak. pada pengestimasian biaya suatu alat, sebelum melakukan pengestimasian harus terlebih dahulu mengidentifikasi barang yang akan diestimasikan. Dalam pengestimasian alat yang akan diinvestasikan pada penyusunan tugas akhir ini digunakan metode pengestimasian biaya dengan cara melakukan penjumlahan dari beberapa harga komponen yang sesuai dengan persyaratan teknis yang dibutuhkan, kemudian dilakukan penjumlahan biaya total sehingga dapat ditentukan perkiraan harga suatu alat. Setelah mendapatkan harga estimasi, maka dilakukanlah pemesanan atau order alat ke pihak produsen yang menyediakan dan dinilai berkompeten dalam melakukan produksi alat tersebut.

2.2.13 Analisis Tekno Ekonomi

Tekno ekonomi memuat tentang bagaimana membuat sebuah keputusan (*decision making*) dimana dibatasi oleh ragam permasalahan yang berhubungan dengan seorang *engineer* sehingga menghasilkan pilihan yang terbaik dari

berbagai alternatif pilihan. Keputusan diambil berdasarkan suatu proses analisa, teknik dan perhitungan ekonomi (David, 2013)

Analisis tekno ekonomi merupakan suatu analisis yang melibatkan keputusan terhadap berbagai sumber daya yang terbatas yang mengakibatkan dampak yang sangat luas dan jauh dimasa yang akan datang. Dampak tersebut tidak bisa diketahui secara pasti sehingga penting untuk mengetahui tentang prediksi kondisi yang akan datang, perkembangan teknologi, dan keberlangsungan dari proyek-proyek yang didanai. Pada dasarnya investasi pada sektor teknik memerlukan pendanaan yang relatif besar sehingga memerlukan perencanaan dan pengambilan keputusan yang mempertimbangkan aspek teknik dan ekonomis yang baik dan rasional.

2.2.14 Cost Benefit Analysis

Analisis biaya manfaat atau *cost benefit analysis* merupakan suatu analisis dengan cara yang sistematis untuk membandingkan sejumlah biaya dan manfaat yang relevan dengan sebuah aktivitas atau sebuah proyek. Tujuan dari analisis ini adalah untuk membandingkan dan mencari manakah yang lebih besar antara sebuah investasi dan manfaat yang diperoleh. Selain itu juga analisis ini berguna untuk menentukan apakah sebuah proyek layak untuk dilakukan atau tidak. Untuk mengetahui seberapa efisien suatu proyek, maka harus dilakukan langkah-langkah berikut ini:

1. Menentukan semua manfaat dan biaya dari proyek yang akan dilaksanakan.
2. Menghitung manfaat dan biaya dalam nilai uang.
3. Menghitung masing-masing manfaat dan biaya dalam nilai uang sekarang.

Adapun metode yang dilakukan untuk menghitung dan menganalisis manfaat dan biaya pada penelitian ini:

2.2.14.1 Simple Payback Period

Merupakan sebuah metode yang digunakan untuk mengukur seberapa cepat sebuah investasi bisa kembali modalnya tanpa memperhatikan nilai uang terhadap

waktu dan aliran dana yang terjadi. Satuan yang digunakan pada metode *simple payback period* bukanlah prosentase, melainkan satuan waktu (bulan, tahun dan sebagainya) karena metode ini mengukur seberapa cepat sebuah investasi bisa kembali, maka dasar yang digunakan adalah *cash flow* atau aliran kas. Berikut adalah model perhitungan metode *simple payback period*:

$$PBP = \frac{I}{\pi}$$

Keterangan :

PBP = *Payback Period*

I = Jumlah Investasi (Penanaman modal)

π = Laba

2.2.14.2 Net Present Value

Metode *Net Present Value* (NPV) atau nilai bersih sekarang adalah sebuah metode perhitungan untuk menghitung selisih dari nilai sekarang arus kas yang masuk dengan nilai sekarang arus kas yang keluar pada periode tertentu. *Net Present Value* adalah nilai *benefit* atau keuntungan yang didapatkan selama suatu proyek berlangsung yang ditinjau pada saat kondisi ini (Yulhafidz, 2011). *Net Present Value* mengestimasi nilai dari suatu uang terhadap waktu. NPV menggunakan harga pembelian awal (investasi) dan nilai waktu dari uang untuk menghitung nilai suatu aset. *Net Present Value* dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$NPV_t = \sum_t (Q_t - C_t) X (1 + i)^{-t}$$

Keterangan:

NPV_t = *Net Present Value* (dalam jenis mata uang)

Q_t = Penerimaan

C_t = Pengeluaran

i = *Discount rate* atau suku bunga pertahun (%)

t = Waktu

Ada tiga kriteria penilaian terhadap metode *Net Present Value* untuk menerima atau menolak suatu proyek yaitu sebagai berikut:

1. Jika $NPV > 0$, maka proyek yang dijalankan layak untuk dilaksanakan.
2. Jika $NPV < 0$, maka proyek yang dijalankan tidak layak untuk dilaksanakan.
3. Jika $NPV = 0$, maka proyek yang dijalankan tidak untung dan tidak rugi.

2.2.14.3 Internal rate of return

Metode *Internal rate of return* (IRR) adalah metode yang digunakan untuk menghitung nilai dari suku bunga maksimal yang dapat dibayar oleh investor atau pemodal dalam suatu proyek. Nilai IRR merupakan nilai saat $NPV=0$. Suatu proyek harus mempertimbangkan tingkat pengembalian dari IRR dan *discount rate* karena investor akan melaksanakan suatu proyek jika $IRR > discount rate$ dan tidak akan melakukan investasi jika nilai $IRR < discount rate$. Perhitungan IRR dapat dilakukan dengan cara iterasi pada komputer. Untuk menghitung *Internal rate of return* dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$IRR = i_1 + \left(\frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \right) (i_2 - i_1)$$

Ada beberapa kriteria penilaian yang digunakan terhadap nilai *Internal rate of return* untuk menentukan apakah suatu proyek layak dilaksanakan atau tidak, yaitu:

1. Jika $IRR > discount rate$ maka proyek layak untuk dilaksanakan.
2. Jika $IRR < discount rate$ maka proyek tidak layak dilaksanakan.
3. Jika $IRR = discount rate$ maka proyek tidak untung dan tidak rugi.

2.2.15 *Power Quality and Energy Analyze*

Metrel MI 2892 merupakan sebuah alat ukur yang digunakan untuk melakukan pengukuran dan analisis kualitas daya listrik yang didesain dengan tampilan warna grafis yang besar dan mudah dibaca yang memungkinkan pengguna bisa mendeteksi harmonik, fasor, anomali gelombang, dan lain lain dalam suatu instalasi dengan cara menghubungkan alat ini. Alat instrumen ini dirancang untuk melakukan pengukuran dengan durasi rekaman jangka panjang untuk mengukur kualitas daya pada sistem distribusi listrik tiga fasa atau fasa tunggal.



Gambar 2.14 Metrel MI 2892

(Sumber: <https://www.metrel.si/en/shop/PQA/mi-2892.html>, diakses pada 1 Desember 2018)