

BAB II
LANDASAN TEORI

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian ini merujuk pada beberapa penelitian dan jurnal terdahulu yang berkaitan dengan Rancang Bangun Sistem Monitoring Listrik Fasa pada gedung laboratorium Teknik Elektro Universitas Siliwangi, Berikut beberapa penelitian dan jurnal terdahulu yang menjadi rujukan dalam pelaksanaan penelitian ini.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

NO	JUDUL PENELITIAN	IDENTITAS PENULIS	HASIL BAHASAN	TAHUN
1.	Rancang Bangun Alat Monitoring Ketidakseimbangan Beban pada Sistem Instalasi 3-Fasa Berbasis Mikrokontroler	Endah Putri Rahayu, Budi Setiadi, Sunarto. Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung	Peralatan monitoring ketidakseimbangan beban yang dibuat dapat mendeteksi dan menginformasikan besarnya arus beban dan tegangan yang terpasang pada masing-masing fasa, juga dapat menginformasikan keadaan ketidakseimbangan beban pada instalasi 3 fasa. Serta secara otomatis sistem akan mengaktifkan buzzer sebagai indikasi terjadinya ketidakseimbangan beban.	2022
2.	Rancang Bangun Sistem Monitoring Listrik Tiga Fasa Berbasis Wireless Sensor Network	Aditya Pratama, A. A. Ngurah Amrita, Duman Care Khrisne	Hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa alat	2021

	Menggunakan LoRa Ra-02 SX1278		<p>monitoring listrik tiga fasa berbasis wireless sensor network menggunakan LoRa Ra-02 SX1278 berhasil dibangun. Seluruh perangkat keras dan perangkat lunak pada sistem dibangun bekerja sesuai dengan rancangan yang ditentukan. Kinerja dari alat monitoring listrik ini mampu melakukan membaca nilai tegangan, arus listrik, frekuensi, faktor daya dan daya aktif menggunakan modul PZEM-004T yang memiliki persentase penyimpangan pengukuran sebesar 1,07%.</p> <p>Kinerja dari perangkat LoRa Ra-02 SX1278 yang digunakan menunjukkan bahwa pada kondisi LOS diperoleh jarak maksimal jangkauan LoRa yaitu 195 meter dan pada kondisi NLOS diperoleh 90 meter.</p>	
3.	Implementasi Sistem Monitoring	Andrian Dwi Dharmawan,	Monitoring Panel Tegangan Listrik	2022

	pada Panel Listrik Author:	Lilik Subiyanto, Anggara Trisna Nugraha	dengan Media Penyimpanan dapat memberikan kemudahan petugas pemantau panel tegangan listrik. Apabila terjadi gangguan pada panel tegangan listrik, petugas maintenance akan dengan sigap menangani masalah tersebut. Selain itu sistem ini juga memberikan data pengukuran secara digital sehingga petugas pemantau dengan mudah mencatat hasil pengukuran berkala dengan akurat, dibandingkan dengan menggunakan alat pengukur yang masih menggunakan analog	
4.	ANALISIS KESEIMBANGAN BEBAN DI GEDUNG ICT UNIVERSITAS DIPONEGORO Rita	Rita Devi Rahmawati, Bambang Winardi dan Ajub Ajulian Zahra Departemen	u 131%. Nilai ini telah melebihi batas ketidakseimbangan beban berdasarkan IEEE 446-1995 dengan batas ketidakseimbangan beban 5% sampai 20% tiap fasanya. Kemudian dilakukan pemerataan beban 1 fasa, hasil simulasi ETAP 12.6 seperti pada Bus SDP Lt 01 maka diperoleh pengurangan arus	2021

			netral yang awalnya arus netral sebesar 6,8A menjadi 0,7 A.	
5.	Prototipe Sistem Monitoring Gangguan Motor Tiga Fasa Berbasis Internet of Things	Emanuel Purwadi Wicaksono, Subuh Isnur Haryudo	<p>Dari hasil pengumpulan data dari sistem monitoring motor tiga fasa, didapatkan hasil pengukuran tegangan tanpa beban fasa tunggal pada fasa R 220V, fasa S 223V, dan fasa R 223V. Nilai ini masih pada standar yang berlaku menurut PUIL. Hasil pengukuran tegangan fasa tunggal motor didapatkan rata-rata pada fasa R sebesar 224,4V, fasa S sebesar 217,4, dan fasa T sebesar 217V. Nilai ini juga masih pada standar menurut PUIL. Hasil pengukuran Arus motor didapatkan rata-rata pada fasa R sebesar 2,6A, fasa S sebesar 2A, dan fasa S 4,2A. Terdapat ketidakseimbangan antar fasa pada pengukuran arus ini. Hasil pengukuran daya aktif didapatkan rata-rata pada fasa R sebesar 144,6W, fasa T sebesar 780,4W.</p> <p>Terjadi ketidakseimbangan pembagian beban pada tiap fasa. Hasil pengukuran suhu motor didapatkan suhu pada menit 5 hingga menit 25 yaitu 38-50 celcius.</p>	2023

			<p>Peningkatan suhu tiap menit mengalami kenaikan yang signifikan yang diakibatkan oleh gulungan dan ketidaksimbangan arus. Hasil pengukuran RPM motor didapatkan range dari 1027 hingga 2375. Putaran yang tidak stabil diakibatkan oleh teknik pengumpulan data menggunakan encoder yang kurang akurat dan kesalahan</p>	
--	--	--	--	--

2.2. Besaran Listrik

Besaran merupakan segala sesuatu yang dapat dihitung, dan dinyatakan dengan angka atau nilai serta semua besaran sudah pasti mempunyai satuan. Pada dunia kelistrikan, dikenal beberapa besaran listrik yang penting untuk diketahui, diantaranya adalah tegangan listrik, arus, faktor daya dan daya listrik (Arifin, Lubis, and Gapy 2019)

2.2.1. 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. Secara matematis, kerja yang dilakukan untuk menggerakkan suatu muatan sebesar satu coulomb dapat didefinisikan sebagai perubahan energi yang dikeluarkan terhadap perubahan muatan listrik dengan satuan Volt (Darwanto, 2021). Misalkan sebuah baterai memiliki tegangan sebesar 12,6 v, itu berarti setiap muatan 1 coulomb menyediakan energi 12,6 joule. Jika sebuah lampu dihubungkan ke baterai tersebut maka setiap muatan 1 coulomb yang

mengalir melalui lampu akan mengkonversi energi sebesar 12,6 joule menjadi energi panas dan energi cahaya. Dengan demikian rumus tegangan adalah sebagai berikut :

$$V = \frac{E}{Q} \text{ volt} \quad (2.1)$$

Dimana :

V = Tegangan dalam satuan volt (V)
 E = Energi dalam satuan joule (J)
 Q = Muatan dalam satuan coulomb (C)

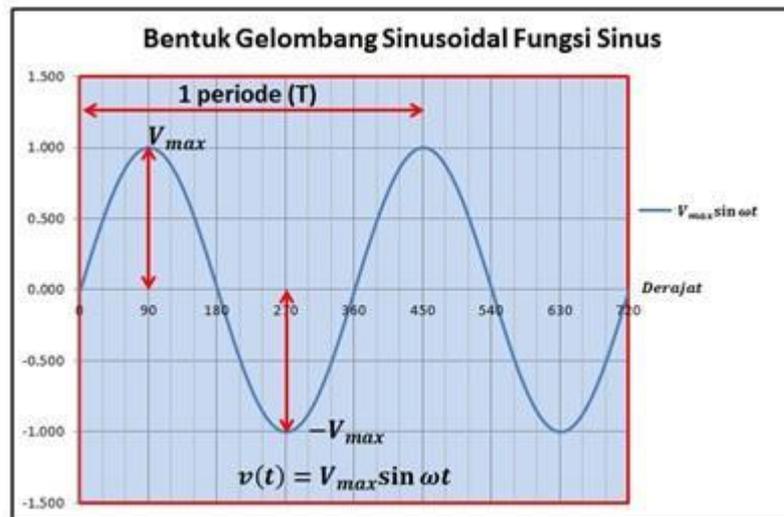
Tegangan yang disalurkan oleh PLN kepada pelanggan pada dasarnya berbentuk gelombang sinusoidal, yang akan berubah pada perioda yang tetap. Gelombang sinusoidal bisa berbentuk gelombang fungsi sinus atau gelombang fungsi kosinus. Kedua gelombang tersebut pada dasarnya identik. Hanya saja memiliki perbedaan sudut sebesar 90° (Darwanto, 2021). Sebuah tegangan sinusoidal berbentuk fungsi sinus memiliki persamaan matematis sebagai berikut :

$$V_{(t)} = V_{max} \sin(\omega t + q) \quad (2.2)$$

Dimana :

V_{max} = Amplitudo maksimum dari tegangan
 ω = Kecepatan sudut dalam radian per detik (rad/s)
 ωt = Argument dari gelombang sinusoida
 q = Sudut fasa

Jika digambarkan dalam bentuk grafik, pada Gambar 2. 1 Merupakan bentuk tegangan sinusoidal fungsi sinus dengan sudut FASA $\phi = 0$.



Gambar 2.1 Gelombang Sinusoidal fungsi sinus

Sumbu X merupakan variable derajat atau waktu, sedangkan sumbu Y mewakili amplitude dari tegangan sinusoidal. Dari grafik tersebut, terdapat beberapa parameter yaitu:

1. Tegangan maksimum (V_{max})

Tegangan maksimum adalah amplitude tertinggi dari suatu gelombang sinusoidal. Dalam satu siklus gelombang terdapat 2 buah tegangan maksimum, yaitu V_{max} dan $-V_{max}$. V_{max} adalah tegangan puncak pada saat gelombang sinusoidal posisi positif. $-V_{max}$ adalah tegangan puncak pada saat gelombang sinusoidal posisi negatif (Bambang 2019).

Tegangan maksimum atau tegangan puncak sangat berpengaruh dalam menentukan besarnya tegangan efektif dari sumber tegangan bolak-balik. Semakin besar amplitude tegangan, maka tegangan efektifnya akan semakin tinggi. Merupakan contoh dari 3 buah gelombang sinusoidal dengan frekuensi dan FASA yang sama, tetapi berbeda amplitue, yaitu 1 volt, 3 volt dan 5 volt ditunjukkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Gelombang Dengan Amplitudo Berbeda Arus Listrik

2.2.2. Tegangan efektif (V_{rms})

Istilah tegangan efektif atau tegangan RMS muncul karena tegangan dan arus rata-rata tidak banyak membantu dalam perhitungan daya dan energi tegangan bolak-balik AC, karena nilai rata-rata fungsi sinusoidal adalah nol. hal ini tentu saja tidak banyak membantu dalam menghitung besarnya daya yang digunakan pada kurun waktu tertentu. Untuk membantu masalah tersebut, maka diperkenalkan istilah tegangan efektif atau tegangan RMS.

Tegangan efektif atau tegangan RMS adalah besarnya tegangan AC bolak-balik yang memiliki dampak yang sama dengan tegangan DC ketika mencatu suatu beban (Bambang 2019). Sebagai contoh, sebuah tegangan baterai 5 volt mencatu

lampu pijar. Untuk bisa menghasilkan daya yang sama tersebut, maka besarnya tegangan AC yang harus disalurkan adalah sebesar 5V rms

2.2.3. Arus Listrik

Listrik ada di alam disebabkan adanya muatan listrik, pergerakan muatan menimbulkan arus listrik, coulomb adalah satuan yang menyatakan muatan, tujuan dari sebuah rangkaian listrik adalah memindahkan muatan sepanjang lintasan yang diinginkan. Definisi arus itu sendiri adalah banyaknya muatan yang mengalir pada sebuah penghantar dalam waktu satu detik (*Coulumb per second*) yang diukur dalam satuan ampere (A) (Evasari 2017). arus listrik dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$I = \frac{dq}{dt} \text{ Ampere} \quad (2.3)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} I &= \text{Arus listrik (Ampere)} \\ Q &= \text{Muatan listrik (Coulumb)} \\ t &= \text{Waktu (detik)} \end{aligned}$$

2.2.4. Daya Listrik dan Energi Listrik

Daya listrik adalah banyaknya energi listrik yang mengalir setiap detik atau joule per second yang diukur dalam satuan watt (w) . daya listrik dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$E = P.t \text{ Joule} \quad (2.4)$$

$$P = \frac{E}{t} \text{ Watt} \quad (2.5)$$

Dimana :

E = Energi dalam satuan joule (J)
 P = Daya dalam satuan Watt (W)
 t = Waktu dalam satuan detik (s)

Energi listrik dapat juga didefinisikan sebagai laju penggunaan daya listrik dikalikan dengan selama waktu tersebut. Satuan SI untuk energi listrik adalah Joule (J). namun dalam kehidupan sehari-hari lebih dikenal dengan *kiloWatt hour (kWh)* (Bambang 2019).

Pada sebuah rangkain listrik, hubungan antara arus dan tegangan dijelaskan dengan hukum ohm dimana arus berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan hambatan. Hambatan yang dimaksud adalah hambatan pada rangkain yang dapat menghalangi aliran arus. Hambatan dinotasikan dengan huruf R dan diukur dalam satuan ohm (Ω)

$$I = \frac{V}{R} \text{ Ampere} \quad (2.6)$$

$$R = \frac{E}{I} \text{ Ohm} \quad (2.7)$$

$$V = I \cdot R \text{ Volt} \quad (2.8)$$

Dimana :

I = Arus listrik dalam satuan ampere (A)

V = Tegangan dalam satuan volt (V)

R = Hambatan (*Resistance*) dalam satuan ohm (Ω)

Selanjutnya hubungan arus, tegangan dan daya dijelaskan dengan persamaan

berikut :

$$P = I \cdot V \text{ Watt} \quad (2.9)$$

$$I = \frac{P}{V} \text{ Ampere} \quad (2.10)$$

$$V = \frac{P}{I} \text{ Volt} \quad (2.11)$$

Dimana :

P = Daya dalam satuan watt (W)

I = Arus listrik dalam satuan ampere (A)
 V = Tegangan dalam satuan volt (V)

Daya listrik dibagi menjadi tiga, yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu. (Studi et al. n.d.)

2.1.3.1. Daya aktif

Daya dengan satuan Joule/detik atau watt disebut sebagai daya aktif. Simbolnya adalah P (artikel-teknologi.com n.d.). daya aktif adalah daya sebenarnya yang dipakai oleh beban. Daya aktif dapat dihitung dengan persamaan berikut : (Indrianto 2020).

$$P = VI \cos \phi \text{ (Watt)} \quad (2.12)$$

Dimana :

P = Daya dalam satuan watt (W)
 V = Tegangan dalam satuan volt (V)
 I = Arus listrik dalam satuan ampere (A)
 $\cos \phi$ = Faktor daya

Untuk system 3 FASA diperoleh rumusan sebagai berikut :

$$P = \sqrt{3} V_{Line} I_{Line} \cos \phi \quad (2.13)$$

Daya pada system 3 FASA memiliki nilai 3 kali daya 1 FASA. (Indrianto 2020)

2.1.3.2. Daya Reaktif

Satuan daya reaktif adalah VAR (Voltamper – reactive). Daya reaktif dengan simbol (Q) ini merupakan jumlah daya yang diperlukan untuk membentuk medan magnet, daya reaktif juga difahami sebagai daya yang tidak yang tidak dihamburkan oleh beban atau dengan kata lain merupakan daya yang disearap namun dikembalikan ke sumbernya.(Indrianto 2020) Daya reaktif dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q = VI \sin \phi \text{ (VAR)} \quad (2.14)$$

Dimana :

Q = Daya dalam satuan (VAR)
 V = Tegangan dalam satuan volt (V)
 I = Arus listrik dalam satuan ampere (A)
 Sin ϕ = Faktor Reaktif

Untuk system 3 FASA diperoleh rumusan sebagai berikut :

$$Q = \sqrt{3} V_{Line} I_{Line} \sin \phi \quad (2.15)$$

Daya pada system 3 FASA memiliki nilai 3 kali daya 1 FASA. (Indrianto 2020)

2.1.3.3. Daya Tampak / Semu

Daya tampak merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif yang disimbolkan dengan S. dengan satuannya adalah VA (Voltampere).(Indrianto 2020) Daya tampak dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$S = V \cdot I \quad (2.16)$$

Dimana :

S = Daya Semu (VA)
 V = Tegangan dalam satuan volt (V)
 I = Arus listrik dalam satuan ampere (A)

Untuk system 3 FASA diperoleh rumusan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} V_{Line} I_{Line} \quad (2.17)$$

Daya pada system 3 FASA memiliki nilai 3 kali daya 1 FASA. (Indrianto 2020)

Sudut fasa ϕ muncul akibat adanya selisih fasa antara fasa tegangan dan fasa arus, jika rangkain bersifat induktif maka fasa arus akan tertinggal dari fasa tegangan, jika rangkain bersifat kapasitif maka fasa arus akan mendahului fasa

tegangan, sedangkan jika rangkain bersifat resistif maka arus akan sefasa dengan tegangan sehingga sudut fasa $\varphi = 0$ (Indrianto 2020). Kemudian setelah nilai tegangan, arus dan daya diketahui maka faktor daya/*power factor* ($\cos \varphi$) dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\begin{aligned} Pf &= \cos \varphi \\ \cos \varphi &= \frac{P}{S} \\ P &= VI = S \cos \varphi \\ Pf &= \cos \varphi = \frac{P}{S} = 1 \end{aligned} \quad (2.18)$$

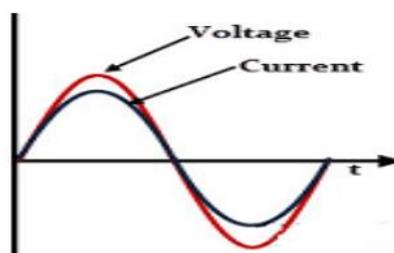
2.2.5. Sifat faktor daya

Dalam sistem tenaga listrik memiliki 3 jenis faktor daya yaitu faktor daya satu (unity), faktor daya mendahului (leading) dan faktor daya terbelakang (lagging) yang ditentukan oleh jenis beban pada sistem tenaga listrik (Yendi Esye, 2021).

2.1.4.1 Faktor daya unity

Faktor daya unity merupakan keadaan ketika nilai $\cos \varphi$ adalah satu dan tegangan sefasa dengan arus. Faktor daya unity akan terjadi bila jenis beban adalah resistif

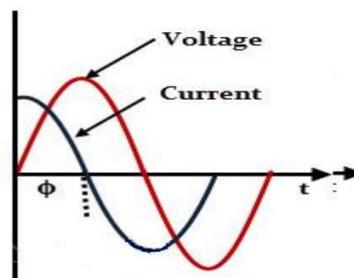
Dilihat pada Gambar 2.3 merupakan gelombang faktor daya unity



Gambar 2.3 Gelombang Faktor daya unity

2.1.4.2 Faktor daya Leading

Faktor daya mendahului (leading) merupakan keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi beban atau peralatan listrik memberikan daya reaktif dari beban bersifat kapasitif dan keadaan kondisi FASA arus mendahului FASA tegangan sebesar sudut ϕ . Apabila arus mendahului tegangan maka faktor daya ini dikatakan “leading”



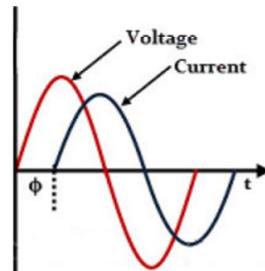
Gambar 2.4 Gelombang Faktor daya leading

Gambar 2.4 merupakan gelombang arus mendahului tegangan, dimana kondisi beban memberikan daya reaktif pada sistem atau beban bersifat kapasitif

2.1.4.3 Faktor daya Lagging

Faktor daya tertinggal (lagging) merupakan keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi beban atau peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif dan keadaan dimana FASA tegangan mendahului arus sebesar sudut ϕ maka faktor daya ini dikatakan “lagging”. Dapat dilihat pada gambar merupakan gambar vektor arus tertinggal dari tegangan dan pada Gambar Gelombang faktor daya lagging.

Gambar 2.5 merupakan gelombang tegangan mendahului arus, dimana kondisi beban memerlukan daya reaktif pada sistem atau beban bersifat induktif



Gambar 2.5 Gelombang Faktor Daya Lagging

2.2.6. Frekuensi

Gelombang tegangan dan arus dinyatakan sebagai nilai puncak dan t sebagai fungsi waktu. Perubahan yang dialami arus dan tegangan secara sinusoida dapat digunakan dengan menggunakan sebuah diagram vektor yang berotasi dapat disebut sebagai diagram fasor (Arifani & Winarno, 2015).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.19)$$

Dimana: f = frekuensi, dalam siklus per detik (Hz). T = periode waktu (detik). Bila dinyatakan dalam frekuensi sudut (angular) ω , maka frekuensi harus dibagi dengan besaran putaran 2π , yakni:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \text{ atau } \omega = 2\pi f \quad (2.20)$$

Pada operasi sistem tenaga listrik, nilai frekuensi dihasilkan oleh generator besarnya:

$$f = \frac{p n}{120} \quad (2.21)$$

Gelombang tegangan dan arus dinyatakan sebagai nilai puncak dan t sebagai fungsi waktu. Perubahan yang dialami arus dan tegangan secara sinusoidal dapat digunakan dengan menggunakan sebuah diagram vektor yang berotasi dapat disebut sebagai diagram fasor persamaan tegangan dan arus seperti di bawah ini :

$$V = V_m \sin \omega t \quad (2.22)$$

$$I = I_m \sin \omega t \quad (2.23)$$

Gelombang tegangan dan arus dinyatakan sebagai nilai puncak dan t sebagai fungsi waktu. Perubahan yang dialami arus dan tegangan secara sinusoidal dapat digunakan dengan menggunakan sebuah diagram vektor yang berotasi dapat disebut sebagai diagram fasor

2.2. Beban Listrik

Beban listrik adalah suatu perangkat alat yang dapat berfungsi jika dialiri listrik. Perangkat tersebut digunakan untuk merubah energi listrik menjadi energi lain misalnya gerak, panas, cahaya dan lain sebagainya (Teknik and Ft 2019). Sistem listrik arus bolak-balik (AC) berdasarkan karakteristik beban dapat *diklasifikasikan* menjadi tiga macam, yaitu :

2.2.1. Beban Resistif

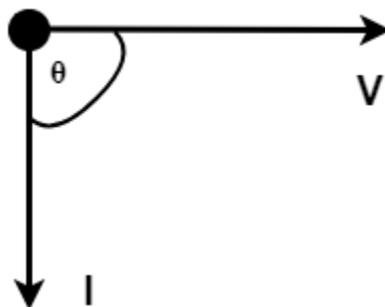
Beban resistif adalah beban yang terdapat komponen tahanan ohm saja (*resistance*), seperti elemen pemanas, dan lampu pijar. Beban jenis resistif hanya mengkonsumsi daya aktif saja dan mempunyai faktor daya sama dengan satu, dan untuk tegangan dengan arus berada dalam satu FASA (Tambunan, Harmonik, and Daya 2018). Perhitungan daya pada beban resistif dengan persamaan (2.9).



Gambar 2.6 Fasor Beban Resistif Arus dan Tegangan pada Beban Resisitif

2.2.2. Beban Induktif

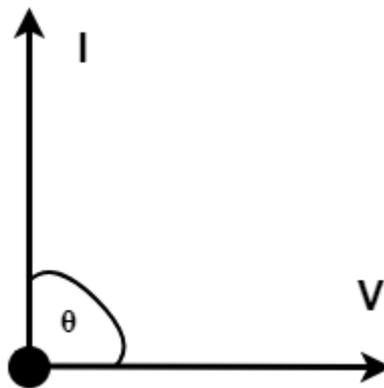
Beban Induktif, yaitu beban berupa lilitan kawat pada kumparan seperti transformator, dan selonoida. Beban ini dapat mengakibatkan pergeseran FASA pada arus sehingga bersifat tertinggal sebesar 90° terhadap tegangan fenomena ini dinamakan *lagging*, hal ini disebabkan oleh energi yang tersimpan berupa medan magnetis yang akan mengakibatkan FASA arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Perhitungan daya beban Induktif dengan persamaan (2.12).



Gambar 2.7 Arus dan Tegangan pada beban Induktif (Bagas wara 2021)

2.2.3. Beban Kapasitif

Beban kapasitif, yaitu beban yang memiliki kemampuan untuk menyerap energi dalam waktu sesaat yang berasal dari pengisian elektrik pada suatu sirkuit, komponen ini dapat menyebabkan FASA arus mendahului terhadap FASA



Gambar 2.8 Arus dan Tegangan pada beban Kafasitif (Bagas wara 2021)

tegangan, fenomena ini dinamakan leading. beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. Perhitungan daya beban Induktif dengan persamaan

Dari ketiga karakteristik jenis beban dibagi menjadi dua yaitu :

1. Beban Linear

Beban linear adalah beban yang nilai impedansinya selalu konstan sehingga arus selalu berbanding lurus dengan tegangan setiap waktu. Beban linear ini mematuhi Hukum Ohm yang menyatakan bahwa arus berbanding lurus dengan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linear akan sama dengan bentuk gelombang tegangan. Apabila diberi tegangan sinusoidal, maka arus yang mengalir ke beban linear juga merupakan sinusoidal sehingga tidak terjadi distorsi dan tidak menimbulkan harmonisa. Beban ini berupa elemen pasif seperti resistor, komputer dan kapasitor (Ardiansyah 2020).

2. Beban Non Linear

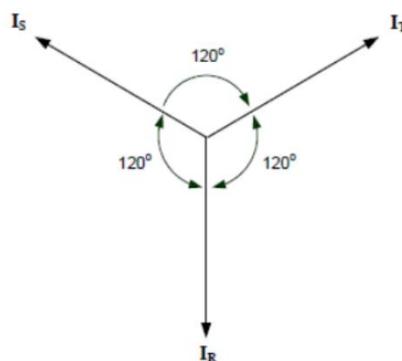
Beban non linear adalah beban yang impedansinya tidak konstan dalam setiap periode tegangan masukan. Dengan impedansinya yang tidak konstan, maka

arus yang dihasilkan tidaklah berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan, sehingga beban non linear tidaklah mematuhi Hukum Ohm yang menyatakan arus berbanding lurus dengan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban nonlinear tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan sehingga terjadi cacat (distorsi). contoh beban non linear salah satunya inverter, motor induksi, televisi dengan monitor LED, komputer/laptop, kipas angin, air conditioner (AC), printer, lampu hemat energi, frequency converter dll.(Sudibya & Irawaty, 2018).

2.3. Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban sistem tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada beban-beban satu fasa. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncul arus di netral. Arus yang mengalir di netral ini menyebabkan terjadinya losses (rugi-rugi), yaitu losses akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Menurut (Ginting, 2022) Beban dinyatakan seimbang apabila :

- Ketiga vektor arus/tegangan adalah sama besar
- Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain,



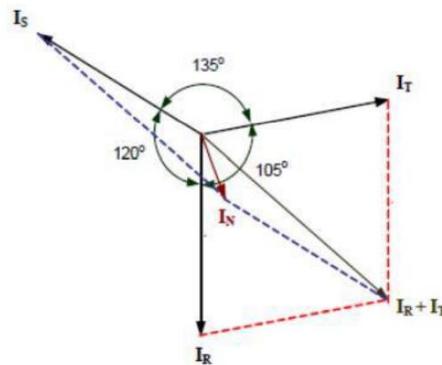
Gambar 2.9 Vektor Beban Seimbang

Pada Gambar 2.9 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (Anwar, 2021). Dalam keadaan ideal, transformator 3 fasa akan mempunyai nilai yang sama pada tiap fasanya, yang berbeda hanyalah sudut fasanya yaitu harus 120° . Namun pada penerapannya, keadaan ideal tersebut sangat sulit terjadi dikarenakan tiap fasa pada sisi sekunder akan menyalurkan daya tiap fasa dengan beban yang berbeda tiap fasanya. Hal ini akan menyebabkan beban tidak seimbang pada masing - masing fasanya. efek dari ketidakseimbangan fasa tersebut adalah akan timbul arus netral (Pramon, 2021).

Menurut (Hidayat et al., 2018) yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang yaitu keadaan dimana salah satu atau keadaan satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang yaitu :

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain

- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.10 Vektor Beban Tidak Seimbang

Pada Gambar 2.10 menunjukkan arus yang tidak seimbang. terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya tergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangan. Persamaan untuk menghitung nilai rata rata pada suatu beban.

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.24)$$

Keterangan

$I_{rata-rata}$ = Arus rata rata

I_R = Arus phase R I

I_S = Arus phase S

I_T = Arus phase T

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

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

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

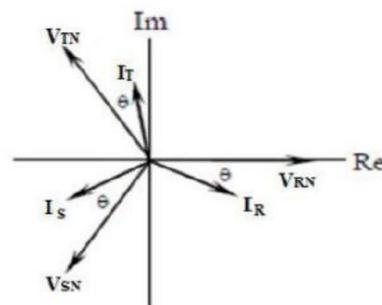
Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b, dan c adalah 1. Sehingga di dapat persamaan untuk ketidakseimbangan beban (dalam %) :

$$U - L = \frac{\{|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|\}}{3} \times 100 \% \quad (2.25)$$

Berdasarkan standar (IEEE Std 446-1987) tentang batasan ketidakseimbangan beban yaitu 5% sampai dengan 20% .

2.4. Arus Netral

Arus netral dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah 3 FASA 4 kawat. Arus netral ini akan muncul jika kondisi beban tidak seimbang atau karena adanya arus harmonisa akibat dari beban non linear yang semakin berkembang digunakan saat ini. Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus balik untuk sistem distribusi 3 FASA 4 kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus FASA dalam komponen simetris (Dwipayana et al., 2017).



Gambar 2.11 Fasor Tegangan dan Arus Terhubung Bintang

Pada Gambar 2.11 menunjukkan diagram fasor tegangan dan arus dengan sudut θ , jika diagram fasor tersebut dikatakan seimbang dalam arti $\theta = 120^\circ$ maka:

$$I_R + I_S + I_T = 0 \quad (2.26)$$

Arus netral yang ideal bernilai 0 karena arus netral diperoleh dari penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa. Maka rumus arus netral adalah:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (2.27)$$

Arus netral yang tinggi dapat mempengaruhi sistem, berikut ini merupakan pengaruh yang dapat disebabkan oleh arus netral yaitu timbulnya panas berlebih pada transformator, menurunnya kualitas daya (Dwipayana et al., 2017). Arus beban tiga fasa dari suatu sistem tidak seimbang dapat diselesaikan menggunakan metode komponen simetris. Tiga fasor tak seimbang dari dapat diuraikan menjadi tiga fasor seimbang. Persamaan untuk menghitung arus perFASAnyanya :

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 \quad (2.28)$$

$$I_S = a^1 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (2.29)$$

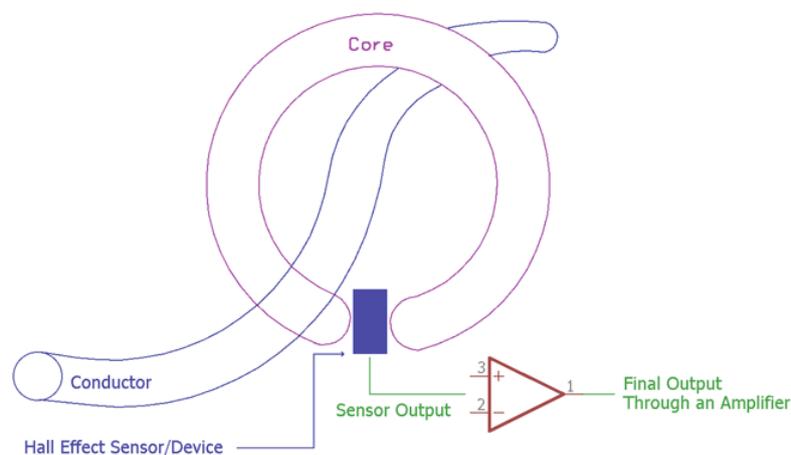
$$I_T = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad (2.30)$$

2.5. Metode Mengukur Arus

Arus merupakan faktor yang sangat kritis dalam Elektronika atau Teknik Elektro. Dalam elektronik, arus dapat memiliki bandwidth dari beberapa nano-ampere hingga ratusan ampere. Rentang ini bisa jauh lebih luas dalam domain Listrik biasanya hingga beberapa ribu ampere, terutama di Jaringan Listrik. Ada berbagai metode untuk mengukur arus di dalam rangkaian atau konduktor .

1. Metode *Hall effect*

Sensor Hall Effect menghasilkan tegangan keluaran tergantung pada medan magnet. Rasio tegangan output sebanding dengan medan magnet. Selama proses pensensoran arus, arus diukur dengan mengukur medan magnet. Tegangan keluaran sangat rendah dan perlu diperkuat ke nilai yang berguna dengan menggunakan penguat gain tinggi dengan noise sangat rendah. Terlepas dari rangkaian amplifier, sensor Hall Effect memerlukan sirkuit tambahan karena merupakan transduser linier.



Gambar 2.12 Metode Hall effect (Sourav Gupta 2019)

Kelebihan:

1. Dapat digunakan dalam frekuensi yang lebih tinggi.
2. Dapat digunakan di AC dan DC secara akurat.
3. Metode berbasis nonkontak.
4. Dapat digunakan di lingkungan yang kasar.

Kekurangan

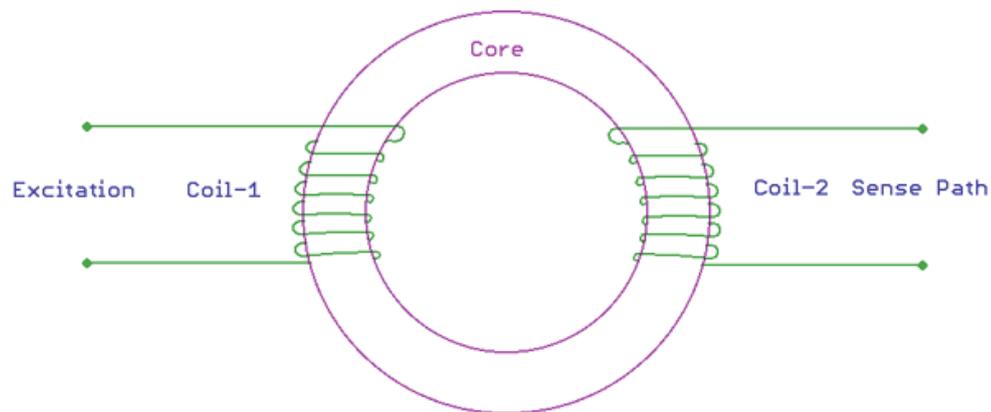
1. Sensor membutuhkan kompensasi.
2. Sirkuit tambahan membutuhkan output yang berguna.
3. Mahal daripada teknik berbasis shunt.

Sensor Hall Effect digunakan dalam meter penjepit serta di banyak aplikasi pensensoran arus Industri dan Otomotif. Banyak jenis sensor hall effect linier dapat mengukur arus dari beberapa mili-amp hingga ribuan ampere. Oleh karena itu, Aplikasi Smart Grid Monitoring juga menggunakan jenis sensor hall effect yang berbeda untuk memantau arus konduktor.

2. Metode *Flux Gate*

Induktor saturable adalah komponen utama untuk teknik pensensoran Fluxgate. Oleh karena itu, sensor Fluxgate disebut sebagai Sensor Arus Induktor Jenuh. Inti induktor yang digunakan untuk sensor fluxgate bekerja pada daerah saturasi. Tingkat kejenuhan induktor ini sangat sensitif dan setiap kerapatan fluks internal atau eksternal mengubah tingkat kejenuhan induktor. Permeabilitas inti berbanding lurus dengan tingkat kejenuhan, maka induktansi juga berubah. Perubahan nilai induktor ini dianalisis oleh sensor gerbang fluks untuk menghasilkan arus. Jika arus tinggi, induktansi menjadi lebih rendah, jika arus rendah, induktansi menjadi tinggi. Sensor Hall Effect bekerja mirip dengan sensor fluxgate, tetapi ada satu perbedaan di antara keduanya. Perbedaannya terletak pada

bahan inti. Sensor Flux Gate menggunakan induktor saturable sedangkan sensor Hall Effect menggunakan inti udara.



Gambar 2.13 Metode Pengukuran Arus Flux Gate (Sourav Gupta 2019)

Pada Gambar 2.13 di atas, konstruksi dasar sensor gerbang fluks ditunjukkan. Ada dua kumparan primer dan sekunder melilit inti induktor jenuh. Perubahan aliran arus dapat mengubah permeabilitas inti yang mengakibatkan perubahan induktansi di kumparan lainnya.

Kelebihan:

1. Dapat mengukur dalam rentang frekuensi yang luas.
2. Memiliki akurasi yang besar.
3. Offset dan drift rendah.

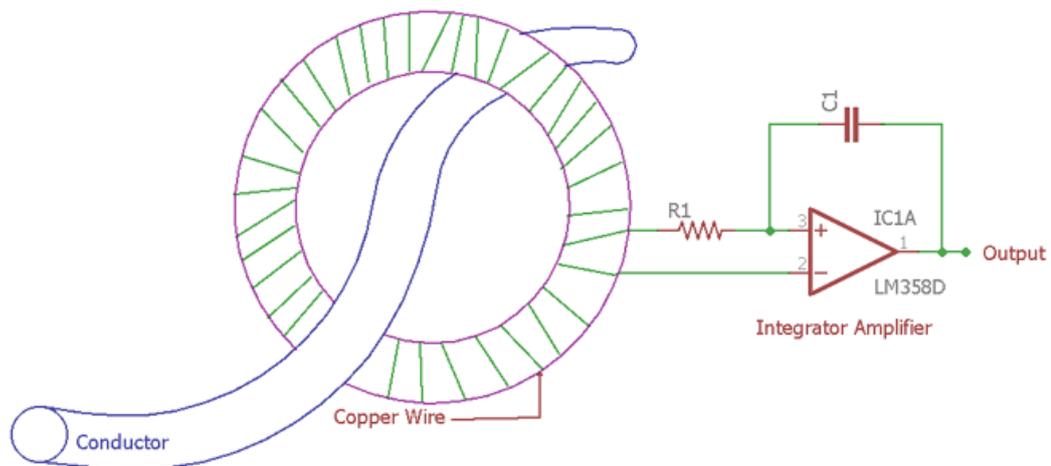
Kekurangan:

1. Konsumsi daya sekunder yang tinggi
2. Faktor risiko meningkat untuk tegangan atau kebisingan arus di konduktor utama.
3. Hanya cocok untuk DC atau AC frekuensi rendah.

Sensor Fluxgate digunakan dalam Solar Inverter untuk menghasilkan arus. Selain itu, pengukuran arus AC dan DC loop tertutup dapat dengan mudah dilakukan dengan menggunakan sensor Gerbang Fluks. Metode pengukuran arus Gerbang Fluks juga dapat digunakan dalam pengukuran arus Kebocoran , deteksi arus berlebih, dll.

3. Metode Arus Rogowski Coil

Rogowski coil ditemukan oleh fisikawan Jerman Walter Rogowski. Kumparan Rogowski dibuat menggunakan kumparan inti udara berbentuk heliks dan melilit konduktor yang ditargetkan untuk pengukuran arus.



Gambar 2.14 Metode Rogowski Coil (Sourav Gupta 2019)

Pada Gambar 2.14 di atas, kumparan Rogowski ditunjukkan dengan sirkuit tambahan. Sirkuit tambahan adalah sirkuit integrator. Kumparan Rogowski memberikan tegangan keluaran tergantung pada laju perubahan arus pada konduktor. Diperlukan rangkaian integrator tambahan untuk membuat tegangan keluaran yang sebanding dengan arus.

Kelebihan:

1. Ini adalah metode yang baik untuk mendeteksi perubahan arus frekuensi tinggi yang cepat.
2. Pengoperasian yang aman dalam hal penanganan belitan sekunder.
3. Solusi berbiaya rendah.
4. Fleksibilitas dalam penanganan karena konstruksi loop terbuka.
5. Kompensasi suhu tidak rumit.

Kekurangan:

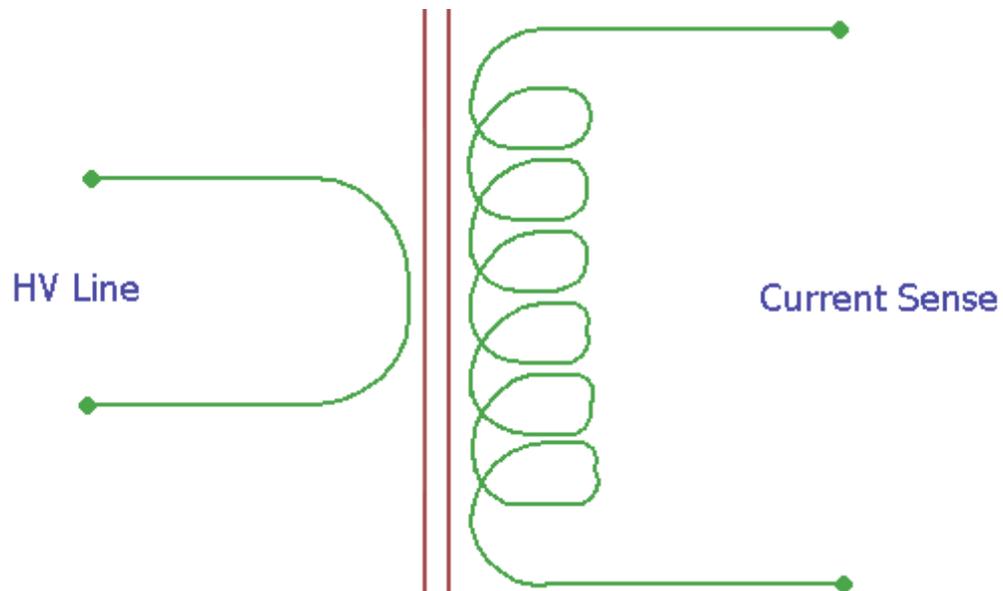
1. Hanya cocok untuk AC
2. Memiliki sensitivitas yang rendah dibandingkan trafo arus.

Rogowski coil memiliki berbagai aplikasi. contoh pengukuran arus dalam modul daya besar, terutama di seluruh MOSFET atau transistor daya tinggi atau di seluruh IGBT . Kumparan Rogowski menyediakan opsi pengukuran yang fleksibel. Karena respons kumparan Rogowski sangat cepat pada transien atau gelombang sinusoidal frekuensi tinggi, ini adalah pilihan yang baik untuk mengukur transien arus frekuensi tinggi di saluran listrik. Dalam distribusi daya atau di jaringan pintar, kumparan Rogowski memberikan fleksibilitas yang sangat baik untuk pengukuran arus.

4. Metode Trafo Arus

Trafo arus atau CT digunakan untuk mendeteksi arus dengan tegangan sekunder yang sebanding dengan arus pada kumparan sekunder. Transformator Ini adalah transformator Industri yang mengubah nilai tegangan atau arus yang besar

menjadi nilai yang jauh lebih kecil pada kumparan sekundernya. Pengukuran dilakukan di seluruh output sekunder.



Gambar 2.15 Metode Trafo Arus (Sourav Gupta 2019)

Gambar 2.15 merupakan konstruksi ditampilkan. Ini adalah transformator CT yang ideal dengan rasio primer dan sekunder sebagai 1:N. N tergantung pada spesifikasi transformator. Pelajari lebih lanjut tentang transformer di sini.

Kelebihan :

1. Kapasitas penanganan arus besar, lebih dari metode lain yang ditampilkan dalam artikel ini.
2. Tidak memerlukan sirkuit tambahan.

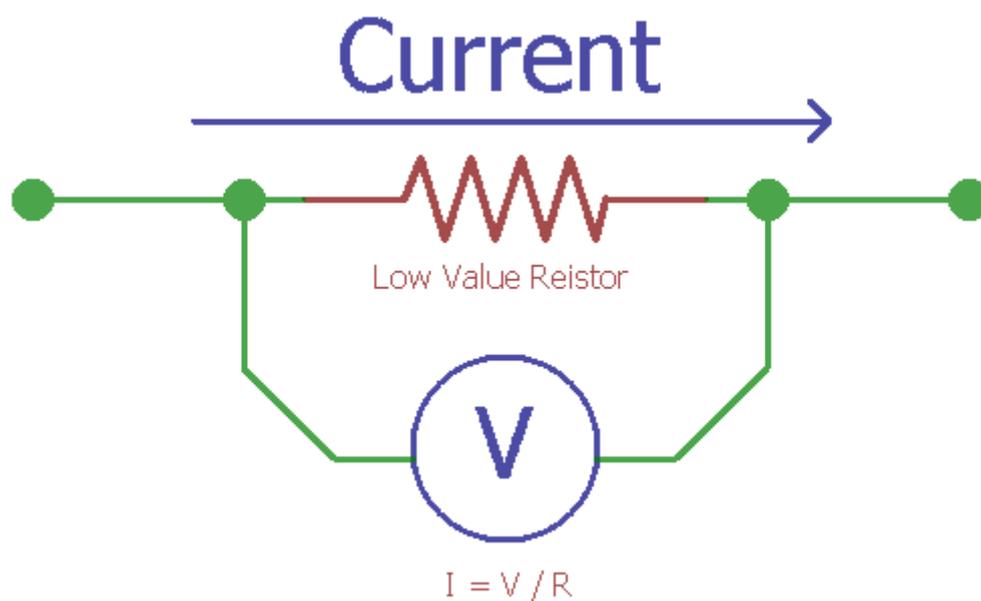
Kekurangan :

1. Membutuhkan pemeliharaan.
2. Histeresis terjadi karena magnetisasi.
3. Arus primer yang tinggi memenuhi bahan inti ferit.

Penggunaan utama dari teknik penginderaan arus berbasis trafo CT adalah di jaringan listrik karena kapasitas pengukuran arus yang sangat tinggi. Beberapa clamp meter juga menggunakan trafo arus untuk pengukuran arus bolak-balik.

5. Metode *Shunt Resistor*

Metode shunt resistor didasarkan pada hukum Ohm. Resistor shunt adalah perangkat atau komponen elektronika yang berfungsi untuk membuat jalur hambatan yang lebih kecil pada suatu aliran arus yang besar di dalam sirkuit elektronika. Komponen ini dibuat dari bahan yang memiliki nilai koefisien resistensi suhu rendah. Jenis resistor ini biasanya digunakan pada sirkuit amperemeter atau perangkat pengukur arus listrik. Konfigurasi hubungan antara komponen ini dengan amperemeter dapat dilakukan dengan cara paralel atau seri.



Gambar 2. 16 Metode Shunt Resistor (Sourav Gupta 2019)

Kelebihan:

1. Solusi yang sangat hemat biaya

2. Dapat bekerja di AC dan DC.
3. Peralatan tambahan tidak diperlukan.

Kekurangan :

1. Tidak cocok untuk operasi arus yang lebih tinggi karena pembuangan panas.
2. Pengukuran shunt memberikan penurunan efisiensi sistem yang tidak perlu karena pemborosan energi melintasi resistor.
3. Penyimpangan termal memberikan hasil kesalahan dalam aplikasi suhu tinggi.

Penerapan resistor Shunt termasuk amp meter digital. Ini adalah metode yang akurat dan lebih murah selain sensor Hall Effect. Resistor shunt juga dapat memberikan jalur resistansi rendah dan memungkinkan arus listrik melewati satu titik ke titik lain dalam suatu rangkaian.

2.6. Mikrokontroler

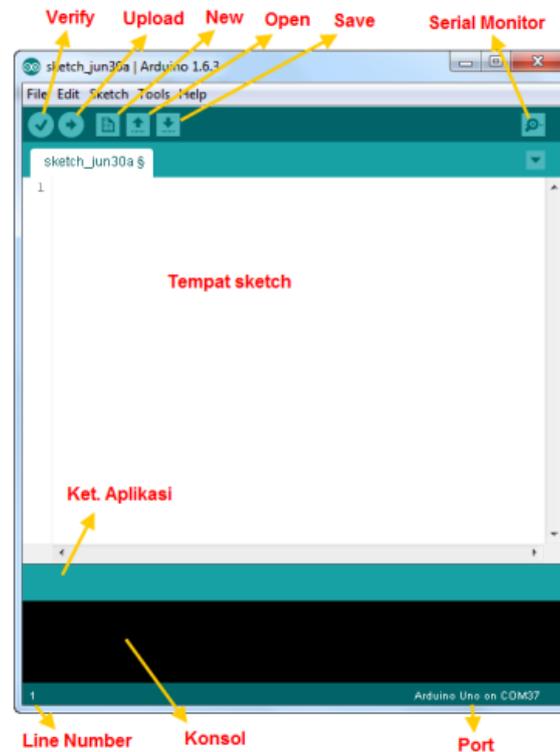
Mikrokontroler adalah sebuah chip berupa IC (*Integrated Circuit*) yang berfungsi sebagai pengontrol rangkain elektronik dan dapat menerima sinyal input, mengolahnya dan memberikan sinyal output sesuai dengan program yang diisikan kedalamnya. Pada umumnya terdiri dari CPU (Central Processing Unit), Memori, I/O tertentu dan unit pendukung seperti Analog to Digital Converter (ADC) yang sudah terintegrasi di dalamnya. Mikrokontroler memiliki kemampuan untuk mengolah data serta memproses data sekaligus juga dapat digunakan sebagai unit kendali untuk mengendalikan suatu alat. (Ahmed Abed and Yasir Naser 2020)

2.6.1. Arduino IDE

Arduino adalah platform pembuatan prototipe elektronik yang bersifat open-source hardware yang berdasarkan pada perangkat keras dan perangkat lunak yang fleksibel dan mudah digunakan. Arduino ditujukan bagi para seniman, desainer, dan siapapun yang tertarik dalam menciptakan objek atau lingkungan yang interaktif. Menurut Sulaiman (2012:1), Arduino merupakan platform yang terdiri dari software dan hardware. Hardware Arduino sama dengan mikrocontroller pada umumnya hanya pada arduino ditambahkan penamaan pin agar mudah diingat. Software Arduino merupakan software open source sehingga dapat di download secara gratis. Software ini digunakan untuk membuat dan memasukkan program ke dalam Arduino. Pemrograman Arduino tidak sebanyak tahapan mikrocontroller konvensional karena Arduino sudah didesain mudah untuk dipelajari, sehingga para pemula dapat mulai belajar mikrocontroller dengan Arduino. Berdasarkan uraian diatas, dapat disimpulkan bahwa arduino merupakan platform pembuatan prototipe elektronik yang terdiri dari hardware dan software.

Arduino diciptakan untuk para pemula bahkan yang tidak memiliki basic bahasa pemrograman sama sekali karena menggunakan bahasa C++ yang telah dipermudah melalui library. Arduino menggunakan Software Processing yang digunakan untuk menulis program kedalam Arduino. Processing sendiri merupakan penggabungan antara bahasa C++ dan Java. Software Arduino ini dapat di-install di berbagai operating system (OS) seperti: LINUX, Mac OS, Windows. Arduino tidak hanya sekedar sebuah alat pengembangan, tetapi kombinasi dari hardware, bahasa pemrograman dan Integrated Development Environment (IDE) yang canggih. IDE adalah sebuah software yang sangat berperan untuk menulis program,

meng-compile menjadi kode biner dan meng-upload ke dalam memory microcontroller. Software IDE Arduino terdiri dari 3 (tiga) bagian:



Gambar 2.17 Software Arduino IDE

- i. Editor program, untuk menulis dan mengedit program dalam bahasa processing. Listing program pada Arduino disebut sketch.
- ii. Compiler, modul yang berfungsi mengubah bahasa processing (kode program) kedalam kode biner karena kode biner adalah satu±satunya bahasa program yang dipahami oleh mikrocontroller.
- iii. Uploader, modul yang berfungsi memasukkan kode biner kedalam memori mikrokontroller.

2.6.2. Node MCU ESP 32

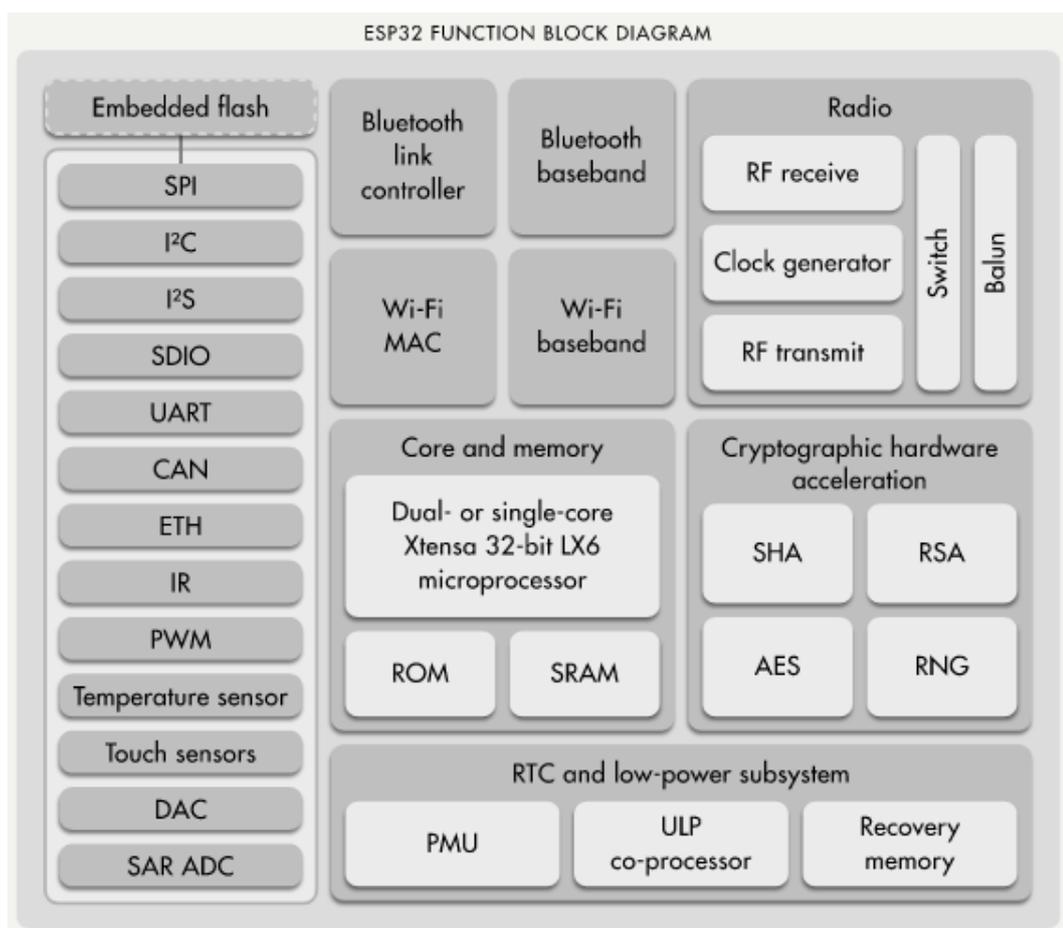
ESP32 dibuat oleh Espressif Systems, ESP32 adalah sistem dengan biaya yang rendah, berdaya rendah pada seri chip (SoC) dengan Wi-Fi & kemampuan Bluetooth dua mode! Keluarga ESP32 termasuk chip ESP32-D0WDQ6 (dan ESP32-D0WD), ESP32-D2WD, ESP32-S0WD, dan sistem dalam paket (SiP) ESP32-PICO-D4. Pada intinya, ada mikroprosesor Tensilica Xtensa LX6 dual-core atau single-core dengan clock rate hingga 240 MHz. ESP32 sudah terintegrasi dengan built-in antenna switches, RF balun, power amplifier, low-noise receive amplifier, filters, and power management modules. Didesain untuk perangkat seluler, perangkat elektronik yang dapat dipakai, dan aplikasi IoT, ESP32 juga bekerja dengan konsumsi daya sangat rendah melalui fitur hemat daya termasuk fine resolution clock gating, multiple power modes, and dynamic power scaling.

Module ESP32 merupakan penerus dari module ESP8266 yang cukup populer untuk Aplikasi IoT. Pada ESP32 terdapat inti CPU serta Wi-Fi yang lebih cepat, GPIO yang lebih, dan mendukung Bluetooth Low Energy.

Adapaun karakteristik dari NodeMCU ESP 32 yaitu :

- a. Single or Dual-Core 32-bit LX6 Microprocessor with clock frequency up to 240 MHz.
- b. 520 KB of SRAM, 448 KB of ROM and 16 KB of RTC SRAM.
- c. Supports 802.11 b/g/n Wi-Fi connectivity with speeds up to 150 Mbps.
- d. Support for both Classic Bluetooth v4.2 and BLE specifications.
- e. 34 Programmable GPIOs.
- f. Up to 18 channels of 12-bit SAR ADC and 2 channels of 8-bit DAC

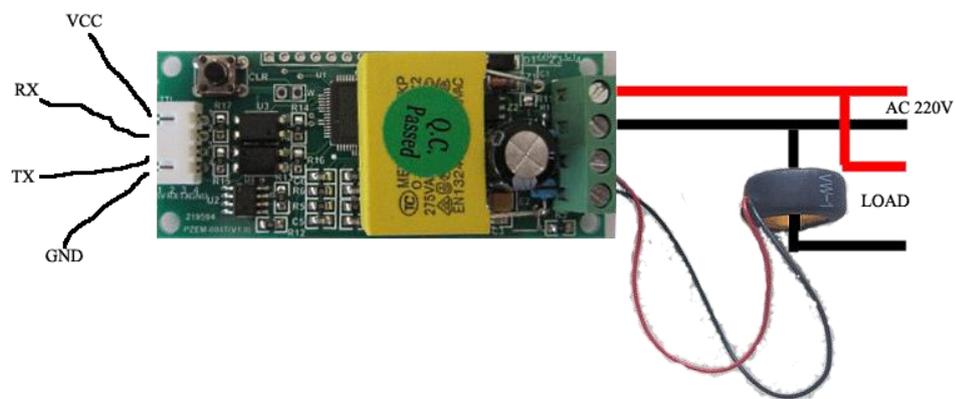
- g. Serial Connectivity include 4 x SPI, 2 x I²C, 2 x I²S, 3 x UART.
- h. Ethernet MAC for physical LAN Communication (requires external PHY).
- i. 1 Host controller for SD/SDIO/MMC and 1 Slave controller for SDIO/SPI.
- j. Motor PWM and up to 16-channels of LED PWM.
- k. Secure Boot and Flash Encryption.
- l. Cryptographic Hardware Acceleration for AES, Hash (SHA-2), RSA, ECC and RNG.



Gambar 2.18 Arsitektur ESP 32 (Prastyo 2019)

2.6.3. Modul PZEM-004T

Modul pzem-004T merupakan suatu modul sensor multifungsi yang berfungsi untuk mengukur tegangan, arus, daya dan energi yang terdapat pada sebuah aliran listrik. Modul ini dilengkapi dengan sensor tegangan dan sensor arus (CT) yang sudah terintegrasi didalamnya. beban yang terpasang tidak boleh melebihi beban yang ditetapkan. Pzem-004T merupakan modul yang menggunakan teknologi *hall effect*. (Habibi, Nur, Setiawidayat, and Mukhsim 2017).



Gambar 2. 19 Modul Pzem-004T

Pada Gambar 2. 19 terdapat dua bagian yaitu bagian sensor untuk dihubungkan kesaluran listrik masing-masing FASA dan bagian komunikasi serial dihubungkan dengan Mikrokontroler. Data yang dapat diukur oleh Modul PZEM-004T yaitu tegangan (volt), Arus(Ampere), Daya (watt) dan Energi (Watt Hour). Spesifikasi modul PZEM-004T ditunjukkan pada tabel Tabel 2.2

Tabel 2.2 Spesifikasi Modul PZEM-004T

No	Besaran Listrik	Satuan
	Tegangan Operasi	5 Volt
	Komunikasi	UART bus Interface TX, RX

	Sensor	CT Sensor
--	--------	-----------

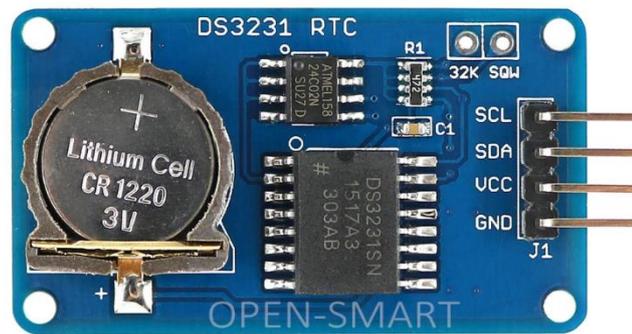
pada modul PZEM-004T terdapat pin untuk dihubungkan dengan sensor maupun pin data untuk dihubungkan dengan mikrokontroler. Pin modul PZEM-004T ditunjukkan pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Pin Modul Pzem-004T

Sensor		Data	
Pin No	Keterangan	Pin No	Keterangan
1	CT Sensor	1	VCC
2	CT Sensor	2	Rx
3	Voltage Sensor	3	Tx
4	Voltage Sensor	4	GND

2.6.4. RTC DS3231 (*Real Time Clock*)

RTC (Real Time Clock) merupakan chip jam elektronik yang dapat menunjukkan waktu dengan akurat dan dapat menyimpan serta update data waktu secara realtime. Untuk menjaga atau menyimpan data waktu yang telah dihidupkan pada modul terdapat baterai jam kecil sebagai backup untuk menghidupkan RTC tersebut, serta keakuratan data waktu yang ditamoilkan digunakan osilator kristal eksternal selain itu dapat melakukan pengukuran suhu melalui internal chip DS3231 dengan fungsi RTC Temperature.



Gambar 2.20 Module Real Time Clock

2.6.5. LCD Nextion HMI

Human Machine Interface adalah suatu sistem yang menghubungkan antara manusia dan teknologi mesin. Sistem HMI sebenarnya sudah cukup populer di kalangan industri. Pada umumnya HMI berupa komputer dengan *display* di *Monitor* CRT/LCD dimana kita bisa melihat keseluruhan sistem dari layar tersebut (Eka Samsul, 2017).

Layaknya sebuah komputer, HMI biasanya dilengkapi dengan *keyboard* dan *mouse* dan juga bisa berupa *touch screen*. Tujuan dari HMI adalah untuk meningkatkan interaksi antara mesin dan operator melalui tampilan layar komputer serta memenuhi kebutuhan pengguna terhadap informasi sistem yang sedang berlangsung (Eka Samsul, 2017).

Terdapat banyak cara untuk membuat sebuah tampilan HMI seperti dengan aplikasi Visual Studio hingga dengan Hardware Touch Screen Panel. HMI akan memberikan suatu gambaran kondisi mesin yang berupa video, grafik, lampu dan lain-lain. Dimana pada tampilan tersebut operator dapat melihat parameter suatu system yang sedang beroperasi (Eka Samsul, 2017).



Gambar 2.21 LCD Nextion HMI

adalah sebuah monitor yang menyediakan antarmuka kontrol dan visualisasi antara manusia dan proses, mesin, aplikasi, atau peralatan. LCD Nextion HMI ini dapat menjadi alternatif baru untuk mengganti LCD tradisional dan tabung LED. LCD Nextion HMI ini juga dapat membuat *User Interface* sendiri dengan aplikasi editor bawaannya yang memungkinkan penampilan monitoring lebih baik dan efektif (Anonim, 2022).

2.7. Internet of Things (IOT)

IoT merupakan suatu konsep yang mempunyai kemampuan untuk mentransfer data dan memperluas manfaat dari konektivitas internet yang tersambung secara terus-menerus tanpa memerlukan interaksi manusia ke komputer. Metode yang digunakan dalam IoT adalah nirakbel atau pengendalian secara otomatis tanpa mengenal jarak. Cara kerja dari IoT yaitu memanfaatkan sebuah pemrograman yang setiap perintah dari suatu argument menghasilkan sebuah interaksi dan komunikasi antara sesama mesin yang terhubung secara otomatis, adapun yang menjadi media penghubung antara perangkat tersebut adalah internet.

Terdapat tiga elemen yang dapat mendorong perkembangan teknologi IoT, elemen-elemen tersebut diantaranya adalah :

1. Sensor dan peralatan mekanis untuk menggerakkan atau mengontrol sebuah mekanisme biasa disebut sistem (*actuator*). Dua alat ini berfungsi sebagai penyedia informasi digital.
2. Konektivitas, yaitu jaringan nirkabel yang bertanggung jawab untuk menghubungkan peralatan satu dengan peralatan yang lainnya.
3. *People* dan *proses*, menjadi pengguna akhir yang bertujuan untuk memproses dan menghubungkan elemen satu dan elemen kedua.